

公里网格的强震动时程快速产出与共享 ——以2025年1月7日西藏定日 $M_s6.8$ 地震为例

任叶飞^{1,2},王宏伟^{1,2},刁红旗^{1,2},刘也^{1,2},强生银^{1,2},周宝峰^{1,2},温瑞智^{1,2}

(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)

摘要:针对当前强震动观测网络尚不能给出覆盖震中近场所有区域的地震动输入记录,建立了公里网格的强震动时程快速产出工作的技术框架。以2025年1月7日西藏定日 $M_s6.8$ 地震为例,阐述了各技术环节的详细过程,开展了震源破裂过程反演、区域宏观场地条件估计和强震动时程模拟等工作。结果表明:①此次地震释放地震矩达 $4.7\times10^{19}\text{ N}\cdot\text{m}$,对应矩震级为7.05;断层滑动以正断层为主并带有少量的左旋走滑分量,最大滑动位移超过了3 m;破裂持续了20多秒,以向北方向破裂传播为主,可能会引起潜在的破裂方向性效应;②给出了30弧秒分辨率的 V_{s30} 分布图和工程场地分类图,震中附近区域场地以I类和II类为主,东南方向较大区域的 V_{s30} 介于260~510 m/s;③给出了近场区域($27^{\circ}30'N\sim30^{\circ}00'N,86^{\circ}18'E\sim88^{\circ}36'E$)内14996个虚拟观测点的模拟三分量加速度时程,并由实际观测记录验证了模拟结果的准确性;最大水平向峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)可达1.0 g, 0.4、0.2 g等值线近似与IX、VIII度等震线重合,0.10、0.05 g等值线围合区域略小于VII、VI度区范围。研究工作和成果可以为震中区域各类承灾体的损伤判别、灾害评估和韧性评估等工作提供合理的地震动输入。

关键词:强震动时程;定日地震;震源破裂过程;随机有限断层模拟;区域场地条件

中图分类号:P315

文献标志码:A

Rapid generation and sharing of kilometer-grid strong motion time histories: A case study of the $M_s6.8$ Dingri, Xizang earthquake on January 7, 2025

REN Yefei^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, DIAO Hongqi^{1,2}, LIU Ye^{1,2}, QIANG Shengyin^{1,2},
ZHOU Baofeng^{1,2}, WEN Ruizhi^{1,2}

(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)

Abstract: In response to the current inability of the strong-motion observation network to provide seismic input records covering all areas of the epicenter vicinity, a technical framework for the rapid generation of kilometer-grid strong motion time histories has been established. Taking the $M_s6.8$ earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025, as an example, the detailed processes of each technical procedure are described, and work on the inversion of the source rupture process, estimation of regional site conditions, and simulation of strong motion time histories has been carried out. The following results are obtained. The earthquake released a seismic moment of $4.7\times10^{19}\text{ N}\cdot\text{m}$, corresponding to a moment magnitude of 7.05. The fault slip is predominantly normal with a small

收稿日期:2025-01-16; 修回日期:2025-01-22

基金项目:黑龙江省自然科学基金杰出青年项目(JQ2023E002);国家自然科学基金项目(U2239252,52478567)

作者简介:任叶飞(1983—),男,研究员,博士,主要从事工程地震相关研究。E-mail:renyefei@iem.net.cn

通信作者:温瑞智(1968—),男,研究员,博士,主要从事工程地震与强震动观测等方面研究。E-mail:ruizhi@iem.ac.cn

amount of left-lateral strike-slip component, and the maximum slip displacement exceeded 3 meters. The rupture lasted for more than 20 seconds, mainly propagating in the northward direction, which may cause potential directivity effects. A V_{s30} distribution map and engineering site classification map with a resolution of 30 arcseconds are provided, and the sites in the vicinity of epicenter area are mainly classified as Class I and Class II, with V_{s30} values ranging from 260 m/s to 510 m/s in the majority of the southeast area. Simulated three-component acceleration time histories for 14 996 virtual observation points in the near-field area ($27^{\circ}30'N \sim 30^{\circ}00'N, 86^{\circ}18'E \sim 88^{\circ}36'E$) are provided, and the accuracy of the simulation results is verified by actual observation records. The maximum horizontal peak ground acceleration (PGA) can reach $1.0 g$, and the $0.4 g$ and $0.2 g$ isolines approximately coincide with the IX and VIII isoseismals, while the $0.10 g$ and $0.05 g$ isolines enclose areas slightly smaller than the VII and VI isoseismal zones. This research work and its results can provide reasonable seismic input for the damage identification, disaster evaluation, and resilience assessment of various disaster-bearing bodies in the epicentral area.

Key words: strong ground motion time history; Dingri earthquake; source rupture process; stochastic finite-fault simulation; regional site condition

0 引言

地震造成的破坏和社会影响与地震动的强弱及其时空分布密切相关,震后快速给出地震动场可有效支撑应急救援、烈度评定等工作。强震动时程快速产出不仅可以形成地震动场,也能为震区各类工程结构的动力反应分析提供合理的地震动输入。由于当前强震动观测网络空间分布的不均匀性以及密集程度的不足,尚不能完全依赖观测记录为震区不同场址的工程结构提供地震动输入,因此有必要研发公里网格级空间分布的强震动时程快速产出技术并及时共享,在有效支撑应急救援工作的同时,还可以实现为各类承灾体提供区域全覆盖的地震动输入,满足工程结构损伤判别、地震灾害损失评估和地震灾害情景构建等应用需求。

美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的WALD等^[1]提出震后快速生成地震动场方法,建立了ShakeMap系统,可以在震后数分钟内给出震区烈度分布图、峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)分布图等图件;在场地校正、地震动空间插值、地震动参数与地震烈度经验相关模型等方面逐步进行了完善^[2-4]。我国在这方面也开展了相应研究,例如,陈鲲等^[5-6]将我国地震动衰减关系给出的预测值与实际观测值相融合并考虑场地效应校正建立了震动图系统,每次地震后都能迅速产出应急图件;CHEN等^[7-8]通过反向投影方法对震源能量辐射进行快速反演再利用地震动预测方程对PGA和峰值地面速度(peak ground velocity, PGV)进行快速预测,可在震后30 min内给出烈度分布图。这些工作尽管能很快预测地震动参数的空间分布,但并没有给出强震动时程,无法满足工程输入需求。

随着计算机性能的大幅提升,一些研究利用地震动模拟技术快速产出强震动场及工程输入时程。例如,王海云^[9]发展了随机有限断层模拟方法并以2010年玉树地震为例对加速度场进行了成功预测,不过其采用经验方法构建了断层破裂模型。李宗超等^[10-11]建立了小震格林函数库并发展了经验格林函数方法,已对我国多个历史大震的地震动进行了重构,但由于方法的局限性,无法形成覆盖全区域的强震动时程,近地表场地非线性效应考虑不足。王宏伟等^[12-14]发展了三维有限断层模拟方法以及震源运动学破裂随机模型,并在鲁甸、玛多和漾濞等多个地震中开展了示例验证;尽管能快速产出强震动时程,但由于震源模型通过随机生成增加了模拟结果的不确定性。尽管这些研究在地震动模拟方法、震源模型构建和强震动时程产出效率等方面取得了较大进展,但针对需求层面的公里级网格高密度空间分布、小时级计算高效率,以及物理层面的震源-路径-场地效应全过程考虑,尚没有建立系统的技术框架,仍需开展各项技术集成研究。

