

刘浪, 李小军, 彭小波. 2011. 汶川地震中强震动相对持时的空间变化特性研究. 地震学报, 33(6): 809-816.  
Liu Lang, Li Xiaojun, Peng Xiaobo. 2011. Study on relative duration of strong motions during the great Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 33(6): 809-816.

# 汶川地震中强震动相对持时的 空间变化特性研究<sup>\*</sup>

刘浪<sup>1),†</sup> 李小军<sup>2)</sup> 彭小波<sup>3)</sup>

1) 中国上海 200092 同济大学土木工程学院

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

**摘要** 使用 70% 和 90% 能量持时定义, 计算了汶川  $M_s 8.0$  大地震中获取的来自 109 个台站强震动加速度记录的相对持时, 并以此在竖向及两个水平向上分别进行了回归统计分析, 得到了地震动持时的空间变化关系, 给出了适合汶川地震地震动的持时定义. 对比分析了上盘和下盘 2 个区域持时空间变化特征, 进一步计算了地震动竖向持时与两个水平向持时的比值, 揭示出汶川地震地震动持时的空间变化特性.

**关键词** 汶川地震 强震动记录 相对持时 衰减关系 上、下盘

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.011 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Study on relative duration of strong motions during the great Wenchuan earthquake

Liu Lang<sup>1),†</sup> Li Xiaojun<sup>2)</sup> Peng Xiaobo<sup>3)</sup>

1) Civil Engineering School, Tongji University, Shanghai 200092, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

**Abstract:** Relative durations of strong ground motions from 109 station records of  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake are calculated based on 70% and 90% energy duration definition. Attenuation relationships of the durations under different definitions are statistically analyzed for three component records and 90% duration definition is recommended. The relationships in the hanging wall and footwall of earthquake faults are compared and the ratios of vertical duration to horizontal duration are discussed for different areas.

**Key words:** Wenchuan earthquake; strong ground motion record; relative duration; attenuation relationship; hanging wall/foot wall

\* 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715038)和国家科技支撑计划项目(2009BAK55B05)资助.

收稿日期 2010-12-28 收到初稿, 2011-04-28 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: yilupaolai2008@163.com

## 引言

持续时间(以下简称持时)是用来描述地震动强度变化的参数。尽管地震学家和工程师们早已经意识到了持时对地震动破坏性作用影响的重要性,但是对于持时展开系统的研究却是近 30 年来才开始的。在 Housner(1975)和 Seed(1975)等对震害研究的基础上, Housner 明确提出了建议对持时展开研究,近些年来的地震记录及震害报告分析中进一步加强了对持时重要性的认识。一直以来在工程上,关于结构地震反应分析的计算通常假设材料具有线性的本构关系。在这一阶段内,考虑反映强度或频度的参数(如峰值加速度或反应谱)对结构的影响相比持时更为重要。但当结构的反应超过弹性极限而进入非弹性反应阶段的时候,持时对结构反应的影响变得更为重要,因此在结构非弹性反应计算分析中,应考虑持时的影响(董娣, 2006)。目前,地震学中的持时通常是绝对持时,即由初始波到达时刻起,直至可见记录消失并出现脉动信号时的时间间隔(胡聿贤, 1988)。而地震工程中通常关心的是地震动的强震动部分,因此除了绝对持时之外,更多的采用相对持时。绝对持时包括 Bolt 括号持时(Bolt, 1973),相对持时则包括 Kawashinat 持时、Husid 持时(Trifunac, Brady, 1975)、二阶距持时(谢礼立, 周雍年, 1984)、Vanmarcke 和 Lai 定义的强震能量持时(谢礼立, 张晓志, 1988)。其中 Husid 能量持时包括 90% 能量持时和 70% 能量持时(Trifunac, Brady, 1975)。现在常用的持时多为 Husid 定义的能量持时,其计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_d = T_2 - T_1 \\ I(T_1) = 0.05 \text{ 或 } 0.15 \quad I(T_2) = 0.95 \text{ 或 } 0.85 \\ I(t) = \frac{\int_0^t A^2(t) dt}{\int_0^T A^2(t) dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中,  $T$  表示时间,  $t$  表示加速度记录时长,  $A$  表示加速度,  $I$  表示地震波能量。本文中将采取该能量持时的定义来计算持时,并同时根据两种不同的能量持时值来计算以作比较。

