

康兰池, 金星. 2009. 四川地区地震动峰值衰减规律研究. 地震学报, 31(4): 403-410.

Kang Lanchi, Jin Xing. 2009. Ground motion attenuation relation for small to moderate earthquakes in Sichuan region. *Acta Seismologica Sinica*, 31(4): 403-410.

四川地区地震动峰值衰减规律研究^{*}

康兰池^{1),*} 金星^{1,2)}

1) 中国福州 350002 福州大学

2) 中国福州 350003 福建省地震局

摘要 基于四川省地震监测台网 27 个基岩台站, 2008 年 5 月 12 日—2008 年 6 月 10 日 105 次地震(震级 $M_L=4.0-6.4$, 震中距 $\Delta=26-623$ km)的 8505 条宽频带速度记录, 利用实时仿真方法得到了相应的加速度记录, 进而对数据进行回归分析, 获得了四川地区基岩场地中小地震峰值加速度和峰值速度的衰减关系, 并用最近发生的一次 4.8 级地震对该规律进行了验证. 通过四川台网的记录, 提出了符合四川地质条件的衰减关系.

关键词 实时仿真 峰值加速度 峰值速度 回归分析 衰减关系

文章编号: 0253-3782(2009)04-0403-08

中图分类号: P315.4

文献标识码: A

Ground motion attenuation relation for small to moderate earthquakes in Sichuan region

Kang Lanchi^{1),*} Jin Xing^{1,2)}

1) Fuzhou University, Fuzhou 350003, China

2) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

Abstract: Based on the data collection of earthquake monitoring stations and networks in Sichuan province, 27 bedrock stations from May 12 to June 10 in 2008 acquired 8505 broadband velocity records from 105 earthquakes (magnitude $M_L=4.0-6.4$, epicentral distance $\Delta=26-623$ km), using real-time simulation methods we obtained corresponding acceleration records. Then by a regression analysis of data the peak ground acceleration and velocity attenuation relation for small and moderate bedrock Sichuan earthquakes were obtained. The relation is verified by a recent 4.8 earthquake in Wenchuan. This paper presents the attenuation relations for Sichuan region by using Sichuan Seismic Network records.

Key words: real-time simulation; peak ground acceleration; peak ground velocity; regression analysis; attenuation relation

* 基金项目 地震科学联合基金(105034)资助.

收稿日期 2008-08-06 收到初稿, 2008-12-09 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: kanglanchi@yahoo.com.cn

引言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 4.0 秒,四川汶川县发生了 $M_s8.0$ 地震,包括北京、上海、贵州、重庆、湖北、江西等全国各省市均有震感.四川汶川地震造成了近 7 万人遇难,30 余万人受伤,近 2 万人失踪,使四川省遭受巨大的经济损失.汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、涉及范围最广、救灾难度最大的一次地震.倒塌房屋、严重损毁不能再居住和损毁房屋涉及近 450 万户,1000 余万人无家可归,重灾区面积达 10 万平方公里,对人民身体、心理伤害更是无法估计.

在这次地震中,汶川 8.0 级地震余震共发生 13550 次余震.据中国地震台网测定,截至 2008 年 6 月 23 日 12 时,汶川震区共发生 $M_L4.0$ 以上余震 220 次,其中 $M_L4.0-4.9$ 地震 187 次, $M_L5.0-5.9$ 地震 28 次, $M_L6.0-6.4$ 地震 5 次.其最大余震为 5 月 25 日的 $M_L6.4$ 地震,四川地震台网记录了这些余震信息,极大地丰富了地震观测数据库.利用这些数据迅速展开相关研究,可为灾区重建及今后防震减灾工作提供第一手资料.在我国当前的地震动衰减研究中,由于缺乏强震记录,至今仍沿用通过转换法由美国数据近似得到.通过四川台网的记录统计回归可得出我们自己的衰减关系,而不用借助美国的资料.

