

模拟汶川地震动持时的空间分布规律研究*

钟菊芳¹, 袁峰^{1,2}, 邱卓¹

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 赣州市城乡规划设计研究院, 江西 赣州 341000)

摘要: 利用随机有限断层时程模拟程序, 模拟符合汶川地震区域特性的水平分量加速度时程, 分析模拟加速度时程持时的空间分布和变化规律。结果表明: 模拟加速度时程的各种持时分布均能很好地体现持时的破裂方向性效应, 但未能清晰反映持时的上盘/下盘效应; 模拟加速度时程的重要持时能反映近断层区域持时明显小于远场持时的特点, 但在总体空间分布上更为“单一”, 未表现出明显的区域“突变”现象; 相较于重要持时, 模拟加速度时程与台站记录时程的 Bolt 持时之间存在更大差异; 模拟加速度时程的重要持时与相对 Bolt 持时随断层距的变化趋势, 总体上能反映水平分量记录时程持时的空间变化特性。

关键词: 地震动持时; 随机有限断层法; 震源参数; 汶川地震; 空间分布

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0483-10

0 引言

地震动持时(以下简称持时, 记为 T_s)是描述地震动工程特性的重要参数之一, 对结构的动力响应具有重要影响。大量研究表明: 地震动持时对结构的最大延性位移和累积滞回耗能均有明显影响, 尤其对结构积累破坏效应的影响更为显著(Hancock, Bommer, 2007; Iervolino *et al.*, 2006; 盛明强等, 2007); 地震动持时对结构非线性反应的影响程度随屈服强度系数的减小而增大(刘鸣等, 1994)。持时对结构抗倒塌能力有重要影响, 长持时的地震动将可能产生较长时间的循环荷载并导致更大的结构响应(Raghunandan, 2013)。在长持时的地震动作用下, 构件抗疲劳强度和刚度的退化将大大降低结构的抗倒塌能力(Chandramohan *et al.*, 2013)。地震动持时的重要性毋庸置疑, 但其在工程实际中并未像振幅和频谱一样得到广泛应用, 因此对地震动持时进行更为深入的研究将有助于推动其理论研究与工程应用。

近年来, 不少学者对地震动持时的空间分布和

随断层距(R)的变化规律等进行了研究。胡进军(2009)分析发现, 汶川地震中地震动的峰值、反应谱和持时均显示出了明显的方向性特征; 破裂后场点的地震动持时明显大于破裂前方的持时, 差别可达数倍; 卢书楠等(2013)通过研究汶川地震台站记录, 发现近断层特征对地震动持时有显著影响; 任叶飞等(2014)通过研究芦山地震台站记录, 得出芦山地震重要持时和 Bolt 持时高于全球经验预测方程估算值, 且 Bolt 持时衰减显著慢于全球平均水平的结论; 王巧临(2014)认为重要持时的分布主要受发震断层的控制, 70%和90%重要持时均随断层距的增加而增大。以往研究往往是基于具体台站记录开展的, 利用模拟地震加速度时程分析地震动持时特性的研究较少, 因此, 通过模拟时程分析地震动持时的空间分布等特性, 对于提升地震动模拟的精确性具有一定意义。

为了揭示目前地震工程界常用的随机有限断层法模拟水平加速度时程地震动持时的空间分布及变化规律, 在已有汶川地震震源参数研究成果的基础上, 本文采用随机有限断层时程模拟程序, 对已获取的汶川地震记录的87个自由地表台站点($R < 300$ km)进行地震动加速度时程模拟, 每

* 收稿日期: 2018-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金(51969019, 51468045), 水利部公益性行为科研专项(201401009), 江西省教育厅科技项目(GJJ160703)及南昌航空大学研究生创新专项资金项目(YC2016019)联合资助。

个台站取 50 条模拟水平分量加速度时程（简称模拟时程，用 ES 加以区分）的地震动持时的平均值作为分析对象，对比分析模拟时程地震动持时与汶川地震台站记录的两水平分量（简称记录时程，分别用 EW 和 NS 表示东西和南北水平分量）地震动持时的空间分布及变化规律，探讨模拟地震动持时的空间分布规律和变化特性，以及震源参数对地震动持时空间分布的影响规律。

1 数据选取

汶川地震发生过程中，中国强震动台网获取了一大批高质量的地震动记录，为研究近场地震动特性提供了丰富的数据。选取汶川地震中断层距 $R < 300\text{ km}$ 的 87 个台站的 EW 和 NS 分量的地震动加速度记录进行分析。其中 11 个基岩台站，其余为 II 类土层场地台站，台站的基本信息见表 1（万卫，2013）。

表 1 中 R 的计算是以汶川地震地表破裂带为发震断层在地表的投影位置，取多个地表破裂带现场调查点的经纬度和台站的经纬度计算得到的最小距离（万卫，2013）。由于地震动持时计算过程中只涉及到加速度时程，受基线漂移等影响较小，因此本文所选的原始记录数据不进行基线调整等数据处理。

2 参数选取及持时计算

国内外学者将汶川地震断层模型分为单断层模型和双断层模型（赵翠萍等，2009；张勇等，2008；毕研磊等，2017；Nakamura *et al*，2010）。由于双断层模型中的青川断裂的应力释放以及滑动位移相对于整个断层比重很小，喻焜（2012）认为单断层模型与双断层模型的选择对有限断层模型影响不大。为简易起见，本文考虑使用单断层模型进行模拟，所选汶川地震震源参数取值见表 2。由于汶川地震存在明显的上/下盘效应，因此应区分上/下盘影响对品质因子进行取值（喻焜，2012；华卫等，2009）；不同场地条件的平均场地放大系数见表 3；震源模型滑动分布选用王卫民等（2008）反演汶川地震得到的有限断层模型。

