王俊杰,王宏伟,强生银,等.考虑最危险情景的临断层铁路站房工程地震动输入[J].地震工程学报,2026,48(6):1399-1409.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250303001

Wang Junjie, Wang Hongwei, Qiang Shengyin, et al. Seismic ground motion input for near-fault railway station buildings considering the worst-case earthquake scenario[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1399-1409. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250303001

考虑最危险情景的临断层铁路站房工程地震动输入

王俊杰[1,2], 王宏伟[1,2], 强生银[1,2], 任叶飞[1,2], 温瑞智[1,2]

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程震动重点实验室,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:针对我国西南地区重大铁路交通枢纽抗震设计面临的地震动输入难题,采用震源运动学随机破裂模型,结合三维随机有限断层地震动模拟方法,建立一套可考虑极端危险震源场景的近断层铁路站房工程地震动输入系统化构建方法。选取川滇高地震风险区鲜水河断裂带南东段作为研究实例,划定多组最危险震源情景,构建涵盖不同断裂分段、不同破裂起裂位置的随机震源破裂模型,数值模拟铁路站房及近断层各场点三分量加速度时程;依托仪器地震烈度绘制区域地震影响场,从破裂方向性效应产生的速度脉冲特征参数空间分布规律、断层上下盘地震动峰值衰减差异、震源破裂随机特性带来的近断层地震动峰值离散不确定性三个维度,验证模拟时程具备典型近断层地震动特征。按照近场强震最不利工况筛选准则,提取控制地震动记录,得到场址对应的最不利地震动输入,确保输入波形具备强震危险性代表性。所提方法可为近断层区域重大交通枢纽工程抗震设计提供可靠的最不利地震动输入方案。

关键词:临断层铁路站房;最危险地震情景;震源破裂模型;地震动模拟;地震动输入

中图分类号:P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1399-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250303001

Seismic ground motion input for near-fault railway station buildings considering the worst-case earthquake scenario

Wang Junjie[1,2], Wang Hongwei[1,2], Qiang Shengyin[1,2], Ren Yefei[1,2], Wen Ruizhi[1,2]

(*1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;*
2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: To address the challenge of constructing seismic ground motion inputs for the seismic

收稿日期:2025-03-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3007402)

第一作者简介:王俊杰(2000-),男,硕士研究生,主要从事地震动模拟相关工作。E-mail: iem21437@163.com。

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

design of major railway transportation hubs in Southwest China, this study proposes a systematic method for generating near-fault ground motion inputs under the most unfavorable scenario. The proposed method is based on stochastic kinematic source rupture models and three-dimensional ground motion simulations. Taking the southeastern segment of the Xianshuihe fault zone in the Sichuan - Yunnan region, which exhibits high seismic hazard, as an example, we define the most unfavorable scenario and construct stochastic rupture models for different fault segments with varying rupture initiation points. Three-component acceleration time histories are simulated for the railway station building and surrounding sites, and the seismic impact field is evaluated using instrumental seismic intensity metrics. The near-fault characteristics of the simulated ground motions are validated from three perspectives: the spatial distribution of velocity pulse characteristics induced by rupture directivity effects, the differences in peak ground motion attenuation between the hanging wall and the footwall, and the uncertainty in near-fault peak ground motions caused by the stochastic rupture process. Following the principle of selecting the most unfavorable near-field earthquake scenario, the critical ground motion input for the station site is identified, ensuring that the selected input is representativeness. This study provides a reliable approach for obtaining unfavorable seismic ground motion inputs for the seismic design of critical transportation buildings in near-fault regions.

Keywords: near-fault railway station building; worst-case earthquake scenario; source rupture model; ground motion simulation; ground motion input

0 引言

我国西南地区地处青藏高原东缘,受印度板块与欧亚板块碰撞作用控制,区内发育鲜水河断裂带、龙门山断裂带等十余条大型活动断层,地震活动频发、历史强震震级高、活动断裂分布密集。随着川藏铁路等国家重大工程持续推进,沿线铁路站房等交通枢纽受地形条件制约,不可避免选址修建于距断层极近的近断层区域。受破裂方向性效应、滑冲效应等复杂震源机制作用,近断层区域地震动空间异质性显著,震害效应突出,对工程地震动输入提出了更为严苛的抗震设防要求。

工程地震动输入一般通过实测记录选波与人工合成地震动两类手段获取。现行《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》[1]第 5.1.2 条规定:采用时程分析法时,应依据建筑场地类别与设计地震分组,选取实际强震记录及人工模拟加速度时程。《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB 50909—2014)》[2]第5.4.1条指出:构建地震动输入时程宜优先采用地震构造、场地条件与目标场地相近的实测强震动记录,尤其本地观测记录;亦可采用人工合成手段生成地震动时程曲线,且合成波形应尽可能还原真实地震动的频谱与相位特征。

选波即从现有强震记录数据库中,结合工程场地条件与结构设计需求,筛选适配的历史地震记录作为场址地震动输入。主流选波方式分为三类:(1)依据震级、震中距、场地类别、持时等地震参数,选取参数匹配度高的地震记录[3];(2)以各类目标反应谱为筛选依据,挑选反应谱与目标谱吻合度较高的观测记录,涵盖规范设计加速度谱、瞬时谱、条件均值反应谱、位移目标谱等[4];(3)基于与结构地震响应关联紧密的地震动强度指标选波,包括峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、峰值速度(Peak Ground Velocity, PGV)、峰值位移(Peak Ground Displacement, PGD)等[5]。

但采用现有选波方法开展近断层场地大震工况抗震设计时存在明显局限。一方面,现有强震记录覆盖场景不完善[6],满足目标震级、断层距、场地类别等参数条件的观测样本十分稀缺,7.0级以上近场强震记录尤为匮乏;另一方面,强震地壳应力积累周期漫长,重现期普遍达百年以上,震源破裂过程受地质条件、力学机制共同控制,机理复杂。纵观全球百年强震观测资料,现有实测数据难以完整还原震源破裂全过程,无法覆盖全部潜在破裂模式[7]。由此可见,传统选波手段难以充分体现大震近场地震动固有的随机性与不确定性。

