

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.085>



融合谱元法与人工神经网络的漾濞地震宽频带地震动模拟

李春果^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 温瑞智^{1,2*}, 任叶飞^{1,2}, 强生银^{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: 宽频带地震动模拟是工程地震中的关键科学问题, 针对现有方法在低频物理建模与高频随机成分的结合中存在频谱不匹配和能量相位冲突的问题, 提出一种基于谱元法 (SEM) 的模拟与基于人工神经网络 (ANN) 的宽频带地震动模拟方法. 首先建立中国强震记录 Flatfile 训练短周期反应谱的非线性映射关系, 其次采用谱元法模拟低频地震动, 并通过调幅因子缩放高频随机成分, 最终根据能量校准获得宽频带地震动时程. 以漾濞 $M_s6.4$ 地震为例, 利用反演得到的有限断层模型和精细三维速度结构模型, 模拟得到起伏地表观测点的低频地震动时程, 使用以上方法合成对应的宽频带模拟时程. 宽频带模拟加速度时程、峰值地震动与观测记录均具有较好的一致性, 可应用于区域地震危险性评估.

关键词: 地震动; 宽频带模拟; 人工神经网络; 谱元法; 漾濞地震.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2026)01-030-13

收稿日期: 2025-03-06

Simulation of Broadband Ground Motion in Yangbi Earthquake by Integrating Spectral Element Method and Artificial Neural Network

Li Chunguo^{1,2}, Wang Hongwei^{1,2}, Wen Ruizhi^{1,2*}, Ren Yefei^{1,2}, Qiang Shengyin^{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: Broadband ground motion simulation is a critical issue in engineering seismology. As traditional methods often face issues of spectral mismatch and energy phase conflicts when combining low-frequency physics-based modeling with high-frequency stochastic components, this paper introduces a hybrid method that integrates artificial neural network (ANN) with spectral element method (SEM). The ANN is trained on the Strong Motion Flatfile of China to capture the nonlinear mapping of short-period response spectra, while the SEM is employed to simulate low-frequency ground motions. High-frequency stochastic components are optimized using scaling factors, and energy alignment is applied to synchronize low- and high-frequency time histories, ensuring stable broadband simulation results. Taking the Yangbi $M_s6.4$ earthquake as a case study, a finite fault model derived from inversion and a refined 3D velocity structure model are used to generate low-

基金项目: 国家自然科学基金地震联合基金项目 (No. U2239252).

作者简介: 李春果 (1995-) 女, 博士, 主要从事地震动数值模拟相关研究. ORCID: 0000-0003-2066-1888. E-mail: lcgz1007@163.com

*** 通讯作者:** 温瑞智, ORCID: 0000-0001-6381-9425. E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

引用格式: 李春果, 王宏伟, 温瑞智, 任叶飞, 强生银, 2026. 融合谱元法与人工神经网络的漾濞地震宽频带地震动模拟. 地球科学, 51(1): 30-42.

Citation: Li Chunguo, Wang Hongwei, Wen Ruizhi, Ren Yefei, Qiang Shengyin, 2026. Simulation of Broadband Ground Motion in Yangbi Earthquake by Integrating Spectral Element Method and Artificial Neural Network. *Earth Science*, 51(1): 30-42.

frequency time histories for monitors. The broadband method is then applied to produce corresponding broadband simulation time histories. The results demonstrate that the simulated broadband acceleration time histories exhibit strong consistency with observed records, providing reliable and realistic inputs for seismic hazard analysis.

Key words: ground motion; broadband simulation; artificial neural network; spectral element method; Yangbi earthquake.

0 引言

近场宽频带地震动模拟是工程地震学领域关心的热点研究课题,相关研究为工程抗震设计提供合理的地震动输入,并为强震记录稀疏地区的地震危险性分析提供科学依据.鉴于地震动固有的确定性和不确定性,以及在地震动模拟的精度和效率之间的平衡,融合不同方法的优势发展合理高效的宽频带模拟技术是未来趋势.

基于物理参数模型的模拟方法要求构建震源破裂模型(如断层几何、滑动分布、破裂速度)、传播路径衰减模型(如品质因子 Q 值)及局部场地精细速度结构模型(如沉积层介质、非线性土体特性等),通过对整合的模型进行解析计算或数值求解,根据物理方程和数学方法求解以实现地震动的确定性模拟,从物理机制方面揭示了震源破裂动力学过程与地震波传播机制.早期研究基于互易定理结合高效波数积分算法,在一维层状介质中实现了震源破裂过程的快速计算及近场地震动模拟(Olson and Primps, 1984; Spudich and Xu, 2003).得益于高性能计算技术的进步,有限元(FEM)、有限差分法(FDM)和谱元法(SEM)等数值方法被广泛应用于三维复杂介质中地震波传播的模拟(Sjögreen and Petersson, 2012; Afanasiev *et al.*, 2019),并通过对三维速度结构扰动(Graves and Pitaraka, 2016)和对运动学震源模型的随机优化处理(Crempien and Archuleta, 2015; Paolucci *et al.*, 2015)等方法,使地震动数值模拟的有效频带拓展到了3~5 Hz.然而,地壳介质中小尺度的不均匀性使高频地震动具有很强的随机性,导致方法在模拟高频成分(>1 Hz)时所需的计算资源呈指数级增长,想要完全计算出工程感兴趣的主要频段(0.1~20 Hz)相当困难,因此目前主要适用于低频(<1 Hz)地震动模拟.

随机方法(Beresnev and Atkinson, 1997; Boore, 2003)基于 ω^2 震源谱模型假设,将地震动表示为经滤波加窗后有限持时的随机过程,其振幅谱在平均意义符合给定的震源谱,相位谱为随机相位.随机方法有效规避了繁琐的物理建模过程,采用有限带

宽的随机白噪声以合成高频地震动成分,但是过度简化的物理表征(如均匀介质假设和点源或有限断层近似)导致低频段(<1.0 Hz)波形模拟出现显著偏差,难以捕捉长周期地震动特征.

宽频带混合模拟方法(Mai and Beroza, 2003; 巴振宁等, 2023; Ji *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023)通过结合两种方法的优势,在交叉频率(通常为1 Hz)处将低频确定性成分与高频随机成分相融合,既考虑低频结果的计算量和计算精度,又能够表现交叉频率两侧震源辐射模式的差异,弥补单一模拟方法在宽频带的不足,显著提升了地震动预测的精度和可靠性.随着大量强震动记录的不断累积,基于数据驱动的人工神经网络(ANN)在工程地震学中得到应用.例如,通过对历史强震记录进行系统训练,快速预测目标场地的峰值地震动(朱景宝等, 2025)和反应谱值(SA; Jiang *et al.*, 2024)等关键参数,为构建更加合理的地震动预测模型提供了技术支撑.近年来,Paolucci *et al.* (2018)提出融合低频地震动数值模拟和ANN的方法用于宽频带地震动时程模拟,该方法通过将低频地震动数值模拟计算得到的结果与基于ANN训练的欧洲近场强震数据库SIMBAD模型相结合,实现了对宽频带地震动峰值参数的合理预测.

本文基于中国大陆强震动“简牍”文件(Flatfile, 简称为CNF, <http://www.gmm-cn.com/data-flat-file/>),利用ANN对数据集进行训练,构建输入参数与短周期地震动强度参数之间非线性映射关系.所选取的输入参数包括矩震级(M_w)、震中距(R_{epi})、台站浅层地表30 m平均剪切波速度(V_{s30})、以及长周期地震动反应谱(SA)等,该模型弥补了数值模拟方法在高频地震动模拟中的不足.将此方法应用于2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震的宽频带数值模拟中,其中低频部分采用谱元法程序SPEED(Mazzieri *et al.*, 2013)进行计算,而高频部分利用ANN训练的参数模型进行预测.宽频带模拟结果与实际观测记录之间良好的一致性表明,数据驱动的ANN模型在确保低频地震动数值模拟结果可靠的前提下实现了对宽频带地震动的有效模拟.