表 1 所选台站基本信息

Tab. 1 Basic information of the selected seismic stations

台站编号	R/km	场地类型	台站编号	R/km	场地类型
51MZQ	3.1	II 类	51HSD	104.5	II 类
51MXN	3.2	II 类	51CXQ	104.7	II 类
51WCW	6.0	II 类	51YAS	111.1	II 类
51SFB	7.8	II 类	51YBY	113.0	基岩
51JYH	18.8	II 类	51JZB	114.2	II 类
51PXZ	21.0	基岩	51YAL	117.1	II 类
51LXT	23.0	II 类	62SHW	121.1	II 类
51MXT	24.0	基岩	51JZZ	125.4	II 类
51LXM	26.0	II 类	51MEZ	127.7	II 类
51JYD	26.4	II 类	51TQL	137.2	II 类
51AXT	28.1	II 类	51MED	140.1	II 类
51JYC	30.5	II 类	62ZHQ	143.0	基岩
51DXY	31.2	II 类	51HYQ	155.4	II 类
51QLY	31.2	II 类	51HYY	156.7	土层
51DYB	37.0	II 类	51HYJ	163.0	II 类
51MXD	42.8	II 类	62TCH	164.4	II 类
62WIX	49.0	基岩	51KDT	176.6	II 类
51XJD	54.5	II 类	51LDD	177.1	II 类
51GYZ	55.2	II 类	51HYW	177.9	II 类
51LXS	56.1	II 类	51SMK	188.7	II 类
51BXZ	57.5	基岩	51SMW	188.7	II 类
51GYS	60.8	II 类	51LDL	190.9	II 类
62WUD	69.2	II 类	62TSH	191.4	II 类
51BXD	72.0	II 类	51LDJ	196.8	II 类
51PJD	72.2	II 类	51MCL	211.2	II 类
51PJW	72.5	II 类	51SMM	211.5	II 类
51HSL	73.5	II 类	51FSB	218.0	基岩
51CDZ	74.0	基岩	62MXT	218.5	II 类
51BXY	77.2	II 类	51MBD	222.2	II 类
51XJB	79.7	II 类	51YXX	249.2	II 类
51JZW	81.7	II 类	62ZNI	260.7	II 类
51JZG	83.5	II 类	51YXZ	262.2	II 类
51YAM	85.0	II 类	51MNC	265.3	II 类
51LSJ	86.1	II 类	51JLT	269.9	II 类
51LSH	92.3	II 类	51MNA	270.5	II 类
62DZJ	96.6	II 类	51SMC	272.9	II 类
51JZY	97.8	II 类	51SMX	272.9	II 类
51LSF	98.9	II 类	62LTA	276.0	基岩
51SPA	100.1	II 类	51MNH	277.4	II 类
51SPT	104.0	基岩	51MNJ	277.4	II 类
51LDS	278.5	II 类	51JLN	290.1	II 类
51LBH	285.4	II 类	51CNT	292.0	基岩
51LBD	285.6	土层	51XDM	292.7	II 类
62YLG	286.3	II 类			

表 2 汶川地震的震源、传播路径和场地效应参数表
(据王卫民等, 2008; 华卫等, 2009)

Tab. 2 The parameter values of the source, propagation path and site effect of the Wenchuan earthquake (based on Wang <i>et al</i> , 2008; Hua <i>et al</i> , 2009)	
参数名称	参考值
矩震级 M_W	7.9
应力降 $\Delta\sigma/\text{Pa}$	120
断层走向, 倾角	222°, 38°
断层上界埋深 h/km	3.0
大断层 $(L \times B)/\text{km}^2$	308 × 40
子断层 $(L \times B)/\text{km}^2$	3.5 × 2.0
窗函数	Saragoni – Hart
品质因子 $Q(f)$	上盘: $274.6 f^{0.423}$
	下盘: $206.7 f^{0.836}$
kappa 值	浅硬土层: 0.030
	深厚土层: 0.010
路径持时	0.0 $R < 10 \text{ km}$
	+0.16R $10 \leq R < 70 \text{ km}$
	-0.03R $70 \leq R < 140 \text{ km}$
	+0.04R $R \geq 140 \text{ km}$
阻尼比	0.05
活断层占比	50.0%
剪切波速 $v_s/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	3.5
破裂速度 $v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	0.8 × 剪切波速
地壳密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.8

表 3 基岩场地和土层场地的平均场地放大系数 (据喻烟, 2012)
Tab. 3 Average site amplification factors for shallow hard ground and soil sites (based on Yu, 2012)

频率/Hz	放大系数	
	基岩场地	土层场地
0.01	1.00	1.00
0.10	1.07	1.10
0.30	1.24	1.26
0.60	1.58	1.60
1.00	1.93	2.60
2.30	2.80	3.63
5.00	3.60	4.50
10.00	4.57	6.00
30.00	5.50	6.00
100.00	5.50	6.00

采用随机有限断层法拟合得到了 $R < 300 \text{ km}$ 的 87 个台站的加速度时程, 并计算得到模拟时程的 70% 和 90% 重要持时 (分别记为 T_{s70} 和 T_{s90}) 以及绝对和相对 Bolt 持时 (分别记为 T_{sBA} 和 T_{sBR}), 并统计得到 87 个台站模拟与记录时程持时比值的均值和标准差, 如表 4 所示。

表 4 87 个台站持时比的均值和标准差
Tab. 4 Mean value and standard deviation of the duration ratio of 87 stations

持时比类别		参数调整前		参数调整后	
		均值	标准差	均值	标准差
T_{s70}	ES/EW	1.01	0.241 9	1.22	0.315 5
	ES/NS	1.02	0.273 1	1.23	0.346 7
T_{s90}	ES/EW	0.86	0.193 8	0.96	0.213 5
	ES/NS	0.87	0.201 5	0.97	0.219 9
T_{sBR}	ES/EW	0.72	0.325 5	0.98	0.646 3
	ES/NS	0.70	0.302 7	0.94	0.484 6
T_{sBA}	ES/EW	0.76	0.217 9	0.80	0.273 8
	ES/NS	0.76	0.245 5	0.80	0.290 9

由表 4 可知, 参数调整前除 T_{s70} 的持时比均值很接近 1.00 外, 其余 3 种都小于 0.90, 其中 T_{sBR} 的 ES/NS 持时比均值只有 0.70。因此, 需进一步调整模拟汶川地震加速度时程的参数取值, 使更多持时定义的模拟与记录时程更为接近。