现有人工合成地震动技术多以匹配目标设计谱为核心,通过谱拟合完成时程重构。例如,Shino-

zuka 等[8]借助傅里叶逆变换生成非平稳地震动，实现幅值谱与目标设计谱匹配；Mukherjee 等[9]利用小波包分解提取天然地震动相位特征，重构相位以拟合目标谱；Bouckovalas 等[10]采用均匀随机相位构建地震动，通过迭代修正幅值谱满足谱匹配要求；张翠然等[11]基于功率谱与渐进谱模型开展随机模拟，假定相位或相位差服从特定概率分布，对初始地震动时程优化处理，使其反应谱在设定精度下逼近目标谱。上述方法虽可保证合成波形与目标谱兼容，却无法还原大震作用下震源破裂过程、地震波传播路径衰减带来的近场地震动差异，缺失对真实震源特征的刻画。而铁路站房多为低矮建筑，对高频地震动响应更为敏感，仅依托设计谱合成的地震动难以满足其高频地震动输入需求。

针对传统方法无法完整表征大震近断层地震动特征的短板，本文提出一套可考虑极端危险震源情景的近断层铁路站房地震动输入系统化构建方法，精准还原大震近场响应规律与震源破裂演化过程。以鲜水河断裂带南东段沿线铁路站房为研究对象，结合区域地质构造建立鲜水河主干断裂带震源随机破裂模型，采用三维随机有限断层地震动模拟方法生成目标场点三分量加速度时程；系统剖析模拟波形的近断层特有地震动效应，包括方向性效应、速度脉冲特征等，再依据近场强震最不利工况筛选准则确定最终输入时程。该方法输出的地震动时程更贴合低矮铁路站房对高频地震动的响应需求，可为近断层区域铁路站房抗震设计提供与区域地震构造背景高度匹配的工程地震动输入。

1　临断层工程地震动输入方法

本文针对近断层铁路站房工程，提出一套考虑最危险地震情景的地震动输入构建方法，可为站房抗震设计提供适配的最不利地震动输入。整套方法涵盖最危险地震情景设定、震源破裂过程模拟、地震动场生成三大核心技术环节：通过划定最危险地震情景，确定目标断裂带上能够发生最大震级地震的震源破裂面空间范围；依托震源破裂模拟刻画随机破裂演化过程，还原滑动量、上升时间、滑动角的时空分布特征；地震动场生成环节综合考量震源、传播路径与场地条件的耦合作用，同步输出水平向及竖向地震动加速度时程。

1.1　最危险地震情景定义和设定方法

从地震发震机制与地震动模拟结果双重维度界定最危险场景：以目标断裂潜在最大震级为基础，综合选取地震动传播最优的震源位置、结构破坏效应最显著的破裂面参数，通过震源破裂模型与模拟结果双重筛选，得到场址最不利地震动输入。具体设定流程如下：

首先，确定最危险场景的震级基准，取目标断裂潜在最大矩震级作为模拟震级。结合工程场地地理坐标，识别对场地起控制作用的活动断裂及其地表迹线；依据该断裂历史强震最大震级、破裂尺度与震级经验关系式、区域应力能量积累释放规律，判定断层潜在最大发震震级。

其次，约束破裂面相对工程场地的空间几何参数，控制指标包含震源深度、破裂面深部延展区间、是否贯通地表等。近断层大震地震动由震源破裂过程主导，起裂点相对场地的距离并非控制地震动水平的核心要素，破裂面与高滑动区相对于场地的空间分布才是关键影响因素，因此假定起裂点可沿目标断裂任意布设。依据摩擦强度随滑动速率的演化规律，地壳可划分为上部脆性滑动弱化层与下部延性滑动强化层，强震均孕育于脆性地壳层。结合区域地壳厚度划定脆性层深度区间[12]，辅以历史地震精定位数据与能量累积特征，确定起裂点埋深并约束破裂面底部边界。针对每一组起裂位置，参考目标断裂已有构造研究成果（断层产状、运动学参数）限定断裂倾向、倾角与滑动角取值范围；依托破裂尺度与地震矩、矩震级的统计经验关系，确定破裂面走向长度 L 与倾向宽度 W。破裂方向性效应由起裂点在破裂面内的走向、倾向相对位置体现，允许破裂面沿断层走向形成多组延展尺度，同时约束破裂面沿倾向贯通至地表。

最后，基于模拟时程筛选最不利地震动。构建多断裂分段、多起裂位置的随机震源破裂模型，生成滑动分布存在差异的多组破裂工况；优先选取高滑动区临近铁路站房的工况开展三维地震动模拟，再按照近场地震最不利判别准则对模拟时程二次筛选，最终得到场址控制性地震动输入，还原工程结构可能遭遇的极端地震动作用。

1.2　震源破裂过程模拟方法

确定最危险地震情景后，需进一步开展震源破裂过程模拟，获取滑动量时空分布、上升时间与滑动角空间分布特征。通常假定滑动量空间分布满足波数域值 k^2 谱随机衰减分布规律[13]。

首先，假定破裂面初始滑动量呈均匀空间分

布，再于破裂面两侧及底部边缘一定范围施加余弦边瓣窗函数，使边缘区域滑动量平缓衰减至0。利用二维傅里叶变换将初始滑动转换为波数域的二维幅值谱$D(k_s, k_d)$，采用波数滤波函数（$F=[1+(c_s^2k_s^2+c_d^2k_d^2)^N]^{-1}$，$k_s$和$k_d$分别为沿走向和沿倾向的波数分量，$c_s^{-1}$和$c_d^{-1}$表示拐角波数）对其滤波，叠加波数滤波函数（1-$F$）滤波的高波数随机部分$S(k_s, k_d)$的表达式为：

$$S(k_s,k_d)=D(0,0)A(k_s,k_d)e^{i\theta}/(a_s a_d)^{1/2} \quad (1)$$

假设θ为区间$[-\pi,\pi]$范围内均匀分布的随机数，给出调整后的波数域二维幅值谱$U(k_s, k_d)$，使修正后的波数衰减特性满足Mai等[14]提出的冯卡门相关函数，即：

$$A(k_s,k_d)=\left[a_s a_d/\left(1+K^2\right)^{1.75}\right] \quad (2)$$

式中：$K=(a_s^2k_s^2+a_d^2k_d^2)^{1/2}$，为归一化波数；$a_s$为沿走向的相关长度，满足$\lg a_s=0.5M_W-2.5$；$a_d$为沿倾向的相关长度，满足$\lg a_d=M_W/3-1.5$。将$U(k_s, k_d)$通过二维傅里叶逆变换，得到滑动量空间分布；随后开展滑动幅值调幅处理，使滑动量均值与由Somerville等[15]提出的平均位错（D）-矩震级经验关系式计算得到的平均滑动量D_{Avg}保持一致，同时控制滑动量标准差为$0.85D_{Avg}$。

