

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201218003

## 参数对地震动随机模拟结果的影响分析\*

党鹏飞<sup>1</sup>, 刘启方<sup>2</sup>, 马完君<sup>1</sup>, 王冲<sup>1,3</sup>

(1. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 随机有限断层法是模拟近场高频地震动常用的方法, 且被国内外研究者证实是成功的且有效的模拟高频地震动的工具。由于随机有限断层模拟方法输入参数较多, 造成对模拟结果的不确定因素也相应较多, 因此在使用随机有限断层法时如何合理地确定输入参数则成为研究者需要考虑的首要问题, 也是成功重建场点加速度纪录的关键环节。简要地介绍了地震动模拟的基本理论、流程和主要参数的意义, 在国内外研究者的研究成果基础上以芦山 $M_w6.6$ 地震为例重点分析了地震动持时对峰值加速度(PGA)、5% 阻尼比加速度反应谱(PSA)和加速度傅里叶谱(FAS)模拟结果的影响。主要得出以下结论:(1)在特定震级下, 持时模型对峰值加速度影响较大, 特别是断层距越小时, 这种影响作用越明显;(2)通过四种持时模型得到的傅里叶谱和反应谱以及模型偏差分析可知, 根据记录90%有效持时拟合其与震中距得到的持时模型表现较好。最后分析了脉冲百分比和断层上缘埋深等参数对模拟反应谱的影响, 结果显示:(1)在相同震级下, 反应谱幅值随脉冲百分比的变化差异不大;(2)在断层方位尺寸给定的前提下, 反应谱幅值随上缘埋深的增加而减小。这些结论可以为随机有限断层模拟方法的工程实际应用时更合理地挑选参数提供理论依据, 也可以相应的提高模拟精度。

**关键词:** 随机模拟; 地震动; 持时模型; PGA; 反应谱; 有限断层法

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0768-10

## Effects Analysis of Parameters on Stochastically Simulated Ground Motions

DANG Pengfei<sup>1</sup>, LIU Qifang<sup>2</sup>, MA Wanjun<sup>1</sup>, WANG Chong<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;  
2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;  
3. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Stochastic finite-fault method is commonly utilized to simulate near-field high-frequency ground motion, and is proved to be a successful and effective tool by researchers at home and abroad. Due to a large number of input parameters, there are many uncertainties in the simulation results. Therefore, how to reasonably determine the input parameters has become a most important problem for researchers, and is also the key to successfully reconstructing the acceleration record of the field site. By introducing the basic principle, procedure and parameters meaning of ground motion simulation, taking the Lushan  $M_w6.6$  earthquake as an example, this paper focuses on the influence of

\* 收稿日期:2020-12-18;修回日期:2021-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51978434)资助

作者简介:党鹏飞(1988—),男,博士研究生。主要从事地震动模拟等方面的研究。E-mail: iempengfeid@qq.com

通讯作者:刘启方(1969—),男,研究员。主要从事近场波动数值模拟等方面的研究。E-mail: qifang\_liu@126.com

ground motion duration on peak ground acceleration (*PGA*), 5%-damped spectral acceleration (*PSA*) and Fourier acceleration spectrum (*FAS*) based on the research results of domestic and foreign researchers. The main conclusions are as follows: (1) The duration model has a great influence on the *PGA* at a specific magnitude; (2) According to the analysis on the Fourier spectrum, response spectra and model bias of the four duration models, the duration model obtained by fitting the 90% effective duration with the epicenter distance is better. At the same time, the influence of the pulse area percentage and the buried depth of the fault on response spectra is analyzed. The results show that: (1) Under the same magnitude, the amplitude of response spectra has little change with the pulse area percentage; (2) When the orientation of the fault is given, the amplitude of response spectra decreases with the increase of buried depth of the fault. These conclusions can provide a theoretical basis for the more reasonable selection of parameters in the practical application of the stochastic finite-fault simulation method, and can also improve the simulation accuracy accordingly.

**Keywords:** stochastic simulation; ground motion; duration model; *PGA*; response spectra; stochastic finite fault method

## 引言

随机有限断层模拟方法合成地震动时需要考虑的输入参数比较多,因此,如何合理地确定这些参数对模拟结果至关重要。随机有限断层法综合考虑了震源、路径和场地三个方面的影响,从而更加符合地震波的产生机理及其在介质中的传播过程,使得模拟结果更加可信,因此备受工程界和学术界的青睐。对于随机有限断层法而言,通常需要选取合理的参数才能得到较为满意的结果,而模型参数的取值往往有很强的主观性和不确定性,这种人为因素直接影响着模拟地震动的精度。由于随机有限断层法输入的参数较多,其模拟结果所依赖的因素也越多。例如高阳等<sup>[1]</sup>分析了不同场地方位角对中强地震动模拟反应谱幅值的影响,结果表明,受破裂方向性效应和上下盘效应的影响,不同场地方位角下近断层模拟反应谱幅值在高频处差异较大。王振宇等<sup>[2]</sup>分析了应力降 $\Delta\sigma$ 、品质因子 $Q$ 和指数 $\eta$ 、高频衰减参数 $\kappa$ 对峰值加速度和反应谱的影响。结果显示,应力降参数对模拟结果的影响显著,*PGA*随着应力降的增大而增大,各周期点上的反应谱也都有明显变化;当矩震级增大时,*PGA*和反应谱受应力降参数的影响也明显增大;*PGA*随品质因子 $Q_0$ 和指数 $\eta$ 的增大而增大,而两个参数对短周期反应谱影响较大,对长周期反应谱影响则较小。在把随机有限断层模拟方法应用于实际工程中时,必须要考虑的一个重要影响因素是断层的几