1 融合 SEM 和 ANN 的宽频带地震动模拟

本文采用 SEM 与 ANN 方法相融合的宽频带地震动模拟方法,其中由 SPEED 程序生成的 SEM 模拟结果获得低频地震动时程,利用 CNF 进行训练的 ANN 模型获得高频地震动反应谱响应.根据 Sabetta *et al.* (2021) 方法生成的随机地震动时程并进行调幅,与低频地震动时程融合得到完整的宽频带地震动时程.

1.1 基于谱元法的地震动数值模拟

本文采用谱元法程序 SPEED (Mazzieri *et al.*, 2013),以三维弹性动力学控制方程为理论基础,利用谱元法的高精度数值计算,通过求解模型的位移场,详细呈现“震源破裂-介质传播-场地响应”全过程的波场特征.其中所涉及物理建模参数主要涵盖:震源参数(如点源矩张量或有限断层滑动分布)、介质物理参数(包括密度 ρ 、纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、品质因子 Q)及局部场地速度结构参数(等效剪切波速 V_{S30} 、非线性土层模型)等.

SPEED 程序优点主要体现在高精度波场模拟、低数值耗散和高计算效率.程序基于高阶谱元法的波场数值解具有超低数值频散特性,显著优于传统有限差分法;采用 METIS 域分解算法,支持非结构自适应网格,能够灵活应用于含有不规则地形起伏界面和非均匀介质结构建模计算;基于 OpenMPI 分布式并行运算配置,具有高性能且高效的并行运算效率.因此程序能够快速且精确展现震源破裂到地震波传播的完整物理过程,同时能够再现局部场地特征(如河谷、山脊)对地

震动传播及响应的影响,为地震波理论研究及地震工程风险性评估提供了可靠的模拟工具.

1.2 ANN 的高频地震动合成

基于 CNF 和部分 NGA 数据构建的高质量样本,训练了人工神经网络(ANN)模型,旨在探讨并建立 M_w 、 R_{epi} 、场地条件如 V_{S30} 以及长周期($T \geq T^*$)标准加速度反应谱与短周期($T < T^*$)标准加速度反应谱之间的潜在联系.其中 T^* 是高频随机成分与低频模拟的融合周期.在长周期范围($T \geq T^*$),反应谱的谱值取决于数值模拟的结果,代表低频成分的地震动特性;在短周期范围($T < T^*$),反应谱的谱值取决于 ANN 模型训练得到的非线性映射关系,代表高频随机性地震动特征. T^* 越小,预测精度有一定程度的提高,同时模型出现过拟合的风险也相应增加(Gatti *et al.*, 2018; Paolucci *et al.*, 2018).因此,综合考虑数值模拟的有效频率通常可达 1~3 Hz (Smerzini *et al.*, 2023),以及避免过拟合问题,最终选择融合周期 $T^* = 1$ s.

1.2.1 中国强震动记录 Flatfile 概述 CNF 汇集了我国数字强震动台网在 2007—2020 年间获取的 1 920 次地震中的 10 626 组三分量记录的地震事件、震源、台站、路径、场地和地震动强度指标六大类元数据的关键参数(郭文轩等, 2025; Wang *et al.*, 2025; 姚鑫鑫等, 2025).本文筛选出 M_w 大于 5.0 以及断层距 R_{rup} 小于 100 km 的地震动记录,包括 100 次地震的 2 667 条地震记录.不同震级地震事件的空间分布如图 1 所示,其中,中等强度震级的地震主要分布在西南地区 and 青海、新疆区域;同时呈现了 M_w 与 R_{rup} 的分布特征(红色圆形散点所示).CNF 数据库中多数地震事件集中在中小距离(20~100 km)以及小

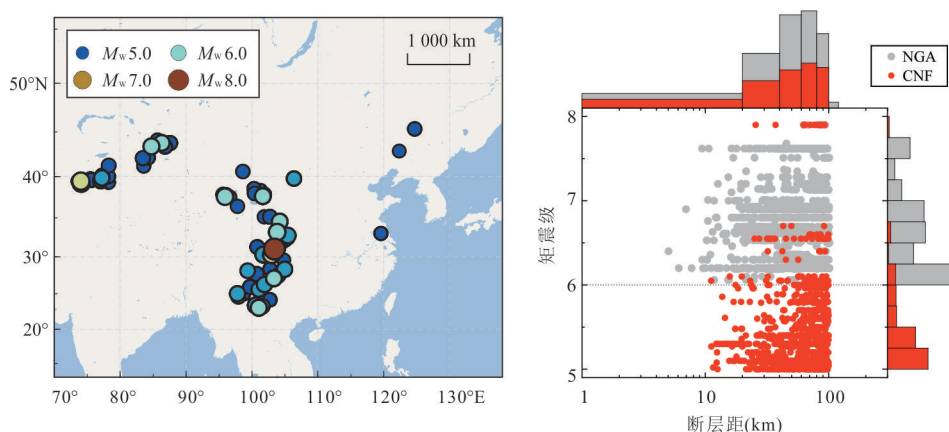


图 1 选取的 CNF 记录震中分布以及震级-距离分布

Fig.1 Epicenter locations of the selected strong motion flatfile of China and distribution between magnitude vs. rupture distance

于 6.5 震级范围内. 观察图 1 的边际直方图可知, CNF 在 5 级左右的中等震级事件占比较高, 同时在中场与中场区域呈现一定的集中趋势. 为扩展中强地震动记录的震级覆盖范围、提升训练的 ANN 模型的泛用性, 本研究选择美国下一代衰减关系项目数据库 NGA-West2 (Bozorgnia *et al.*, 2014; <https://peer.berkeley.edu/research/databases/databases>) 中 $M_w > 6$ 且 $R_{rup} < 100$ km 的 5 862 条强震动记录 (图 1 灰色散点所示), 从而保证模型对中强震级地震动特征的学习能力和预测精度. 二者结合得到的数据集涵盖了中-强地震震级, 且近场至中场距离范围方面更加丰富, 为后续研究提供更为全面的信息.

1.2.2 ANN 训练中国强震动记录 Flatfile 人工神经网络 (ANN) 是由神经元按照一定连接结构组合而成的网络. 本文选择前馈神经网络, 即各节点间的信息单向传递且不存在反馈回路. 图 2 所示的神经元结构展示了前馈神经网络的基本架构: 输入层、隐藏层以及输出层. 其中, 隐藏层采用 Sigmoid 型非线性激活函数的神经元, 输出层则采用线性激活函数的神经元, 不同层内神经元通过权重矩阵 W 和偏置项的求和连接, 形成层间传递机制并获得最终的输出结果. ANN 训练中利用 Levenberg-Marquardt 方法提供非线性拟合最小化的数值解, 实现了更稳健和高效的优化过程.

本文所用的数据库包括 3 个正交分量 (东西 EW 和南北 NS 和竖向 UD 分量) 的参数集合, 对参数进行对数化处理以减小变异性并保证训练结果稳定性. 其中输入层包含 16 个维度的地震动特征参数, 包括 M_w 、 R_{epi} 、 V_{S30} 、地震动峰值速度

PGV 和使用地震动峰值加速度 PGA 归一化处理得到 $T1 = [1.0:0.2:2, 2.5:0.5:5.0]$ 的长周期标准加速度反应谱 (SA/PGA). 输出层包含 12 个维度的参数, PGA 和 $T2 = [0.05, 0.1:0.1:0.7, 0.75, 0.8, 0.9]$ 的短周期标准加速度反应谱. 隐藏层神经元数量设置为 30, 在保证预测精度的同时可避免占用较高的计算资源. 两组权重 W 和偏置 b 的矩阵将在训练过程中迭代调整, 第一组对应输入层至隐藏层映射, 第二组对应隐藏层至输出层的映射, 最终获得 20 个版本的神经网络模型.