采用与滑动量空间分布一致的方法模拟滑动角λ的空间分布；开展滑动角幅值调整时，其空间分布标准差取15°。破裂时间与上升时间分别引入和滑动量空间分布相关的随机扰动n_p'和n_q'，两类随机扰动在二维波数域内的幅值谱统一表达为：

$$N'=\eta U+\left(1+\eta^2\right)^{1/2}N \quad (3)$$

式中：N表示高斯随机分布在二维波数域幅值谱，破裂时间和上升时间分别服从[0,1]和[0.85,1.0]高斯分布；η表示与滑动分布之间的相关系数，变化范围为0～1。

1.3 地震动场快速模拟方法

王宏伟等[16]提出可实现三维地震动模拟的随机有限断层法，该方法已先后应用于2020年新疆伽师M_S6.4地震、2021年云南漾濞M_S6.4地震[17]、2021年青海玛多M_S7.4地震[18]、2023年土耳其M_W7.8与M_W7.6双震事件[19]的地震动场模拟。该方法耦合震源、传播路径与局部场地的区域地震动经验模型及水平成层速度结构模型，依托随机有限断层理论可快速输出三维地震动加速度时程。本文采用该方法计算设定地震下工程场地的加速度时程，完成模拟后筛选最不利地震动时程作为结构抗震设计输入[20]。

2 鲜水河断裂带南东段设定地震模拟结果

本文以鲜水河断裂带南东段近断层铁路站房为工程实例，构建兼顾最危险发震情景的场址最不利地震动输入。鲜水河断裂带南东段发育色拉哈主干断裂，以及雅拉河、折多塘两条分支断裂，断裂体系呈平行展布，区域地质构造复杂，地震活动强度大、发震频次高，断层运动以左旋走滑为主。断层几何参数取值综合现有研究成果确定：刘冠中等[21]通过野外地质调查查明，该断裂南东段主体倾向NE，局部段倾向SW；赵静等[22]融合地质勘察与地震序列重定位多源数据，得到鲜水河断裂带南东段统一构造参数，即倾向NE、倾角75°，本研究采用该组参数开展建模。结合历史地震目录[23]与区域未来地震危险性评价成果[24]，分别设定色拉哈段、雅拉河段、折多塘段目标矩震级为M_W7.5、M_W7.1、M_W7.0。依据2001—2014年区域地震序列统计资料[25]，震源深度取10 km，该数值位于实测震源深度优势分布区间6～11 km内，且接近区间均值9 km。

依据Wells等[26]建立的断层几何参数经验关系式，确定各断裂段破裂面尺寸：色拉哈段120 km（长）×18 km（宽）、雅拉河段68.2 km（长）×14 km（宽）、折多塘段27 km（长）×16 km（宽）。三维破裂模型构建时，沿色拉哈段、雅拉河段、折多塘段依次布设3个、3个、1个起裂点；针对每一处起裂点开展10组震源随机破裂模拟。破裂面平均滑动量由地震矩公式$M_0=\mu DA$（其中M_0为地震矩，μ为剪切模量，A为破裂面面积）计算得到。各分段设定地震不同起裂点对应的破裂面形态及单组破裂滑动分布如图1所示；最终共生成70组最危险情景设定地震随机破裂模型，详细参数如表1所列。

采用三维地震动随机有限断层模拟方法计算设定地震近场范围内的地震动加速度时程。依据Denolle等[27]推导的均匀破裂面地震应力降计算公式，色拉哈段、雅拉河段、折多塘段设定地震的应力降依次取13.21 MPa、9.78 MPa、15.30 MPa；传播路径参数选用Xu等[28]针对川滇区域提出的几何扩散模型与S波品质因子$Q_S=180f^{0.5}$；地震动路径持时模型采用王宏伟等[29]利用四川地区部分地震的强震动记录构建的区域经验模型。地壳放大模型选用美国国家地震减灾计划B/C场地分界对应的经

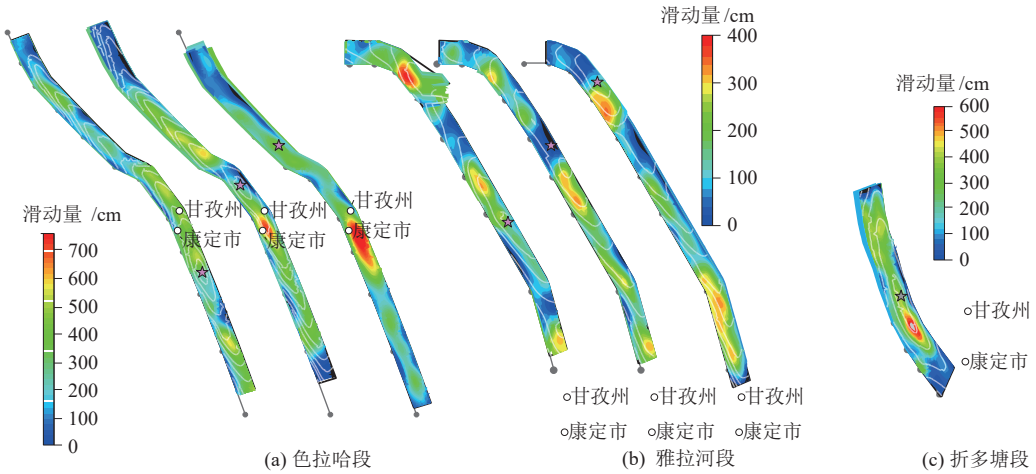


图 1　各断裂段设定地震破裂面及滑动分布

Fig. 1　Rupture surfaces and slip distributions of scenario earthquakes for each fault segment