地震动衰减关系是估计地震动参数的一种方法,可为灾区重建的抗震设防工作提供相关的地震动参数.在汶川地震当中,四川区域台网记录到了大量的地震观测数据,为我们进行地震动衰减规律研究提供了方便.本文利用这些记录来进行衰减规律的研究,利用金星等(2004a, b)提出的实时仿真方法,将速度记录进行仿真处理得到加速度记录,进而对这些数据进行统计分析,得到了四川地区中小地震峰值加速度和峰值速度的衰减规律.

1 资料收集与整理分析

目前我国地震台网经过“九五”和“十五”的数字化改造,已经进入一个新的发展阶段.四川省数字地震监测台网配备了新型的宽频带、大动态、高分辨率速度型地震仪.我国南北地震带延绵数千公里,其位置大致为:(南)昆明—成都—兰州—银川(北),涉及地区从

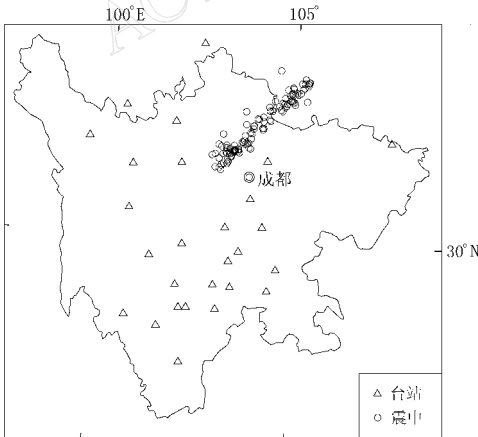


图 1 本研究所用地震震中分布图
Fig.1 Epicenters of the earthquakes analyzed in this study

宁夏经甘肃东部、四川西部,直至云南,属于我国的地震密集带.而龙门山地震带是南北地震带上的最活跃地带,位于青藏高原与四川盆地的交界处,四川省是中国地震活动较活跃的地区之一.由于汶川主震震害严重导致四川台网部分台站在震后无法正常工作.本文选取四川省数字地震监测台网中 27 个基岩台站,2008 年 5 月 12 日—2008 年 6 月 10 日震级从 $M_L4.0-6.4$ 、震中距从 26—462 km 共计 105 次地震的 8505 条宽频带速度记录,考虑 1 次地震的两条水平记录为两条独立的记录,进行统计.该 27 个基岩台站中有 24 个基岩台站使用 CMG-3ESPC 型宽频带地震

计, 测量频带为 60 s—50 Hz; 其余 3 个基岩台站使用 BBVS-60 型宽频带地震计, 测量频带为 60 s—50 Hz. 速度记录中关于震级与震中距的分布情况见表 1, 地震的震中位置分布见图 1.

为了利用本文收集的资料进行峰值加速度衰减规律研究, 本文采用金星等(2003, 2004a, b; 2005)、马强等(2003)提出的利用宽频带速度记录实时仿真位移、加速度的方法, 将速度记录转化为加速度记录.

表 1 各震级及震中距范围的地震记录次数

Table 1 Number of seismic records in respective earthquake magnitude and distance ranges

震中距/km	震 级				
	$M_L 4.0-4.4$	$M_L 4.5-4.9$	$M_L 5.0-5.4$	$M_L 5.5-5.9$	$M_L > 6.0$
0—50	15	27	20	6	0
50—100	75	186	138	39	11
100—200	194	354	266	67	22
200—300	152	260	185	34	16
300—400	125	188	147	22	18
>400	87	143	108	17	14

2 地震动参数回归模型与方法

在确定地震动参数衰减模型系数时, 经常用到最小二乘法. 另外许多其它的方法也是在此基础上, 根据数据分布特点所作的一些改进. 例如, 加权最小二乘法(田启文等, 1986); 一致加权最小二乘法(霍俊荣, 1989)等. Joyner 和 Boore(1981)提出了两步法, 金星和康兰池(2008)对距离和震级进行解耦. 第一步对距离进行回归, 第二步对震级进行回归, 以减少两者间的相关性对回归结果的影响. 本文在确定地震动参数衰减模型系数时, 利用了两步法, 第一步对距离进行最小二乘拟合, 第二步对震级进行最小二乘法拟合.