对于特定地震, $\Delta\sigma$ 、 $Q(f)$ 和 kappa 值对 T_s 的影响较大, 其中 kappa 值与相对持时成正相关而与绝对持时成负相关, 即 kappa 值对各种 T_s 的影响趋势不一 (袁峰, 2017)。这里采取调整 $\Delta\sigma$ 和区分上下盘影响的 $Q(f)$ 中 Q_0 和 f 值的方式。参考以往对四川地区 $\Delta\sigma$ 和 $Q(f)$ 的研究成果, 经反演确定用于模拟汶川地震的 $\Delta\sigma = 95 \text{ Pa}$, $Q(f)_{\text{上盘}} = 360f^{0.70}$, $Q(f)_{\text{下盘}} = 315f^{0.92}$, 由此得到参数调整后的 87 个台站模拟时程与记录时程比值的均值和标准差见表 4。对比参数调整前后的 4 种持时比值均值和标准差可知, 调整参数后的均值整体上有了明显升高, 除 T_{s70} 比值的均值与 1.00 差值更大外, 其余 3 种持时比值的均值都更接近于 1.00, 且此时标准差仍较小, 大都在 0.30 左右波动, 最大也不超过 0.65。调整参数后的 T_{s90} 及 T_{sBR} 的持时比均值分别达到 0.96 和 0.94 以上, 拟合结果能够很好地满足地震工程界对模拟时程持时的精度要求。

3 模型参数取值的合理性分析

以理县桃坪 (51LXT, R 为 23.0 km) 和九寨沟 (51JZB, R 为 114.2 km) 2 个台站为例, 从记录时程和模拟时程的波形、峰值加速度 (PGA) 及加速度反应谱 (S_a) 等方面进行对比分析, 说明所选用模型参数的合理性。

3.1 加速度时程波形

51LXT 和 51JZB 台站记录时程和模拟时程的波形见图 1。

(1) 51LXT 台的模拟时程的波形整体上与记录时程的波形很相近, 能够体现震动最为强烈的波段; 模拟时程的 PGA 值为 316.43 cm/s^2 , 而记录的 PGA 值为 $339.73 \sim 379.58 \text{ cm/s}^2$, 模拟值稍小于记录值;

(2) 51JZB 台在 $0 \sim 5 \text{ s}$ 的模拟加速度值稍大于记录值, 其它时间点的模拟效果很好。模拟 PGA 值为 94.32 cm/s^2 , 而记录的 PGA 值为 $70.84 \sim 112.20 \text{ cm/s}^2$, 模拟 PGA 值位于记录 PGA 值取值区间; 模拟时程的波形与记录时程波形很接近, 较好地反映了主震持续时间。

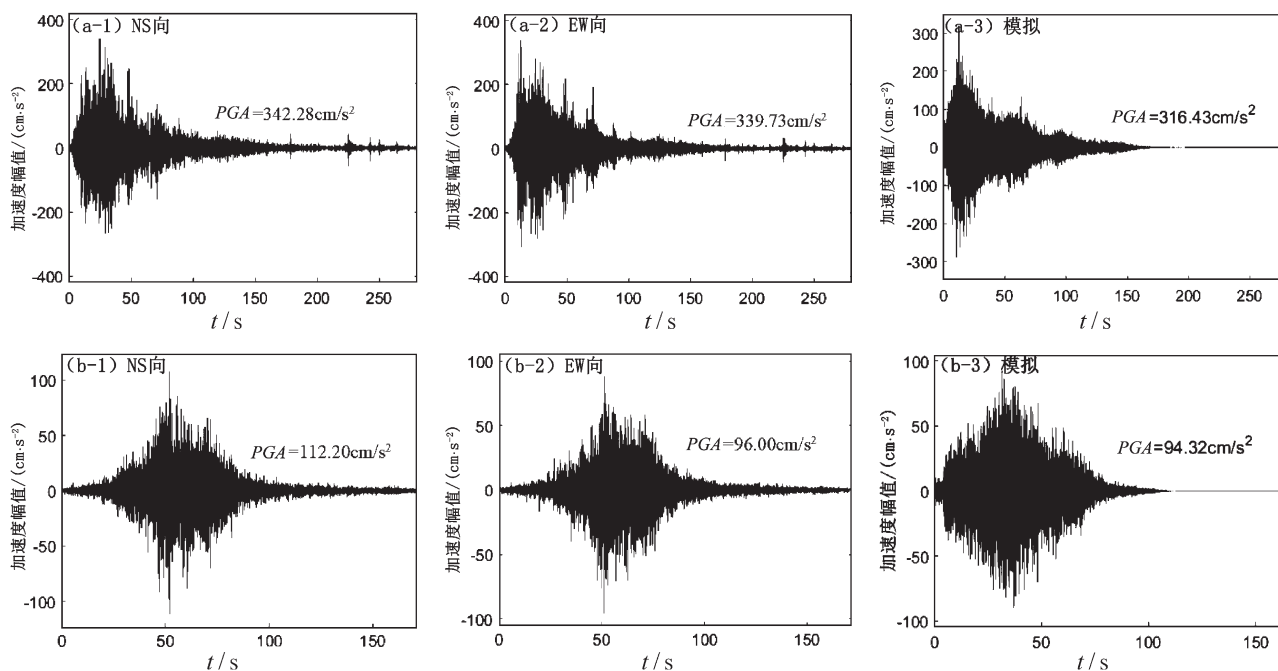


图 1 51LXT (a) 和 51JZB (b) 台站水平分量记录与模拟加速度时程的波形图

Fig. 1 Waveform diagrams of horizontal component and synthetic acceleration time histories of 51LXT (a) and 51JZB (b) stations

3.2 PGA 值

每个台站 50 条模拟时程的 PGA 期望值与记录时程的 PGA 及其误差值随断层距 R 变化对比见图 2。由图中看出, 模拟时程的 PGA 与记录时程 PGA 吻合程度较好, 衰减趋势基本一致; 相较于远场区域 ($R > 100 \text{ km}$), 近场区域 ($R \leq 100 \text{ km}$) 的模拟误差更小, 但大多数模拟误差均在 0.5 范围内, 即观测 PGA 值为模拟 PGA 值的 0.6 ~ 1.6 倍。由于台站记录的 PGA 值受场地效应和地形条件的影响较大, 而我国西南地区大都是山区地形, 因此很难模拟得到符合所有台站的 PGA 值。