何特征。对于预测未来可能发生的地震时,虽然中强地震的发震构造的不明确给地震动模拟造成很大困难,但是与断层相关的参数(比如断层长、宽等)对地震动模拟结果影响很小<sup>[3]</sup>,并不会影响模拟方法的应用。因此,在其他学者研究的基础上,重点分析了持时模型对地震动峰值加速度、反应谱和傅里叶谱的影响,旨在为以后选取持时模型时提供理论支持和调整原则,从而帮助随机模拟方法的进一步发展和应用;最后也简要分析了脉冲百分比、上缘埋深等对模拟结果的影响。

## 1 随机模拟方法基本理论

随机模拟方法是目前广泛使用的高频地震动模拟方法。地震动模拟首先是D.M. Boore<sup>[4]</sup>基于有限带宽的高斯白噪声的随机振动理论提出并发展起来的。由于随机点源法后来被发现不适用于大震近场的地震动模拟,I.A. Beresnev等<sup>[5-6]</sup>提出了随机有限断层法,此方法的基本思路是将整个断层破裂面划分为有限个子断层单元<sup>[7]</sup>,每个子断层近似可以看做点源进行模拟<sup>[8-9]</sup>,最终合成的加速度是由每个断层的加速度在一定时间延迟后进行叠加而成。但是为了保证地震矩守恒,某些断层往往需要多次破裂,并且模拟结果强烈依赖于子断层尺寸。D. Motazedian等<sup>[10]</sup>对有限断层法进行了改进,提出了动力学拐角频率的概念。动力学拐角频率使得每个子断层的拐角频率各不相同,破裂起始点所在的子断层拐角频率最大,随着破裂面的扩展,拐角

频率逐渐减小。为了进一步消除子断层尺寸对模拟结果的影响, D. Motazedian 等<sup>[10]</sup>基于速度谱的平方给出了高频标定因子来保证远场辐射能守恒。后来, D.M. Boore<sup>[11]</sup>对随机有限断层法做了进一步的改进, 例如, 把上升时间改为拐角频率的倒数, 高频标定因子改为基于加速度谱的平方等, 进而使随机有限断层法发展成为目前近场地震动模拟中最有效的方法<sup>[12-15]</sup>。

## 2 随机有限断层法模拟参数

### 2.1 基本理论介绍

在频域内, 场点某一点的傅里叶幅值谱可以表示为震源、路径和场地的乘积<sup>[4]</sup>:

$$A_{ij}(f) = \frac{R_{\theta\varphi} \cdot F \cdot PRTITN}{4\pi \cdot \rho_s \cdot \beta^2} \cdot \frac{M_{0ij}(2\pi f)^2}{1 + (f/f_{0ij})^2} \quad (1)$$

$\left\{ \exp(-\pi f \kappa) \cdot \exp(-\pi f R_{ij}/Q\beta) \cdot G(R_{ij}) \cdot A(f) \right\}$   
 式中,  $R_{\theta\varphi}$  为辐射模型系数, 一般取 0.55;  $F$  为自由地表放大系数, 取 2.0;  $PRTITN$  为水平分量系数, 一般取 0.707;  $\rho$  为震源处传播媒介的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\beta$  为震源附近传播介质的剪切波速,  $\text{km}/\text{s}$ ;  $M_{0ij}$  为第  $ij$  个子断层的地震矩,  $\text{dyne}\cdot\text{cm}$ ;  $f$  为频率,  $\text{Hz}$ ;  $f_{0ij}$  为第  $ij$  个子断层的动力学拐角频率,  $\text{Hz}$ ;  $\kappa$  为高频衰减参数,  $\text{s}$ ;  $Q$  为品质因子, 一般表达式为  $Q = Q_0 f^\eta$ ;  $R_{ij}$  为第  $ij$  个子断层的震源距,  $\text{km}$ ;  $A$  为场地项, 包括地壳放大函数和局部场地放大函数两项。

王振宇等<sup>[2]</sup>已经分析了上述公式中应力降  $\Delta\sigma$ 、品质因子  $Q$  和 高频衰减参数  $\kappa$  对模拟结果的影响。但是在地震动模拟实例中, 发现地震动持时对模拟结果也具有至关重要的作用<sup>[15]</sup>。在随机有限断层法中, 持时模型一般表述为:

$$T = T_p(R) + 1/f_0 \quad (2)$$

式中,  $T$  为地震动持时;  $1/f_0$  为震源上升时间;  $R$  为断层距,  $\text{km}$ ;  $T_p$  为路径持时, 表示为:

$$T_p(R) = \begin{cases} 0, & R < 10 \text{ km} \\ 0.16(R - 1), & 10 \text{ km} \leq R < 70 \text{ km} \\ 9.6 - 0.03(R - 70), & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ 7.8 + 0.04(R - 130), & 130 \text{ km} \leq R \end{cases} \quad (3)$$