## 1 数据及持时空间变化模型

本文所采用的数据全部引自国家强震动台网中心提供的强震动加速度记录,共来自 109 个台站(李小军等, 2008)。其中基岩场地共 18 个台站,土层共 91 个台站。同时,以断层(中央断裂地表破裂带)端点为起点沿 NS 方向各偏移 45°,并根据台站所处的位置分为 2 个区域,即上盘区域和下盘区域,两个区均将东西向和南北向的水平记录作为两次独立的观测量。这样上盘区域包括了 156 条水平向记录,78 条垂向记录;下盘区域包括 62 条水平向记录,31 条垂向记录。持时的回归模型采用

$$\lg Y = b_0 + b_1 R + b_2 \lg R + \epsilon \quad (2)$$

式中,  $Y$  为能量持时;  $R$  为台站至断层破裂面的垂直距离,即断层距;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  均为常数;  $\epsilon$  为随机误差。

## 2 水平向持时回归结果及比较

上盘区水平向回归结果为

$$90\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_1 = 2.2412 + 0.001R - 0.2844 \lg R \quad (3)$$

$$70\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_2 = 1.8734 + 0.0007R - 0.1994 \lg R \quad (4)$$

下盘区水平向回归结果为

$$90\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_1 = 1.2724 - 0.0002R + 0.3136 \lg R \quad (5)$$

$$70\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_2 = 0.7216 - 0.0009R + 0.5758 \lg R \quad (6)$$

回归的结果与原始数据示于图 1 和图 2.

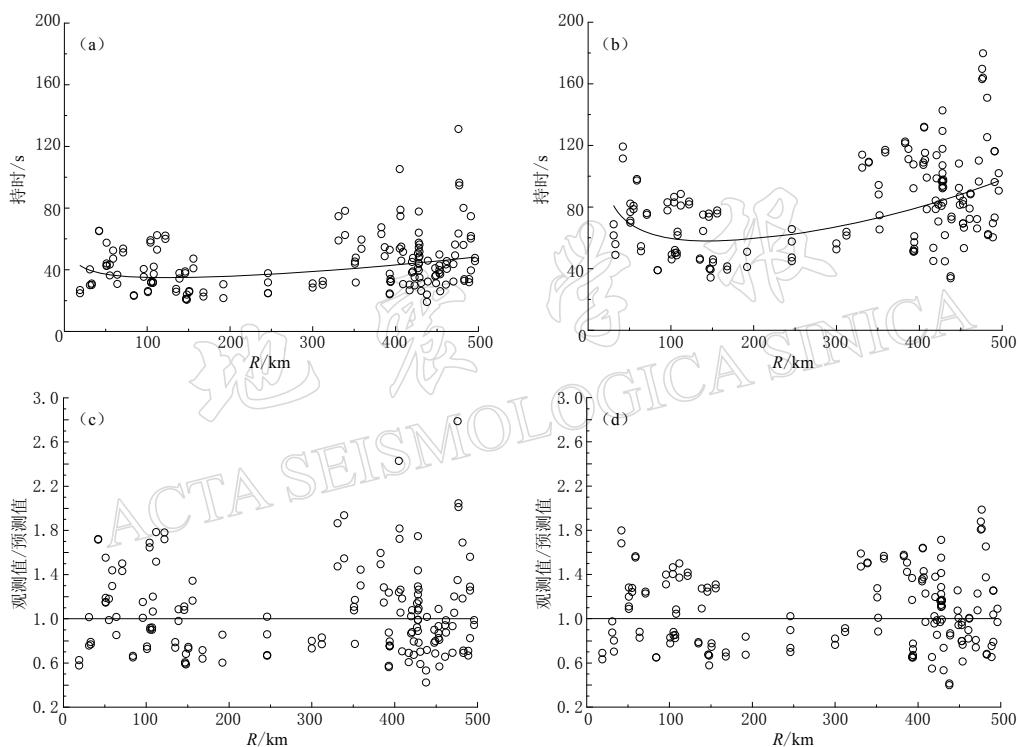


图 1 上盘区水平向 70% 和 90% 能量持时结果比较

(a), (b) 分别为 70% 和 90% 能量持时的拟合结果; (c), (d) 为其对应的观测值与计算值之比

Fig. 1 Comparison of the 70% (left) and 90% (right) energy duration  
for horizontal records in fault hanging wall area