表 1　震源破裂模型设定参数

Table 1　Parameters of seismic source rupture models

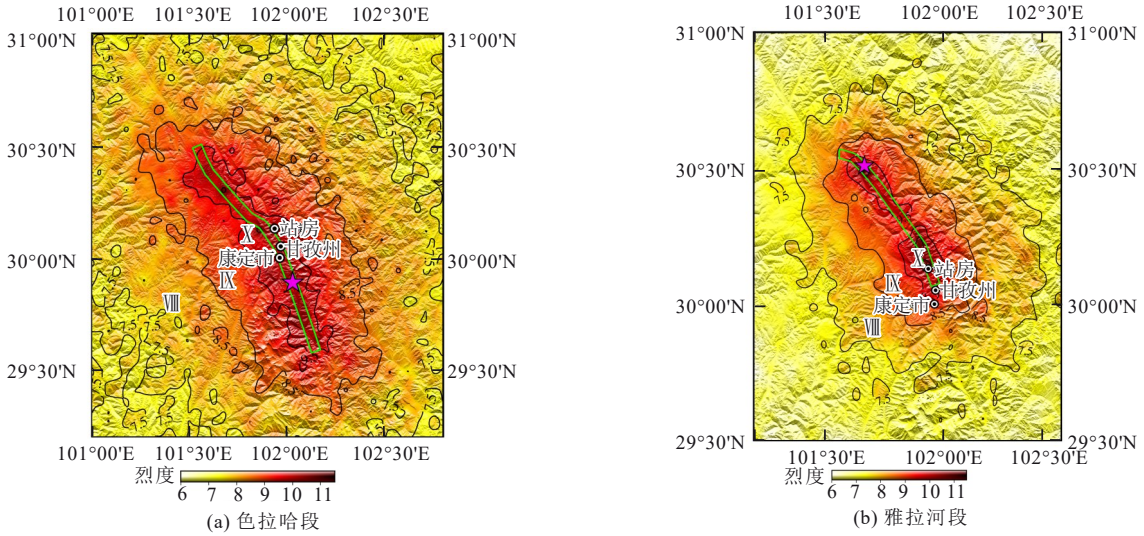
断裂	色拉哈段			雅拉河段			折多塘段
震级 M_W	7.5			7.1			7.0
震源深度/km	10			10			10
倾角/倾向	75°/NE			75°/NE			75°/NE
平均滑动角	0			0			0
$L\times W$/km	120×18			68.2×14			27×16
平均滑动/cm	268			152.0			237.9
起始破裂点位置	102.03°E/29.89°N	101.90°E/30.12°N	101.78°E/30.22°N	101.85°E/30.31°N	101.74°E/30.43°N	101.65°E/30.53°N	101.84°E/30.07°N
起始破裂点在破裂面上沿走向和沿倾向的比例	0.30/0.85	0.50/0.85	0.70/0.85	0.35/0.85	0.50/0.85	0.85/0.85	0.50/0.85

验放大模型，对应地表下 30 m 等效剪切波速 v_{S30}=760 m/s[30]；局部场地放大效应采用耦合 v_{S30}、基岩峰值加速度的线性与非线性场地效应经验模型[31]，该模型以 B/C 类场地分界作为工程基岩面，场地 v_{S30} 采用 Heath 等[32]基于地形数据的全球 v_{S30} 估计值结果。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[33]，κ_0 在 0.005～0.03 范围内，斜率 $k=1.031\times10^{-4}$。

基于各设定地震模拟结果，绘制近场区域仪器地震烈度空间分布图。依据《中国地震烈度表（GB/T 17742—2020）》[34]，由三分量模拟地震动合成加速度、速度时程，采用三分量合成峰值加速度 PGA 与峰值速度 PGV 计算仪器地震烈度。图 2 为色拉哈段、雅拉河段设定地震对应的仪器地震烈度空间分布，可见烈度等值线呈不规则椭圆形，长轴与断层破裂走向保持一致；极震区烈度最高可达 Ⅹ 度，沿破裂面展布，空间位置主要受控于破裂面滑动量分布特征。

近断层地震动与远场地震动存在显著差异，具备速度脉冲、破裂方向性效应、上盘效应等典型近断层特征[35]，本文对模拟得到的地震动时程开展近场特性系统性分析。

采用 Shahi 等[36]提出的速度脉冲识别方法，对断层距≤60 km 范围内的模拟地震动记录开展脉冲识别，提取脉冲峰值与脉冲周期参数，并结合其建立的概率计算方法[37]求解近场速度脉冲发生概率。以色拉哈段设定地震为例，得到速度脉冲幅值、周期及脉冲发生概率的空间分布规律（图 3）。图 3 中等高线代表脉冲发生概率，圆圈直径表征速度脉冲幅值，圆圈颜色对应脉冲周期。该工况地震破裂呈现非对称双侧传播特征，优势破裂方向近似 SE 向；震中 SE 侧的脉冲型地震动发生概率显著高于 NW 侧，强速度脉冲主要集中于断层邻近区域，整体概率空间分布呈纺锤形。沿破裂传播方向对比可知，破裂前方脉冲发生概率明显高于破裂后方，模拟结果体现出显著的近断层向前方向性效应；其中，近



(a) 色拉哈段 (b) 雅拉河段

图 2 基于模拟记录的仪器地震烈度分布

Fig. 2 Distribution of instrumental seismic intensities based on simulated records