本文拟通过集成震源破裂过程反演、随机有限断层地震动模拟、区域宏观场地条件估计和场地效应模型调整等多项技术,建立面向公里网格的强震动时程快速产出技术框架,并以2025年1月7日西藏定日 $M_s 6.8$ 地震为例,阐述各技术环节的详细过程和计算结果,将模拟结果与观测记录进行比较讨论,验证技术框架的合理性和可行性,最终给出此次地震近场区域公里网格内供工程输入选用的强震动时程数据集并开放共享,可为后续其他研究工作提供必要的数据支撑。

1 强震动时程快速生成技术框架

地表地震动由震源破裂产生、经地壳介质传播和浅层场地反应共同作用形成,这些影响在强震动时程的快速产出过程中都需要被科学考虑。基于此,设计了图1所示的技术框架,过程是:第1步,利用远场测震记录和近场强震动记录联合反演得到地震的断层破裂面模型;第2步,由第1步得到的断层破裂面模型结合已有的震源参数(例如,应力降)理论模型、路径衰减模型和地壳放大模型通过随机有限断层模拟技术得到近场区域内公里网格的基岩强震动加速度时程;第3步,利用区域内的宏观场地条件分布图,通过经验场地效应调整模型对基岩地震动进行校正得到覆盖近场全域的公里级分辨率加速度时程。

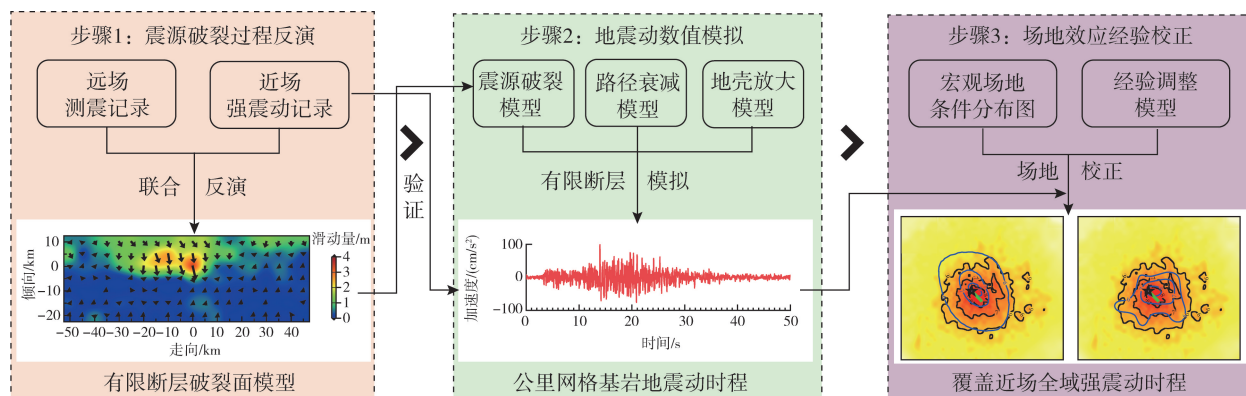


图1 强震动时程快速生成技术框架

Fig. 1 Technical framework for rapid generation of strong ground motion time histories

2 定日地震地质构造背景

2025年1月7日西藏定日 $M_s6.8$ 地震发生于青藏高原中南部,见图2。根据中国地震台网中心、USGS等单位给出的震源机制解,此次地震为正断层型,表现为青藏高原南北向挤压和东西向拉伸条件下的地壳变形。青藏高原南部地区同时受到南北向挤压和东西向拉张应力作用,高原内部发育有近南北向和近东西向的2种典型断裂^[15-16]。在这种强烈地壳形变作用下,拉萨地块及周缘断裂带活动尤为强烈。自1950年以来,拉萨地块共发生 $M6$ 以上地震21次,其中最大为2017年西藏米林 $M_s6.9$ 地震,距离最近是1993年西藏昂仁 $M_s6.4$ 地震。

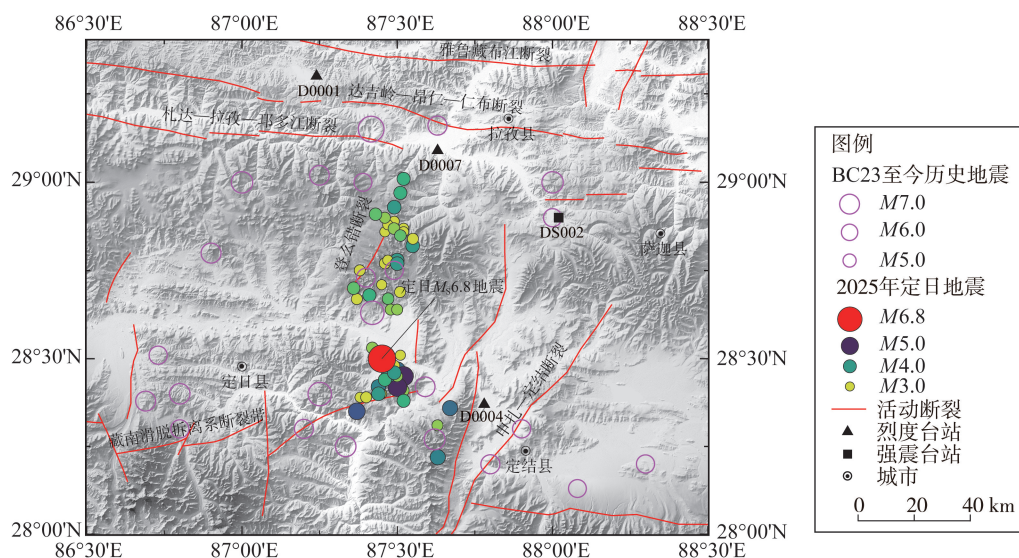


图2 定日地震震中区域地质构造

Fig. 2 Geological structure in the epicentral area of the Dingri earthquake

此次地震位于青藏高原拉萨地块内部,区域内发育了亚东-谷露裂谷、尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷等7条近南北向裂谷带,其控制断裂以正断层为主,断层倾角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,裂谷宽度 $10\sim 20\text{ km}$ ^[17-18]。此次地震发生在申扎-定结地堑盆地带的西侧边界附近,距离最近的断层为登么错断裂,该断裂在2015年尼泊尔地震之后表现活跃,初步研究结果表明此次地震发震断裂为登么错断裂北段(<https://eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2025/38560.html>)。根据中国地震台网速报地震目录,截至2025年1月14日,共发生M3.0及以上余震52次,其中M3.0~3.9地震45次,M4.0~4.9地震6次,M5.0~5.9地震1次,余震序列呈近南北向分布,震源深度集中在10 km。

3 震源破裂过程反演

3.1 观测数据收集与处理

本文选取了8个近场强震台站和32个远场测震台站的观测数据,台站分布如图3(a)、(b)所示。选取的强震台站数量有限,且多数距离发震断层较远,方位角覆盖有限;而选取的远场测震台站震中距范围是 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$,以忽略地幔三重性以及核-幔边界复杂性对地震波传播的影响,方位角范围是 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,覆盖范围较好。对强震动记录进行基线校正后积分成速度波形,进行带宽滤波($0.05\sim 0.50\text{ Hz}$),并以0.5 s时间间隔进行重采样;截取了P波到达之前5 s与P波到达之后75 s总共80 s的时间窗口。将远场测震记录的速度波形积分成位移波形并去除仪器响应,进行带宽滤波($0.01\sim 0.50\text{ Hz}$),并以0.5 s时间间隔进行重采样,截取了P波到达之前10 s与P波到达之后60 s总共70 s的时间窗口。