首先考虑地震强度相同时, 震中距对地震动峰值的影响, 选取模型为

$$\ln Y = a_0 + b_0 \ln(\Delta + R_0) \tag{1}$$

式中, a_0 和 b_0 分别为地震震级 M 的函数, 考虑到四川地区地震震源深度一般为 10 km 左右, 我们取几何扩散项 $b_0 \ln(\Delta + R_0)$ 中的 R_0 为 10 km, 同时简单认为 a_0 和 b_0 与地震震级存在线性关系(图 2), 选取模型为

$$\begin{cases} a_0 = a + bM_L \\ b_0 = c + dM_L \end{cases} \tag{2}$$

最后回归的物理模型为

$$\ln Y = a + bM_L + (c + dM_L) \ln(\Delta + 10) \tag{3}$$

3 结果

按照上节所述的模型对加速度记录和速度记录的水平向和竖直向峰值分别进行统计回归, 得到了四川地区基岩场地地震动峰值的衰减规律, 具体结果见表 2.

利用上述衰减模型分别计算得到 M_L 为 4.5, 5.0, 5.5 和 6.0 的峰值加速度(a_{pg})和峰值速度(v_{pg})随震中距 Δ 变化的曲线(图 3). 图 3 中还给出了原始记录以作对比分析.

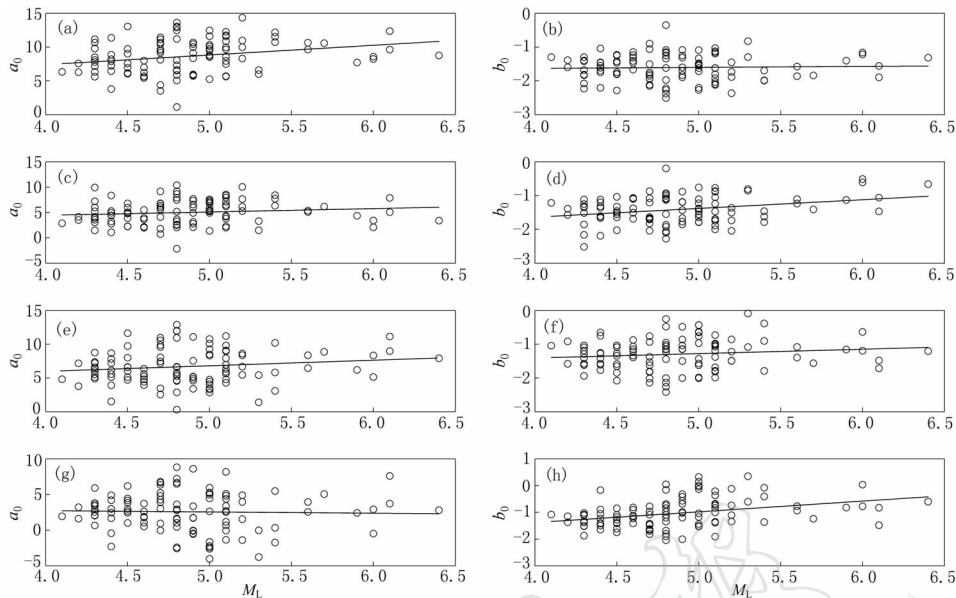


图 2 两步法回归模型地震动峰值加速度(a_{pg})和峰值速度(v_{pg})中 a_0 值、 b_0 值与震级关系
(a) a_0 值($a_{pg}-H$); (b) b_0 值($a_{pg}-H$); (c) a_0 值($v_{pg}-H$); (d) b_0 值($v_{pg}-H$); (e) a_0 值($a_{pg}-V$);
(f) b_0 值($a_{pg}-V$); (g) a_0 值($v_{pg}-V$); (h) b_0 值($v_{pg}-V$). H 表示水平向, V 表示竖向