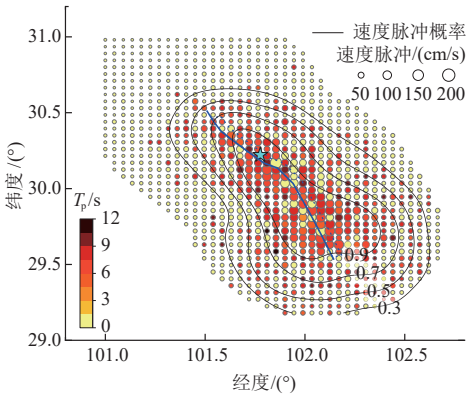


图 3 基于模拟记录的速度脉冲空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of velocity pulses based on simulated records

断层区域(断层距≤20 km)普遍存在大幅值、长周期速度脉冲。

上盘效应是近断层地震动的典型特征,指断层上盘场点因距发震断层面更近,地震动整体幅值系统性放大、峰值衰减速率更缓的工程现象[38]。以雅拉河段设定地震为研究工况,基于10组随机震源破裂模拟结果,统计断层地表投影两侧20 km范围内水平向PGA的空间分布规律。图4给出了上下盘PGA随距离R_X(场点至破裂面上边缘地表投影的最短距离)的衰减变化特征,同时展示了1 km分段间距对应的PGA均值与一倍标准差区间。对比结果表明:同等R_X条件下,上盘区域PGA整体显著高于下盘区域,且该差异在0~5 km近断层范围内最为突出;相较于下盘,上盘PGA衰减速率更小,地震动空间分布呈明显不对称特征。将模拟结果与Abrahamson等[39]提出的ASK2014上盘效应理论模型对比,二者衰减趋势高度一致,证实本文模拟数据可精准反映近断层地震动的上盘效应特征。

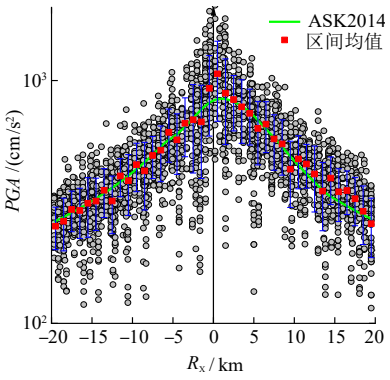
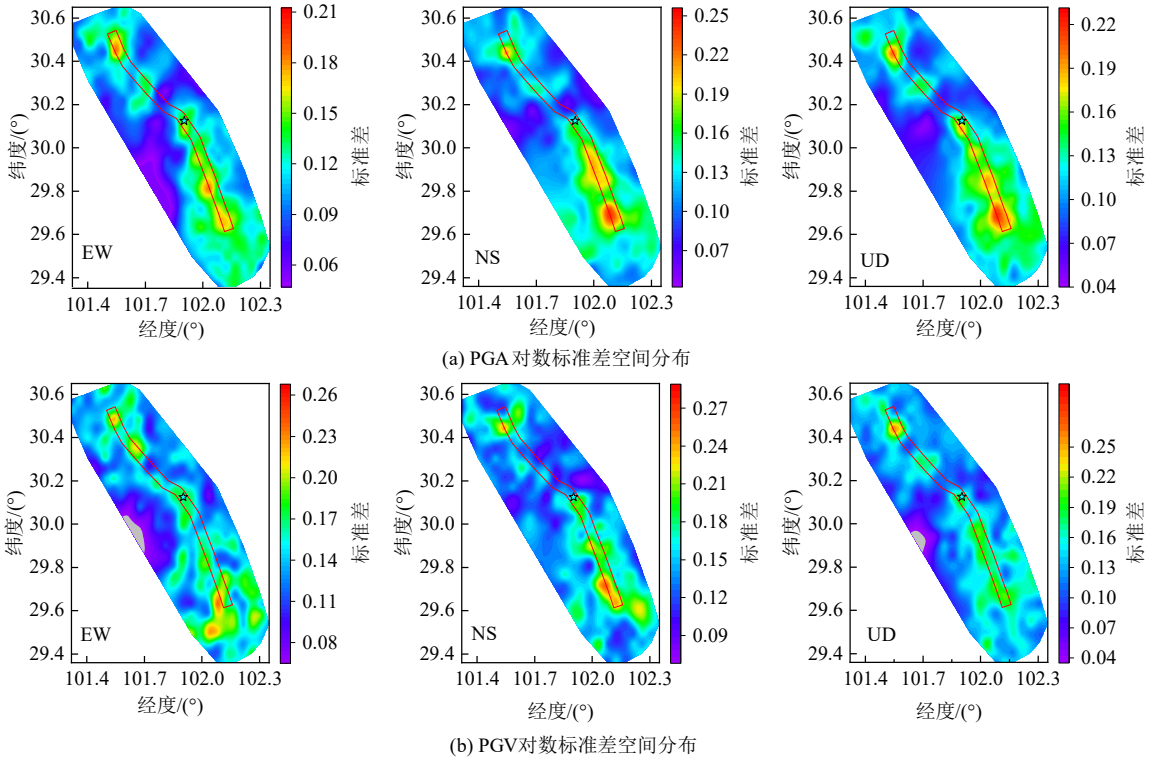


图 4 上下盘模拟记录PGA衰减特征

Fig. 4 Attenuation characteristics of PGA of simulated records on the hanging wall and footwall

震源随机破裂模型受断层几何尺度约束,破裂面滑动量空间分布呈现凹凸体非均匀排布与位置随机特征,对近断层地震动的不确定性具有显著调控作用。以色拉哈段设定地震为研究对象,对断层地表投影两侧20 km范围内的10组随机破裂模拟结果开展统计分析,得到PGA、PGV对数标准差的空间分布规律(图5)。结果表明,研究区内地震动对数标准差整体介于0.12~0.15;断层破裂前后方辐射区峰值标准差普遍大于0.1,显著高于垂直断层走向区域(标准差<0.1)。本文模拟所得地震动不确定性略高于Wang等[40]的随机破裂模拟结果,推测该差异源于研究区断层几何构造更为复杂。



(a) PGA对数标准差空间分布

(b) PGV对数标准差空间分布

图 5　地震动参数峰值对数标准差空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of logarithmic standard deviations of peak ground motion parameters