训练过程中使用早停法以提高神经网络泛化能力, 将原始数据随机划分为 3 个独立子集: 训练集 (TRN, 85%)、验证集 (VLD, 10%) 和测试集 (TST, 5%). 训练集作为基准数据, 用于计算梯度和动态更新网络权重及偏置. 验证集在训练过程中监控基于验证集的误差, 当验证误差在指定次数的迭代中值增加时, 训练停止, 用于实时监控模型泛化能力并预防过拟合现象. 测试集误差用于比较不同模型, 以判断数据集的划分是否合理. 图 3 展示了在不同输出周期条件下, ANN 训练模型与原始观测数据的反应谱比值的分布. 3 个数据集的误差数值整体上较为稳定, 均匀分布于零基线附近, 其中短周期处 ($T < 0.25$ s) 谱比误差较大, 可达 0.4~3.3, 其他周期内二者的误差更稳定, 为 0.6~1.7.

1.2.3 ANN 高频地震动生成 在综合考虑低频地震动数值模拟中涉及的 M_w 、 R_{epi} 、 V_{S30} 等参数, 及其获得的长周期加速度反应谱的基础上, 根据训练的 ANN 模型生成了 20 组短周期反应谱幅值集

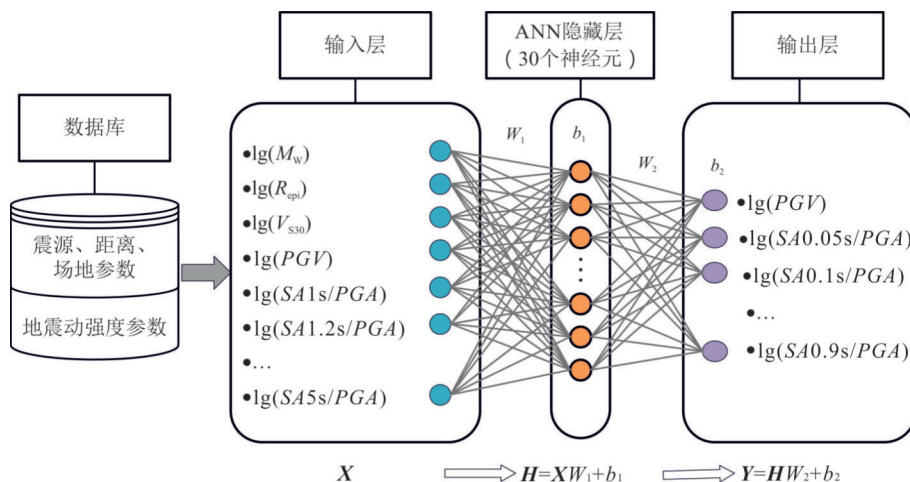


图 2 ANN 神经元结构示意图

Fig.2 Sketch of ANN neuronal structures

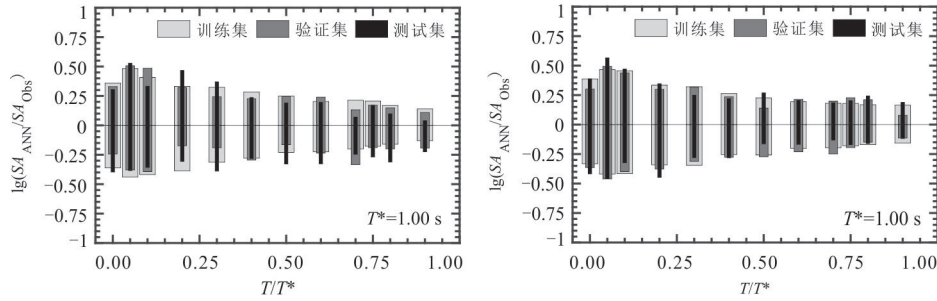


图3 东西向分量两个版本的ANN模型在归一化周期下的性能检验

Fig.3 Two of ANN performance in predicting the EW component of the CNF, in which SA_{ANN} denotes the response spectral ordinates predicted by the ANN and SA_{Obs} is the observed ones

SA_{ANN} 代表ANN模型预测得到的反应谱幅值, SA_{Obs} 表示训练前数据库内的观测值. 训练集、验证集和测试集使用不同灰度的颜色表示

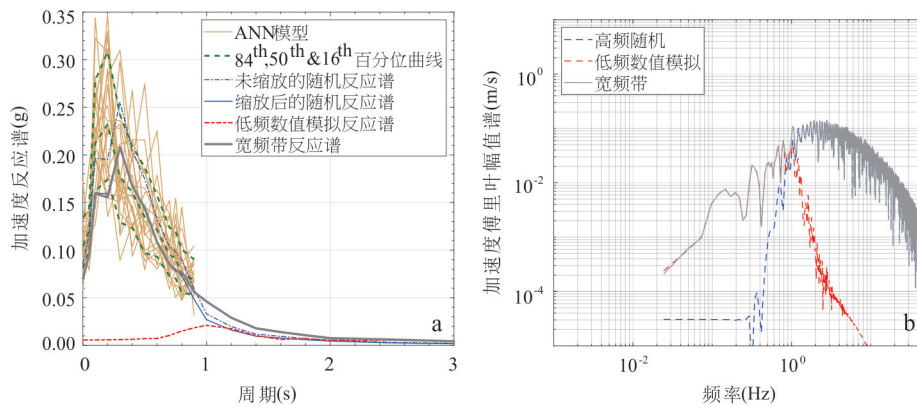


图4 宽频带、低频数值模拟和高频随机方法得到的加速度反应谱(a)和傅里叶幅值谱对比(b)

Fig.4 Comparison of spectral (a) and Fourier amplitude of acceleration (b) from broad-band, low frequency simulation, and high-frequency stochastic methods

合. 图4a中黄色实线表示20个ANN模型预测的结果, 反应谱的中位数、第16百分位和第84百分位反应谱则用绿色虚线表示. 其中, 选取反应谱集合的中位数曲线作为目标反应谱.

1.3 宽频带合成方法

为了从指定的目标宽频带反应谱中获得对应的宽频带时程, 参考美国国家标准与技术研究所NIST (Whittaker *et al.*, 2011)采用的谱匹配方法, 在保持相位不变的前提下, 通过在频域内调整或小波变换对加速度记录进行迭代缩放处理, 使其精确匹配目标反应谱. 使用低频波形直接进行谱匹配时, 其高频段会呈现数值噪声特征, 这与实际地震动的高频物理特性存在显著差异. 因此, 采用Sabetta *et al.* (2021)提出的一种半经验的非平稳随机模拟方法(称为SP2021), 基于S变换的时频工具, 隐式地调幅和调频以生成地震动的高频时程. SP2021方法根据给定 M_w 、 R_{epi} 、 V_{S30} 以及断层类型 TOF, 能够快速生成特定场地的若干条高频地震动合成记录.

首先, 基于 Sabetta *et al.* (2021)的方法生成了20组非平稳加速度时程, 并对这些随机时程施加截止频率为 $1/T^*$ 的高通滤波处理, 同时对数值模拟的加速度时程采用相同截止频率的低通滤波, 以确保时程在各自有效频带内的特性得以保留. 随后, 分别计算滤波后随机时程与数值模拟时程的加速度反应谱 SA_{stoch} 和 SA_{pbs} , 其中数值模拟时程的长周期反应谱 ($T \geq T^*$) 被用作ANN的输入, 以获得ANN输出的短周期 ($T < T^*$) 反应谱 SA_{ANNout} ; 同时, 通过将ANN短周期反应谱与数值模拟的长周期反应谱合并, 构建目标反应谱 SA_{target} .