3.2 断层模型与格林函数计算

参考USGS快速给出的震源机制解(节面1:走向 349° ,倾角 42° ,滑动角 -103° ;节面2:走向 187° ,倾角 49° ,滑动角 -78°)构建断层模型;可以判断此次地震是正断层机制,2个节面的走向都是近似南北走向。中国地震局在震后及时开展了余震重定位、地表破裂轨迹线的确定以及遥感观测数据的分析,震后余震分布显示断层面面向西部倾斜,地表破裂轨迹为近似南北但北部稍偏东,遥感观测数据显示断层西侧为地壳永久变形的沉降区域。根据以上这些信息判定,实际断层破裂面的走向应该是接近 180° 而不是 360° 。因此,本文构建断层模型选用的是USGS的矩张量解的节面2,矩形断层沿走向方向的长度设置为100 km,沿倾向方向的宽度设置为35 km,断层的地表投影位置如图3(c)所示,起始破裂位置(震源)的经纬度采用USGS的定位结果: $28^{\circ}38'20.4''\text{N}$, $87^{\circ}21'39.6''\text{E}$,震源深度为10 km。

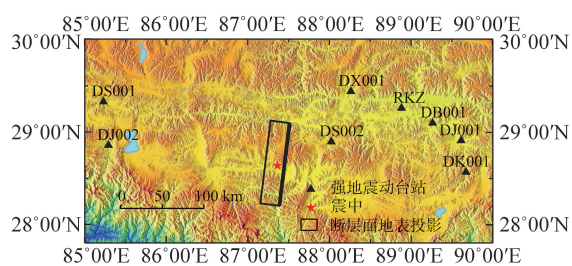
强震台站的格林函数采用扩展的反射方法计算^[19],每个台站所在位置的一维水平成层速度结构从三维速度结构模型^[20]中提取。此速度结构模型是中国大陆地壳和上地幔的P波和S波联合速度结构模型,由体波到时和面波频散曲线数据联合反演得到,空间分辨率水平方向为 0.5° ,竖向在地壳内从5~20 km不等,不包含近地表的地震基岩以上特别是工程基岩的岩石层以及上覆土层的信息。远场台站格林函数的计算采用地震射线方法^[21],震源区的一维速度结构从Crust1.0模型^[22]中提取。

3.3 震源联合反演

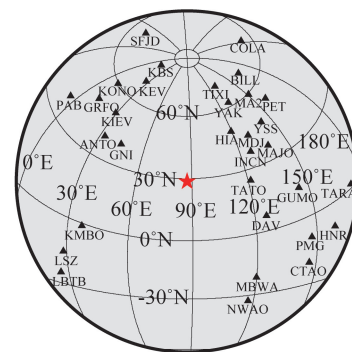
本文使用强震动观测的三分量数据和远场测震P波竖向数据进行震源联合反演,采用的反演方法为多窗口非负最小二乘法,获得平滑约束下震源滑动位移的时空分布^[23-25],平滑约束的权重由最小化Akaike贝叶斯信息标准^[26]获得。为了使得每条地震波形数据在震源反演中具备等权重,每条波形的重采样数据在反演之前进行了归一化处理。

将矩形断层模型划分成等面积的子断层,尺寸统一为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$,每个子断层的滑动相当于在子断层中心位置的点源滑动;每个子断层可以允许在破裂到达后的多个窗口进行滑动,每个滑动窗口的上升时间设为1.5 s,窗口个数设为8,滑动方向限制在震源机制解提供的初始滑动角 $-78^{\circ}\pm 45^{\circ}$ 内,即不允许出现与初始滑动角方向相反的滑动。通过尝试最小化波形残差,破裂在断层面上的传播速度设置为 3.2 km/s 。

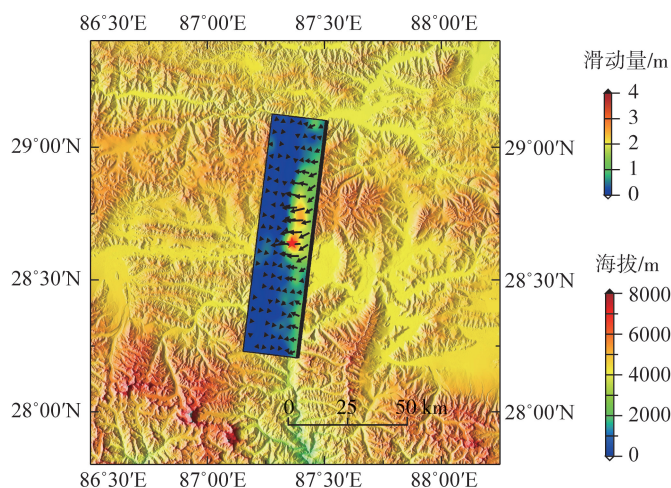
图3(c)和(d)给出的震源滑动分布表明:定日地震的断层滑动以正断层滑动为主并带有少量的左旋走滑分量,破裂从震源开始同时向南和向北双向传播,但主要以向北破裂传播为主,最大的滑动位移超过了3 m,主要的滑动发生在震源及震源北部区域,这样会导致向北或北部稍偏东方向的破裂方向性效应,与震后发布的地震烈度图相一致。图3(e)给出的震源时间函数表明地震破裂持续了20多秒,释放的地震矩为 $4.7\times 10^{19}\text{ N}\cdot\text{m}$,对应的矩震级为7.05。图3(f)和(g)分别展示了强震动速度波形拟合和远震P波位移波形拟合结果,表明反演结果较为可靠。