Fig. 2 The relation of the value a_0 and b_0 with magnitude in two-step regression model
(a) Value a_0 of $a_{pg}-H$; (b) value b_0 of $a_{pg}-H$; (c) value a_0 of $v_{pg}-H$; (d) value b_0 of $v_{pg}-H$;
(e) value a_0 of $a_{pg}-V$; (f) value b_0 of $a_{pg}-V$; (g) value a_0 of $v_{pg}-V$; (h) value b_0 of $v_{pg}-V$.
 a_{pg} is peak ground acceleration, v_{pg} is peak ground velocity

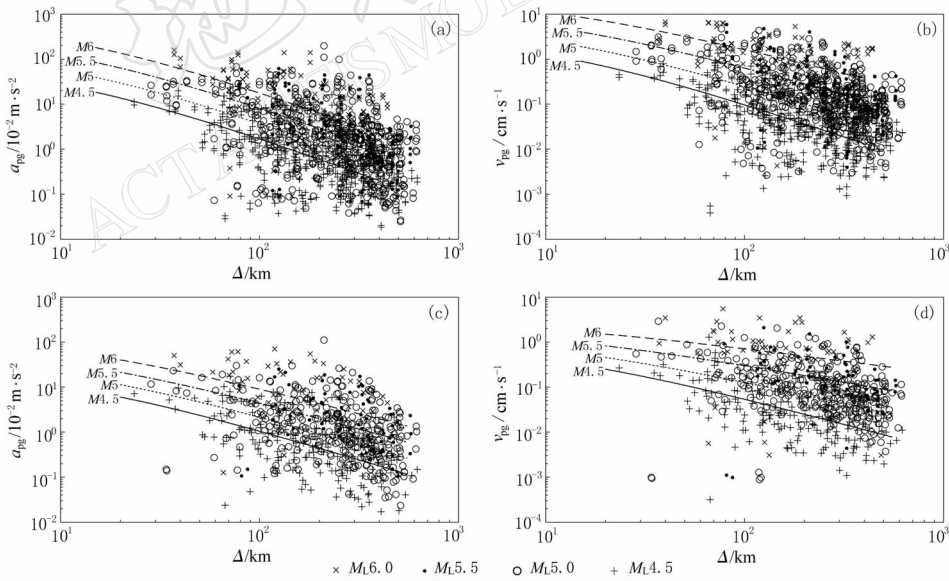


图 3 两步法模型结果(线)与原始记录(散点)的对比

(a) 水平向峰值加速度; (b) 水平向峰值速度; (c) 竖向向峰值加速度; (d) 竖向向峰值速度
Fig. 3 Comparison between the result of two-step model (line) and original record (dot)
(a) Peak ground horizontal acceleration; (b) peak ground horizontal velocity; (c) peak ground
vertical acceleration; (d) peak ground vertical velocity

表 2 模型系数回归结果

Table 2 The result of regression coefficients of models

地震动参数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$a_{pg}-H$	1.6683	1.4315	-1.7457	0.0289
$a_{pg}-V$	2.6607	0.82468	-1.9301	0.12964
$v_{pg}-H$	1.7516	0.66795	-2.6725	0.25823
$v_{pg}-V$	3.4246	-0.1747	-2.9983	0.40315