针对宽频带模拟中高频随机成分与低频基于物理的模拟之间的协调问题, 参考 Tarbali and Bradley (2015) 给出随机反应谱 SA_{stoch} 与目标谱 SA_{target} (单位为 m/s^2) 的误差:

$$r_{\min} = \min_{SF} \left(\sum_T w(T) \left[\frac{\ln SA_{target}(T) - \ln (SF^\alpha \cdot SA_{stoch}(T))}{\sigma_{SA_{ANNout}}(T)} \right]^2 \right), \quad (1)$$

其中对于加速度谱, $\alpha=1$; w 对应不同周期的权重,

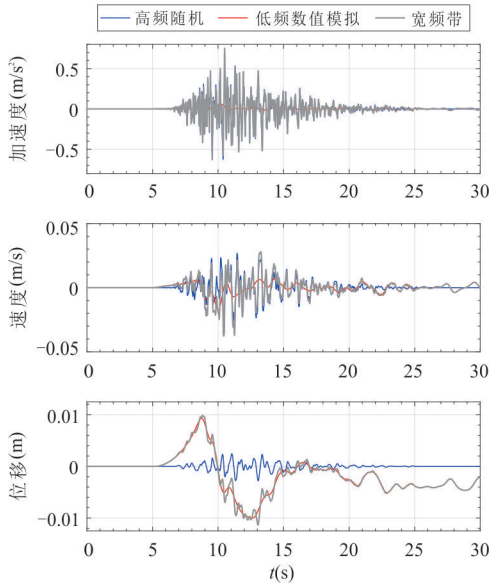


图5 宽频带、低频数值模拟和高频随机方法加速度、速度和位移时程的对比

Fig.5 Comparison of time histories of acceleration, velocity, and displacement from broad-band, low-frequency simulation, and high-frequency stochastic methods

$T=T^*$, $w=2$; $T<T^*$, $w=1$; $T\geq T^*$, $w=0$. 确定误差最小的最优调幅系数 SF , 并将该系数应用于随机时程的加速度、速度和位移的缩放处理(图4中蓝色实线所示)。

其次,计算低频记录与缩放后的高频随机记录的阿里亚斯强度(I_A)曲线,校准 I_A 达到总能量5%的时间 I_{A5} ,使高、低频成分的能量在时域内同步释放。

最后,通过时域叠加生成宽频带加速度时程和对应的宽频带反应谱(图4中灰色实线)。这种方法避免了高、低频反应谱合成时可能出现的谱值跳跃情况(Graves and Pitarka, 2010)。图6b通过傅里叶幅值谱(Fourier Amplitude Spectrum, FAS)对比,展现了低频记录、缩放后的随机高频记录和宽频带记录频域内的分布特征。低频段(0.1~1 Hz)内谱元法数值模拟记录的FAS呈现显著优势,高频段(>1 Hz)内,调整后的随机记录FAS占主导地位,且频谱曲线未出现由数值离散导致的非物理高频振荡,在宽频带内展现出良好的连续性和平滑过渡的特性。

时域内时程的对比如图5所示。宽频带合成记录的加速度时程中,PGA显著增大。示例记录PGA从低频记录的0.25 g增至宽频带记录的0.5 g。速度与位移时程仍由低频成分主导,低频数值模拟结果与宽频带合成记录的速度、位移时程几乎重合(差异<5%),表明高频随机成分的叠加未破坏低

频地震动基于弹性动力学方程求解的物理特性。

2 宽频带地震动模拟:漾濞 $M_s6.4$ 级地震为例

北京时间2021年5月21日21:48:34,中国云南省漾濞县发生 $M_s6.4$ 级地震。据中国地震台网中心发布(<https://www.ceic.ac.cn/history>),震中为(25.66°N, 99.87°E),震源深度约为10 km。震中位于云南省西部,地质上处于青藏高原东南边缘和印度板块交界处(图6),具有复杂的地震构造条件和地质结构(Fu *et al.*, 2023; 王一咪等, 2023)。图6给出了震前1天至震后3天内的前震和余震分布、主震和最大震级前震($M_s5.6$)和最大余震($M_s5.2$)的位置和对应的震源机制解(赵博等, 2022),以及震中附近强震动台站和烈度台站的位置。根据这次地震的震源破裂模型以及高精度地下速度结构模型,采用谱元法SPEED获得低频地震动数值模拟结果。基于前文介绍的宽频带模拟方法得到对应的宽频带地震动时程,对比低频与宽频带模拟结果在时、频域的地震动强度参数,并给出宽频带模拟应用到地震烈度图的分布。

2.1 研究区域和模型构建

谱元法地震动数值模拟的计算模型如图6a虚线所示,经纬度范围(25.31°~25.97°N, 99.52°~100.28°E),范围内涵盖15个地震烈度速报台站和2个强地震动观测台站。模型尺寸为80 km×80 km×26 km,使用美国国家航空航天局的SRTM计划提供的90 m精度的数字高程模型(DEM)(<https://eosps.nasa.gov/missions/shuttle-radar-topography-mission>),建立包含地形起伏的区域精细化三维速度结构模型。根据模拟频率范围确定网格大小,模型被划分为尺寸200~600 m的六面体单元网格,网格总数约120万,设置 $N=4$ 次Legendre多项式插值函数,获得共78 050 000个谱元节点。受复杂构造活动的影响,漾濞县的地下介质呈现速度结构的非均质性,综合全球地壳模型CRUST1.0(<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>)和云南地区平均速度结构模型(吴建平, 2004)构建了速度结构模型。其中深度 Z 小于2 500 m时,采用随 Z 连续变化的密度、 V_p 和 V_s 模型。 P 波与 S 波的品质因子 Q_p 、 Q_s 代表地震波的衰减特性,参考Olsen(2003)基岩场地 Q 模型的设置,选择 Q 值为对应波速的1/10,详见表1。为避免地震波传播到人工边界产生虚假反射波,计算区域外边界采用Clayton and Engquist(1977)基