其他文献中也有使用如下模型<sup>[16]</sup>:

$$T = a \cdot R + 1/f_0 \quad (4)$$

式中,  $a$  为模型系数, 一般取 0.5 或者 0.1, 其他参数含义同上。

也有参考文献使用如下形式表示地震动路径持时<sup>[15-18]</sup>:

$$T = a \cdot R + b \quad (5)$$

式中,  $a, b$  为回归系数;  $R$  为断层距,  $\text{km}$ 。

鉴于以上各种地震动持时模型, 如何在地震动模拟中合理的选用是科研工作者最为关心的, 本文将重点分析各持时模型对地震动模拟结果的影响。

### 2.2 模拟参数和背景

北京时间 2013 年 4 月 20 日, 四川雅安地区发生里氏 7.0 级地震, 在本次触发的台站中选取断层距小于 200  $\text{km}$  的 31 个台站作为研究对象。台站、断层和震中分布如图 1 所示。台站和记录详细信息见表 1。模拟使用的参数详见表 2。表 1 中  $V_{s30}$  表示地表 30  $\text{m}$  下土层的平均剪切波速, 并且按照美国国家地震减灾计划 (United States National Earthquake Hazards Reduction Program) 提出的场地分类标准进行场地分类。本文使用的持时模型表述为模型 1 (式 (2))、模型 2 (式 (4) 中  $a = 0.1$ )、基于芦山地震近场台站记录拟合的 90% 地震动持时<sup>[15]</sup>, 即模型 3 (式 (5) 中  $a = 0.0495, b = 20.8394$ )、模型 4 (式 (4) 中  $a = 0.5$ ), 分别研究持时模型对地震动模拟结果的影响。

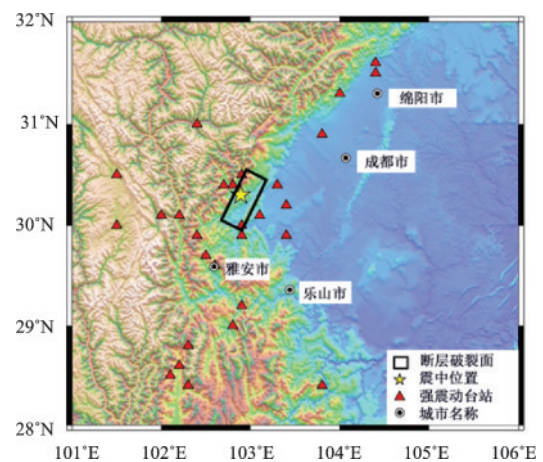


图 1 芦山地震触发台站分布<sup>[15]</sup>

Fig. 1 The location of triggered stations in the Lushan earthquake<sup>[15]</sup>

表 1 断层距小于 200 km 的台站及其记录的详细信息<sup>[15]</sup>

Table 1 The information of stations and records within a rupture distance of 200 km<sup>[15]</sup>

台站编码	经度/(°)	纬度/(°)	断层距/km	PGA/(cm·s <sup>-2</sup> )	V <sub>s30</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	场地分类
51LSF	102.9	30.0	4.11	371.90	517	C
51QLY	103.3	30.4	11.24	292.55	508	C
51YAM	103.1	30.1	13.32	374.35	600	C
51YAL	102.9	29.9	14.93	202.76	535	C
51BXZ	102.9	30.5	15.58	429.55	394	C
51BXD	102.8	30.4	16.59	909.92	585	C
51BXM	102.7	30.4	22.53	278.15	398	C
51PJD	103.4	30.2	32.16	168.25	390	C
51TQL	102.4	29.9	38.62	277.72	526	C
51HYT	103.4	29.9	43.80	68.43	437	C
51KDZ	102.2	30.1	51.04	25.23	500	C
51HYQ	102.6	29.6	53.29	61.58	362	C
51HYY	102.5	29.7	55.38	167.08	475	C
51PXZ	103.8	30.9	67.79	12.56	418	C
51KDT	102.0	30.1	70.42	68.42	628	B
51XJD	102.4	31.0	72.28	31.17	370	C
51HYW	102.9	29.2	85.13	52.01	442	C
51SFB	104.0	31.3	112.83	65.46	379	C
51KDX	101.5	30.0	113.99	13.97	403	C
51GLQ	102.8	29.0	114.46	19.68	373	C
51DFB	101.5	30.5	122.54	19.35	372	C
51MNW	102.3	28.8	145.12	42.91	388	C
51AXT	104.4	31.5	155.88	20.40	376	C
51MNC	102.2	28.6	163.13	31.96	490	C
51MNA	102.2	28.6	169.36	18.30	563	C
51BCD	104.4	31.6	170.12	14.64	432	C
51MNJ	102.2	28.6	175.20	17.50	450	C
51MNT	102.2	28.6	176.21	44.62	446	C
51MNH	102.1	28.5	188.85	27.92	371	C
51XDM	102.3	28.4	190.68	22.66	417	C
51LBH	103.8	28.4	192.18	44.64	391	C

注:表中 V<sub>s30</sub>列中,黑体表示数据来自于 NGA West 2(新一代衰减关系)数据库,其余数据通过经验插值计算<sup>[19]</sup>,表中 PGA 为两水平向几何平均值

### 3 输入参数敏感性分析

#### 3.1 持时影响分析

利用上述模型参数,以 2013 年芦山地震为例,分别用四种常用的持时模型对芦山地震断层距小于 200 km 的 31 个台站记录进行模拟。不同持时模型计算的反应谱和傅里叶谱与观测反应谱及其傅里叶谱对比如图 2 和图 3 所示。由图可知,在短周