3　铁路站房地震动输入

铁路站房场址位于色拉哈段设定地震破裂面上盘区域(图 2，R_X约 5 km)。图 6 汇总了该场址在多组危险地震情景下、10 次随机模拟对应的核心地震动参数，包括 PGA、PGV、0.3 s 与 1.0 s 周期拟加速度(Pseudo Spectral Acceleration，PSA)，以及仪器地震烈度(Macroseismic Intensity，MSI)。统计结果表明，模拟地震动 PGA 取值区间为 0.5g～1.9g，PGV 取值区间为 50～120 cm/s。其中，雅拉河段地震情景对应的仪器地震烈度离散性更强，烈度区间为Ⅸ～Ⅺ度；色拉哈段地震情景对应的仪器地震烈度整体稳定为Ⅹ度。频谱特征分析显示，短周期(0.3 s)PSA 幅值显著高于长周期(1.0 s)PSA 幅值，表明该近断层地震动能量集中于高频频段，对研究区自振周期小于 0.5 s 的轻型结构及中低层铁路站房建筑具备更强的破坏效应。

在获取各设定地震情景下铁路站房场址的地震动时程后，进一步筛选最不利地震动记录作为站房结构的抗震输入。郝敏等[41]的研究表明，PGA 与各类建筑结构的破坏程度具有良好相关性，PGV 则与脆性结构的震害特征显著相关。以 PGA 和 PGV 作为衡量地震动破坏能力的指标，选取最不利地震动记录，参考《中国地震烈度表(GB/T 17742—2020)》[34]中 PGA 与 PGV 的组合关系式：I=0.5×［3.17lg（PGA）+6.59］+0.5×［3.00 lg（PGV）+9.77］，对场址 70 条模拟记录开展排序，最终选取雅拉河段设定地震下一组随机模拟时程作为最不利地震动输入。该记录的加速度、速度时程及伪加速度反应谱如图 7 所示；速度时程可见显著双向速度脉冲，对应较强长周期分量。竖向地震动峰值水平较高，体现近场竖向地震动放大特征，且富含高频成分，与 Wang 等[42]提出的近断层竖向分量增强规律相符。此次地震动整体表现为持时短、幅值大的特点，计算得到其有效持时为 15.7 s：较短持时由近场震源持时与路径持时共同控制，高幅值则与场址周边断层滑动位错分布密切相关。场址邻近子断层滑动量较大，对该处地震动产生显著放大作用，模拟结果可完整反映大震工况下震源破裂过程与区域地质构造对近场地震动的综合控制作用。

震源模型构建阶段，破裂起始点的空间分布依据经验关系沿断层走向、倾向按比例布设。由于实际破裂位置存在空间随机性，且断裂沿线周边断层

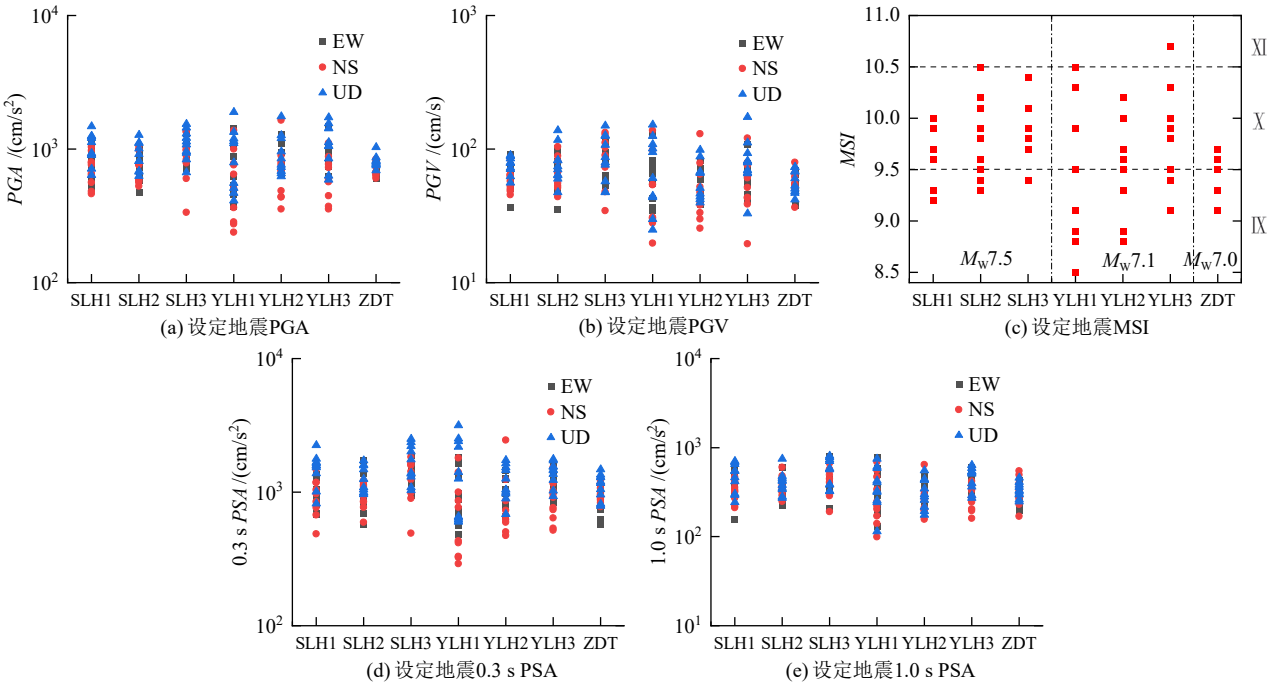


图 6 站房场址处地震动参数

Fig. 6 Ground motion parameters at the station building site

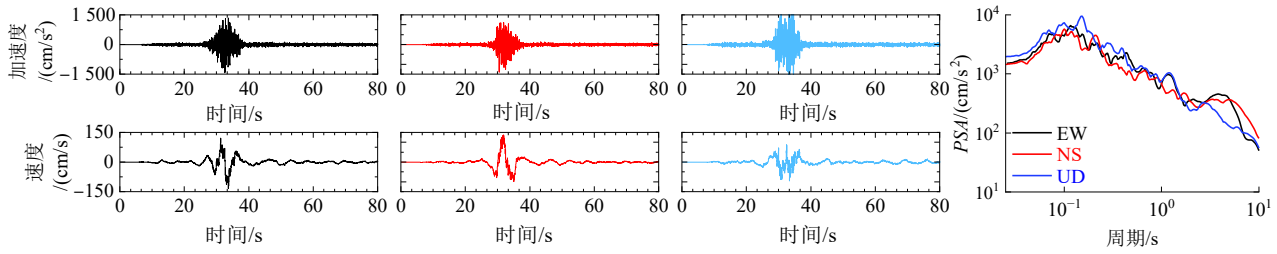


图 7 最不利地震动输入加速度、速度时程和拟加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration and velocity time histories and pseudo-acceleration response spectra of the most unfavorable ground motion input