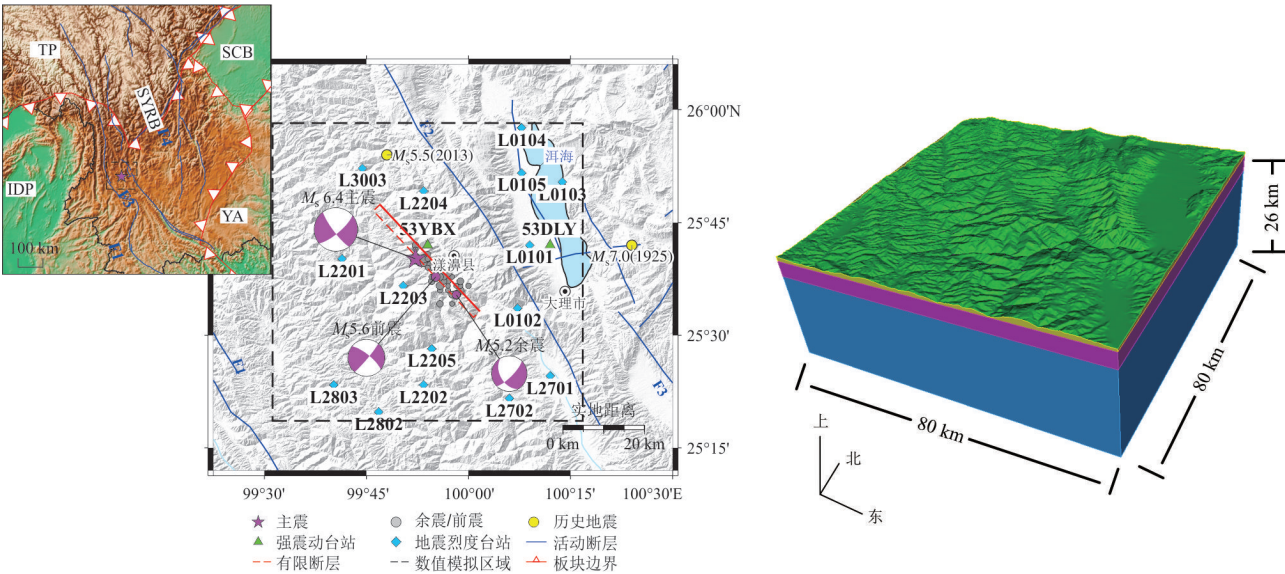


图6 漾濞地震模拟区域震中及区域内台站的位置分布和计算模型示意图

Fig.6 Epicenters and stations of the Yangbi earthquake series and the computational region

IDP.印度板块;SYRB.四川-云南菱形块体;SCB.四川盆地;YA.扬子块体;F1.澜沧江断层;F2.维西-乔后-巍山断层;F3.红河断层

表 1 速度结构模型

Table 1 Velocity structure model

层数	密度 (t/m ³)	V _P (m/s)	Q _P	V _S (m/s)	Q _S	厚度 H (m)	谱自由度
1	1.74×V _P ^{0.25}	1 330+42×Z ^{0.5}	$\frac{V_P}{10}$	700+42×Z ^{0.5}	$\frac{V_S}{10}$	2 500	4
2	2.67	4 850	485	2 800	280	1 500	4
3*	2.74	6 100	610	3 550	355	21 000	4

注:Z代表土层的深度,星号表示震源所在层.

于弹性波动方程旁轴近似理论提出的吸收边界条件,使地震波无反射的穿过人工边界.根据谱元稳定性条件,地震动数值模拟的频率范围 f_{\max} 可达2.5 Hz.

震后多位学者公布了漾濞 $M_s6.4$ 地震的震源破裂过程反演结果,本文选用朱音杰等(2022)利用有限断层反演方法获得的运动学震源模型(如图7所示).震源模型的参数详见表2所示,破裂长度和宽度分别为36 km和18 km(根据Somerville *et al.* (1999)裁剪反演破裂面),最大滑动量约为0.6 m,呈现东南方向的单向破裂特征,破裂面走向/倾角/滑动角分别为136°/83°/-192°.破裂速度为2.2 km/s,约为土层剪切波速的0.78倍,与Chen *et al.* (2022a)的分析一致.文中采用的运动学震源模型参数详见图7,为提高模拟结果的数值分辨率,分别对滑动量、子断层的上升时间 τ 和断层滑动角进行随机化处理(Liu *et al.*, 2006).将断层离散为尺寸为125 m×125 m的41 172个子断层,由子断层的破裂

表 2 运动学震源模型参数

Table 2 Parameters of the kinematic seismic source model

震源参数	
矩震级 M_w	6.1
地震矩 $M_0(N\cdot m)$	1.43×10^{18}
震中 (纬度, 经度)	(25.66°, 99.87°)
震源深度(km)	11.2
断层长度 $L(km)$	36
断层宽度 $W(km)$	18
走向角(°)	136
倾角(°)	83
上升时间 $\tau(s)$	0.38
子断层尺寸(m)	125
滑动角平均值(°)	-192
破裂速度 $V_R(km/s)$	2.2
断层滑动分布(m)	朱音杰等(2022), 见图7
震源时间函数	指数函数, 见图7

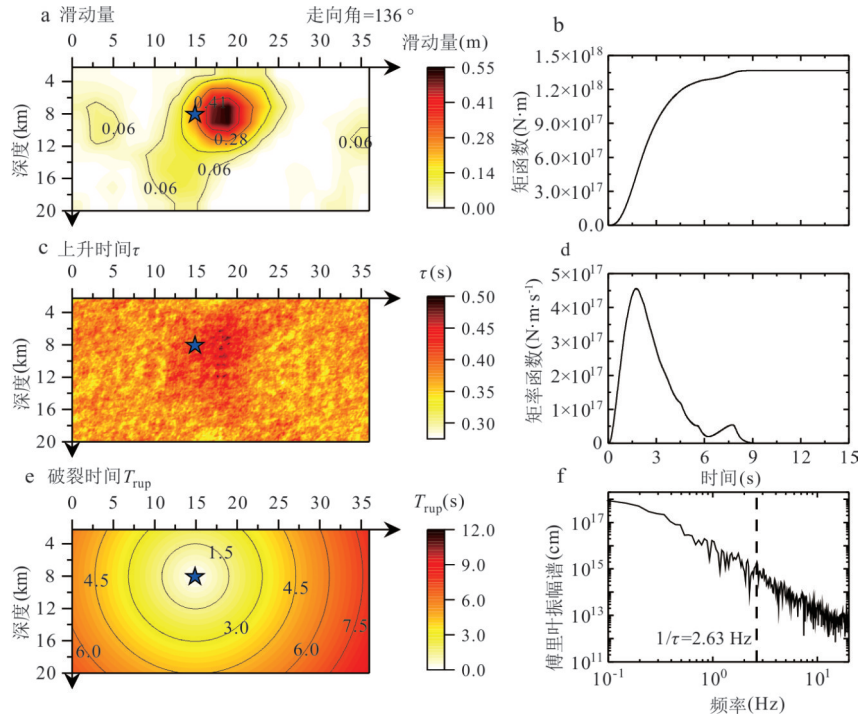


图 7 有限断层的(a)滑动量、(c)τ和(e)T_{rup}分布,以及断层的(b)矩函数MF、(d)矩率函数MRF和(f)MRF的FAS

Fig.7 Distribution of (a) slip, (c) randomized rise time (τ) and (e) rupture time (T_{rup}) on the fault plane, and (b) the total Moment Function (MF) on the fault plane, (d) the corresponding Moment Rate Function (MRF) and (f) the Fourier amplitude spectrum of the MRF

虚线对应的值为τ的倒数

时间 T_{rup} 分布可知断层内能量集中在震后约 7.5 s 内释放.图 7 展示了有限断层平面内 t 时刻的累积地震矩函数

$$MF(t) = \sum_i M_i S(t), \text{ 矩率函数 } MRF$$

(t) = MF(t) 和 MRF(t) 的 FAS 幅值谱,其中 M_i 是子断层 i 上释放的地震矩,子断层归一化的震源时间函数 S(t) 见公式 2:

$$S(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 - (1 + \frac{(t - T_{rup})}{(\tau/4)}) \cdot e^{-\frac{(t - T_{rup})}{(\tau/4)}} & 0 < t < \tau \end{cases} \quad (2)$$

2.2 宽频带地震动时程与观测记录对比

获得低频地震动时程后,采用第 1 节构建的 ANN 模型和随机方法获得高频地震动时程,最终得到计算模型内 17 个台站的地震动加速度宽频带时程、速度以及位移时程.限于篇幅,图 8 给出了不同震中距的 6 个台站的结果进行对比分析.图 8 展示了台站观测值与模拟值的位移、速度和加速度时程,以及速度时程的 FAS,图 a~f 根据震中距由小及大的顺序依次展示了台站 L2203、L2201、L3003、

L0101、L2803 和 L2702. 其中观测值的位移、速度与加速度时程均进行基线校正、记录波形首尾加余弦窗并补零,巴特沃斯非因果带通滤波处理以去除观测记录的噪声干扰,带通滤波的上下限频率根据观测记录的信噪比(SNRs)大于 3 判断,下限频率选择 0.05 Hz 以避免出现基线漂移,上限频率选为 25 Hz 以减少高频噪声影响.红色线模拟值的位移与速度时程采用与观测值相同的处理以便进行对比,模拟的加速度时程则给出了宽频带结果.与观测记录的波形相比,位移和速度时程的一致性证明了方法在中-低频模拟结果的可靠性,宽频带加速度时程的幅值一定程度上偏小,但地震动持时、峰值等特征展现出较好的一致性.