期下( $T < 1$  s),四种模型得到的模拟值在大多数台站都与真实值较为符合。图 4 给出了不同持时模型得到的模型偏差<sup>[15]</sup>(P.F. Dang 等<sup>[15]</sup>,式(6))与周期的关系。由图可知,模型 1、模型 3 和模型 4 在短周期( $T < 1$  s)处模型偏差( $\log(\text{模拟值}/\text{观测值})$ ,其中观测值为两水平分量的几何平均值)均接近于零。特别是模型 3,模型偏差几乎在整个短周期范围内都比模型 1 和模型 2 小。这是因为模型 3 是基于芦山地震记录的 95% 有效持时拟合其与震中距

表2 模拟使用的参数<sup>[15]</sup>Table 2 Modeling parameters for simulation of the Lushan earthquake<sup>[15]</sup>

参数	参数值	数据来源
断层走向 (走向, 倾角)	205°, 38.5°	王卫民等 <sup>[20]</sup>
断层长和宽 /km	66, 35	王卫民等 <sup>[20]</sup>
子断层尺寸 /km	6, 5	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
上缘埋深 /km	0.0	王卫民等 <sup>[20]</sup>
高频衰减参数 $kappa/s$	0.033	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
地震矩 ( $M_w$ )	6.7	王卫民等 <sup>[20]</sup>
品质因子 $Q(f)$	$274.6 f^{0.423}$	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
剪切波速 /( $km \cdot s^{-1}$ )	3.6	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.8	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
脉冲百分比 /%	50	D. Motazedian 等 <sup>[10]</sup>
应力降 (bars)	45	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
窗函数	Saragoni-Hart	D. Motazedian 等 <sup>[10]</sup>
传播速度/剪切波速	0.8	D. Motazedian 等 <sup>[10]</sup>
震源模型	特定滑移分布	王卫民等 <sup>[20]</sup>
几何传播函数	$1/R$ ( $R \leq 70.5$ km)	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
	$1/70.5$ ( $70.5 < R \leq 117.5$ )	
	$1/R^{0.5}$ ( $R > 117.5$ )	
持时模型	式(2)、式(3)	王海云 <sup>[21]</sup>
	$0.5R + 1/f_0$	本文
	$20.8394 + 0.495R$	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
	$0.1R + 1/f_0$	E. Yalcinkaya 等 <sup>[22]</sup>
地壳放大函数	北美基岩地壳放大函数 B/C	G.M. Atkinson 等 <sup>[23]</sup>
场地放大函数	H/V 谱比	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
周期范围	0.05~10 s	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>
频率范围	0.1~20 Hz	P.F. Dang 等 <sup>[15]</sup>

的关系得到的模型,在地震动持续时间上更接近于真实记录,这也可以从图5看出(图中小圆点为记录的95%持时)。图6给出了不同持时模型对峰值加速度的影响。可见,模型1在峰值加速度方面模拟结果要高于其他模型。在断层距大于60 km范围内,4个模型得到的峰值加速度差异很小,并且接近于观测峰值加速度,但是在断层距小于60 km处,模拟值得到的峰值加速度与观测值差异显著,这可能是由于断层距越小,断层几何尺寸效应越明显,也可能是几何传播函数未能表达这一距离范围内地震波的真实传播过程。这也说明,随机有限断层法在近场地震动模拟方面还有改进的空间,还需要更多的参数去约束,以此来进一步提高模拟精度。在断层距仅有16.59 km的51BXD台站处,观测峰值加速度达到909 cm/s<sup>2</sup>,而模型1得到的模拟值为

820.34 cm/s<sup>2</sup>,模型3得到的模拟值为623.79 cm/s<sup>2</sup>,均比其他模型较好。综合来说,本文建议取模型1或者模型3较为理想。

为了更进一步地说明,我们以表2参数为例,取随机滑移分布条件下的应力降60 bars<sup>[15]</sup>,分别取矩震级为8.0、7.0、6.0、5.0和4.0 5个不同震级,模拟四个持时模型下的峰值加速度和周期为0.2 s、0.5 s、1.0 s、2.0 s和3.0 s下的反应谱,分别由图7和图8所示。由图可知,不论是PGA还是PSA,在小震级下,四种模型得到的结果差异较小,而在大震级下,差异较为显著。当然本文也仅仅只是定量分析,因为相同震级,并不一定就有相同的震源机制和断层类型,想要得到更为精确的结果,还需要大量的地震数据归类整理分析得出。