注： a_{pg} 表示峰值加速度， v_{pg} 表示峰值速度， H 表示水平向， V 表示竖直向。

图 3 给出的峰值加速度和峰值速度衰减关系曲线与原始记录的对比结果表明：

- 1) 计算值总体上与原始记录基本一致，反映了原始资料的衰减趋势。从回归结果可以看到震级项前的系数都为正数，说明峰值随震级的增大而增大。另外，结果中距离对数项和距离项前的系数都为负数，说明峰值随距离的增大而减小。
- 2) 远场回归结果与原始数据有很好的对应关系，而在近场拟合结果中则有一定的偏差。产生该结果的原因可能是近场记录数量比例过小，导致对地震动的估计偏于保守。在获得更多的资料以后，可以对这一缺陷进行弥补。
- 3) 同一震级下竖直向峰值加速度衰减均比水平向峰值加速度衰减略快一些。这与地震动竖直向分量高频成分较快衰减的一般情况是吻合的。

4 与其它衰减关系的对比

由于本文采用的中小地震记录以中远场居多，所以选取了近年来研究内容相似的有代表性的几个地震动峰值衰减规律进行对比，它们分别为 Liu 和 Tsai(2005)衰减关系和 Bragato 和 Slejko(2005)衰减关系。下面简要介绍这两个衰减关系：

1) Liu 和 Tsai(2005)衰减关系，包括峰值加速度和峰值速度衰减关系。利用的记录主要是中国台湾 1993—2002 年构造活动地区浅源地震基岩、坚硬土层和软土层上的记录。其震级介于 4.0—7.1 之间，震源距小于 275 km，衰减关系形式为

$$\ln Y = a \ln(R + h) + bR + cM_w + d \tag{4}$$

式中， M_w 为矩震级， R 为震源距， h 为近震饱和系数。

2) Bragato 和 Slejko(2005)衰减关系，包括峰值加速度和峰值速度衰减关系。利用的记录主要是阿尔卑斯山东部 1976—2002 年构造活动地区浅源地震基岩和坚硬土层的记录。其震级介于 2.5—6.3 之间，震中距小于 134 km，衰减关系形式为

$$\lg Y = \alpha(b + cM_L)M_L + (d + eM_L^3)\lg \Delta \tag{5}$$

式中， M_L 为震级， Δ 为震中距。

图 4 为对应 $M_L=4.5, 5.0, 5.5$ 和 6.0 的 3 种模型结果对比。从图中可以看出，本文方法在近距离处估计值在中近场与 Liu 和 Tsai(2005)衰减关系非常相似，无论峰值速度还是峰值加速度都非常明显。随着震级和距离的增大，二者区别增大。分析其原因，除了地域差别之外，可能主要是由于所统计数据分布差别和回归方法差异造成的。Liu 和 Tsai(2005)衰减关系由于大震记录偏多，影响了小震的衰减规律，使得小震估计值偏大。Bragato 和 Slejko(2005)直接采用多元法将基岩与土层资料合并来统计。由于近场小震记录偏多，回归结果在近场值应该更接近真实记录，但是也影响了远场大震记录的衰减规律，使