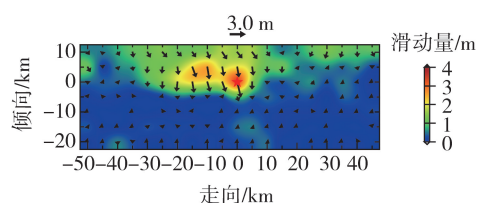
(a) 选取的近场强震台站分布



(b) 选取的远场测震台站分布

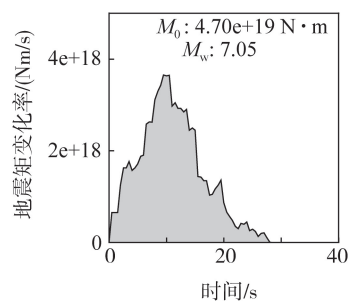


(c) 反演得到的断层滑动在地表投影

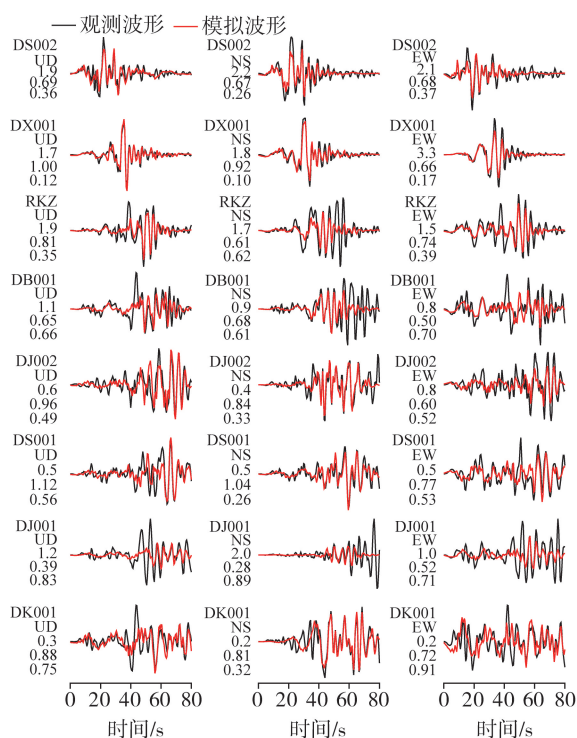


注: 走向为187°, 倾角为49°。

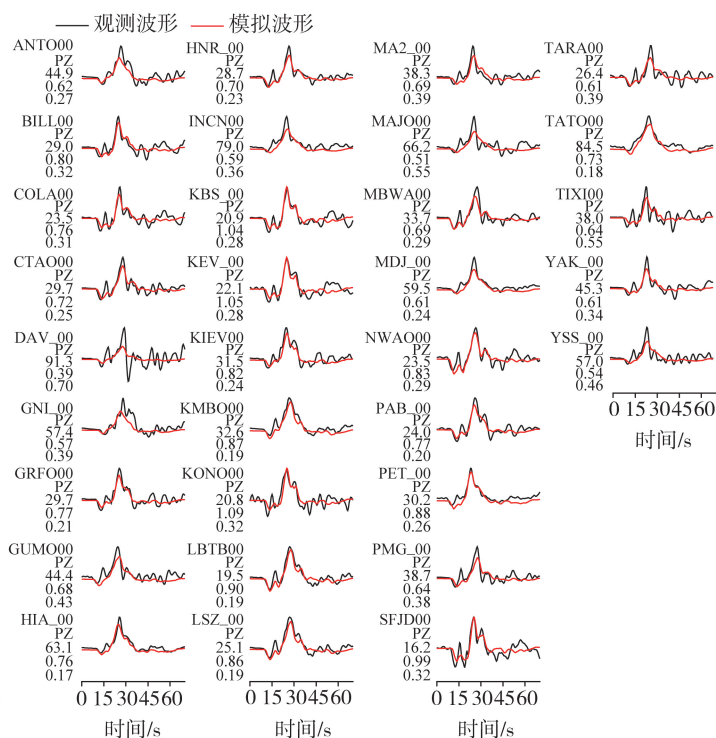
(d) 反演得到的断层面滑动分布



(e) 反演得到的震源时间函数



(f) 强震动速度波形拟合 (单位: cm/s)



(g) 远震P波位移波形拟合 (单位: μm)

图3 定日地震震源破裂过程反演结果

Fig. 3 Inversion results of the source rupture process of the Dingri earthquake

将本研究的结果与张勇等^[27]以及王卫民^[28]的反演结果进行对比并发现,三者给出的破裂特征十分接近,最大的滑动位移都接近 3 m,主要破裂位置位于震源北部;但也存在一些差异,例如,张勇等^[27]基于强震动数据反演的结果最大滑动位移接近 2 m,比远震反演结果小,王卫民^[28]基于远震数据得到的结果在断层一定深度处有接近 3 m 的滑动位移,而本研究的联合反演结果以及张勇等^[27]用远震和强震动分别反演的结果都显示最大滑动位移位于断层浅处接近地表的地方。

4 强震动时程快速产出与共享

4.1 模拟方法及模型参数

王宏伟等^[12]发展了模拟三维地震动的随机有限断层方法,该方法已成功应用于我国 2020 年新疆伽师 $M_s 6.4$ 地震^[29]、2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震^[14]、2021 年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震^[13],以及 2023 年土耳其 $M_w 7.8$ 和 $M_w 7.6$ 双震^[30]的地震动场模拟。本文采用该方法模拟此次地震的近场区域强震动时程。

震源破裂模型采用了本文基于远震 P 波和近场强震动记录联合反演的结果,见图 3。根据 SOMERVILLE 等^[31]提出的原则对破裂面进行裁剪后,破裂面的长度和宽度分别为 100、20 km,根据 DENOLLE 等^[32]提出的均匀空间椭圆破裂面的地震应力降表达式($\Delta\sigma = C(a, b, \nu)M_0/(\pi ab^2)$, a, b 分别为椭圆长轴和短轴半径),地震应力降为 2.749 MPa,接近于全球正断层大地震的应力降中位值,例如: 4.03 MPa^[33]、3~4 MPa^[34]。几何扩散模型采用 ATKINSON 等^[35]提出的 3 段线性模型,3 个线性段的距离分段点与地壳厚度相关,根据 Crust1.0 模型,地壳厚度为 68 km,距离分段点为 102、170 km,3 个线性段的几何扩散分别为 R^{-1} 、 R^0 、 $R^{-0.5}$ 。S 波品质因子 $Q_s = \max(60, 180f^{0.45})$ ^[36-37]。S 波路径持时模型采用活动地壳区模型^[38]。地壳放大模型采用 $V_{s30} = 760$ m/s 基岩场地的经验放大系数^[39]。地震动高频衰减参数 κ 采用与距离相关的线性模型($\kappa = \kappa_0 + kR$)表示, κ_0 在 0.005~0.030 范围内,斜率 $k = 0.00008$ ^[40]。各模型参数详见表 1。

表 1 定日 $M_s 6.8$ 地震随机有限断层模拟输入参数

Table 1 Input parameters for stochastic finite-fault simulation of the Dingri $M_s 6.8$ earthquake

参数名称	参数值	参数名称	参数值
矩震级 M_w	7.05	几何扩散模型	$G(R) = \begin{cases} R^{-1.0}, & R < R_1 \\ R_1^{-1.0} R^0, & R_1 \leq R < R_2 \quad (R_1 = 102 \text{ km}, R_2 = 170 \text{ km}^{[35]}) \\ R_1^{-1.0} R_2^0 (R/R_2)^{-0.5}, & R \geq R_2 \end{cases}$
震源破裂模型	联合反演模型(见图 3)	路径持时	活动地壳区路径持时模型 ^[38]
应力降 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	2.749	S 波品质因子 Q_s	$Q_s = \max(60, 180f^{0.45})$ ^[36-37]
P 波和 S 波波速/(km/s)	6.00、3.52	高频衰减参数 κ/s	$\kappa = \kappa_0 + kR, \kappa_0 = 0.005-0.03 \text{ s}, k = 0.00008$ ^[40]
介质密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	2.72	地壳放大模型	$V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ 基岩场地的放大效应 ^[39]
动破裂面比例	50%		