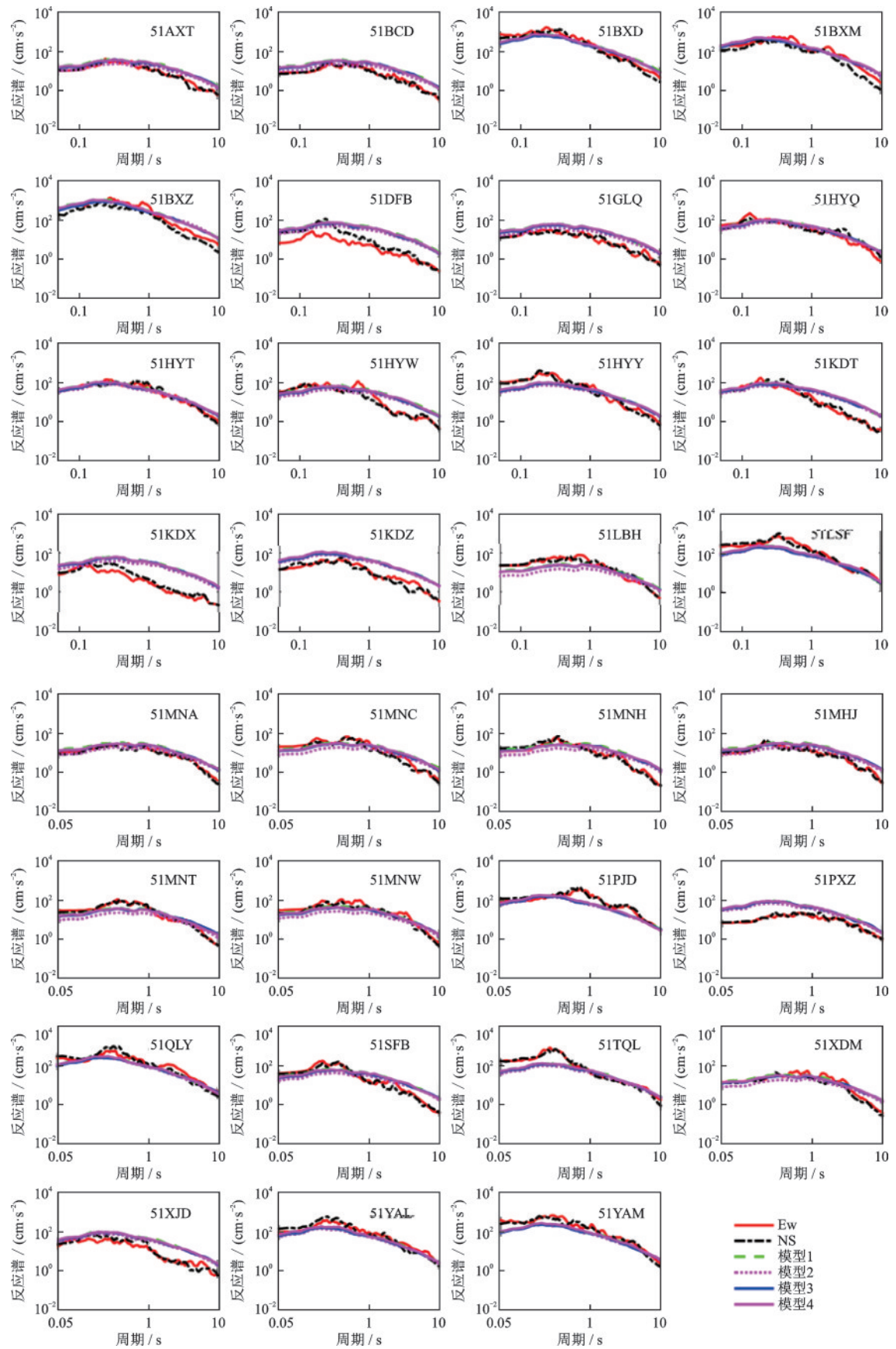


图2 不同持时模型的反应谱

Fig. 2 Response spectra of different duration models

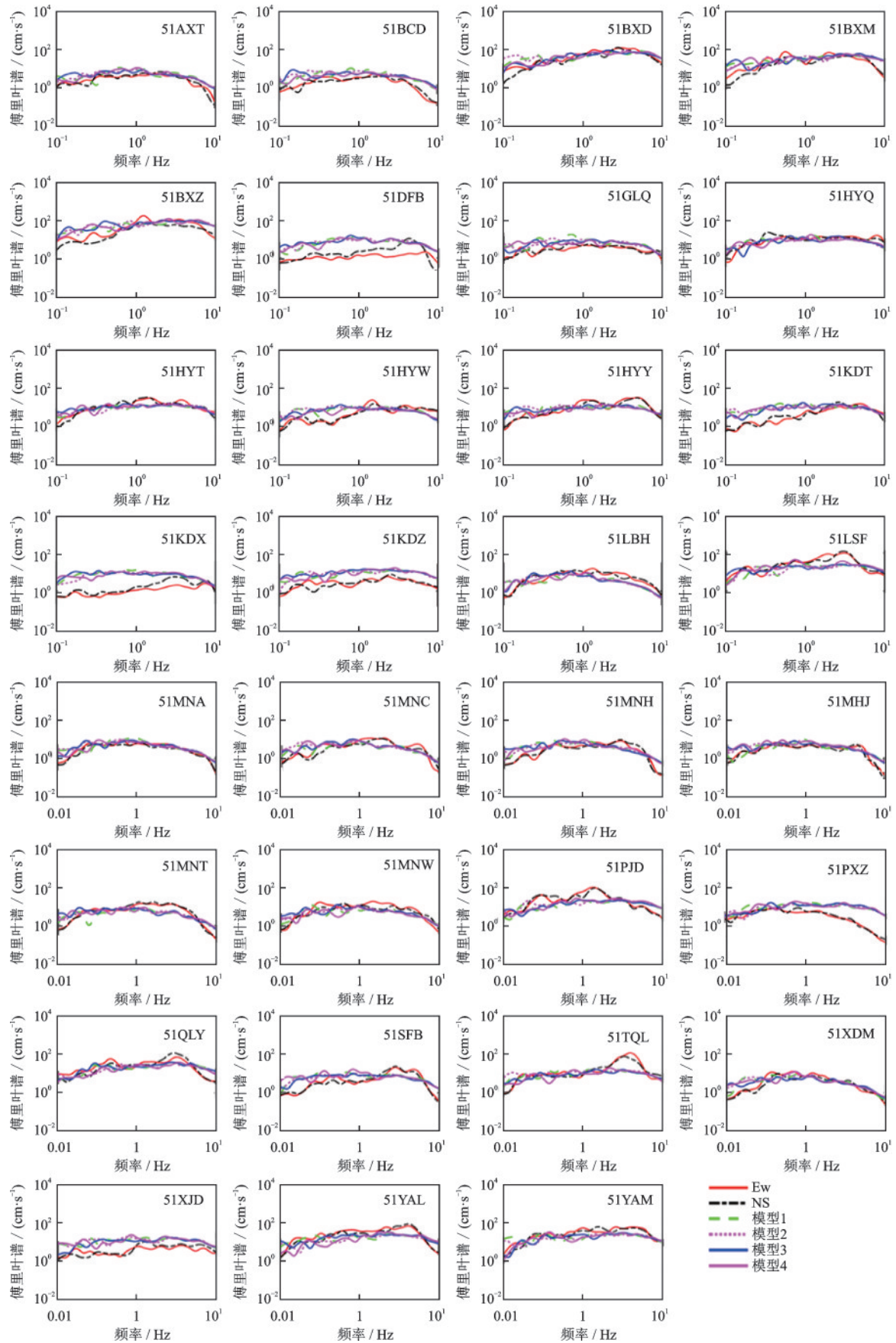


图3 不同持时模型的傅里叶谱

Fig. 3 Fourier acceleration spectrum of different duration models

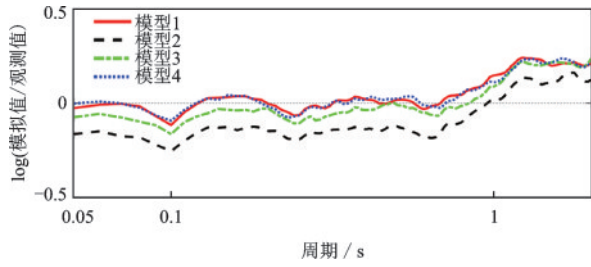


图4 不同持时模型的模型偏差

Fig. 4 Model bias of different duration models