(a) and (b) show fitted curves of 70% and 90% energy duration respectively;

(c) and (d) are ratios of observed to predicted durations

## 2.1 两种持时定义的比较

由图 1 和图 2 的两个区域原始数据拟合曲线以及观测值与计算值之比的两类图中均可看出, 两种不同定义得到的拟合曲线基本上反映了持时的变化趋势, 即随着断层距的增加而持时逐渐增大。相比较而言, 第一种持时定义所得到的结果随距离的增加更为明显, 第二种则相对缓慢; 上盘区和下盘区的持时在远场随距离的增幅都不明显, 其离散性要小一些, 即在差不多的断层距处持时大小也相差不大, 而第一种定义得到的结果则反映出持时差异要大一些。究其原因, 作者认为, 地震波能量沿着断层不断释放和衰减, 其过程可以大致分为 3 个部分: 能量弱释放阶段、能量集中释放阶段和能量后续释放阶段。第

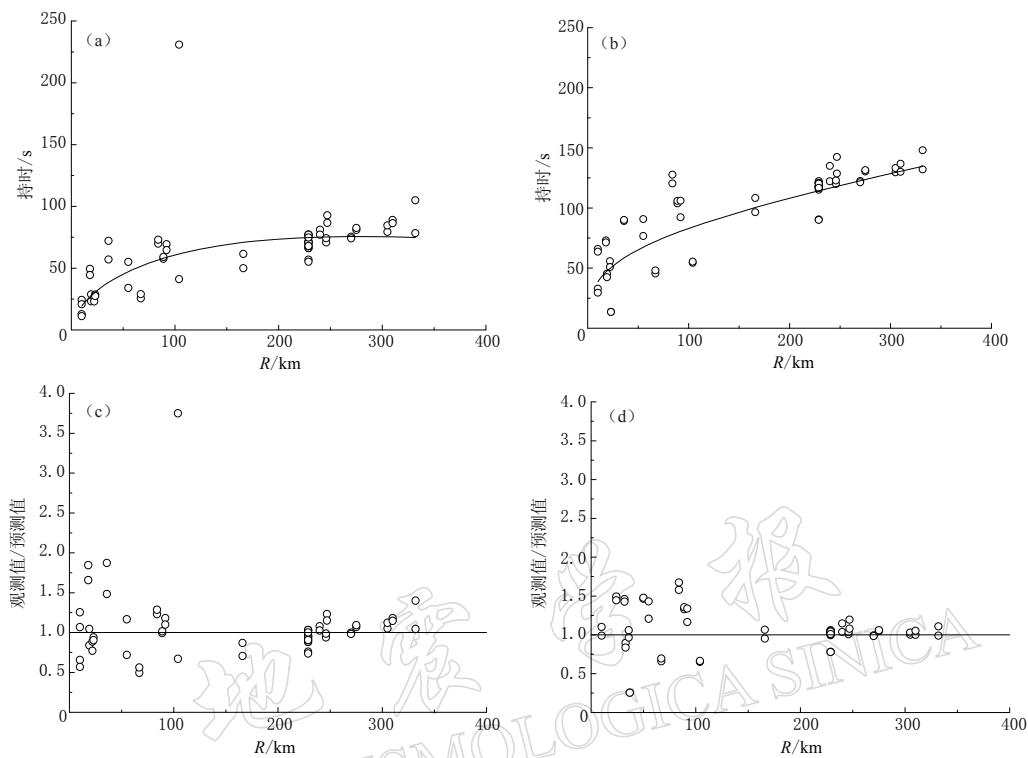


图 2 下盘区水平向 70% 和 90% 能量持时结果比较

(a), (b) 分别为 70% 和 90% 能量持时的拟合结果; (c), (d) 为其对应的观测值与计算值之比

Fig. 2 Comparison of the 70% (left) and 90% (right) energy durations for horizontal records in footwall area  
 (a) and (b) show fitted curves of 70% and 90% energy duration respectively;  
 (c) and (d) are ratios of observed to predicted durations