3.3 加速度反应谱

模拟时程与记录时程的加速度反应谱 S_a 的对比见图 3, 图中灰色线条为 50 条模拟时程的加速度反应谱, 加粗线条为 50 条模拟时程的加速度反应谱的均值。

由图 3 可知, 51LXT 台的模拟时程的加速度反应谱值, 无论是在高频还是低频部分, 都与台站记录时程的加速度反应谱值很接近; 51JZB 台在 $0.8 \sim 5 \text{ s}$ 范围内的模拟时程的加速度反应谱值较记录时程偏大, 其它频率点的模拟效果很好。

第 j 个台站的记录时程和模拟时程在周期 T_i 后

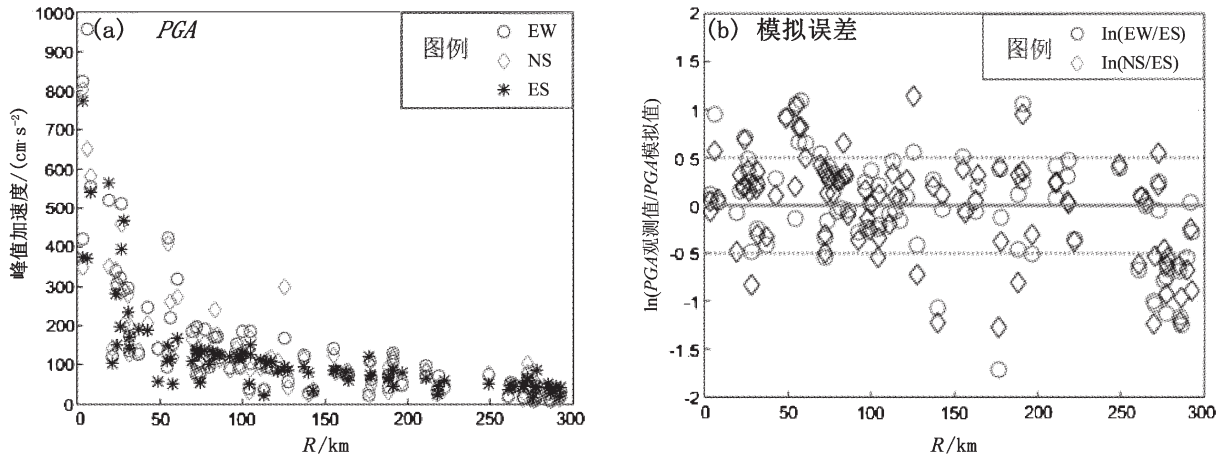


图2 记录时程 (a) 及模拟时程 (b) 的 PGA 及其比值的对数值随断层距的变化图

Fig. 2 Variation of PGA and the logarithm of its ratio of recording time history (a) and simulation time history (b) varied with the fault distance

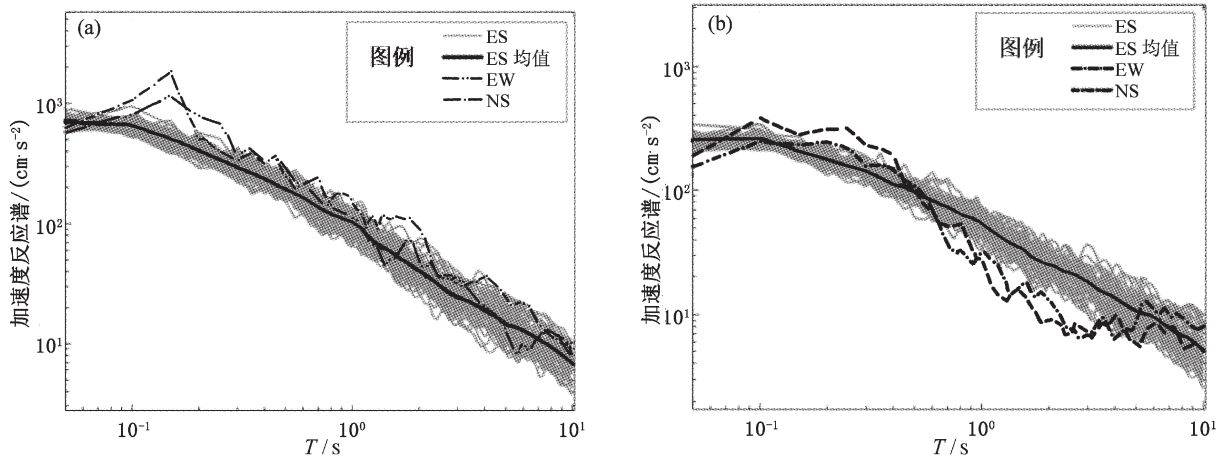


图3 51LXT 台 (a) 和 51JZB 台 (b) 水平分量时程与模拟加速度时程的反应谱对比图

Fig. 3 Comparison diagram of response spectra of horizontal component and synthetic acceleration time histories of 51LXT (a) and 51JZB (b) stations

的加速度反应谱的比值的对数取值可参照下式计算：

$$r_j(T_i) = \ln[S_{aj}(T_i)/S_{aj}'(T_i)] \quad (1)$$

式中： $S_{aj}(T_i)$ 和 $S_{aj}'(T_i)$ 分别为第 j 个台站记录的 EW 或 NS 分量时程和模拟时程在周期 T_i 的反应谱值。

加速度反应谱 S_a 比值的对数值的均值与方差可表示为 (李亚楠, 2016)：

$$B(T_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1, N} r_j(T_i) \quad (2)$$

$$\sigma^2(T_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1, N} [r_j(T_i) - B(T_i)]^2 \quad (3)$$

式中： N 为台站的数量，本文 N 取 87。

使用式 (2)、(3) 计算 87 个台站加速度反应谱比值的对数值的均值与方差，随周期的变化如图 4 所示。

由图 4 可知，所有台站的模拟值在 2 ~ 5 s 范围内与观测值吻合较好，平均误差接近于 0，表示模拟值与观测值很相近。但在 0.05 ~ 2 s 范围内，平均误差较大，由负值逐渐增大为正值，具体表现为：模拟值先是高估了观测值，而后两者差异逐渐减小；在 0.1 s 左右时，模拟值低于观测值，且随周期增大误差进一步增加，在 0.5 s 左右达到峰值。总体来说，模拟时程的加速度反应谱稍小于台站记录时程，但基本上能够满足大多数工程结构的要求。出现模拟值低估观测值的原因可能主要有以下 2 个方面：一是所取台站的 R 较大，

超过一半的台站 $R > 100$ km, 最大的 R 接近 300 km, 而以往研究表明随机有限断层法在近断层区域拟合效果较好, 在远场区域较差; 二是考虑到 $\Delta\sigma$ 与持时成负相关, 且以往研究模拟加速度时程的持时往往低估水平分量时程的持时, 因此所取 $\Delta\sigma$ 较张勇等 (2008) 关于汶川地震的研究成果偏小 (李亚楠, 2016)。

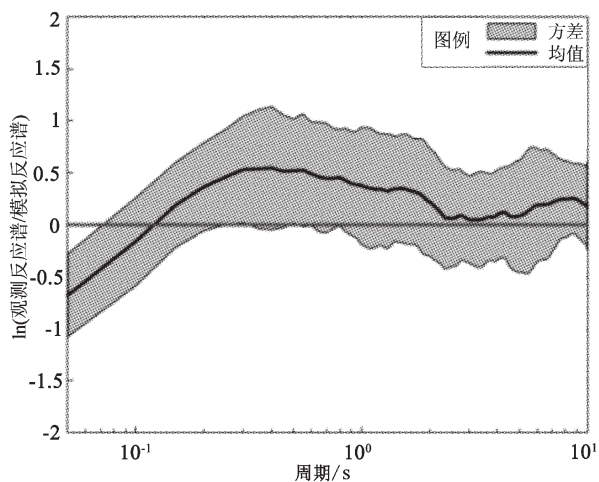


图4 汶川地震中 87 个台站观测和模拟反应谱比值的对数的均值和方差

Fig. 4 Mean value and variance of the logarithm of the ration of the observed and simulated response spectrum of 87 stations during the Wenchuan earthquake

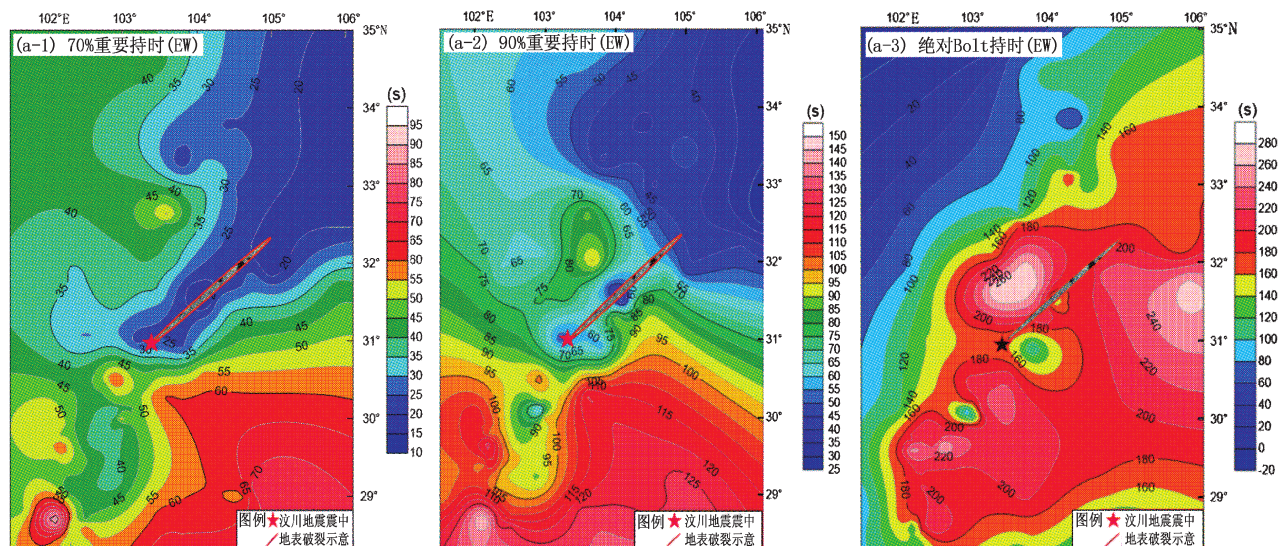
由上面的分析可知, 2 个台站的模拟时程在波形、 PGA 以及 S_a 都与台站记录比较接近, 说明所采用的随机有限断层模型参数是合理的。

4 模拟时程持时的空间分布特征

为分析模拟时程持时的空间分布特征, 利用调整后的模型参数, 每个台站 50 条模拟时程的持时平均值及记录时程持时的分布如图 5 所示。从图中可以看出:

(1) 模拟时程的各种持时分布均能很好地体现持时的破裂方向性效应, 即断层破裂前方区域的持时较后方小; 相较于记录时程持时分布体现出的显著上/下盘效应, 即上盘区域持时较下盘小, 模拟时程持时的分布并未很明显地表明持时的上/下盘效应, 但从断层的左下方区域的持时分布仍可看出上下盘持时分布存在差异, 表现为断层左下方持时较左上方持时更大。模拟时程的持时并没有将汶川地震记录时程的持时的上/下盘效应很好地体现出来, 可能是受到各种因素例如地形、场地效应等影响, 而模拟参数只在 $Q(f)$ 取值方面考虑了上/下盘区域的差异, 未从其他方面考虑上下盘区域存在的差异。

(2) 模拟时程的 T_{s70} 和 T_{s90} 均能体现近断层区域持时明显比远场持时小的特点, 即在断层附近出现了明显的持时较周围小的现象。从重要持时的总体分布而言, 模拟时程持时基本上能够反映记录时程持时表现出来的特征, 但在一些小区域的持时分布上仍存在差异, 表现为记录时程持时在某些区域存在“突变”, 如台站记录时程的 T_{s90} 在 (103°E , 30°N) 附近出现的“绿色”区域, 而模拟时程持时在总体空间分布上更为“单一”,



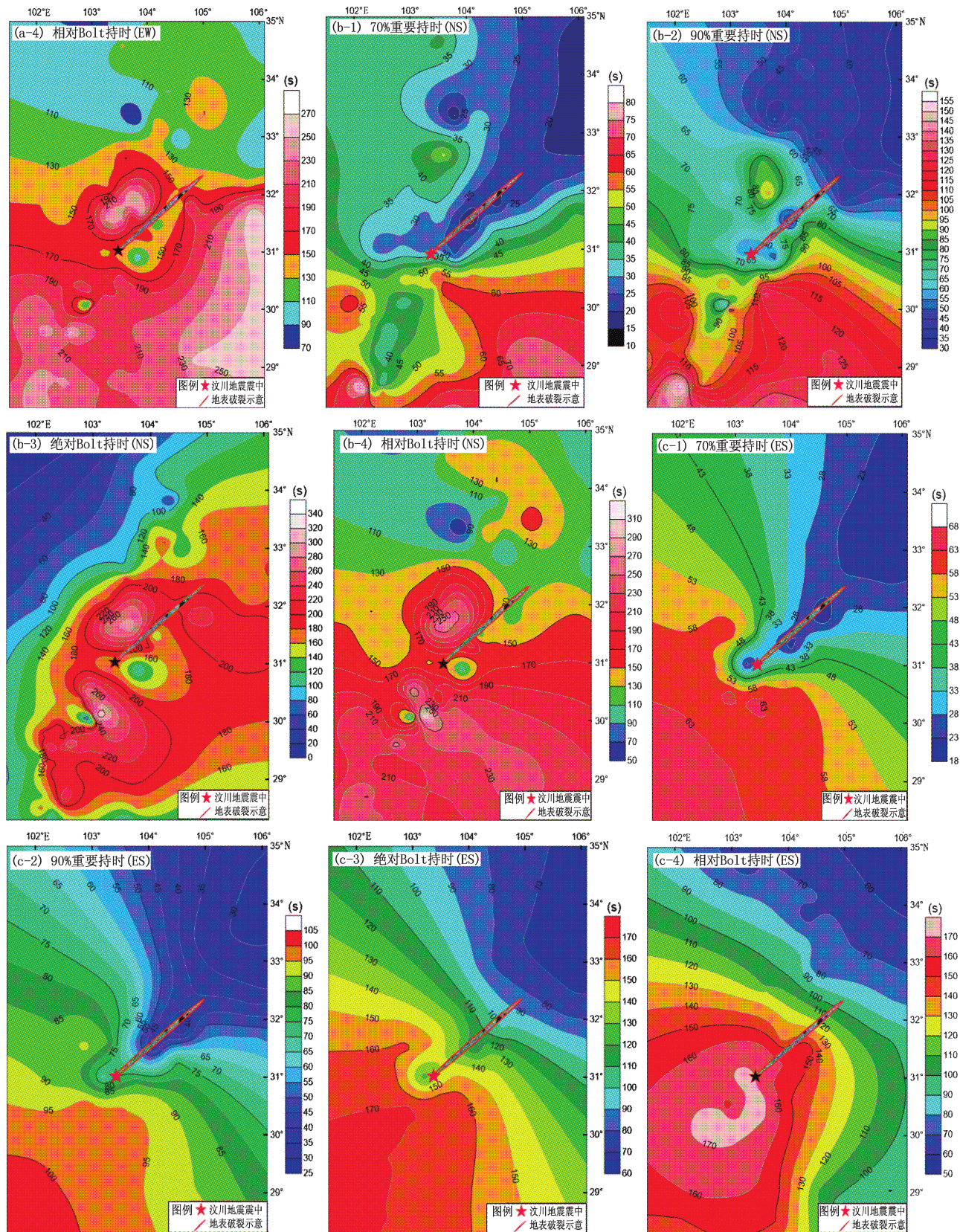


图5 EW向(a)和NS向(b)的记录时程与ES向模拟时程(c)的持时分布图

Fig. 5 Distribution of duration of the horizontal component time history in EW (a) and NS (b) direction and the synthetic time history ES (c)

未表现出明显的区域“突变”现象。这可能是由于持时受局部场地条件的影响较大,而模拟时程往往只是在整体上对场地条件进行模拟,很难反映小区域的场地条件变化。模拟时程与台站记录时程的这一差异在 Bolt 持时中也有体现。

(3) 相较于重要持时,模拟时程与台站记录时程的 Bolt 持时之间存在更大的差异。首先,台站记录时程的 Bolt 持时表现出上/下盘效应明显而破裂方向性效应较弱的特点,而模拟时程持时则刚好相反,表现出明显的上/下盘效应和较弱的破裂方向性效应。以 T_{sBR} 为例,由于汶川地震上盘区域峰值加速度和脉冲加速度均强于下盘区域,而 T_{sBR} 的阈值取决于与峰值加速度的相对大小,使得上盘区域的 T_{sBR} 阈值大于下盘,即计算持时的“准入门槛”更高,因此上盘区域的 T_{sBR} 更小。

5 模拟时程持时的空间变化性

模拟时程持时 T_{s70} 、 T_{s90} 及 T_{sBR} 随断层距 R 的空

间变化特性可以采用式 (4) (王倩, 2015) 进行拟合分析:

$$T_s = a + bR + c \lg R + \varepsilon \quad (4)$$

式中: a , b , c 均为回归系数; ε 为误差。

T_{sBA} 则采用式 (5) (王倩, 2015) 进行拟合分析:

$$T_{sBA} = ae^{bR} + \varepsilon \quad (5)$$

表 5 和图 6 同时给出了模拟时程和记录时程的各种持时随 R 变化的回归结果。从图 6 和表 5 可知:

(1) T_{s70} , T_{s90} , T_{sBA} 和 T_{sBR} 随 R 的变化趋势,总体上能够反映记录时程持时的空间变化特性。具体来说, $R > 100$ km 时, ES 向的 T_{sBA} 随 R 变化较为平缓,但从拟合参数 b 值可知,其确实是随着 R 增加而增加的。相较于 T_{s70} , ES 向 $R < 100$ km 的 T_{s90} 更能够反映记录时程持时的空间变化特性,表现为该范围内 T_{s90} 的记录值与拟合值曲线更为接

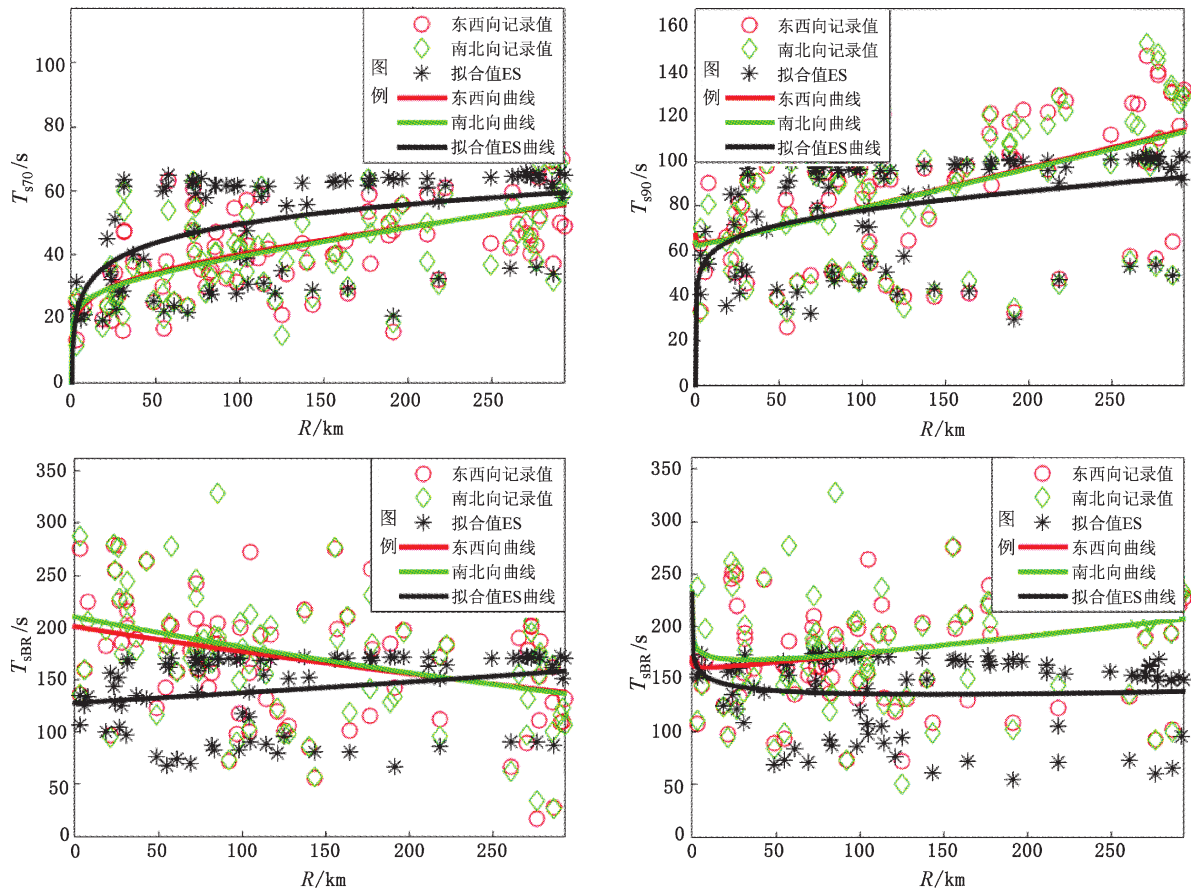


图 6 台站水平分量时程与模拟加速度时程的持时随断层距变化的拟合结果图

Fig. 6 The fitting result of the duration of the horizontal component and the synthetic time histories varied with the change of the fault distance

表5 各种定义的持时与断层距的回归关系

Tab. 5 Regression relationship between durations and fault distances of different definitions

持时		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
T_{s70}	EW	15.66	0.058 1	9.304
	NS	18.23	0.069 2	7.128
	ES	12.33	0.007 1	18.250
T_{s90}	EW	63.20	0.181 4	-1.172
	NS	62.09	0.176 0	-0.446
	ES	43.33	0.039 7	15.220
T_{sBR}	EW	162.20	0.178 2	-2.938
	NS	185.70	0.207 5	-15.840
	ES	170.60	0.061 1	-20.320
T_{sBA}	EW	200.90	-0.001 3	
	NS	210.10	-0.001 5	
	ES	127.70	0.000 7	

近。这可能是由于阈值为5%~95%时，重要持时能够体现更多的地震动能量范围，受局部脉冲加速度影响较小。

(2) 当 $R < 300$ km时，ES向的 T_{s70} 总体上大于台站记录时程的 T_{s70} ，且随着 R 的增加，这种差异逐渐减小，表现为 T_{s70} 的记录值与拟合值曲线随 R 的增加逐渐靠近。而 T_{s90} 和 T_{sBR} 则与 T_{s70} 的情况刚好相反，二者的模拟加速度时程持时都小于相应的台站记录时程持时，且随着 R 的增加这种差异逐渐增大。不同阈值的重要持时出现差异可能是由于：相较于台站记录时程，模拟时程在整个时域上分布的时间范围较小；且随着 R 的增加，实际地震波传播过程中受到传播路径及复杂地形等影响越大，而模拟过程中很难将这些影响因素原本地反映在模拟参数中，这导致时域上的时间范围差异逐渐增加；又考虑到台站记录时程的 T_{s70} 往往反映的是震动最为强烈、加速度脉冲最集中的时间部分，其受 R 增大的影响较 T_{s90} 小。因此，随 R 增加，模拟时程与记录时程的 T_{s70} 差异逐渐减小，而 T_{s90} 差异逐渐增大。

(3) 当 $T_{s90} < 60$ s时，绝大多数台站的模拟时程持时与台站记录时程持时相差很小，且随着 R 的增加，二者逐渐接近；当 $T_{s90} > 100$ s时，模拟时程与记录时程的持时之间差异较大，即很少有台站的模拟时程 $T_{s90} > 100$ s，此时持时似乎达到一种“饱和”状态，其他持时定义下的持时也有类似现象，表现在图中即为模拟时程持时的较大值

大小相当。这可能是由于模拟时程的过程中设定的模拟参数过于单一，很少体现地震发生、传播过程和场地条件等会出现的复杂“特殊”情况，而在实际地震中这些因素往往对持时的大小产生较大影响。

模拟时程和台站记录时程的 T_{sBA} 随 R 的变化趋势不一致，即台站记录时程的 T_{sBA} 随 R 的增大而减小，而此时模拟时程的 T_{sBA} 与 R 成正相关，表现在拟合系数上即为记录时程 T_s 曲线的 b 值为负数，而拟合值曲线的 b 值为正数。这可能是由于模拟时程在整个时域上分布的时间范围较记录时程小，而 T_{sBA} 是根据固定的加速度阈值进行计算，导致模拟时程的 T_{sBA} 总体较测点记录时程的持时小。

6 结论

基于随机有限断层法，参考现有汶川地震震源参数的研究成果，经反演确定了汶川地震的模型参数，并从模拟时程的波形、PGA几何衰减和 S_a 误差等方面检验了该模型参数的合理性，利用模拟得到的 $R < 300$ km的87个台站加速度时程，分析了模拟时程的持时特征。结果表明：

(1) 模拟时程的各种持时分布均能很好地体现持时的破裂方向性效应，但并未很明显地表明持时的上/下盘效应，然而从部分区域的持时分布仍可看出上、下盘持时分布存在一定差异。

(2) 模拟时程的重要持时能够体现近断层区域的持时明显比远场持时小的特点，相较于重要持时，模拟时程与记录时程的Bolt持时之间存在更大差异，且模拟时程的Bolt持时表现出明显的上/下盘效应和较弱的破裂方向性效应。

(3) 模拟时程的相对持时随 R 的变化趋势，总体上能够反映记录时程持时的空间变化特性，而模拟时程和记录时程的绝对Bolt持时随 R 的变化趋势并不一致。

本文开展的模拟时程持时的空间分布和空间变化规律分析，对随机有限断层模型参数的选取具有参考意义，为地震动时程模拟和结构抗震计算分析中地震动持时的确定提供了理论依据和计算方法。

参考文献：

- 毕研磊,张永志,曹海坤,等. 2017. 利用断层自剖分技术反演汶川 $M_w 7.9$ 地震滑动分布[J]. 地震研究, 40(2): 211-215.
胡进军. 2009. 近断层地震动方向性效应及超剪切破裂研究[D].

- 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 华卫,陈章立,郑斯华. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究[J]. 地球物理学报, 52(2):365–371.
- 李亚楠. 2016. 工程用地震动模拟随机性方法研究[D]. 大连:大连理工大学.
- 刘鸣,刘伯权,赖明. 1994. 考虑结构低周疲劳特性后强震持时对结构反应的影响[J]. 世界地震工程, (4):30–34.
- 卢书楠,翟长海,谢礼立. 2013. 汶川地震中强震持时的特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 33(2):1–7.
- 任叶飞,温瑞智,周宝峰,等. 2014. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学报, 57(6):1836–1846.
- 盛明强,罗奇峰,刘建成,等. 2007. 考虑场地类别与强震持时的滞回耗能谱的特征分析[J]. 地震研究, 30(2):169–174.
- 万卫. 2013. 汶川地震反应谱衰减关系研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 王倩. 2015. 水平地震动持时的特征研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 王巧临. 2014. 2011 年东日本 M_w 9.0 大地震地震动特征[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 王卫民,赵连锋,李娟,等. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 51(5):1403–1410.
- 喻畑. 2012. 汶川地震区地震动估计经验模型[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 袁峰. 2017. 汶川地震动持时特性分析[D]. 南昌:南昌航空大学.
- 张勇,冯万鹏,许力生,等. 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学:地球科学, 38(10):1186–1194.
- 赵翠萍,陈章立,周连庆,等. 2009. 汶川 M_w 8.0 地震震源破裂过程研究:分段特征[J]. 科学通报, 54(22):3475–3482.
- Chandramohan R, Lin T, Baker J W, *et al.* 2013. Influence of Ground Motion Spectral Shape and Duration on Seismic Collapse Risk [C]//Tokyo:10CUEE conference proceedings 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering.
- Hancock J, Bommer J J. 2007. Using spectral matched records to explore the influence of strong – motion duration on inelastic structural response[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27(4):291–299.
- Iervolino I, Manfredi G, Cosenza E. 2006. Ground motion duration effects on nonlinear seismic response [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(1):21–38.
- Nakamura T, Tsuboi S, Kaneda Y, *et al.* 2010. Rupture process of the 2008 Wenchuan, China earthquake inferred from teleseismic waveform inversion and forward modeling of broadband seismic waves [J]. Tectonophysics, 491(1):72–84.
- Raghunandan M. 2013. Influence of long duration ground shaking on collapse of reinforced concrete structures [D]. Boulder: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado.

Study on Spatial Distribution of Simulated Acceleration Ground Motion Duration of Wenchuan Earthquake

ZHONG Jufang¹, YUAN Feng^{1,2}, QIU Zhuo¹

(1. College of Civil Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

(2. Urban Planning Design Institute of Ganzhou, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract

Using the stochastic finite fault time history simulation program, we simulated the horizontal component acceleration time history in accordance with the regional characteristics of Wenchuan earthquake, and analyze the spatial distribution and variation law of simulated acceleration time duration. The results show that the distributions of each time duration of simulated acceleration time history can reflect the rupture directivity effect of time duration, but can not clearly reflect the upper/lower disk effect. Moreover, the significant duration of simulated acceleration time history can reflect the characteristics that the duration in near fault area is obviously smaller than that in far field, but it is more “single” in the overall spatial distribution and does not show obvious regional “mutation” phenomenon. Compared with the significant duration, there is a greater difference between the simulated acceleration duration and the Bolt holding time recorded by the station. The changing trend of these two durations could generally reflect the spatial variation characteristics of the horizontal component recording with the fault distance. **Keywords:** ground motion duration; stochastic finite – fault method; source parameters; Wenchuan earthquake; spatial distribution