2.3 地震动强度指标对比

本节对比宽频带地震动的强度指标——峰值地震动(PGA、PGV、地震动峰值位移 PGD)和周期为 3 s 的反应谱(SA_{3s})——随断层投影距(R_{JB})的衰减,图 9 展示了强度指标在水平分量的几何平均值(GMH)和竖向分量(UD)的分布情况.为了更清晰地展示衰减规律,将距离分为 8 个对数均匀分布的分段,并计算了每个分段内地震动强度参数的对数

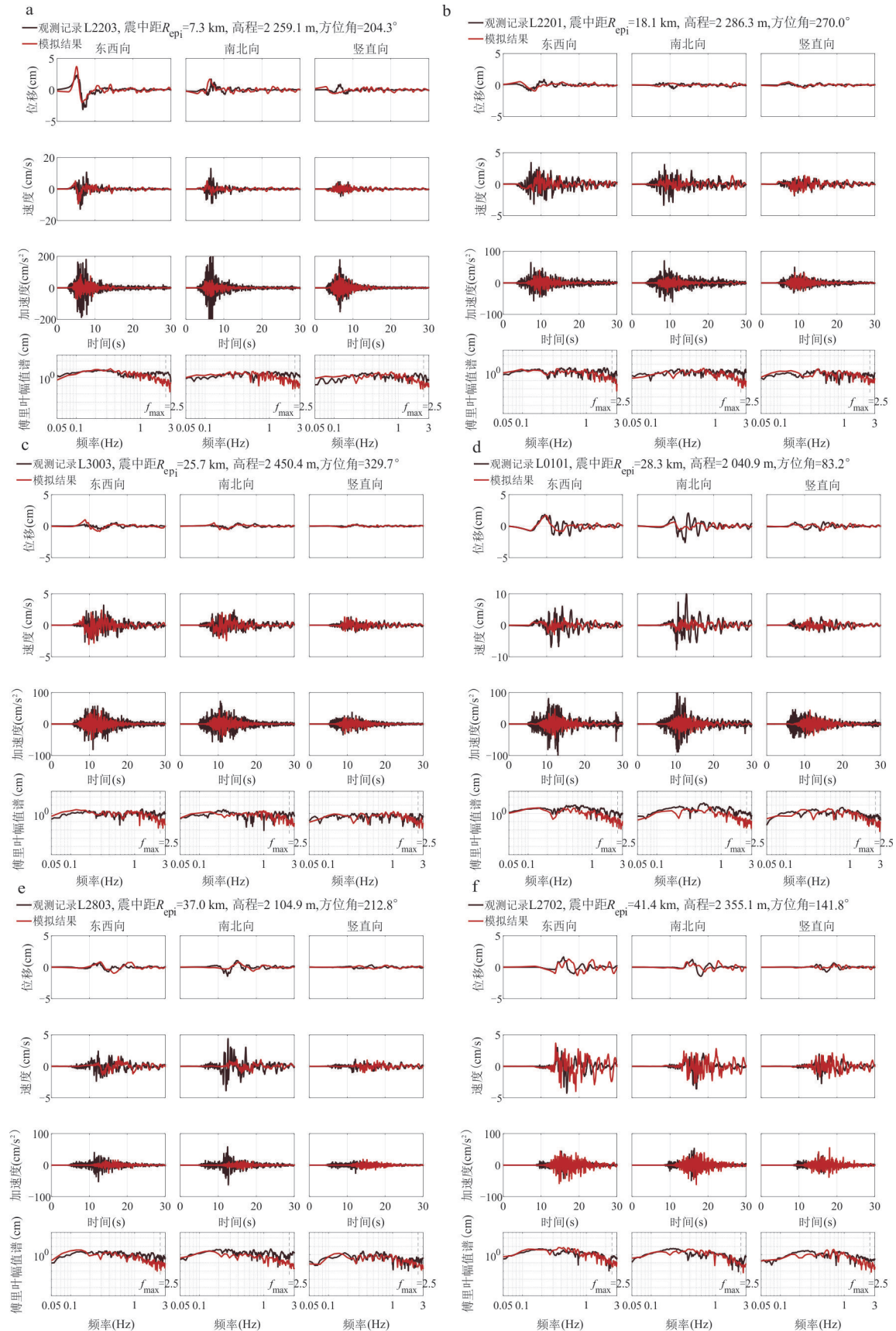


图8 六个台站模拟的位移、速度、加速度时程和速度时程的FAS与观测记录的对比

Fig.8 Comparison of simulated displacement, velocity, acceleration and Fourier amplitude spectra (FAS) of velocity and recordings at six stations

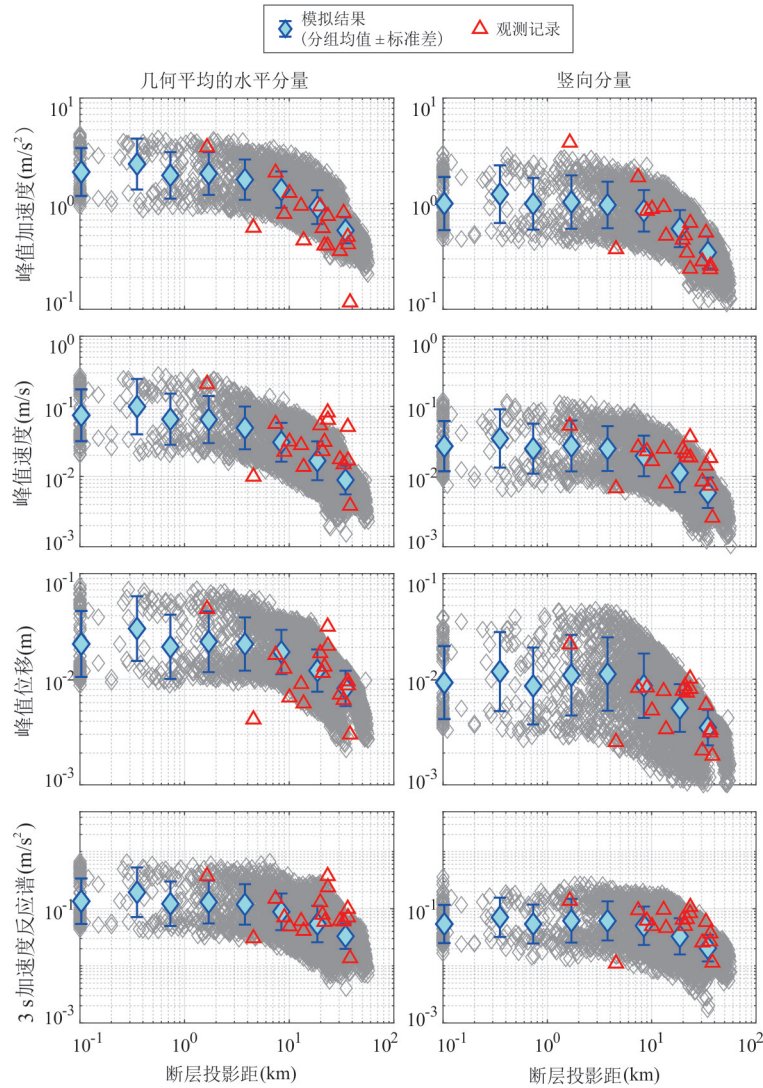
图9 模拟记录 PGA 、 PGV 、 PGD 和 SA_{3s} 随断层投影距的衰减

Fig.9 Comparison of simulated and observed PGA , PGV , PGD and spectral acceleration SA at 3 s in natural log units plotted as a function of R_{jb} for the GMH component and the UD component

平均值及其标准误差棒.与图中三角形所示的台站实际观测记录强度参数的分布相比,模拟的各个强度参数随距离的分布均具有较好的一致性,峰值参数和反应谱参数整体上十分接近.