4.2 区域场地条件及调整模型

有限断层数值模拟给出了基岩场地的强震动时程,考虑浅层地表介质的场地反应影响,需要利用经验模型对结果进行调整;这里采用 SS14 模型^[41],它表示与场地 V_{s30} 相关的线性和非线性场地放大效应,参考基岩场地定义为 $V_{s30} = 760$ m/s。接下来需要确定计算区域内任一网格点的 V_{s30} 值。理论上,基于实地钻孔勘探的剪切波速测试是获取场地类别或 V_{s30} 等场地参数最可靠的方法,然而通常由于经济等条件的限制,难以实现对整片区域的钻孔勘探。有研究发现地形、地貌和地质等宏观表面特征与场地参数(V_{s30} 、 V_{se} 和覆盖层厚度等)之间具有良好的相关性^[42-43]。REN 等^[44]基于 1:50 万地质图数据和全国钻孔资料,考虑地层时代、地层成因、岩性描述和钻孔统计特性,建立了地层时代、成因与场地类别的经验关系,给出全国 1:50 万基于地质信息的区域场地分类结果。ZHOU 等^[45-46]利用钻孔剪切波速资料及地形坡度数据,使用基于坡度数据的协同克里金插值方法,得到我国 V_{s30} 分布结果。张雨婷等^[47-49]充分考虑地形特征参数与地形坡度关系的区域依赖性,基于不同区域的钻孔资料和坡度数据,分别建立了我国不同区域的 V_{s30} 与地形坡度的经验关系,并给出了全国 30 弧秒分辨率的 V_{s30} 分布结果。

本文采用张雨婷等^[47-49]基于地形坡度信息给出的全国 30 弧秒分辨率的 V_{s30} 估计值,该结果已在我国省级地震危险性区划和强震动 Flatfile 数据库建设中得到了应用^[50]。图 4(a)中给出了此次地震震中周边区域的 V_{s30} 分布;结合 XIE 等^[51]给出的 V_{s30} 与中国工程场地类别转换关系,图 4(b)给出了此次地震震中周边区

域的工程场地分类结果。结果表明:大范围内场地以 I 类为主,这与西藏地区高海拔山脉地貌特征一致,地表介质以较硬的岩石为主,一定程度上表明图中展示的场地条件估计结果较为合理;震中附件区域场地以 I 类和 II 类为主,存在少量的 III 类场地;震中东南方向较大区域的 V_{s30} 介于 260~510 m/s,地表浅层介质相对较软,局部场地条件可能会对地震动及震害产生一定影响。

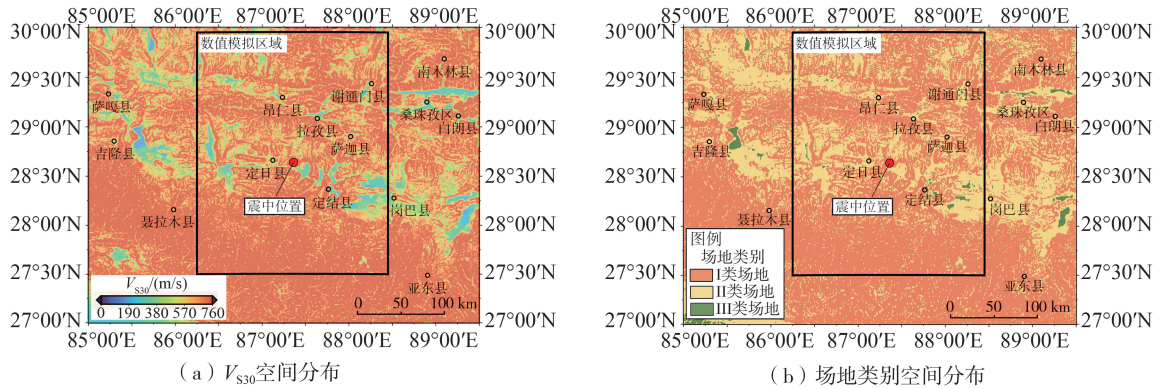
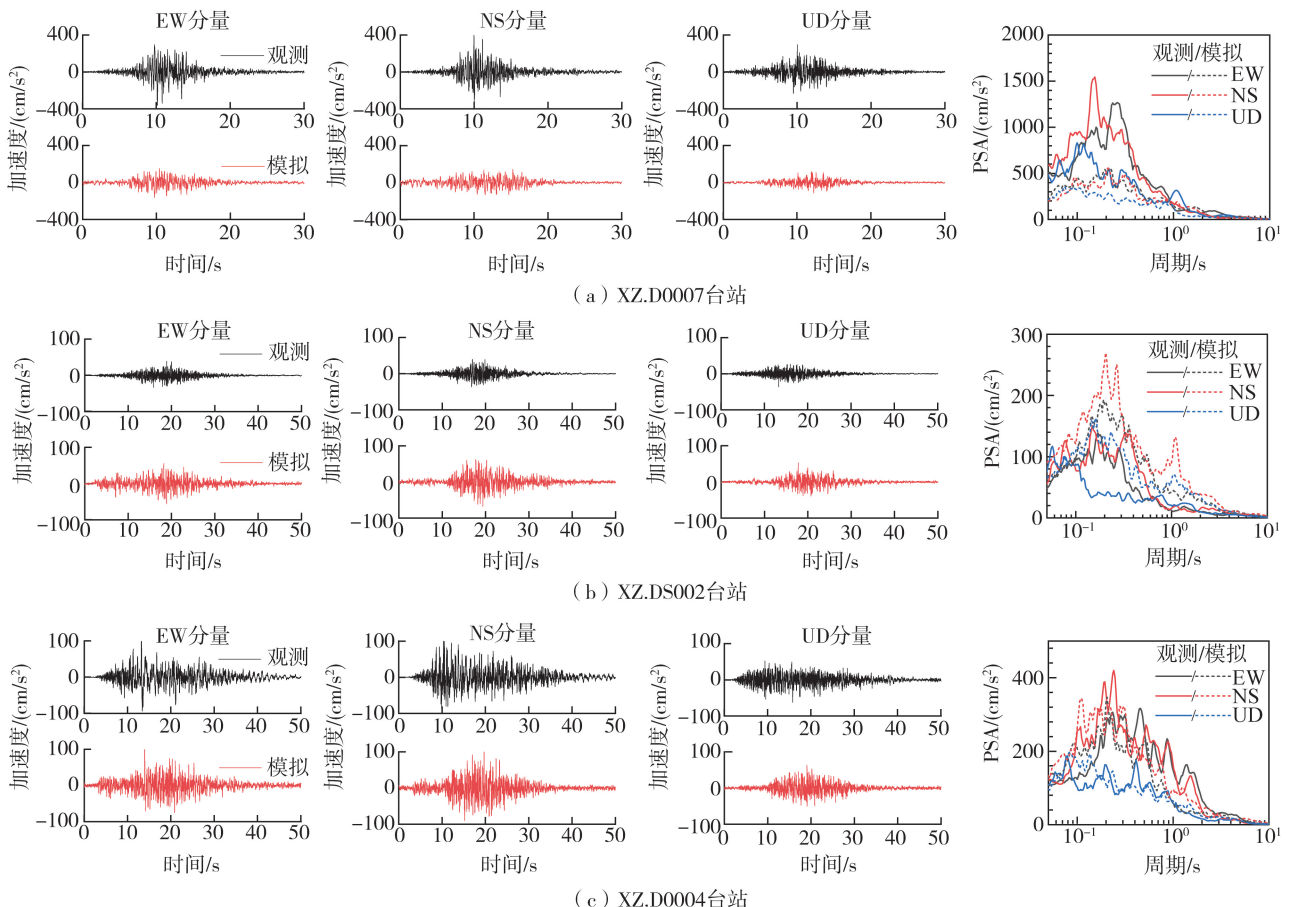