面具备一定空间变异性，导致铁路站房相对破裂面的空间位置存在多种组合；但无需遍历全部破裂面工况，断层周边其余场点的模拟结果同样具备统计代表性。为验证本文选取的最不利地震动输入是否具备代表性，进一步提取7组设定地震情况下，垂直断层走向3W范围（W为断层面地表投影宽度）内所有场点模拟记录，开展地震动参数统计分析（图8）。结果显示，PGA与PGV均服从对数正态分布，随断层距增大，参数离散程度逐步降低；本文选取的最不利地震动对应的PGA、PGV（图中水平虚线）分别高于区域内95.8%、96.4%的近断层场点，证明该地震动输入具备充足的保守性与工程代表性。

4 结论

本文基于震源随机破裂模型与随机有限断层三维地震动模拟方法，以鲜水河断裂带南东段铁路站房为研究对象，构建了一套考虑最危险场景的临断层铁路站房工程地震动输入方法。通过建立多组最危险场景下的设定地震随机破裂模型，获取站房场址及临断层区域的地震动时程，系统验证了地震动的近断层特征，并依据模拟结果绘制区域地震烈度分布。主要研究结论如下：

（1）模拟所得地震烈度场呈NW-SE向不规则椭圆分布，烈度≥Ⅹ度的极震区主要集中于断层两侧，与历史震害中断层近场破坏集中的规律吻合，临断层铁路站房位置的地震烈度可达Ⅺ度。

（2）模拟地震动具备典型近断层特征，包含破裂方向性效应产生的长周期速度脉冲、上盘效应造成的加速度峰值空间差异；震源破裂模型与地震参数具有良好的随机性，符合抗震设计规范对设定地

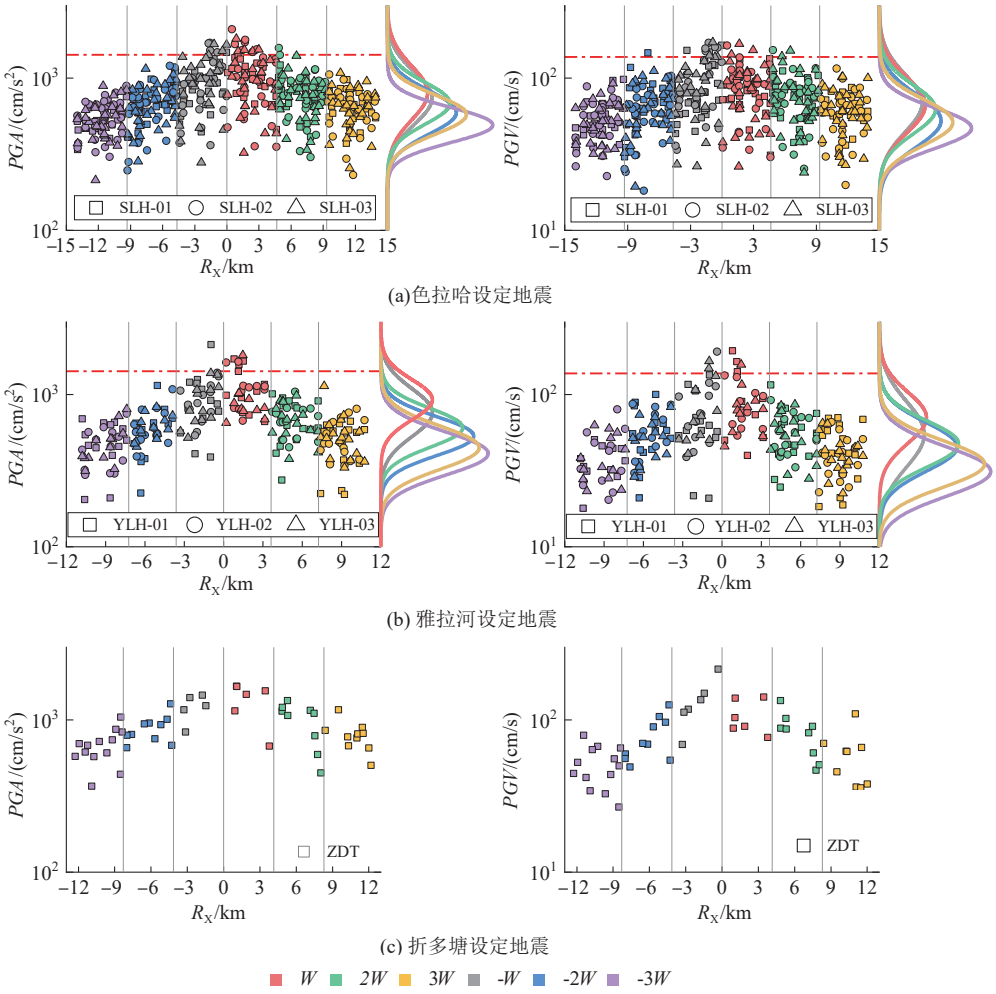


图 8　各设定地震断层附近场点 PGA、PGV

Fig. 8　PGA and PGV at near-fault sites for each scenario earthquake

震模拟的随机化要求，能够保证模拟样本有效覆盖各类潜在危险震源场景。

（3）虽然铁路站房与破裂面的相对位置存在不确定性，但本文选取的最不利地震动输入可覆盖绝大多数潜在危险工况，能够为铁路站房抗震设计与性能评估提供保守、可靠且具有代表性的地震动输入依据。

需要说明的是，破裂面尺寸、平均滑动量等建模参数由设定地震震级控制，最不利地震动输入与震级取值高度相关，本文震级依据断裂带最大潜在地震确定，震级调整将同步改变配套地震动参数与模拟结果。本研究融合震源随机特征与三维地震动模拟技术，构建面向最危险场景的铁路站房地震动输入体系，既可给近断层重要交通枢纽抗震设计提供合理的最不利地震动输入，亦能推广至桥梁、隧道等重大交通基础设施抗震分析与设计。

参考文献（References）

[1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings[S].

[2] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
GB 50909-2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S].

[3] Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 469-500.

[4] 雷屹欣，陈辉国，姚未来，等. 基于瞬时谱匹配的地震波选波方法及应用[J]. 地震工程学报，2023，45(3)：696-705.
Lei Yixin, Chen Huiguo, Yao Weilai, et al. Selection method of seismic waves based on instantaneous spectrum matching and its application [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(3): 696-705.

[5] 叶献国. 地震强度指标定义的客观评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，1998(6)：11-15.
Ye Xianguo. Objective evaluation on definition of earthquake intensity index[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 1998(6): 11-15.

[6] 温瑞智. 我国强地震动记录特征综述[J]. 地震学报, 2016, 38(4): 550-563.
Wen Ruizhi. A review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(4): 550-563.

[7] 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟. 川滇地区若干活动断裂带整体的强地震复发特征研究[J]. 中国地震, 2002, 18(3): 267-276.
Yi Guixi, Wen Xueze, Xu Xiwei. Study on recurrence behaviors of strong earthquakes for several entireties of active fault zones in Sichuan—Yunnan region[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(3): 267-276.

[8] Shinozuka M, Deodatis G. Simulation of stochastic processes by spectral representation[J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4): 191-204.

[9] Mukherjee S, Gupta V K. Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 799-804.

[10] Bouckovalas G D, Papadimitriou A G. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7-10): 547-558.

[11] 张翠然, 陈厚群. 工程地震动模拟研究综述[J]. 世界地震工程, 2008, 24(2): 150-157.
Zhang Cuiran, Chen Houqun. Review and prospects on the simulation research of engineering earthquake ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(2): 150-157.

[12] Wesnousky S G. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(4): 1609-1632.

[13] Bernard P, Herrero A, Berge C. Modeling directivity of heterogeneous earthquake ruptures[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(4): 1149-1160.

[14] Mai P M, Beroza G C. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B11): 1110-1127.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 强生银, 王宏伟, 温瑞智, 等. 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[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_S6.4 earthquake on May 21, 2021[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(12): 4538-4547.

[18] 李春果, 王宏伟, 温瑞智, 等. 2021年青海玛多M_S7.4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_S7.4 earthquake, Qinghai Province[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(5): 1085-1100.

[19] 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.

[20] 谢礼立, 翟长海. 最不利设计地震动研究[J]. 地震学报, 2003, 25(3): 250-261.
Xie Lili, Zhai Changhai. Study on the severest real ground motion for seismic design and analysis[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 250-261.

[21] 刘冠中, 马瑾, 张鸿旭, 等. 二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 878-891.
Liu Guanzhong, Ma Jin, Zhang Hongxu, et al. Study on activity features of Xianshuihe fault zone with fault creep and short baseline observation for the last 20 years[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 878-891.

[22] 赵静, 任金卫, 江在森, 等. 鲜水河断裂带三维变形特征[J]. 地震地质, 2018, 40(4): 818-831.
Zhao Jing, Ren Jinwei, Jiang Zaisen, et al. Three-dimensional deformation characteristics of the Xianshuihe fault zone[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(4): 818-831.

[23] Wen X Z, Ma S L, Xu X W, et al. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan—Yunnan faulted-block, southwestern China[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 168(1-2): 16-36.

[24] 秦四清, 薛雷, 徐锡伟, 等. 川滇地区未来强震预测与汶川M_W7.9级地震孕震过程分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2639-2650.
Qin Siqing, Xue Lei, Xu Xiwei, et al. A prediction of strong earthquakes in the Sichuan and Yunnan regions and analysis of the seismogenic process of the Wenchuan M_W7.9 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2639-2650.

[25] 尹力, 周本刚, 任治坤, 等. 鲜水河断裂带地震矩亏损的空间分布及2022年泸定M6.8级地震[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 425-436.

Yin Li, Zhou Bengang, Ren Zhikun, et al. Spatial distribution of seismic moment deficit in Xianshuihe fault zone and the 2022 Luding M6.8 earthquake[J]. Earth Science, 2024, 49(2): 425-436.

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

[27] 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.

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

[29] 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.

[30] 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.

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

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

[33] 傅磊，谢俊举，陈苏，等. 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[J]. 地球物理学报，2023，66(7)：2933-2950.
Fu Lei, Xie Junju, Chen Su, et al. 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[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(7): 2933-2950.

[34] GB/T 17742—2020 中国地震烈度表[S].
GB/T 17742—2020 The Chinese seismic intensity scale[S].

[35] 刘启方，袁一凡，金星，等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动，2006，26(1)：1-10.
Liu Qifang, Yuan Yifan, Jin Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10.

[36] Shahi S K, Baker J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2456-2466.

[37] Shahi S K, Baker J W. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 742-755.

[38] Abrahamson E. Management fashion[J]. The Academy of Management Review, 1996, 21(1): 254-263.

[39] Abrahamson N A, Silva W J, Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1025-1055.

[40] Wang H W, Ren Y F, Wen R Z, et al. Investigating the contribution of stress drop to ground-motion variability by simulations using the stochastic empirical Green′s function method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(10): 4415-4430.

[41] 郝敏，谢礼立. 地震动潜在破坏矩阵研究[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2008，48(3)：321-324.
Hao Min, Xie Lili. Damage potential matrix for the effect of earthquake ground motion[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(3): 321-324.

[42] Wang G Q, Zhou X Y, Zhang P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan(China) earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(1): 73-96.

（本文编辑：任　栋）