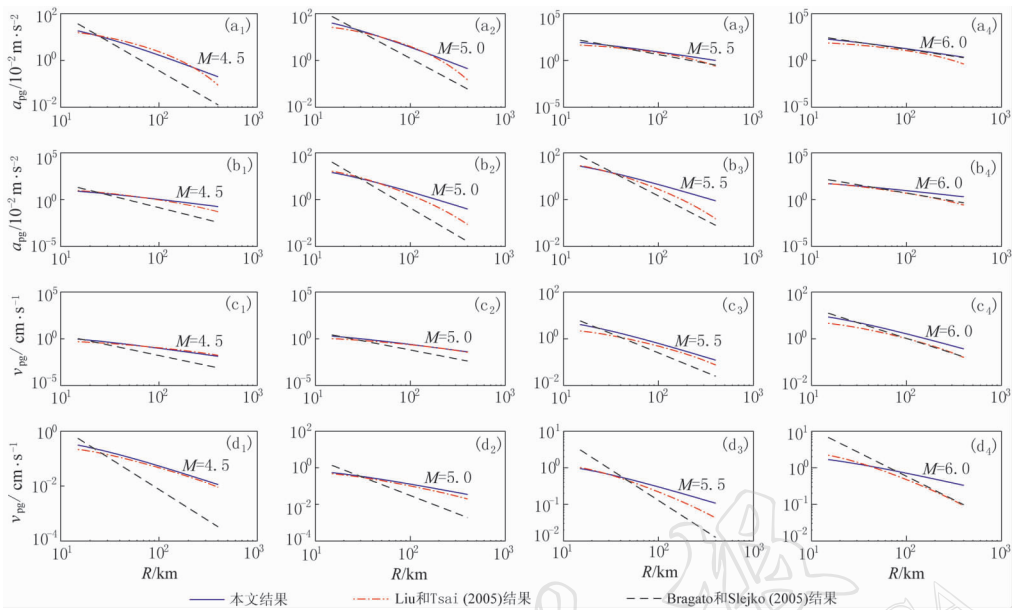


图 4 本文结果与 Liu 和 Tsai (2005)以及 Bragato 和 Siejko (2005)结果比较

(a₁—a₄) 水平向峰值加速度; (b₁—b₄) 竖直向峰值加速度;
(c₁—c₄) 水平向峰值速度; (d₁—d₄) 竖直向峰值速度

Fig. 4 Comparison between the result of this paper and results of others

(a₁—a₄) Peak ground horizontal acceleration; (b₁—b₄) peak ground vertical acceleration;
(c₁—c₄) peak ground horizontal velocity; (d₁—d₄) peak ground vertical velocity

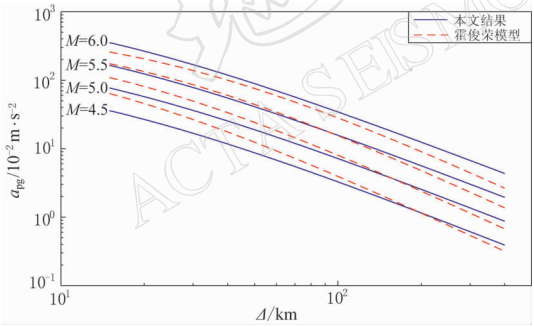


图 5 本文结果与霍俊荣(1989)结果比较

Fig. 5 Result of this paper compared with Huo (1989)

远场大震处估计值偏小.

同时, 本文还将所得结果与霍俊荣 (1989)结果进行了比较(图 5). 从图 5 可以看出, 在低震级近距离处, 本文结果偏小, 中距离时两者相当, 在远距离处本文结果偏大; 从整体上看, 随着震级的增大, 本文结果要大于霍俊荣(1989)结果, 而且本文衰减速率要快于霍俊荣(1989)结果.

5 衰减关系的检验

2008 年 6 月 17 日 13 时 51 分宁强县发生了 M_L 4.8 地震. 我们选取了此次地震的所有速度记录, 利用金星等(2003)提出的实时仿真方法, 将速度记录仿真到同一频带范围 0.05—20 Hz, 利用前面所采用的实时仿真方法得到了相应的加速度记录, 并提取其峰值速度和峰值加速度, 本文所得的曲线与此进行了对比(图 6).

从图中我们可以看出, 本文衰减曲线计算值与原始记录数据基本一致. 认为本文结果具有很强的实用性.