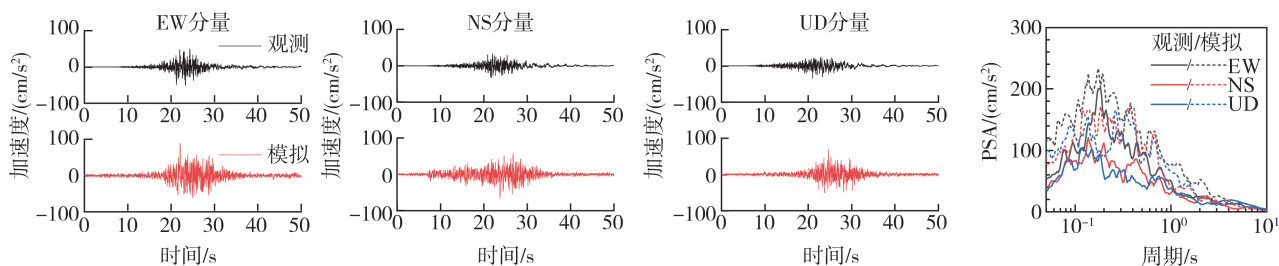
图4 震中周边区域场地条件空间分布

Fig.4 Spatial distribution of site conditions in the vicinity of epicentral area

4.3 模拟结果讨论

根据上述模型模拟了此次地震中距离震中一定范围内($27^{\circ}30'N \sim 30^{\circ}00'N$ 、 $86^{\circ}38'E \sim 88^{\circ}36'E$) 14 996 个虚拟观测点的三分量(EW、NS、UD)加速度时程,虚拟观测点的间距与至断层破裂面地表投影的最短距离(R_{JB})有关,当 R_{JB} 处于 $(0, 5]$ 、 $(5, 100]$ 、 $(100, +\infty)$ km 时,间距分别为 0.010° (约 1 km)、 0.025° (约 2.5 km)、 0.100° (约 10 km)。图 5 给出了距离断层破裂面较近($R_{np} < 50$ km)的 4 个台站(XZ.D0007、XZ.DS002、XZ.D0004、XZ.D0001,具体位置见图 2)的模拟记录加速度时程和反应谱,图中与观测记录进行了对比。XZ.D0007 台站模拟记录加速度时程幅值、5%阻尼比拟加速度反应谱(pseudo-absolute-acceleration spectra, PSA)均低于观测记录,但其他 3 个台站模拟与观测记录加速度时程、PSA 均具有较好的一致性。





(d) XZ.D0001台站

图5 部分强震动台站的模拟记录加速度时程、PSA 及其与观测记录的对比

Fig.5 Acceleration time histories and PSAs of simulated records at some strong motion stations and their comparison with observed results

利用虚拟观测点三分量强震动加速度时程的模拟结果,根据 GB/T 17742—2020《中国地震烈度表》,利用三分量合成 PGA 和 PGV 计算了各虚拟观测点的仪器地震烈度,如图 6(a) 所示,定日县城在 VII~VIII 度区,拉孜县城在 VII 度区,昂仁县城和定结县城在 VI~VII 度区,仪器地震烈度的长轴方向与震源破裂面走向一致,破裂面凹凸体位置对极震区(VIII、IX)分布范围有很大的影响,IX 度区位于起始破裂点 NNE 侧的断层破裂面地表投影范围内,与破裂面凹凸体区域较为一致,震中 NNE 侧 VIII 区垂直断层方向的范围明显大于 SSW 侧;不平滑的等震线以及少量的烈度异常区均体现出了局部场地条件的影响。

图 6(b)、(c)分别给出了模拟记录水平向 PGA、PGV 空间分布,在破裂面凹凸体浅埋深部位的地表投影范围内的水平向 PGA 可达 $1.0 g$,水平向 PGA 为 0.40 、 $0.20 g$ 的等值线近似与 IX、VIII 度等震线重合,但 PGA 为 0.10 、 $0.05 g$ 的等值线围合区域略小于 VII、VI 度区范围,这可能与远场竖向地震动模拟结果偏大有关,为提高模拟精度,本文在虚拟观测点的地震动模拟中考虑了 $R_{rup} < 50 \text{ km}$ 内 4 个台站模拟与观测记录的差异,近场竖向地震动与水平向地震动比值一般会高于远场,基于近场观测记录差异调整可能会造成远场竖向地震动模拟结果偏大。与 PGA 等值线相比,PGV 等值线的不平滑特性更显著,这可能体现了局部场地条件对 PGV 的影响更明显。

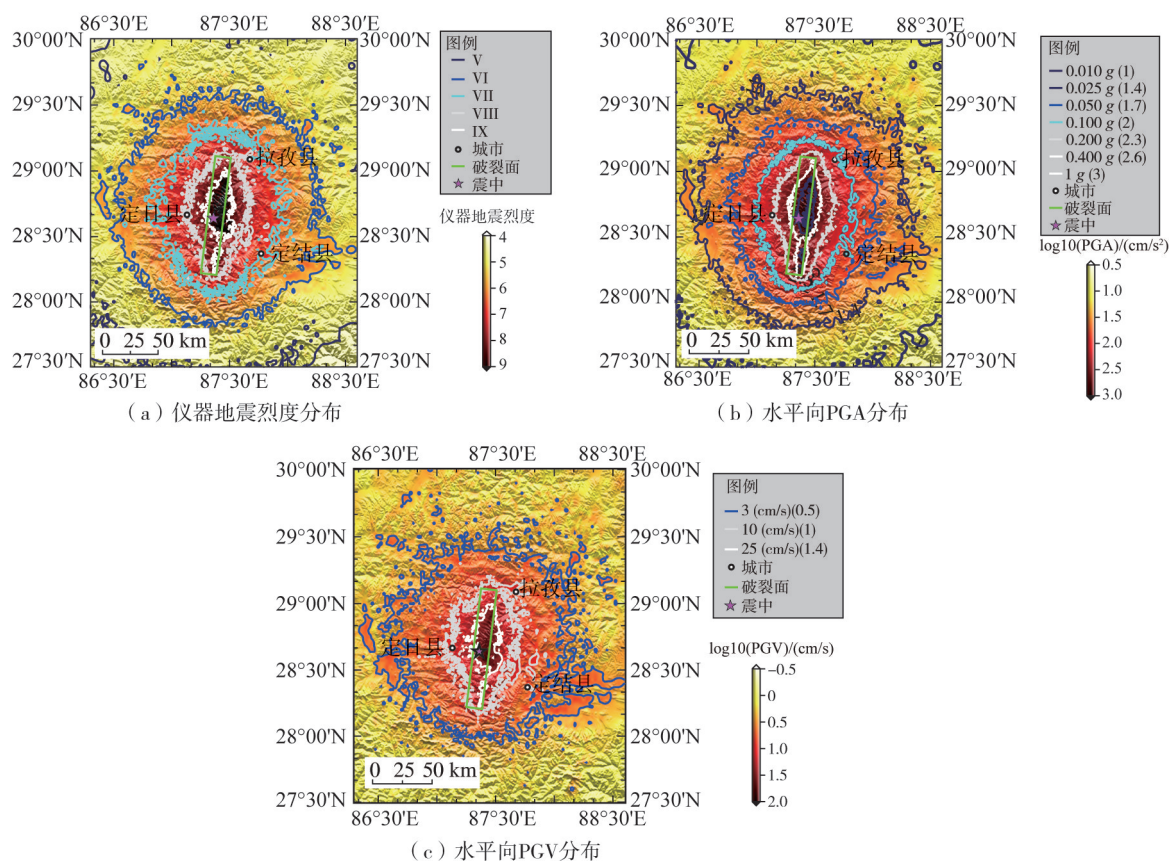


图6 模拟给出的仪器地震烈度、水平向 PGA 和水平向 PGV 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of instrumental seismic intensity, horizontal PGA and horizontal PGV given by the simulation