2.4 宽频带模拟空间分布

地震烈度是描述地震对地表及建筑物破坏程度的重要指标,根据中国地震烈度表(GB/T 17742—2020)由三分量模拟记录得到合成加速度记录,据此计算模拟时程对应的仪器地震烈度,得到模拟地震烈度分布如图10所示.烈度图的长轴方向与震源破裂模型的走向(NW-SE向)高度一致,极震区位于断层破裂面的传播方向(东南向),这与滑动分布最大值的区域吻合,形状与走滑断层单侧破裂方向性效应理论一致(Somerville *et al.*, 1999),

对比 Chen *et al.*(2022b)基于台阵观测数据联合地震动衰减方程(GMPes)及场地修正技术得到的震后快速烈度评估结果可见,在极震区定位、长轴走向预测及次级烈度区形态上拥有较高的一致性,均呈现出受破裂方向性控制的非对称辐射模式.由于地表起伏地形的影响,模拟记录的地震烈度区呈现明显的不规则性.对比云南省地震局根据震区灾害调查和仪器烈度等制定并发布的地震烈度图(https://yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html),谱元法数值模拟得到地震动低频成分(<1 Hz),其烈度分布图显示极震区(烈度 \geq VIII度)范围明显小于蓝色曲线代表的实际观测值,而宽频带模拟通过融合低频与随机高频成分,显著提高了模拟烈度分布与实际烈度的一致性,为工程

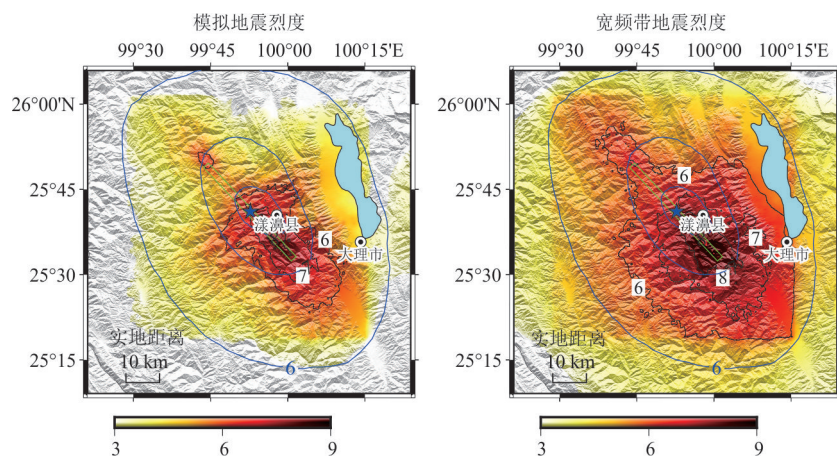


图 10 低频模拟地震烈度和宽频带地震烈度分布

Fig. 10 Distribution of intensity for low-frequency simulation and broadband simulation

抗震设计提供了更可靠的烈度预测依据。

3 结论与讨论

本文提出一种谱元法数值模拟与 ANN 方法相融合的宽频带地震动模拟方法,利用中国强震动记录 Flatfile 构建了 ANN 模型,获得了 16 维地震动特征参数的输入层(包含 M_w 、 R_{epi} 、 V_{s30} 与 $T \geq 1$ s 的长周期反应谱),与 12 维高频目标参数的输出层(PGA 及 $T < 1$ s 的短周期反应谱)的非线性映射关系.应用该模型,对谱元法模拟的低频地震动时程和随机方法得到的高频地震动时程进行时域和频域的优化匹配,最终合成宽频带地震动时程。

2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 地震的宽频带模拟结果验证了方法的合理性和适用性.在低频段,采用谱元法程序 SPEED 进行模拟,基于反演的有限断层模型及非均质的三维速度结构模型,计算了地表观测点的三分量低频地震动时程及频谱.随后,结合 ANN 模型和随机方法获得了对应的宽频带时程.与强震动观测记录的对比表明,宽频带模拟的时程波形和峰值地震动参数(如 PGA 、 PGV 、 PGD)与观测结果基本一致,基于宽频带模拟时程计算的仪器烈度与宏观地震烈度较为吻合,表明方法在区域地震动危险性评估的适用性。

ANN 模型的有效性依赖于训练数据库的质量和空间分布合理性.目前 CNF 数据库中缺少软土地表的近场强震动记录,针对此类地质条件的宽频带模拟可能产生系统偏差.不过,随着国家数字强地震动观测台网系统的不断发展,和区域密集台网(阵)作为补充性观测网络的规模化部署,中国强震

动记录 Flatfile 的数量快速增加,数据质量显著提升,其数据覆盖密度逐渐加强.后续的研究将构建分布更均衡的强震动记录数据库,并应用大数据人工智能工具,发展高时空分辨率、基于物理和数值预测模型的地震预测技术,进一步尝试解决数据驱动技术在地震动物理上的可解释性不足的问题。

致谢:感谢米兰理工大学 Roberto Paolucci 教授和 Manuela Vanini 博士的技术指导!感谢审稿人的专业意见与建议!

References

- Afanasiev, M., Boehm, C., van Driel, M., et al., 2019. Modular and Flexible Spectral-Element Waveform Modelling in Two and Three Dimensions. *Geophysical Journal International*, 216(3): 1675–1692. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy469>
- Ba, Z. N., Liu, Y., Zhao, J. X., et al., 2023. Near-Fault Broadband Ground-Motion Simulation of 2021 Yangbi $M6.4$ Earthquake: An Improved FK Method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 45(4): 709–719 (in Chinese with English abstract).
- Beresnev, I. A., Atkinson, G. M., 1997. Modeling Finite-Fault Radiation from the w_n Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(1): 67–84. <https://doi.org/10.1785/bssa0870010067>
- Boore, D. M., 2003. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. *Pure and Applied Geophysics*, 160 (3): 635–676. <https://doi.org/10.1007/PL00012553>
- Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Al Atik, L., et al., 2014. NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra*, 30(3): 973–987. <https://doi.org/10.1193/072113eqs209m>

- Chen, J. L., Hao, J. L., Wang, Z., et al., 2022a. The 21 May 2021 Mw 6.1 Yangbi Earthquake—A Unilateral Rupture Event with Conjugately Distributed Aftershocks. *Seismological Research Letters*, 93(3): 1382—1399. <https://doi.org/10.1785/0220210241>
- Chen, W. K., Wang, D., Zhang, C., et al., 2022b. Estimating Seismic Intensity Maps of the 2021 Mw 7.3 Madoi, Qinghai and Mw 6.1 Yangbi, Yunnan, China Earthquakes. *Journal of Earth Science*, 33(4): 839—846. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1586-9>
- Clayton, R., Engquist, B., 1977. Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(6): 1529—1540. <https://doi.org/10.1785/bssa0670061529>
- Crempien, J. G. F., Archuleta, R. J., 2015. UCSB Method for Simulation of Broadband Ground Motion from Kinematic Earthquake Sources. *Seismological Research Letters*, 86(1): 61—67. <https://doi.org/10.1785/0220140103>
- Fu, G. Y., Wang, Z. Y., Liu, J. S., et al., 2023. Lithospheric Equilibrium and Anisotropy around the 2021 Yangbi Ms 6.4 Earthquake in Yunnan, China. *Journal of Earth Science*, 34(4): 1165—1175. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1607-3>
- Gatti, F., Touhami, S., Lopez-Caballero, F., et al., 2018. Broad-Band 3-D Earthquake Simulation at Nuclear Site by an All-Embracing Source-to-Structure Approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115: 263—280. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.028>
- 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. <https://doi.org/10.1785/0120100057>
- 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. <https://doi.org/10.1785/0120160088>
- Guo, W. X., Yao, X. X., Liu, Y., et al., 2025. Review of Research on Strong-Motion Record Flatfile. *World Earthquake Engineering*, 41(1): 14—25 (in Chinese with English abstract).
- Ji, Z. W., Li, Z. C., Sun, J. Z., et al., 2023. Estimation of Broadband Ground Motion Characteristics Considering Source Parameter Uncertainty and Undetermined Site Condition in Densely Populated Areas of Pingwu. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1081542. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1081542>
- Jiang, Q. F., Rong, M. S., Wei, W., et al., 2024. A Quantitative Seismic Topographic Effect Prediction Method Based upon BP Neural Network Algorithm and FEM Simulation. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1355—1366. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1795-x>
- Liu, P., Archuleta, R. J., Hartzell, S. H., 2006. Prediction of Broadband Ground-Motion Time Histories: Hybrid Low/High-Frequency Method with Correlated Random Source Parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2118—2130. <https://doi.org/10.1785/0120060036>
- Mai, P. M., Beroza, G. C., 2003. A Hybrid Method for Calculating Near-Source, Broadband Seismograms: Application to Strong Motion Prediction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137(1—4): 183—199. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00014-1)
- Mazzieri, I., Stupazzini, M., Guidotti, R., et al., 2013. SPEED: SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin: A Non-Conforming Approach for 3D Multi-Scale Problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 95(12): 991—1010. <https://doi.org/10.1002/nme.4532>
- Olsen, K. B., 2003. Estimation of Q for Long-Period (>2 Sec) Waves in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2): 627—638. <https://doi.org/10.1785/0120020135>
- Olson, M. H., Primps, S. B., 1984. Working at Home with Computers: Work and Nonwork Issues. *Journal of Social Issues*, 40(3): 97—112. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1984.tb00194.x>
- Paolucci, R., Mazzieri, I., Smerzini, C., 2015. Anatomy of Strong Ground Motion: Near-Source Records and Three-Dimensional Physics-Based Numerical Simulations of the M_w 6.0 2012 May 29 Po Plain Earthquake, Italy. *Geophysical Journal International*, 203(3): 2001—2020. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv405>
- Paolucci, R., Gatti, F., Infantino, M., et al., 2018. Broadband Ground Motions from 3D Physics-Based Numerical Simulations Using Artificial Neural Networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A): 1272—1286. <https://doi.org/10.1785/0120170293>
- Sabetta, F., Pugliese, A., Fiorentino, G., et al., 2021. Simulation of Non-Stationary Stochastic Ground Motions Based on Recent Italian Earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(9): 3287—3315. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01077-1>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10915-011-9531-1>
- Smerzini, C., Vanini, M., Paolucci, R., et al., 2023. Regional Physics - Based Simulation of Ground Motion within the Rhne Valley, France, during the M_w 4.9 2019 Le Teil Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(4): 1747–1774. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01591-w>
- 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. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.59>
- Spudich, P., Xu, L. S., 2003. 85.14-Software for Calculating Earthquake Ground Motions from Finite Faults in Vertically Varying Media. In: Lee, W. H K., Kanamori, H., Jennings, P. C., et al., eds., International Geophysics, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Elsevier, Amsterdam, 1633–1634. [https://doi.org/10.1016/s0074-6142\(03\)80293-0](https://doi.org/10.1016/s0074-6142(03)80293-0)
- Tarbali, K., Bradley, B. A., 2015. Ground Motion Selection for Scenario Ruptures Using the Generalised Conditional Intensity Measure (GCIM) Method. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(10): 1601–1621. <https://doi.org/10.1002/eqe.2546>
- Wang, H. W., Li, H. R., Ren, Y. F., et al., 2025. A Comprehensive Earthquake Source Database for China's Strong-Motion Flatfile (2007–2020). *Earthquake Research Advances*, 5(2): 100346. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2024.100346>
- Wang, X. C., Wang, J. T., Zhang, C. H., 2023. Deterministic Full - Scenario Analysis for Maximum Credible Earthquake Hazards. *Nature Communications*, 14: 6600. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42410-3>
- Wang, Y. M., Xu, L. H., Yang, H. Y., et al., 2023. Deep Deformation Mechanism and Active Tectonic along the Weixi-Qiaohou Fault Zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(3): 1070–1085 (in Chinese with English abstract).
- Whittaker, A., Atkinson, G., Baker, J., et al., 2011. Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response - History Analyses, Grant/Contract Reports (NISTGCR). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915482
- Wu, J. P., Ming, Y. H., Wang, C. Y., 2004. Source Mechanism of Small-to-Moderate Earthquakes and Tectonic Stress Field in Yunnan Province. *Acta Seismologica Sinica*, 26(5): 457–465 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X. X., Ren, Y. F., Kishida, T., et al., 2025. A Post Processing Method of Strong Motion Record Filtering Satisfying the Compatibility. *Engineering Mechanics*, 42(1): 152–163 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Gao, Y., Ma, Y. L., 2022. Relocations, Focal Mechanisms and Stress Inversion of the May 21th 2021 Yangbi M_s 6.4 Earthquake Sequence in Yunnan, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(3): 1006–1020 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. B., Liu, H. Y., Luan, S. C., et al., 2025. Prediction of On - Site Peak Ground Motion Based on Machine Learning and Transfer Learning. *Earth Science*, 50(5): 1842–1860 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. J., Luo, Y., Zhao, L., et al., 2022. Rupture Process of Yunnan Yangbi M_s 6.4 Earthquake Constrained by Regional Broadband Seismograms. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(3): 1021–1031 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 巴振宁, 刘悦, 赵靖轩, 等, 2023. 2021年漾濞 6.4 级近断层宽频地震动模拟: 一种改进的 FK 方法. *岩土工程学报*, 45(4): 709–719.
- 郭文轩, 姚鑫鑫, 刘也, 等, 2025. 强震动记录 Flatfile 研究综述. *世界地震工程*, 41(1): 14–25.
- 王一咪, 徐龙辉, 杨海燕, 等, 2023. 维西-乔后断裂带的深部变形机制与构造活动特征. *地球物理学报*, 66(3): 1070–1085.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛, 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究. *地震学报*, 26(5): 457–465.
- 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 等, 2025. 满足数据同一性的强震动记录去噪滤波后处理输出方法. *工程力学*, 42(1): 152–163.
- 赵博, 高原, 马延路, 2022. 2021年5月21日云南漾濞 M_s 6.4 地震序列重新定位、震源机制及应力场反演. *地球物理学报*, 65(3): 1006–1020.
- 朱景宝, 刘赫奕, 栾世成, 等, 2025. 基于机器学习和迁移学习的现地地震动峰值预测. *地球科学*, 50(5): 1842–1860.
- 朱音杰, 罗艳, 赵里, 等, 2022. 利用区域宽频地震数据反演 2021年5月云南漾濞 M_s 6.4 地震震源破裂过程. *地球物理学报*, 65(3): 1021–1031.