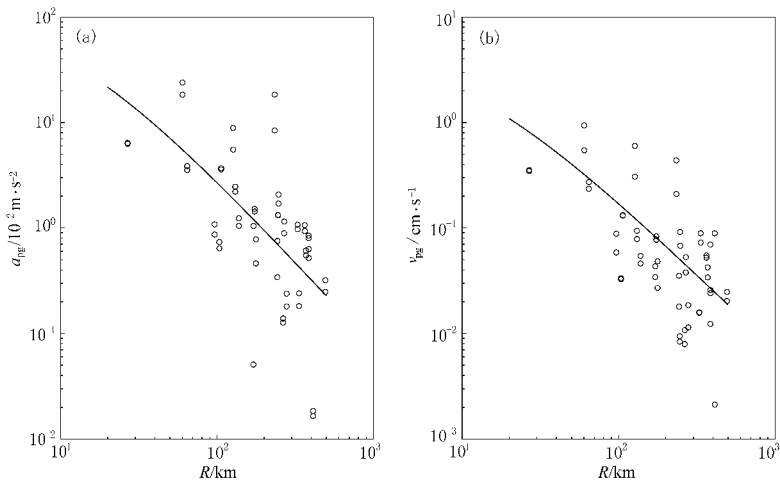


图 6 拟合结果(线)与原始记录值(小圆圈)的对比。(a)峰值加速度；(b)峰值速度

Fig. 6 Comparison between the result of weighted multivariant model (line) and original record (open circles)
(a) Peak ground acceleration; (b) peak ground velocity

6 讨论与结论

本文利用四川省地震监测台网搜集到的四川地区地震速度记录，根据金星等(2004b)提出利用数字化速度记录实时仿真加速度时程的方法，由速度记录仿真得到了加速度记录，并采取两步法模型对加速度记录和速度记录的水平向和竖向峰值分别进行统计回归，得到了四川地区基岩场地地震动峰值的衰减规律。根据本文的研究，此衰减关系应用范围为：① 距离：26—462 km；② 震级： M_L 4.0—6.4；③ 场地条件：基岩。

将本文的回归结果与 Liu 和 Tsai (2005)以及 Bragato 和 Slejko (2005)地震动衰减关系进行对比，给出了一些存在差异的可能原因。并利用台网在 2008 年 6 月 17 日所获得 4.8 级地震数据进行检验，从结果可以看出衰减曲线计算值与原始记录基本一致。本文的衰减关系具有很强的实用性。

由于国内缺乏强震记录，故地震动衰减研究长期依赖于由美国通过转换方法得到的衰减关系。在汶川地震中发生了大量的 5—6 级余震，本文利用这些数据统计得出了我国自己的衰减规律，为今后由中小地震地震动衰减关系向强地震动衰减关系扩展奠定了基础。目前只是对峰值加速度和峰值速度进行了统计回归，对于地震动其它参数，我们将另文介绍。

中国地震局台网中心为本文研究提供了资料，在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨：国家地震局工程力学研究所：29—39.
金星，马强，李山有. 2003. 四种计算地震反应数值方法的比较研究[J]. 地震工程与工程震动，**23**(1)：18—30.
金星，马强，李山有. 2004a. 利用数字强震仪记录实时仿真地动速度[J]. 地震工程与工程震动，**24**(1)：49—84.
金星，马强，李山有. 2004b. 利用数字化速度记录实时仿真位移与加速度时程[J]. 地震工程与工程震动，**24**(6)：9—14.
金星，马强，李山有. 2005. 利用数字强震仪记录实时仿真地动位移[J]. 地震学报，**27**(1)：79—85.

- 金星, 康兰池. 2008. 福建地区中小地震地震动峰值衰减规律研究[J]. 地震学报, **30**(3): 279–291.
- 马强, 金星, 李山有. 2003. 单自由度系统地震动力反应的实时计算方法[J]. 地震工程与工程震动, **23**(5): 61–68.
- 田启文, 廖振鹏, 孙平善. 1986. 根据烈度资料估算我国地震动参数衰减规律[J]. 地震工程与工程振动, **6**(1): 21–36.
- 王国新. 2001. 强地震动衰减研究[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所: 23–29.
- Bragato P L, Slejko D. 2005. Empirical ground-motion attenuation relations for the Eastern Alps in the magnitude range 2.5–6.3[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**(1): 252–276.
- Joyner W, Boore D. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**(3): 2011–2038.
- Liu K S, Tsai Y B. 2005. Attenuation relation of peak ground acceleration and velocity for crustal earthquake in Taiwan [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**(3): 1043–1058.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA