

# 基于改进的经验格林函数方法的地震动模拟\*

李启成, 杜玉春, 严冬冬, 裴 蕾

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**改进的经验格林函数方法弃掉以往完全用经验方法确定用于合成大震的小震数目的方法, 考虑了大地震断层各个子断层位错的不均匀性, 使得经验格林函数方法的物理意义更加清楚。用改进的经验格林函数方法, 以汶川  $M_s 6.4$  余震记录作为经验格林函数模拟了九寨白河台、松潘安宏台、皋兰台和成都中和4个台站的加速度时程, 与以往的经验格林函数方法比较, 模拟结果的反应谱与记录符合得更好, 证明了改进的经验格林函数方法可以反映震源位错的复杂分布, 可以在工程地震中用来估计场地地震动过程。

**关键词:**经验格林函数方法; 地震动; 反应谱; 汶川地震

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)01-0074-07

## 0 引言

用经验格林函数方法模拟地震动, 为建筑物的抗震设防提供了较为准确的地震动时程, 使该方法成为广大地震工作者经常使用的模拟地震动的方法, 其要求大小地震必须满足“相似条件”(Irikura, 1986; Irikura, Kamae, 1994), 但随着地震资料的不断积累, 人们发现大小地震的不相似是普遍存在的。Pacheco 等(1992)研究结果表明, 对于较大地震, 其断层宽度往往达到整个发震带宽度, 此时地震断层宽度饱和, 大小地震的“相似条件”不再成立; Dalguer 等(2008)研究结果还表明, 出现地表破裂的大地震一定不会有小震与之“相似”。2008年5月12日汶川8.0级地震后, 出现了大范围的地表破裂, 其主断层面长300多公里, 有走滑分量, 也有倾滑分量, 很难有一个小震与它相似, 用该方法不能模拟像汶川这样的大地震。因此, “相似条件”使得经验格林函数方法的适用范围受到限制,

大地震断层位错不均匀已经被大量工作所证实(罗奇峰, 胡聿贤, 1990; 刘启方, 2005)。针对经验格林函数方法在计算过程中大地震各个子断层的位错取相同数值, 没有考虑断层面位错不均匀的问题, Irikura (2004), Irikura, Kamae (1994), 吴迪(2008)把经验格林函数方法与凸凹体模型结合来改进经验格林函数方法, 但该方法

仅用应力降描述凸凹体, 本质上仅考虑了大地震断层面最大位错部分与其它位错部分的区别, 没有充分考虑整个大地震断面上的位错不均匀。

目前经验格林函数方法中用于合成大地震的小震数目是由大、小地震的长度、宽度和位错的比值决定的。这个比值一般不为整数, 但在计算时小震数目必须取整数, 这个整数的取值只能根据上述比值加上经验的判断获得, 但经验判断有失经验格林函数方法在理论上的严密性。

汶川大地震断层面上位错十分不均匀, 如何描述这种位错的不均匀? 目前没有找到与汶川大地震相似的小震, 是否可以用经验格林函数方法合成大地震时程? 合成大地震的小震数目如何确定? 本文对经验格林函数方法进行改进, 并用改进方法模拟了汶川地震动。

## 1 经验格林函数方法的改进

李启成(2010)对经验格林函数方法进行了改进, 由式(1)来合成地震动。

$$U_{CB}(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{n=1}^{N_w} \sum_{k=1}^{N_D} \frac{R_{CB}(\theta, \varphi)}{R_{CS}(\theta, \varphi)} \times \frac{r_0}{r_{lm}} \times K_l \times K_n \times K_d \times F \times U_{CS}(x, t - t_{sln} - t_{dkln}). \quad (1)$$

其中,  $t_{dkln} = r_{lm}/V_c + \sqrt{(\xi_1 - \xi_0)^2 + (\eta_0 - \tau_0)^2}/V_r + (k_d - l)\tau_s$ ,  $t_{sln} = (r_{lm} - r_0)/V_c$ 。  $U_{CB}(x, t)$  和

\* 收稿日期: 2012-01-18.

基金项目: 黑龙江省教育厅 2011 年科研项目 (12513082) 资助.

$U_{CS}(x, t - t_{sln} - t_{dcln})$  分别是大小地震的时程； $r_0$  是小震震中到观测点的距离； $r_{lm}$  是大震子断层到观测点距离； $R_{CB}(\theta, \varphi)$  和  $R_{CS}(\theta, \varphi)$  分别是大小地震的辐射系数； $N_L$  和  $N_W$  分别为大小地震的长、宽比值，并向上取整； $N_D$  是大地震子断层的位错与小震位错的比值，并向上取整； $V_e$  是波的传播速度； $V_r$  是断层破裂传播速度； $\tau_s$  是小震的上升时间； $\xi$  和  $\eta$  表示断层面坐标，如图 1 和图 2 所示。

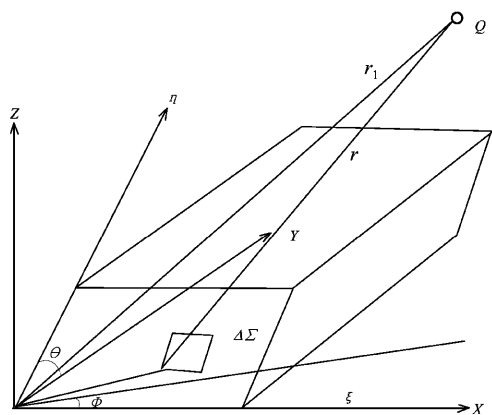


图 1 Haskell 矩形断层模型中表示的断层平面和坐标

Fig. 1 Fault plane and coordinate represented in the Haskell rectangular fault model

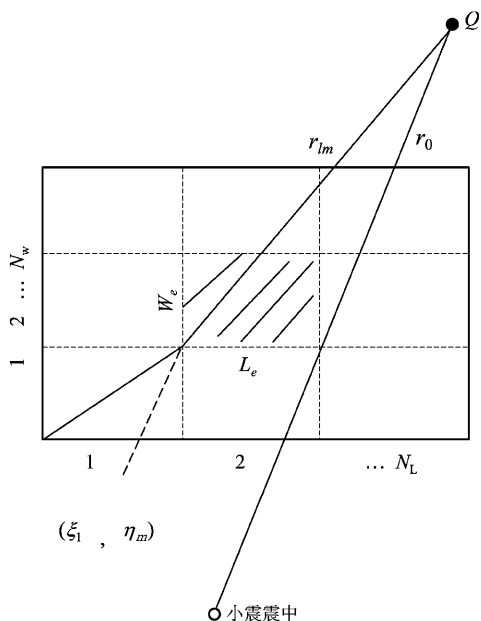


图 2 按照小震尺寸，把大地震断层划分为  $N_L \times N_W$  个单元

Fig. 2 Main shock fault is divided into  $N_L \times N_W$  elements based on the dimension of small earthquakes

式 (1) 中的  $K_l$ ,  $K_m$  和  $K_d$  的取值方法如下：(1) 当大小地震长、宽和位错的比值都为整数时， $K_l$ ,  $K_m$  和  $K_d$  都取为 1；(2) 当大小地震长、宽和位错的比值不为整数时， $K_l = 1$  ( $l = 1, 2, \dots, (N_L - 1)$ ),  $K_l =$  大小地震长度比值的小数部分 ( $l = N_L$ )； $K_m = 1$  ( $m = 1, 2, \dots, (N_W - 1)$ ),  $K_m =$  大小地震宽度比值的小数部分 ( $m = N_W$ )； $K_d = 1$  ( $d = 1, 2, \dots, (N_D - 1)$ ),  $K_d =$  大小地震位错比值的小数部分 ( $d = N_D$ )。

式 (1) 是改进的经验格林函数方法的数学表示，与经验格林函数方法相比，有以下几点改进：

(1) 以往经验格林函数方法要求大小地震必须满足“相似条件”；改进的经验格林函数方法仅要求大小地震震源机制相同，此方法扩展了以往经验格林函数方法的适用范围。

(2) 以往经验格林函数方法没有充分考虑整个大地震断层面上的位错不均匀。改进的经验格林函数方法在式 (1) 中增加了一项  $m$ ,  $m$  项描述了大地震断层面上各个子断层位错的不同。

(3) 在以往经验格林函数方法中，用于合成大地震的小震数目由大小地震长、宽和位错比值，并根据经验取整。在改进经验格林函数方法中比值的小数部分一律向上取整，整数部分的小震幅值与以往方法相同，小数部分的小震幅值由大小地震的长、宽和位错比值确定。改进的方法虽然是半经验的，但比以往完全靠经验取值的物理意义更加明确。

## 2 用改进的经验格林函数方法模拟汶川地震动

### 2.1 汶川地震的断层模型

2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震的断层从四川的康定地区到青川地区，长约 500 km，但破裂主要集中在康定到平武约 300 km 的区域。张勇等 (2008) 进一步的研究结果表明，汶川地震是一次以逆冲为主、兼有右旋走滑分量的断层错动；走向大约为  $220^\circ$ ，倾角约  $32^\circ$ ；地震释放的标量地震矩  $M_0 = 2.0 \times 10^{21}$  N·m，相当于矩震级  $M_w 8.1$ ；破裂始于映秀镇下方，断层面的最大应力降为 53 MPa，平均应力降为 18 MPa。

张勇等 (2008) 研究的结果还表明，汶川大地震断层面上的滑动分布很不均匀。大地震断层示意图如图 3 所示，一共有 4 个滑动量集中区域。最大的滑动区位于初始破裂点附近，在汶川和映秀下方，

沿断层走向 180 km, 倾向 50 km, 最大滑动量 7.3 m。第二大滑动区位于北川一带, 沿断层走向达 60 km, 倾向 35 km, 最大滑动量为 5.6 m。第三大滑动区在康定以北地区, 沿断层走向约 50 km, 倾向约 45 km, 最大滑动量为 1.8 m。位于青川东北地区还存在一个较小的滑动集中区, 最大滑动量 0.7 m, 由于这部分的滑动量小, 且滑动区范围不大, 在模拟时将其忽略。进一步的计算得出, 整个断层面上的平均滑动为 2.4 m, 向东北方向的破裂速度为 3.4 km/s, 向西南方向的破裂速度为 2.2 km/s, 剪切波速取 3.2 km/s。计算过程中取汶川大地震的断层面从康定到平武长约 360 km, 宽约 50 km, 断层走向为 220°, 倾角 32°。

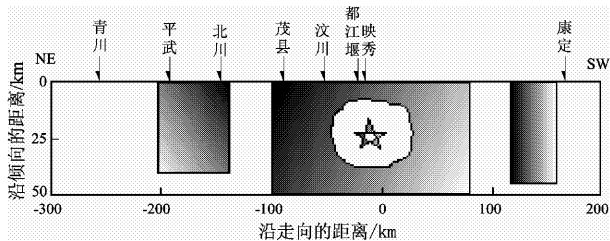


图3 汶川地震断层示意图  
Fig. 3 Sketch map of fault in Wenchuan  
M8.0 earthquake

2.2 汶川地震参数和计算模型

汶川 8.0 级地震后, 发生了一次  $M_s6.4$  强余震。这次余震以倾滑为主, 兼有走向滑动 (郭祥云等, 2010), 与主震的震源机制有很大的相似性, 用改进的经验格林函数方法模拟主震可以取这次余震为经验格林函数。根据反演结果和经验关系得到的这次余震断层参数如表 1 所示 (张勇等, 2008)。

图 4 表示汶川 8.0 级地震断层的计算模型和子断层的划分 (李启成, 2010), 图中的  $D$  表示每个子断层的位错,  $m$  值表示每个子断层位错的不均匀。

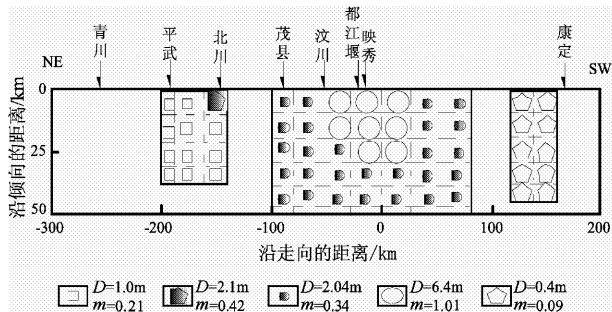


图4 汶川地震断层的计算模型  
Fig. 4 Computational model of Wenchuan  
M<sub>s</sub>8.0 earthquake

表 1 汶川  $M_s6.4$  余震参数  
Tab. 1 Parameters of Wenchuan  $M_s6.4$  aftershock

震源深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	上升时间/s	矩震级	$M_0/\text{dyne} \cdot \text{cm}$	$(L \times W)/\text{km}^2$	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	D/m
14	251	74	0.30	6.5	$6.3 \times 10^{25}$	$29.9 \times 9.6$	3.4	0.62

2.3 模拟结果

用汶川  $M_s6.4$  余震记录作为经验格林函数模拟了九寨白河台、松潘安宏台、皋兰台和成都中和 4 个台站的加速度时程。

图 5 是九寨白河台记录的、用没考虑断层位错不均匀的经验格林函数方法 (模拟 1) 和考虑位错不均匀改进的经验格林函数方法 (模拟 2) 模拟得到的汶川地震东西、垂直方向加速度时程, 及其反应谱比较。从图中可以看出, 考虑断层位错不均匀模拟得到的反应谱与记录符合得更好。

图 6 是在松潘安宏记录的、用没考虑断层位错不均匀的经验格林函数方法 (模拟 1) 和考虑位错不均匀改进的经验格林函数方法 (模拟 2) 模拟得到的汶川地震东西、南北方向加速度时程, 及

其反应谱比较。从图中可以看出, 考虑断层位错不均匀模拟得到的反应谱与记录符合得更好。

图 7 是在皋兰记录到、用没考虑断层位错不均匀的经验格林函数方法 (模拟 1) 和考虑位错不均匀改进的经验格林函数方法 (模拟 2) 模拟得到的汶川地震东西、南北方向加速度时程, 及其反应谱比较。从图中可以看出, 考虑断层位错不均匀模拟得到的反应谱在高频部分与记录符合得更好。

图 8 是在成都中和记录到、用没考虑断层位错不均匀的经验格林函数方法 (模拟 1) 和考虑位错不均匀改进的经验格林函数方法 (模拟 2) 模拟得到的汶川地震南北东西、竖直方向加速度时程, 及其反应谱比较。从图中可以看出, 考虑断层位错不均匀模拟得到的反应谱与记录符合得更好。

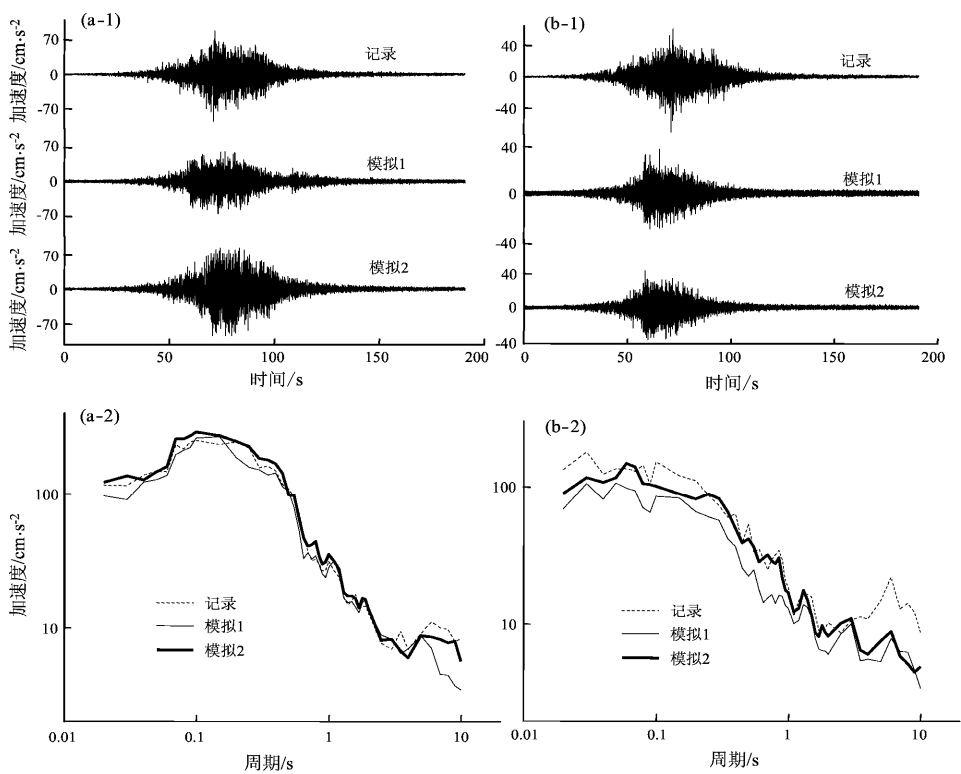


图 5 九寨沟白河台三种情况下汶川地震东西方向 (a)、竖直方向 (b) 加速度时程和反应谱比较  
Fig. 5 Comparison of EW (a) and vertical (b) acceleration time-histories and response spectrum of Wenchuan *M*8.0 earthquake recorded by Baihe Station in Jiuzhai Country in three situations

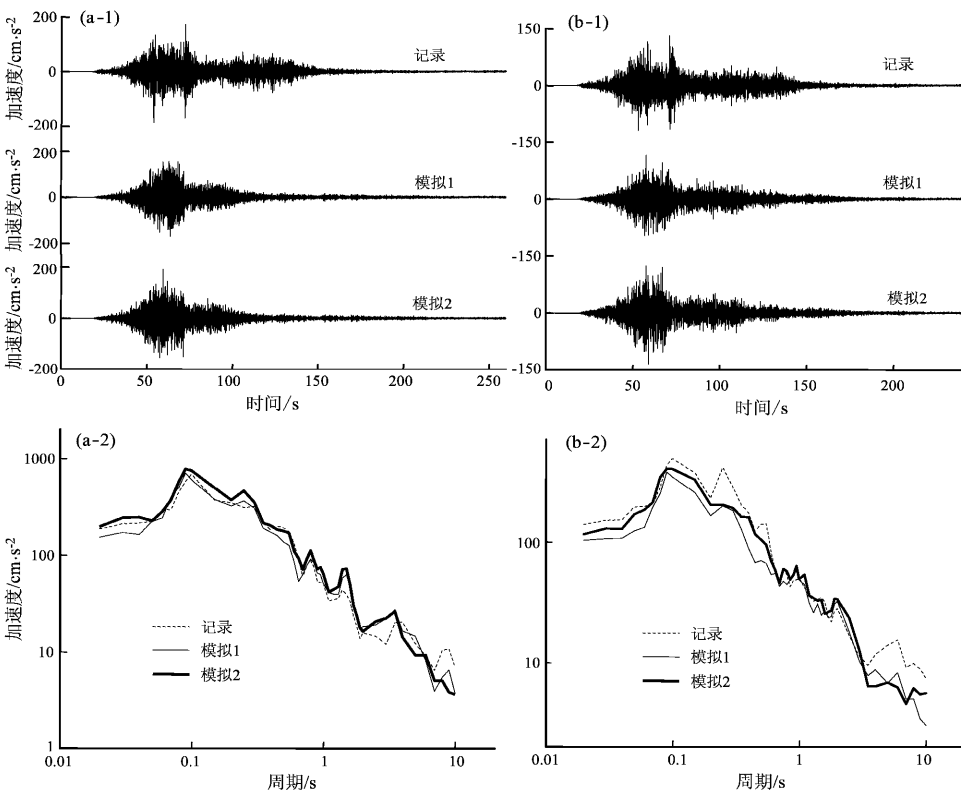


图 6 松潘安宏台三种情况下汶川地震东西 (a)、南北方向 (b) 加速度时程和反应谱比较  
Fig. 6 Comparison of EW (a) and SN (b) acceleration time-histories and response spectrum of Wenchuan *M*8.0 earthquake recorded by Anhong Station in Songpan Country in three situations

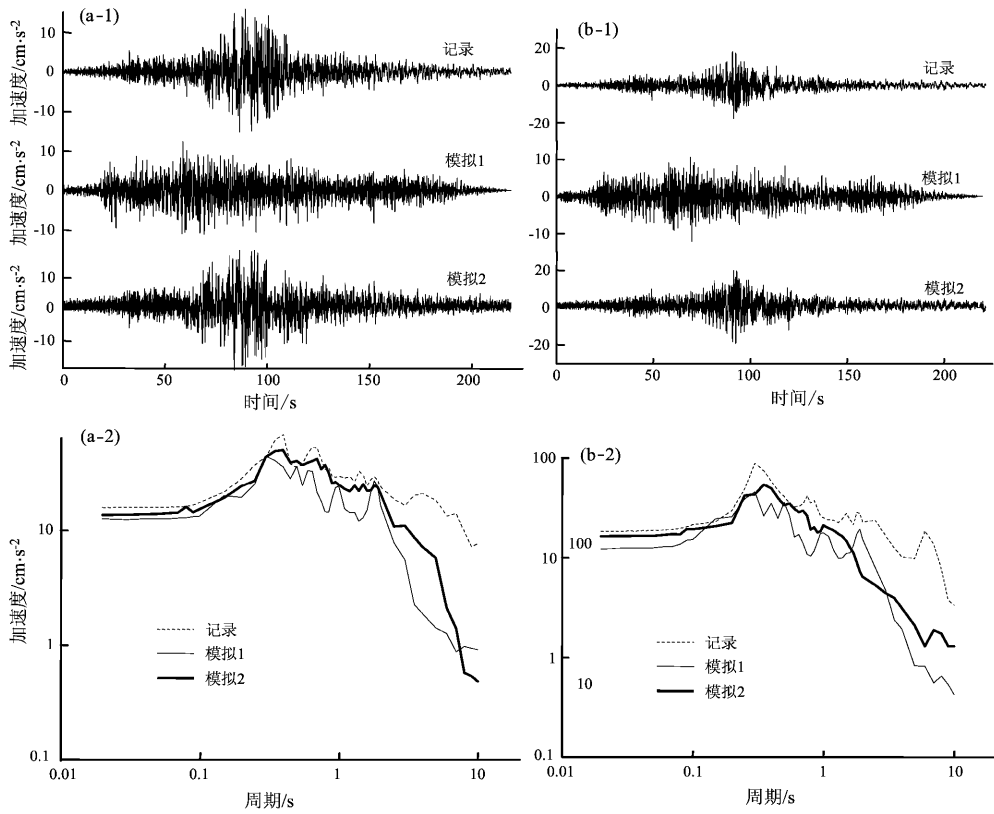


图7 皋兰台三种情况下汶川地震东西 (a)、南北方向 (b) 加速度时程和反应谱比较  
Fig.7 Comparison of EW (a) and SN (b) acceleration time-histories and response spectrum of Wenchuan M8.0 earthquake recorded by Gaolan Station in three situations

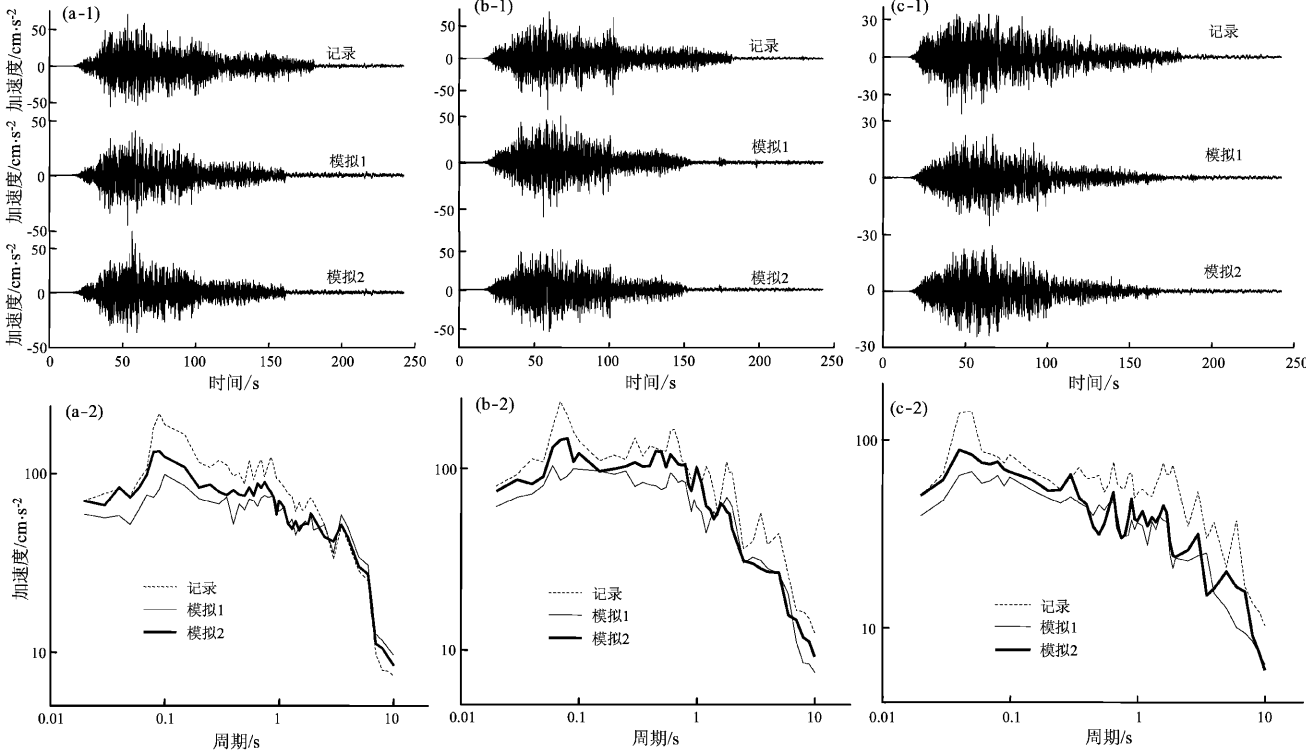


图8 成都中和台三种情况下汶川地震南北 (a)、东西 (b)、竖直方向 (c) 加速度时程和反应谱比较  
Fig.8 Comparison of EW (a) and SN (b) acceleration time-histories and response spectrum of Wenchuan M8.0 earthquake recorded by Zhonghe Station in Chengdu in three situations

### 3 讨论

改进的经验格林函数方法考虑了大地震断层面各个子断层位错的不同, 改变了以往不考虑各个子断层位错差异的计算方法, 计算方法更接近断层位错过程的物理本质。

在以往的经验格林函数方法中, 用于合成大地震的小震数目由大小地震长、宽和位错比值确定, 长、宽和位错比值相同, 其比值的小数部分根据经验取舍。改进的经验格林函数方法中小震数目依然由大小地震的长、宽和位错比确定, 但长、宽和位错的比值可以不相同, 整数部分的小震幅值的处理方法与以往相同, 小数部分的小震幅值根据大小地震的长、宽和位错比值进行相应调整。改进的方法虽然是半经验的, 但保证了合成大地震的地震矩守恒, 比以往完全用经验方法取值是一个进步, 其物理意义也更清楚。

地震动的模拟十分复杂, 一般很难要求模拟的加速度时程与记录符合得十分好。现在公认的标准是通过模拟结果的反应谱或傅里叶谱与记录的反应谱或傅里叶谱的符合程度, 来评判模拟结果。我们用改进的经验格林函数方法模拟结果的反应谱与记录反应谱符合得比较好, 证明了改进的经验格林函数方法可以反映震源位错的复杂分布, 并可以在工程地震中用来估计场地地震动过程。

### 参考文献:

- 郭祥云, 陈学忠, 李艳娥, 等. 2010. 2008年5月12日四川汶川8.0级地震与部分余震的震源机制解[J]. 地震, 30(1): 50-60.
- 李启成. 2010. 经验格林函数方法模拟地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 刘启方. 2005. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 罗奇峰, 胡聿贤. 1990. 改进的经验格林函数法和卢龙近场加速度合成[J]. 地震工程与工程振动, 10(3): 1-13.
- 吴迪. 2008. 基于凸凹体模型的地震动半经验合成研究[D]. 上海: 同济大学.
- 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(D辑: 地球科学), 38(10): 1186-1198.
- Dalguer L A, Miyake H, Day S M, *et al*. 2008. Surface Rupturing and Buried Dynamic-Rupture Models Calibrated with Statistical Observations of Past Earthquakes[J]. BSSA, 98(3): 1147-1161.
- Irikura K, Kamae K. 1994. Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique[J]. ANNALI DI GEOFISICA, X X X VII(6): 1721-1743.
- Irikura K. 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function[C]//Proc 7th Japan Earthquake Symp. Japan: Tokyo, 151-156.
- Irikura K. 2004. Recipe for predicting strong ground motions from future large earthquakes[J]. Disaster Prevention Research Institute Annals, Kyoto University, 47(A): 25-45.
- Pacheco J F, Scholz C H, Sykes L R. 1992. Changes in frequency-size relationship from small to large earthquakes[J]. Science, 355(6355): 71-73.

## Ground Motion Simulation Based on Improved Empirical Green's Function Method

LI Qi-cheng, DU Yu-chun, Yan Dong-dong, Pei Lei  
(*Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China*)

### Abstract

The improved Empirical Green's Function method considers the displacement heterogeneity at each sub-faults of fault of main shock, makes the physical meaning of Empirical Green's Function method clearly, and abandons previous empirical method which confirms small earthquake numbers used to synthesize main shock. We use Wenchuan  $M_s 6.4$  aftershock records as the Empirical Green's function, and simulate the acceleration time histories at Baihe Station in Jiuzhai County, Anhong Station in Songpan Country, Gaolan Station and Zhonghe Station in Chengdu by the improved Empirical Green's function method. Compared with former results by Empirical Green's function method, response spectrums in the simulation results are more closer to the records, which prove the complicated distributions of epicenter displacements can be reflected by the improved Empirical Green's function method, this method can be used to estimate site ground motion processes in engineering seismology.

**Key words:** Empirical Green's Function method; ground motion; response spectrum; Wenchuan earthquake