一个阶段主要受到 P 波控制(假设强震仪由首先到达的 P 波触发);第二阶段包括 P 波和 S 波甚至瑞雷波,但主要由直达的 S 波控制;第三阶段则主要包括经多次反射、折射和散射的体波. 其中第二个阶段在 Husid 图中近似为一条直线,因此它是相对稳定的(Dobry *et al*, 1978). 由第二种定义得到的持时主要代表了能量集中释放的持续时间,也就是说当不同的地震波传播到距离断层差不多远近的台站处,尽管记录到的不同地震波各自的总能量不同,但大部分在第二个阶段持续时间是差不多的. 反观第一种持时定义,除包括了能量集中释放这个阶段,它还相对广一些地包含了部分一、三阶段,这样得到的结果离散性自然要大一些. 鉴于汶川地震是一次特大地震,地震动的最大值和次大值出现的时间并非一定在震动的前期,即使到了整个震动过程的后期,依然可能出现比较大的峰值,说明上述的第三阶段中有许多体波不断反射、折射和散射,它们所包含的能量也不容忽视. 因此,本文主张采用第一种定义,即 90% 能量持时.

## 2.2 两个区域的水平向持时比较

根据上述原因,本文针对第一种定义所得结果进行比较分析. 由图 2a 和图 2c 可以看出下盘区的数据拟合情况更好. 同时,除了在近断层区域(50 km)上盘区的持时大于下盘区外,在中远场(100 km)和较远场(200 km)下盘区的计算值都大于上盘区. 而且下盘区持时随断层距增大的速率要比上盘区快很多. 作者曾对比分析过两个区域峰值加速度的衰减

情况(刘浪,李小军,2011),发现两个区域峰值加速度除近断层区外其它地方差别并不十分明显,尤其是在较远场,而且衰减速率也相差无几(刘浪,2010).但是在持时上差异却变得十分明显。诸多研究表明,持时与场地条件有极其紧密的关系,特别是软土层对持时的影响比较大。软土的强震动平均持时比中等场地约长5—6 s,比坚硬场地约长10—12 s,而大约是基岩平均持时的2倍(Vanmarcke,Lai,1980).因此出现该现象的原因也很有可能与下盘区位于四川盆地有关。对于该问题需要做出进一步的分析。

### 3 坚向持时回归结果及比较

上盘区坚向回归结果为

$$90\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_1 = 1.7596 + 0.0004R + 0.0002\lg R \quad (7)$$

$$70\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_2 = 1.8042 + 0.0007R - 0.1721\lg R \quad (8)$$

下盘区坚向回归结果为

$$90\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_1 = 1.2476 + 0.0002R + 0.3326\lg R \quad (9)$$