4.4 数据共享

本研究产出的震源破裂模型已在 <http://www.gmm-cn.com/gmm-events/> 网站上共享,包括各子断层的经纬度、深度(km)、滑动方向和滑动量(m);同时共享了精度为30弧秒的区域场地类别和 V_{s30} 数据,提供Tif、NetCDF和ASCII这3种格式。

另外还公开分享了各公里网格点的强震动加速度时程及对应基本信息。基本信息包括网格点的经纬度坐标、 V_{s30} (m/s)、破裂距 R_{rup} (km)、Joyner-Boore距 R_{JB} (km);加速度时程数据格式为文本格式,第1行为时间间隔(s)、数据点数量、P波开始时间(s)、S波结束时间(s),其后各行为按时间序列排序的加速度时程,每行包括3列数据,分别对应EW、NS、UD分量的加速度(cm/s^2)。

5 结论

面向工程输入对地震动时程的应用需求,建立了公里网格的强震动时程快速产出技术框架,并以2025年1月7日西藏定日 $M_s6.8$ 地震为例,阐述各技术环节的详细过程,展示了各步骤计算结果,针对此次地震得到了如下结论:

1) 对此次地震的震源破裂过程进行了反演。结果表明,地震破裂持续了20多秒,释放地震矩为 $4.7 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$,对应矩震级为7.05;断层滑动以正断层为主并带有少量的左旋走滑分量,破裂从震源开始同时向南和向北双向传播,但主要以向北方向破裂传播为主,最大滑动位移超过了3 m,主要的滑动发生在震源及震源北部区域,可能会引起潜在的破裂方向性效应。

2) 利用数字高程数据评估了研究区域宏观场地条件,给出了30弧秒分辨率的 V_{s30} 分布图和工程场地分类图。结果表明,震中附近区域场地以I类和II类为主,存在少量的III类场地;震中东南方向较大区域的 V_{s30} 介于260~510 m/s之间,局部场地条件可能会对地震动和影响产生一定影响。

3) 利用随机有限断层方法模拟给出了近场区域($27^\circ 30' \text{N} \sim 30^\circ 00' \text{N}$ 、 $86^\circ 18' \text{E} \sim 88^\circ 36' \text{E}$)内14996个虚拟观测点的三分量加速度时程,并由实际观测记录验证了模拟结果的准确性。结果显示,最大水平向PGA可达1.0 g,0.4、0.2 g等值线近似与IX、VIII度等震线重合,0.10、0.05 g等值线围合区域略小于VII、VI度区范围。与PGA等值线相比,PGV等值线的不平滑特性更显著,这可能体现了局部场地条件对PGV的影响更加显著。

需要指出的是,尽管各环节给出的计算结果良好并且可靠,验证了技术框架的可行性,但过程中所采用的震源、路径和场地相关的经验模型还需要进一步开展研究,建立适用于我国不同地区的模型以充分考虑其存在的区域依赖性。

致谢:感谢中国地震局工程力学研究所强震动观测中心提供的本次地震强震动观测记录,IRIS-DMC提供的远场测震记录,北京大学张勇教授针对震源破裂过程反演工作的探讨与建议。

参考文献:

- [1] WALD D J, WORDEN B C, QUITORIANO V, et al. ShakeMap manual: Technical manual, user's guide, and software guide[R]. Menlo Park: USGS, 2005.
- [2] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379–1395.
- [3] WORDEN C B, WALD D J, ALLEN T I, et al. A revised ground-motion and intensity interpolation scheme for ShakeMap[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(6): 3083–3096.
- [4] WORDEN C B, GERSTENBERGER M C, RHOADES D A, et al. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 204–221.
- [5] 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 考虑场地效应的ShakeMap系统研究[J]. 中国地震, 2010, 26(1): 92–102.
CHEN Kun, YU Yanxiang, GAO Mengtan. Research on ShakeMap system in terms of the site effect[J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(1): 92–102. (in Chinese)
- [6] 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 基于地震记录的震动图校正方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 679–691.
CHEN Kun, YU Yanxiang, GAO Mengtan. Research on correction method for ShakeMap based on seismic data[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4): 679–691. (in Chinese)

- [7] CHEN W K, WANG D, ZHANG C, et al. Estimating seismic intensity maps of the 2021 M_w 7.3 Madoi, Qinghai and M_w 6.1 Yangbi, Yunnan, China earthquakes[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(4): 839–846.
- [8] CHEN W K, WANG D, SI H J, et al. Rapid estimation of seismic intensities using a new algorithm that incorporates array technologies and ground-motion prediction equations (GMPEs)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2022, 112(3): 1647–1661.
- [9] 王海云. 2010年4月14日玉树 M_s 7.1 地震加速度场预测[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2345–2354.
WANG Haiyun. Prediction of acceleration field of the 14 April 2010 Yushu earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10): 2345–2354. (in Chinese)
- [10] 李宗超, 高孟潭, 陈学良, 等. 九寨沟 M_s 7.0 地震强地震动模拟及漳扎镇地震动强度预测[J]. 地球物理学报, 2019, 62(7): 2567–2581.
LI Zongchao, GAO Mengtan, CHEN Xueliang, et al. Simulation of ground motion by the 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake and estimation of ground motion intensity in the Zhangzha Town[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(7): 2567–2581. (in Chinese)
- [11] LI Z C, SUN J Z, FANG L H, et al. Reproducing the spatial characteristics of high-frequency ground motions for the 1850 M 7.5 Xichang earthquake[J]. Seismological Research Letters, 2022, 93(1): 100–117.
- [12] 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 一种随机有限断层的三维地震动模拟方法——鲁甸地震为例[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 181–191.
WANG Hongwei, REN Yefei, WEN Ruizhi. A modified stochastic finite-fault method for simulating ground motions in three dimensions: A case study of Ludian earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 181–191. (in Chinese)
- [13] 李春果, 王宏伟, 温瑞智, 等. 2021年青海玛多 M_s 7.4 地震随机有限断层三维地震动模拟[J]. 地震地质, 2021, 43(5): 1085–1100.
LI Chunguo, WANG Hongwei, WEN Ruizhi, et al. Three-component ground motion simulations based on the stochastic finite-fault method for the 2021 Maduo M_s 7.4 earthquake, Qinghai Province[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(5): 1085–1100. (in Chinese)
- [14] 强生银, 王宏伟, 温瑞智, 等. 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[J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4538–4547.
QIANG Shengyin, WANG Hongwei, WEN Ruizhi, et al. Three-dimensional ground motion simulations by the stochastic finite-fault method for the Yangbi, Yunnan M_s 6.4 earthquake on May 21, 2021[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(12): 4538–4547. (in Chinese)
- [15] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊1): 12–20.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Guomin, et al. Strong earthquake activity and active blocks in Chinese mainland[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(Sup. 1): 12–20. (in Chinese)
- [16] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025–2042.
DENG Qidong, CHENG Shaoping, MA Ji, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7): 2025–2042. (in Chinese)
- [17] 张进江. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. 地质通报, 2007, 26(6): 639–649.
ZHANG Jinjiang. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(6): 639–649. (in Chinese)
- [18] 贺日政, 高锐. 西藏高原南北向裂谷研究意义[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 35–43.
HE Rizheng, GAO Rui. Some significances of studying north-southern rift in Tibet plateau[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 35–43. (in Chinese)
- [19] KOHKETSU K. The extended reflectivity method for synthetic near-field seismogram[J]. Journal of Physics of the Earth, 1985, 33(2): 121–131.
- [20] HAN S C, ZHANG H J, XIN H L, et al. USTClitho2.0: Updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data[J]. Seismological Research Letters, 2022, 93(1): 201–215.
- [21] KIKUCHI M. Note on teleseismic body-wave inversion program [EB/OL]. (2006–03–16) [2025–01–07]. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>.
- [22] LASKE G, MASTERS G, MA Z, et al. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of Earth's crust[C]//The European Geosciences Union. Geophysical research abstracts. Vienna: Copernicus Publications, 2013, 15(15): 2658.
- [23] YOSHIDA S, KOKETSU K, SHIBAZAKI B, et al. Joint inversion of near-and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake[J]. Journal of Physics of the Earth, 1996, 44(5): 437–454.
- [24] HIKIMA K, KOKETSU K. Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(18): L18303.
- [25] DIAO H Q, KOBAYASHI H, KOKETSU K. Rupture process of the 2016 Meinong, Taiwan, earthquake and its effects on strong ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(1): 163–174.
- [26] AKAIKE H. Likelihood and the Bayes procedure[J]. Trabajos de Estadística Y de Investigación Operativa, 1980, 31(1): 143–166.
- [27] 张勇, 徐贝贝, 徐晨雨. 2025/01/07 定日 M 6.8 地震震源机制与初步破裂模型[EB/OL]. (2025–01–07) [2025–01–07]. <https://pku-geophysics-source.group/htmls/20250107010516Dingri.html>.
ZHANG Yong, XU Beibei, XU Chenyu. Focal mechanism and preliminary rupture model of the 7 Jan 2025 M 6.8 Dingri earthquake[EB/OL]. (2025–01–07) [2025–01–07]. <https://pku-geophysics-source.group/htmls/20250107010516Dingri.html>. (in Chinese)
- [28] 王卫民. 2025年1月7日西藏日喀则 7.1 级地震震源破裂过程反演初步结果[EB/OL]. (2025–01–07) [2025–01–07]. (<https://cstr.cn/18406.11.SolidEar.tpdc.301782>).

- WANG Weimin. Preliminary result for rupture process of Jan. 7, 2025, $M7.1$ earthquake, Rikaze[EB/OL]. (2025-01-07)[2025-01-07]. <https://cstr.cn/18406.11.SolidEar.tpdc.301782>. (in Chinese)
- [29] 王宏伟, 温瑞智, 任叶飞. 考虑区域特征的地震动模拟——以2020年伽师 $M_s6.4$ 地震为例[J]. 地震地质, 2021, 43(2): 430–446.
WANG Hongwei, WEN Ruizhi, REN Yefei. Seismic ground motion simulation considering regional characteristics: A case study of the Jiashi $M_s6.4$ earthquake in 2020[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(2): 430–446. (in Chinese)
- [30] 王宏伟, 强生银, 温瑞智, 等. 2023年2月6日土耳其 $M_w7.8$ 和 $M_w7.6$ 两次大地震的地震动特征及模拟[J]. 地球物理学报, 2024, 67(8): 2990–3003.
WANG Hongwei, QIANG Shengyin, WEN Ruizhi, et al. Characteristics and simulations of ground motions in Turkey $M_w7.8$ and $M_w7.6$ great earthquakes on 6 February 2023[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(8): 2990–3003. (in Chinese)
- [31] SOMERVILLE P, IRIKURA K, GRAVES R, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. Seismological Research Letters, 1999, 70(1): 59–80.
- [32] DENOLLE M A, SHEARER P M. New perspectives on self-similarity for shallow thrust earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(9): 6533–6565.
- [33] 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.
- [34] ALLMANN B P, SHEARER P M. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114(B1): B01310.
- [35] ATKINSON G M, MEREU R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(5): 2014–2031.
- [36] PARVEZ I A, VACCARI F, PANZA G F. A deterministic seismic hazard map of India and adjacent areas[J]. Geophysical Journal International, 2003, 155(2): 489–508.
- [37] MIR R R, PARVEZ I A. Ground motion modelling in northwestern Himalaya using stochastic finite-fault method[J]. Natural Hazards, 2020, 103(2): 1989–2007.
- [38] BOORE D M, THOMPSON E M. Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2541–2552.
- [39] ATKINSON G M, BOORE D M. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(6): 2181–2205.
- [40] SHARMA J, CHOPRA S, ROY K S. Estimation of source parameters, quality factor (QS), and site characteristics using accelerograms: Uttarakhand Himalaya region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(1): 360–380.
- [41] SEYHAN E, STEWART J P. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1241–1256.
- [42] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379–1395.
- [43] THOMPSON E M, WALD D J, WORDEN C B. A VS30 map for California with geologic and topographic constraints[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2313–2321.
- [44] REN Y F, ZHANG Y T, JI K, et al. Site classification scheme based on geological age and genesis for Xinjiang and the Capital Metropolitan areas of China[J]. Earthquake Spectra, 2024, 40(1): 174–199.
- [45] ZHOU J, LI X J, TIAN X M, et al. New framework of combining observations with topographic slope to estimate V_{s30} and its application on building a V_{s30} map for mainland China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2022, 112(4): 2049–2069.
- [46] ZHOU J, LI L, LI X J, et al. A 30 arcsec resolution V_{s30} map for mainland China using refined topographic slope-based cokriging (SCK) model[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2025, 115(1): 332–348.
- [47] 张雨婷. 基于我国地形与地质条件的场地分类方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020.
ZHANG Yuting. Site classification method based on topographical and geological characteristics in China[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020. (in Chinese)
- [48] 张雨婷, 任叶飞, 温瑞智, 等. 基于决策树考虑地形特征的场地参数估计方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 698–710.
ZHANG Yuting, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. A method of site parameter estimation based on decision tree theory considering terrain features[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(2): 698–710. (in Chinese)
- [49] ZHANG Y T, REN Y F, WEN R Z, et al. Regional terrain-based V_{s30} prediction models for China[J]. Earth, Planets and Space, 2023, 75(1): 72.
- [50] JI K, REN Y F, ZHU C B, et al. Site database for national strong motion stations in mainland China[J]. Engineering Geology, 2024, 339: 107651.
- [51] XIE J J, LI K W, LI X J, et al. VS30-based relationship for Chinese site classification[J]. Engineering Geology, 2023, 324: 107253.