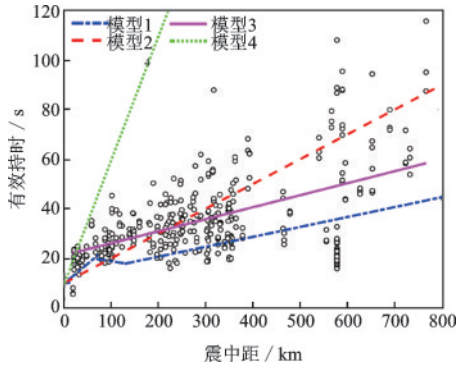


图5 不同持时模型比较

Fig. 5 Comparison of different duration models

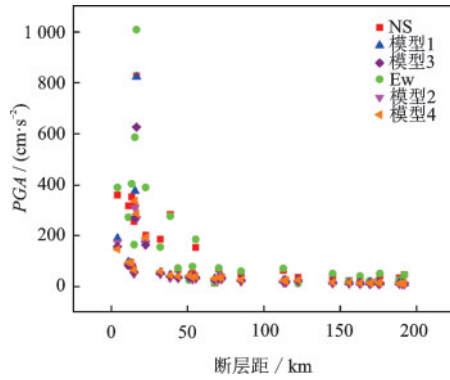


图6 不同持时模型的加速度峰值

Fig. 6 PGA of different duration models

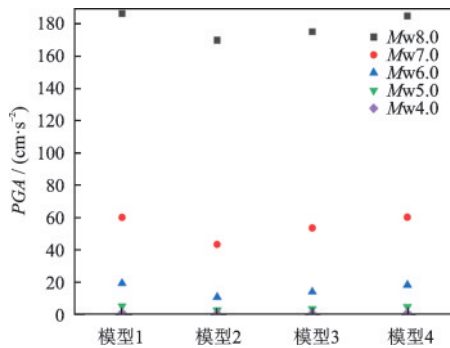
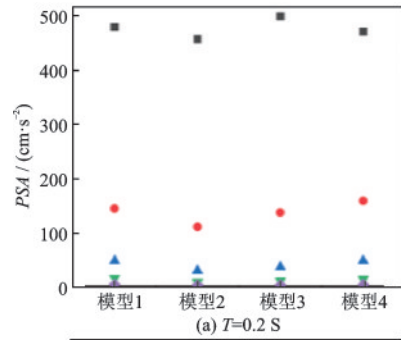
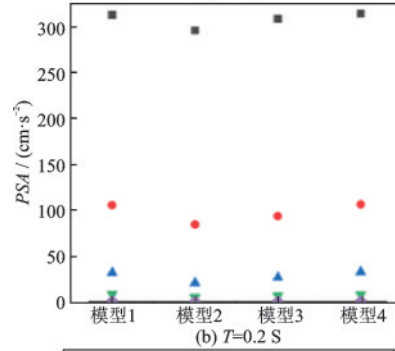


图7 不同持时模型对PGA的影响

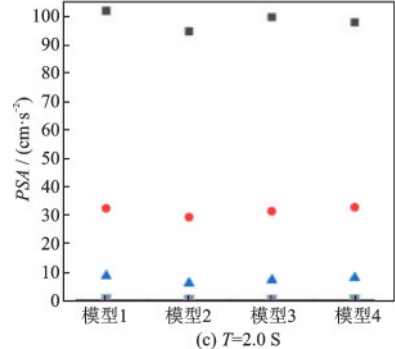
Fig. 7 Effect of duration model on PGA



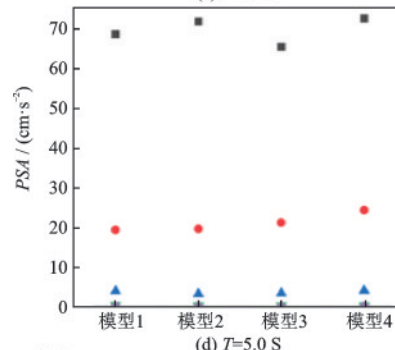
(a)  $T=0.2$  S



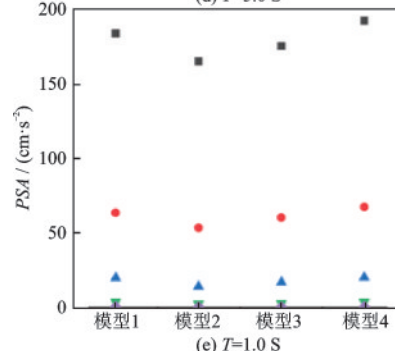
(b)  $T=0.2$  S



(c)  $T=2.0$  S



(d)  $T=5.0$  S



(e)  $T=1.0$  S

■  $M_w 8.0$  ●  $M_w 7.0$  ▲  $M_w 6.0$  ▼  $M_w 5.0$  ◆  $M_w 4.0$

图8 不同持时模型对PSA的影响

Fig.8 Effect of duration model on PSA

### 3.2 脉冲百分比影响分析

为了描述断层破裂的某一时刻,断层上只有部分分子断层产生位错量,而其他断层未产生位错量的现象,D. Motazedian 等<sup>[10]</sup>引入了脉冲百分比(Pulsing area percentage)的概念。工程界普遍使用 D. Motazedian 等<sup>[10]</sup>推荐的 50%,即仅有一半的子断层在破裂传播过程中产生位错量,也仅有这部分子断层影响动力学拐角频率的大小。由于这一概念与有限断层模型产生地震动的实际特征更符合,因此有效解决了有限断层模拟方法在模拟地震动谱幅值在低频处偏大的问题<sup>[3,10]</sup>。为了进一步比较相同震级下(其他参数见表 2),脉冲百分比对模拟结果的影响,本文计算了不同震级和不同脉冲百分比下地震动的反应谱,如图 9 所示。如图所示,在相同震级下,短周期反应谱幅值随脉冲百分比的变化差异很小,这与 D. Motazedian 等<sup>[10]</sup>得到的结论一致。因此在模拟地震动时,可以在 50%~100% 合理选取。

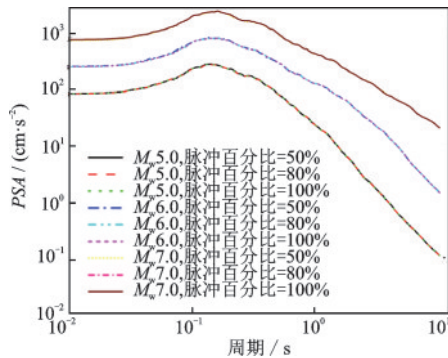


图 9 震级与脉冲百分比对 PSA 的影响

Fig. 9 Effects of magnitude and pulse area percentage on PSA

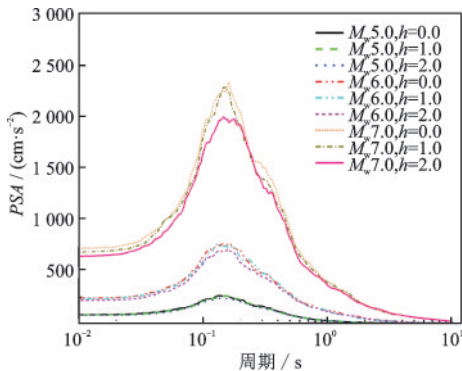


图 10 震级与上缘埋深对 PSA 的影响

Fig. 10 Effects of magnitude and  $h$  on PSA

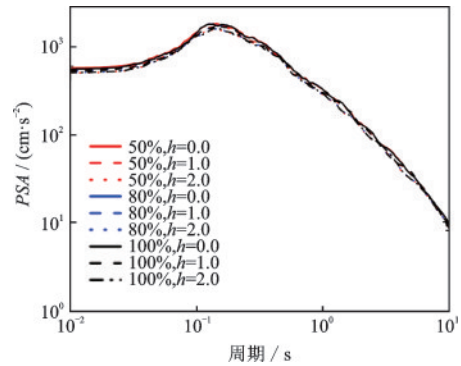


图 11 上缘埋深与脉冲百分比对 PSA 的影响

Fig. 11 Effects of  $h$  and pulse area percentage on PSA

### 3.3 上缘埋深影响分析

在模拟地震动时,可能遇到的另一个棘手的问题是断层上缘角埋深( $h$ ),一般反演震源模型大多都给出断层几何尺寸,断层滑移量,倾角和滑动角等,很少会给出上缘角的经纬度和上缘埋深等参数。并且在预测未来大地震时,与断层有关的数据,比如倾角、滑动角、上缘埋深、上缘经纬度、断层尺寸和断层上的位错量等等都是未知的,这对地震记录较少的国家和地区带来极大不便。本文在前人工作的基础上,着重分析了上缘埋深对反应谱的影响,如图 10 所示。如图可知,在短周期范围内,相同震级下,上缘埋深越大,反应谱幅值相应的较小。在特定震级下( $M_w$  6.7),不同脉冲百分比和上缘埋深对模拟反应谱幅值影响如图 11 所示,由图可知,在震级一定的前提下,脉冲百分比和断层上缘埋深对反应谱幅值的影响不大。需要特别指出的是,这里所说的上缘埋深是指在上缘角经纬度、断层倾向角、滑移角等确定的情况下的变量。如果在上述参数未给定时,这些参数共同确定震源距或者断层距,这将对模拟 PGA 和相应的谱幅值产生影响。除此之外,可以将随机有限断层法(EXTend stochastic finite-fault SIMulation method)EXSIM 程序中计算震源距的参考点由上缘角改为由震中位置计算相应距离,这将为参数输入带来很大方便。

## 4 结论

随机有限断层法模拟地震动时,各参数的选取受主观因素较多,从而造成了模拟结果会出现很多不确定性。需要特别强调的一点是,震级相同,不代表这些地震有相同的震源模型、震源机制和地震

波传播路径,震源发震可能差异很大,本文沿用其他学者的做法简单的使用震级区分不同大小的地震。基于此,本文重点分析了常用的四个持时模型对峰值加速度、反应谱和傅里叶谱的影响,也定量分析了脉冲百分比和断层上缘埋深对反应谱的影响,得出以下结论:

(1)在特定震级下,持时模型对峰值加速度的影响较大,特别是断层距越小时,这种影响更为显著。随着震级的变化,持时模型对峰值加速度和反应谱的影响不大,这为使用随机有限断层法时,持时模型的选取提供参考。

(2)芦山地震中,脉冲百分比和断层上缘埋深对模拟反应谱影响不是很明显。在相同震级下,反应谱幅值随着脉冲百分比的变化不显著,随上缘埋深的增加而减小。因此,在把随机有限断层法应用于预测地震数据较少的国家和地区时,应该重点抓住品质因子、应力降、场地放大、震源模型和持时等这些主要参数。

## 参考文献:

- [1] 高阳,潘华,汪素云. 随机有限断层法模拟中强地震近场强震动的参数影响研究[J]. 地震学报, 2014, 36(4): 698-710.  
Gao Y, Pan H, Wang S Y. Effect of parameters on near-fault ground-motion simulations for moderate-strong earthquakes by stochastic finite-fault method [J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(4): 698-710. (in Chinese)
- [2] 王振宇,赵培培,薄景山. 地震动随机模拟方法主要影响参数分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 34-41.  
Wang Z Y, Zhao P P, Bo J S. Analysis for the effects of main parameters on ground motions by stochastic simulation method [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 34-41. (in Chinese)
- [3] 高阳,潘华,汪素云. 随机有限断层法模拟中强地震近场强震动的参数影响研究[J]. 地震学报, 2014, 36(4): 698-710.  
Gao Y, Pan H, Wang S Y. Effect of parameters on near-fault ground-motion simulation for moderate-strong earthquakes by stochastic finite-fault method [J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(4): 698-710. (in Chinese)
- [4] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(6): 1865-1894.
- [5] Beresnev I A, Atkinson G M. Modeling finite-fault radiation from the  $\omega^n$  spectrum [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 67-84.
- [6] Beresnev I A, Atkinson G M. FINSIM-a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults [J]. Seismological Research Letters, 1998, 69(1): 27-32.
- [7] Hartzell S H. Earthquake aftershock as Green's functions [J]. Geophysical Research Letters, 1978, 5(1): 1-14.
- [8] Aki K. Scaling law of seismic spectrum [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(4): 1217-1231.
- [9] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(26): 4997-5009.
- [10] Motazedian D, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(3): 995-1010.
- [11] Boore D M. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(6): 3202-3216.
- [12] RaghuKanth S T G, Kavitha B. Stochastic finite fault modeling of subduction zone earthquake in northeastern India [J]. Pure Apple Geophys, 2013, 170(11): 1705-1727.
- [13] Ugurhan B, Askan A. Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Duzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(4): 1498-1512.
- [14] Zafarani H, Rahimi M, Noorzad A, et al. Stochastic simulation of strong-motion records from the 2012 Ahar-Varzaghan dual earthquakes, northwest of Iran [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(3): 1419-1434.
- [15] Dang P F, Liu Q F. Stochastic finite-fault ground motion simulation for the  $M_w$  6.7 earthquake in Lushan, China [J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 1215-1241.
- [16] Ghofrani H, Atkinson G M, Goda K, et al. Stochastic finite-fault simulations of the 2011 Tohoku, Japan, earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2B): 1307-1320.
- [17] Dang P F, Liu Q F, Song J. Simulation of the Jiuzhaigou, China, earthquake by stochastic finite-fault method based on variable stress drop [J]. Natural Hazards, 2020, 103(2): 2295-2321.

(本文责编:池营营)

(下转第 818 页)