$$70\% \text{ 能量持时} \quad \lg Y_2 = 0.9539 - 0.0001R + 0.4043\lg R \quad (10)$$

回归的结果与原始数据示于图3和图4。

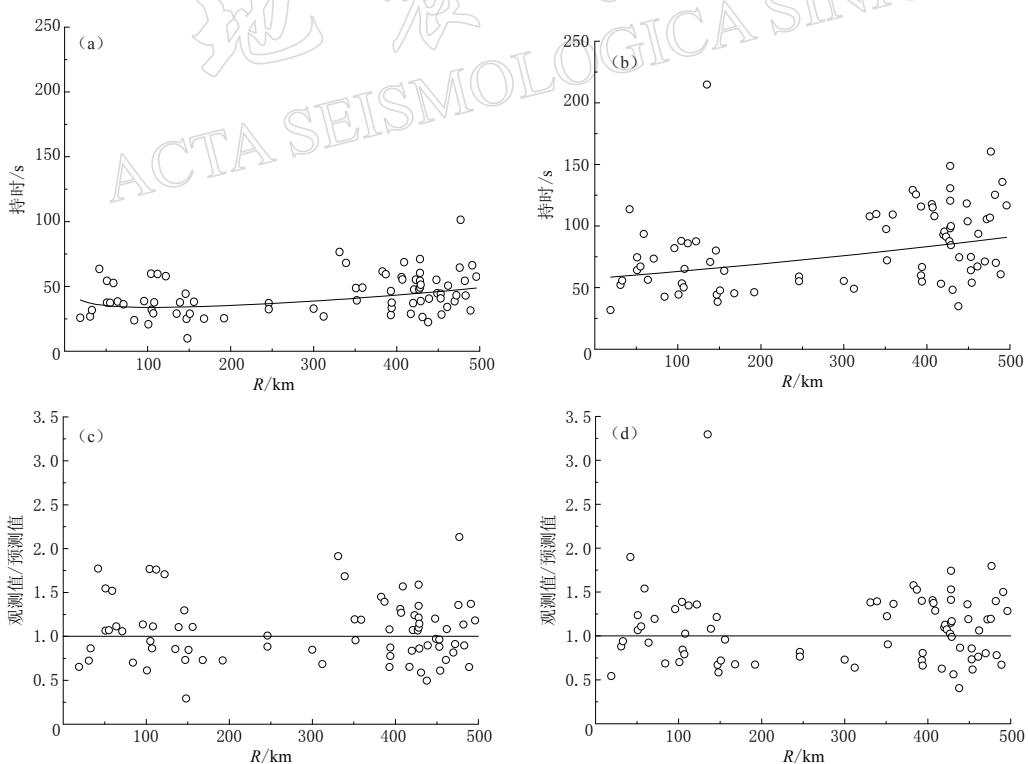


图3 上盘区坚向70%和90%能量持时的结果比较

(a), (b) 分别为70%和90%能量持时的拟合结果; (c), (d) 为其对应的观测值与计算值之比

Fig. 3 Comparison of the 70% (left) and 90% (right) energy durations for vertical records in hanging wall area

(a) and (b) show fitted curves of 70% and 90% energy duration respectively;

(c) and (d) are ratios of observed to predicted durations

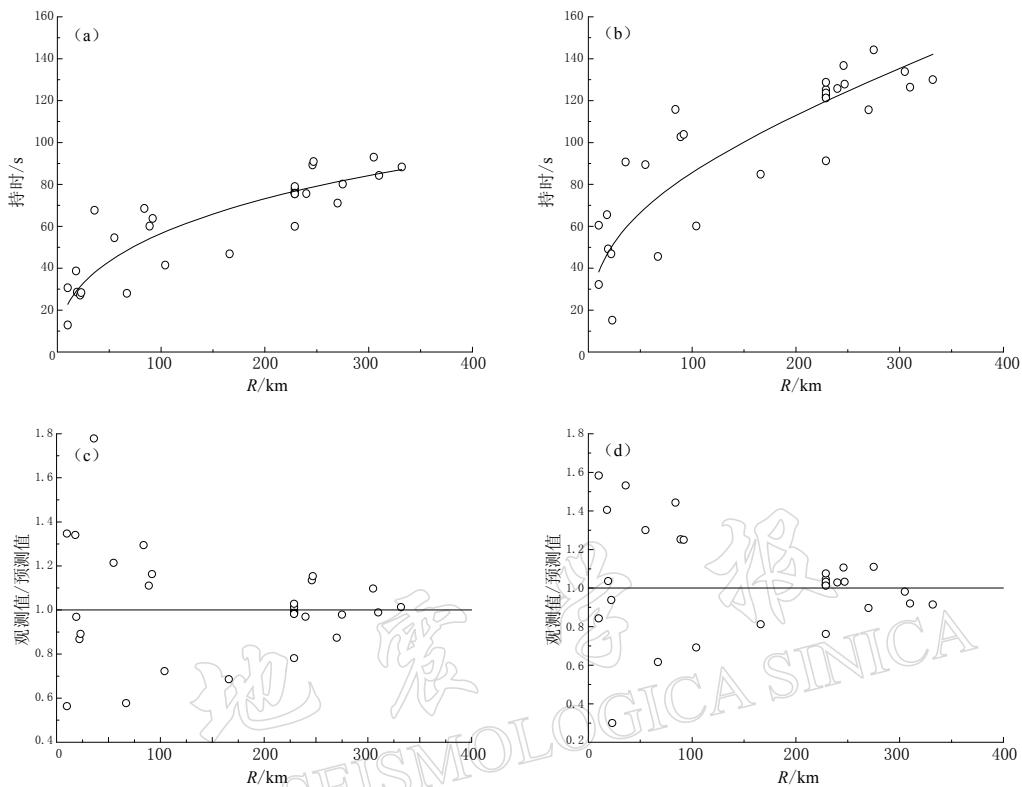


图 4 下盘区竖向 70% 和 90% 能量持时的结果比较

(a), (b) 分别为 70% 和 90% 能量持时的拟合结果; (c), (d) 为其对应的观测值与计算值之比

Fig. 4 Comparison of the 70% (left) and 90% (right) energy durations for vertical records in footwall area

(a) and (b) show fitted curves of 70% and 90% energy duration respectively;

(c) and (d) are ratios of observed to predicted durations

### 3.1 两种定义比较

采用两种不同持时定义计算所得的结果, 坚向与水平向上有类似的结论, 因此仍建议采用第一种 90% 能量持时定义。不过两种定义的差异不如水平向上明显, 两者计算所得持时随断层距增加的速率均没有水平向的快。

### 3.2 坚向持时与水平向持时比较

现将水平方向上的 EW 和 NS 两个分量视为独立观测的持时分量, 分别将其与坚向上的持时进行比较, 借以分析两个区断层距对不同方向持时的影响。回归结果如图 5, 6 所示。

从图 5 中可以看出, 随着断层距增大, 上盘区坚向持时与两个水平方向持时的比值有十分相近的变化趋势, 在 100 km 以内该比值不断增大, 然后再逐渐减小。总体上看, NS 方向的比值要大于 EW 方向的, 也就是说上盘区 EW 方向上的水平向持时要更大一些。从图 6 可看出, 下盘区坚向与水平向持时的比值也有相似的变化趋势, 但与上盘区正好相反, 100 km 以内该比值逐渐减小, 然后再不断增大。总体上 EW 方向的比值要大于 NS 方向的, 也就是说下盘区 NS 方向上的持时要大一些。另外, 在 EW 方向上, 下盘区坚向与 EW 向持时的比值要比上盘区大得多; 在 NS 方向上, 下盘区坚向与 NS 向持时的比值也要比上盘区大, 不过彼此的差异要小于 EW 方向。

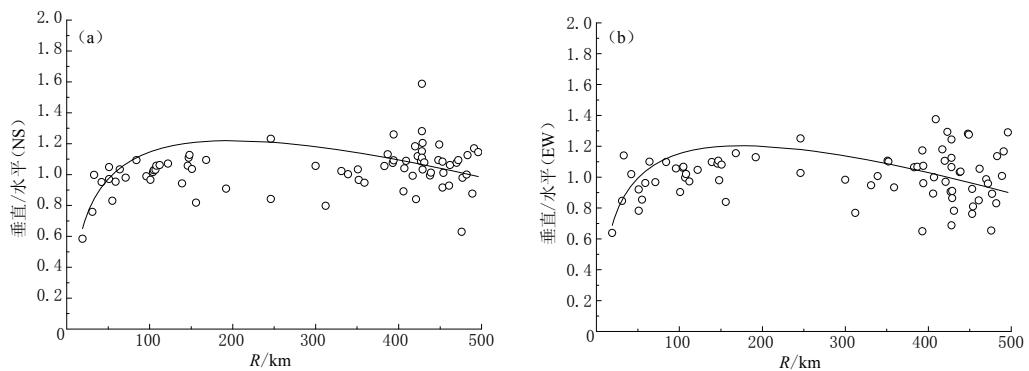


图 5 上盘区竖向与两个水平方向 90% 能量持时之比

(a) 垂直向/水平向(NS); (b) 垂直向/水平向(EW)

Fig. 5 Ratio of vertical to horizontal of 90% energy duration in hanging wall area

(a) Vertical / horizontal(NS); (b) Vertical / horizontal(EW)

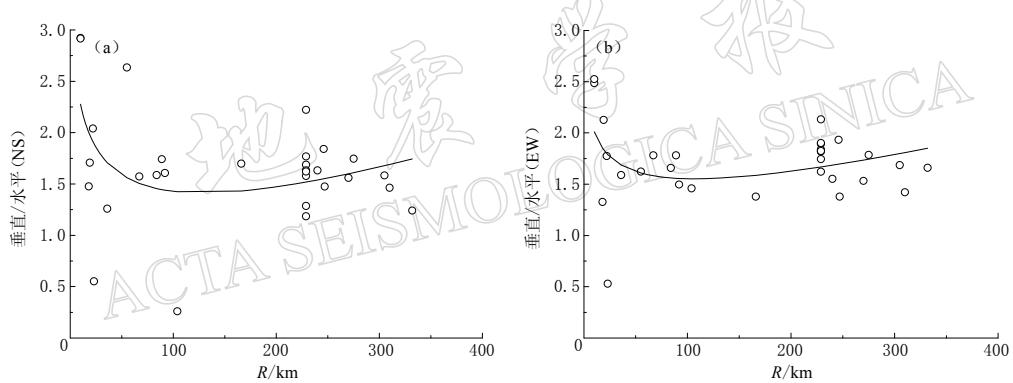


图 6 下盘区竖向与两个水平方向 90% 能量持时之比

(a) 垂直向/水平向(NS); (b) 垂直向/水平向(EW)

Fig. 6 Ratio of vertical to horizontal of 90% energy duration in footwall area

(a) Vertical / horizontal(NS); (b) Vertical / horizontal(EW)

## 4 讨论与结论

本文对两种不同能量持时进行了回归计算, 对汶川地震上、下盘区域的持时特性作出了分析, 认为采用 90% 能量持时的定义更为合理。同时, 对水平向和竖向的计算均表明, 除近场区域(50 km 内)上盘的持时要大于下盘外, 其余场点上盘的持时都要小于下盘, 而且上盘持时随断层距的增大速率也慢于下盘。最后, 在对竖向与水平向持时之比的拟合计算中发现, 上盘和下盘的竖向持时都很大, 尤其是在下盘。这是与强度参数和频度参数不同的地方, 即峰值加速度及反应谱的竖向分量基本都小于水平分量。另外, 在下盘竖向与 EW 分量的持时比值要大于它与 NS 分量的比值, 而在上盘没有出现该现象。上、下盘区域水平向上的持时差异十分明显, 由于持时与场地条件联系紧密, 因此出现该现象的原因很有可能与下盘区位于四川盆地有关, 但具体情况还需做出进一步的研究分析。

## 参 考 文 献

- 董娣. 2006. 地震动特性的影响因素与不确定性分析[D]. 北京: 北京工业大学; 34-40.
- 胡聿贤. 1988. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社; 588-613.
- 李小军, 周正华, 于海英, 温瑞智. 2008. 汶川 8.0 级地震强震动观测及记录初步分析[R]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社; 52-68.
- 刘浪. 2010. 汶川地震地震动衰减特性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所; 23-28.
- 刘浪, 李小军. 2012. 汶川地震地震动峰值加速度衰减特性分析[J]. 北京工业大学报, 待发表.
- 谢礼立, 张晓志. 1988. 地震动记录持时与工程持时[J]. 地震工程与工程振动, **8**(1): 31-38.
- 谢礼立, 周雍年. 1984. 一个新的地震动持续时间定义[J]. 地震工程与工程动, **4**(2): 27-35.
- Bolt B A. 1973. Duration of strong motion[C]//Proceedings of the 5th WCEE. Rome, Italy; **1**: 1304-1313.
- Dobry R, Idriss I M, Ng E. 1978. Duration characteristic of horizontal components of strong-motion earthquake records[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **68**(5): 1487-1520.
- Housner G W. 1975. Meaures of severity of earthquake ground shaking[C]//Proceedings of the U S National Conference on Earthquake Engineering. EERI, Oakland, California; **1**: 1100-1108.
- Seed H B. 1975. Site dependant spectra for earthquake resistant design[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **66**(1): 221-244.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **65**(3): 581-626.
- Vanmarcke E H, Lai S S. 1980. Strong motion duration and RMS amplitude of earthquake records[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **70**(4): 1293-1307.