

喻焯、崔建文、李小军等,2014,川滇地区中小震地震动衰减特征分析,中国地震,30(3),409~418。

# 川滇地区中小震地震动衰减特征分析

喻焯<sup>1)</sup> 崔建文<sup>2)</sup> 李小军<sup>3)</sup> 杨黎薇<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地壳应力研究所,北京市德外西三旗 100085

2) 云南省地震局,昆明 650224

3) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

**摘要** 利用2007年以来川滇地区24次中小型破坏性地震( $M_s 4.7 \sim 6.7$ )的基岩场地和土层场地的强震动记录,分别统计获得了川滇地区水平向基岩场地和土层场地的地震动峰值及加速度反应谱衰减关系。通过与俞言祥等2006年基于转换方法得到的我国西部基岩地震动衰减关系的对比,验证了本文衰减关系对利用中小地震进行地震动估计的可靠性。同时,根据强震动数据随震级以及震中距的分布,分析了本文结果的适用性和可靠性。

**关键词:** 川滇地区 地震动 衰减关系

[文章编号] 1001-4683(2014)03-0409-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震动衰减关系是地震区划和地震危险性分析确定工程设计地震动参数的重要基础。对于强震记录较多的地区,一般采用强震动观测记录直接统计获取地震动衰减关系。对于强震记录较少的地区,一般基于目标区域的地震构造、地质与地形地貌环境、地震动资料及地震烈度资料等,通过转换或修正参考区域的地震动衰减关系获得。我国由于强震观测起步较晚,取得的对工程结构有影响的强震记录有限,无法直接统计衰减关系。因此,我国现有的衰减关系大部分都是基于烈度资料转换而得(霍俊荣等,1992;汪素云等,2000;俞言祥等,2006)。这些研究成果已经广泛应用到我国工程地震领域,满足了国家经济科学发展的需要。但是,这些衰减关系提出于10多年前,主要存在以下不足。第一,烈度是一个宏观参数,它不仅与地面运动强度有关,还与目标区经济发展、人口密度、结构抗震性能等有关。因此,基于烈度资料的转换方法对地震动参数的估计精度有限(李小军等,2005;陶夏新等,2010)。第二,频谱是地震动的主要特征量,综合描述地震动强度的地震烈度难以表述地震动的频谱分布特征,不能全面地描述地震动特征。“十五”期间建成的中国数字地震观测台网为获取高质量的强震动记录提供了机会。自2007年台网试运行以来,我国地震记录逐渐

[收稿日期] 2014-07-07; [修定日期] 2014-07-17

[项目类别] 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2013-04)和国家自然科学基金资助项目(51278469)联合资助

[作者简介] 喻焯,男,1983年生,助理研究员,博士。主要从事强震观测及工程地震研究。

E-mail: yutian0721@yeah.net

丰富,基于数字地震记录的统计分析已成为我国地震动衰减关系研究的主要方向(崔建文等,2006;雷建成等,2007;卢大伟等,2010;喻焜等,2011)。例如:康兰池等(2009)利用四川宽频带速度记录得到了四川地区中小震地震动峰值加速度和峰值速度衰减规律;王玉石等(2013)等基于川滇地区强震动记录得到了川滇地区水平向地震动峰值加速度及反应谱衰减规律。受限于我国强震台网中基岩台站比例较小,基岩场地强震记录更少,基于数字强震记录获取的地震动衰减关系均包含了场地效应,基岩地震动衰减关系成果较少。

川滇地区位于青藏高原东南缘、南北地震带的中南段,新构造变形十分强烈,是我国地震活动最强烈的地区之一。自2007年中国数字强震动观测台网试运行以来,川滇地区相继发生了2008年汶川8.0级大地震及其强余震、2009年云南姚安6.0级地震、2011年盈江5.9级地震、2012年彝良6.1级地震等一系列中强震以及大量的小地震,获取了大量的数字强震动记录,其中少量的基岩台站记录了数字强震记录。这些数字强震记录为建立更可靠的川滇地区的地震动衰减关系提供了数据基础。

本文拟利用川滇地区2007年以来发生的24个中小震( $4.7 \leq M_s \leq 6.7$ )共计332条强震动记录(其中,基岩场地36条)分别研究川滇地区基岩场地和土层场地的水平向地震动峰值及加速度反应谱衰减规律。为了尽量减少余震的强震记录对地震动衰减关系的影响,本研究中对于四川地区没有采用汶川余震强震记录,仅采用2008年攀枝花6.1级地震及其强余震的强震动数据。

## 1 基础资料

本文采用的24个地震序列见表1。从表1可以看出,地震序列中包含了主震及其强余震,例如2007年宁洱6.7级地震及其4.9级余震,2008年攀枝花6.1级地震及其5.8级余震等;同时也有包含前震的地震序列,例如2008年盈江4.9级地震之后又发生的5.3和6.1级地震。从表1可以看出,地震序列最大震级 $M_s 6.7$ ,最小震级 $M_s 4.8$ ,其中4.7~4.9级地震5个,5.0~5.9级15个,6.0级以上4个。

本文采用的地震记录共332条,其中36条基岩场地记录分布于14个基岩场地台站。图1和图2给出了基岩场地记录和土层场地记录的震级-震中距分布图。从图1、2可以看出,基岩场地记录大部分分布于震中距75km以内;大部分强震记录均产生于5.7级以下的地震。

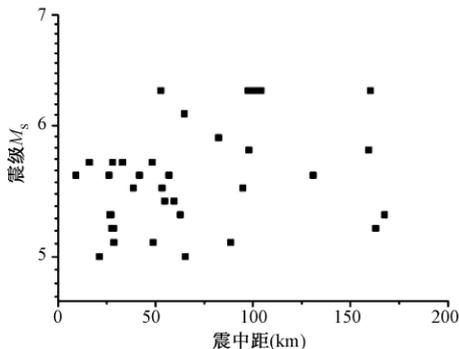


图1 基岩场地记录震级-震中距分布

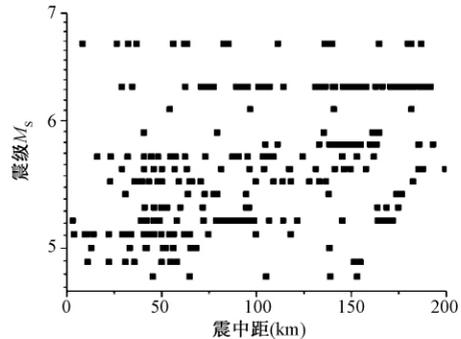


图2 土层场地记录震级-震中距分布

表 1 本文分析所用的地震序列

地震时间		震级		震中位置		震中地点	震源深度 (km)
年.月.日	时:分:秒	$M_s$	$M_L$	(°E)	(°N)		
2007.06.03	05:34:56	6.7	6.4	101.130	23.080	云南宁洱	5.0
2007.06.03	10:49:01	4.9	4.7	101.100	23.033	云南宁洱	4.0
2008.08.20	05:35:11	4.9	4.9	97.900	25.117	云南盈江	15.0
2008.08.21	20:20:53	5.3	5.1	97.810	24.930	云南盈江	16.0
2008.08.21	20:24:29	6.1	5.8	97.790	24.910	云南盈江	14.0
2008.08.30	16:30:52	6.3	6.1	102.060	26.300	四川攀枝花	19.0
2008.08.31	16:31:09	5.8	5.6	102.060	26.270	四川攀枝花	13.0
2008.08.31	17:34:48	4.8	5.1	102.060	26.250	四川攀枝花	12.0
2008.09.03	14:27:23	5.0	4.9	97.800	24.820	云南盈江	25.0
2009.07.09	19:19:14	6.3	5.9	101.030	25.600	云南姚安	6.0
2009.07.10	17:02:01	5.4	5.3	101.050	25.600	云南姚安	10.0
2009.11.02	05:07:16	5.0	4.9	100.700	25.950	云南宾川	10.0
2010.02.25	12:56:51	5.2	5.6	101.950	25.420	云南元谋	20.0
2011.03.10	12:58:11	5.9	5.4	97.950	24.650	云南盈江	10.0
2011.06.20	18:16:50	5.3	5.4	98.690	25.050	云南腾冲	10.0
2011.08.09	19:50:16	5.2	5.6	98.700	25.033	云南腾冲	11.0
2012.06.24	15:59:32	5.7	5.4	100.690	27.710	云南宁蒗	11.0
2012.09.07	11:19:41	5.7	6.1	103.983	27.500	云南彝良	14.0
2012.09.07	12:16:29	5.6	5.8	104.050	27.550	云南彝良	14.0
2012.09.11	11:21:20	4.9	5.0	99.183	24.667	云南施甸	14.0
2013.02.20	13:01:56	4.8	4.8	101.600	23.250	云南墨江	5.0
2013.03.03	13:41:15	5.5	5.4	99.700	25.900	云南洱源	9.0
2013.04.17	09:45:54	5.1	5.0	99.800	25.900	云南洱源	10.0
2013.08.31	08:04:14	5.9	5.6	99.350	28.150	云南香格里拉	10.0

## 2 强地震动参数以及衰减关系式

为了研究川滇地区中小震水平向地震动峰值及加速度反应谱衰减关系,本文采用的衰减关系为(王国新,2001)

$$\lg(Y) = C_1 + C_2M + (C_4 + C_5M) \lg(R + R_0) \quad (1)$$

式中, $Y$ 为地震动参数两个水平向分量的合成矢量模,地震动参数包括 $PGA$ 、 $PGV$ 以及不同周期对应的加速度反应谱; $R$ 为震中距; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $R_0$ 为回归系数; $R_0$ 为近场饱和因子,其取值对近场地震动衰减关系影响显著。本文采用两步法进行回归:首先对每个地震进行回归处理,假设回归值为 $R_0$ ,发现 $R_0$ 均很小到几乎为0时拟合方差最小。为了更好地估计近场的结果,参考NGA模型(Abrahamson et al,2008)对 $R_0$ 的取值,本文设定 $R_0 = 5\text{km}$ ;第二步回归 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_4$ ,方差最小者的回归系数为最终结果。

## 3 统计结果

利用36条基岩场地强震动记录和296条土层场地强震动记录回归得到基岩与土层场地上的 $PGA$ 、 $PGV$ 以及加速度反应谱的衰减关系式(1)的回归系数(表2)。为了验证结果

的可靠性,将获取的地震动衰减关系与俞言祥的西部基岩水平向地震动衰减关系(俞言祥,2006)(长轴定义模型Ⅰ,短轴定义模型Ⅱ)进行了对比。图3~6分别比较了震级档为5.0、5.5、6.0、6.5时震中距分别为10km、50km、100km及200km时的加速度反应谱。从图3~6可以发现如下规律:

(1) 本文的基岩场地地震动衰减关系与模型Ⅱ在5.0、5.5以及6.0震级档的高频部分(3Hz以上)比较接近,对长周期地震动的估计前者要小于后者。在6.5震级档,前者要整体小于后者。从图1可以看出,本文的基岩场地数据点主要分布在5.0以及5.5震级档,这说明在5.0以及5.5级震级档模型Ⅱ高估了3Hz以下的地震动。而在高震级档,因数据稀少而导致本文结果的可靠性不高。

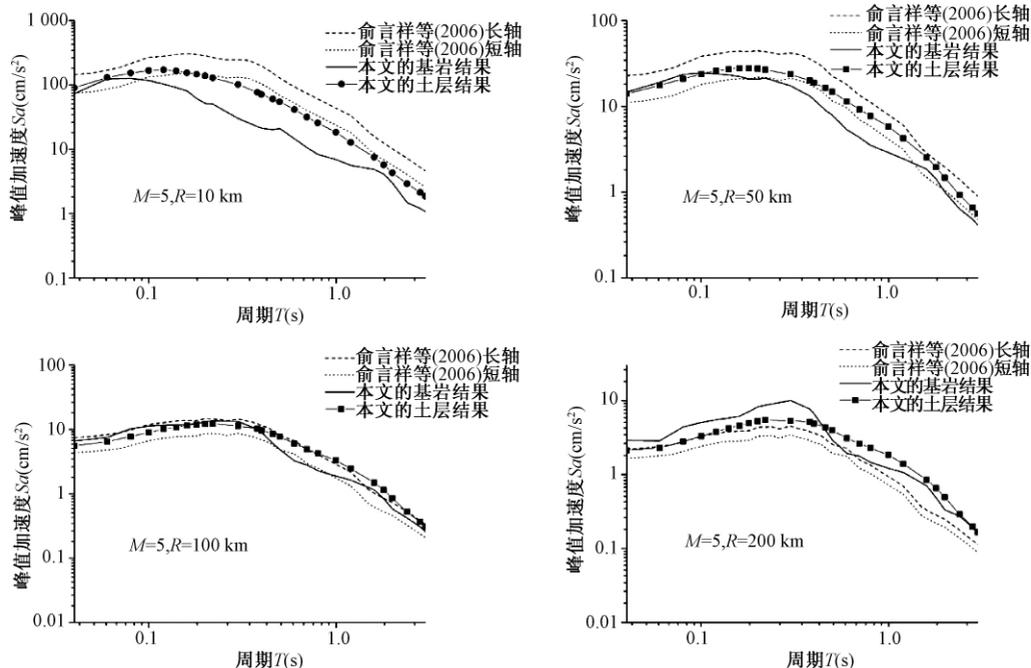
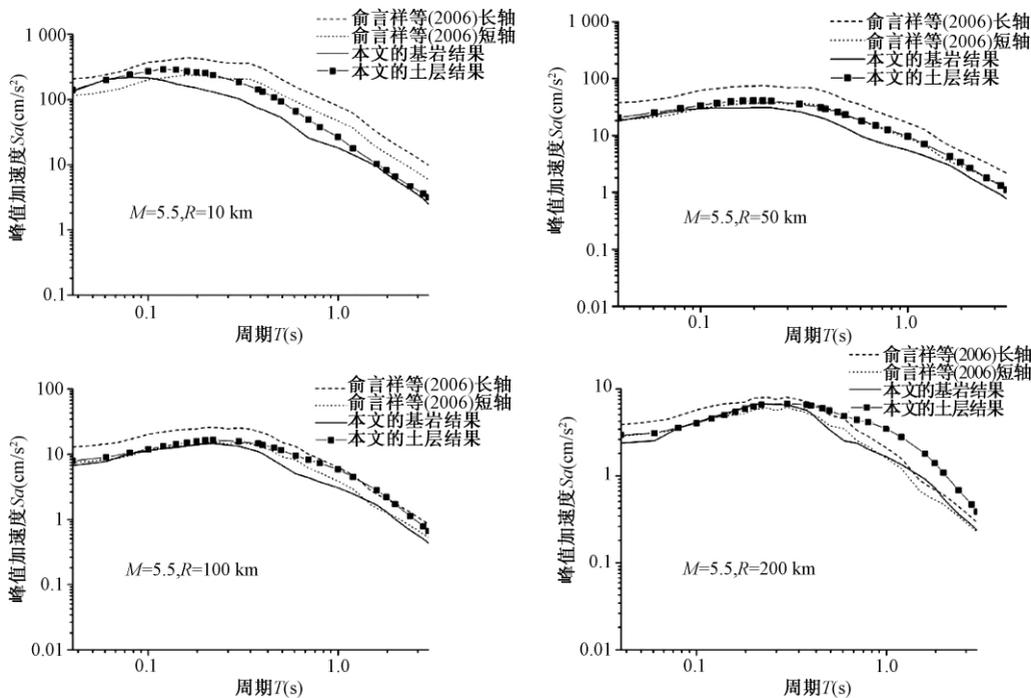
(2) 本文土层场地地震动衰减曲线与模型Ⅱ整体上非常接近,但在中远场长周期反应谱估计时前者高于后者。这主要是由于距离的增加导致地震动长周期成分增加,土层的放大作用明显。

(3) 本文土层场地地震动衰减曲线与基岩地震动衰减曲线在高频段非常接近,在0.8s附近土层的放大作用明显。随着距离的增加,土层场地的反应谱特征周期增加,谱形状变宽。

表2 川滇地区水平向地震动峰值及加速度反应谱( $\zeta = 0.05$ )衰减系数

周期 (S)	基 岩						土 层					
	$C_1$	$C_2$	$C_4$	$C_5$	$R_0$	$\sigma$	$C_1$	$C_2$	$C_4$	$C_5$	$R_0$	$\sigma$
PGA(g)	-7.019	1.372	2.284	-0.663	5.0	0.310	-2.171	0.508	-0.812	-0.100	5.0	0.288
PGV(cm/s)	-6.348	1.464	2.354	-0.628	5.0	0.305	1.534	0.040	-2.098	0.198	5.0	0.300
0.04	-5.369	1.143	1.576	-0.564	5.0	0.322	-1.826	0.495	-0.965	-0.093	5.0	0.295
0.06	-3.519	0.881	0.567	-0.412	5.0	0.316	-1.271	0.450	-1.160	-0.081	5.0	0.310
0.10	-5.250	1.156	1.634	-0.570	5.0	0.313	-2.198	0.645	-0.507	-0.201	5.0	0.334
0.12	-7.148	1.486	2.429	-0.707	5.0	0.298	-3.180	0.824	0.039	-0.296	5.0	0.332
0.14	-5.493	1.137	1.620	-0.532	5.0	0.302	-3.337	0.852	0.110	-0.306	6.0	0.324
0.16	-6.286	1.270	1.908	-0.577	5.0	0.290	-3.323	0.844	0.111	-0.300	7.0	0.320
0.20	-10.609	2.024	4.144	-0.965	5.0	0.302	-3.788	0.888	0.313	-0.316	5.0	0.317
0.24	-10.939	2.113	4.301	-1.007	8.0	0.343	-4.108	0.907	0.441	-0.319	5.0	0.310
0.30	-14.354	2.652	6.207	-1.317	5.0	0.381	-3.996	0.867	0.315	-0.288	5.0	0.312
0.38	-12.959	2.360	5.283	-1.138	5.0	0.330	-4.298	0.880	0.410	-0.288	5.0	0.303
0.40	-13.092	2.384	5.180	-1.122	5.0	0.332	-4.134	0.840	0.268	-0.259	5.0	0.306
0.50	-8.175	1.482	2.170	-0.586	5.0	0.365	-3.147	0.615	-0.356	-0.130	5.0	0.319
0.60	-8.007	1.412	1.816	-0.515	5.0	0.349	-2.257	0.410	-0.957	-0.007	5.0	0.333
0.80	-8.491	1.440	1.832	-0.499	5.0	0.338	-1.263	0.153	-1.710	0.157	5.0	0.361
1.00	-6.917	1.136	0.881	-0.328	5.0	0.304	-1.422	0.127	-1.784	0.187	5.0	0.381
1.20	-10.483	1.753	3.023	-0.708	5.0	0.296	-0.378	-0.109	-2.429	0.317	5.0	0.396
1.50	-5.685	0.861	0.668	-0.283	5.0	0.287	-0.180	-0.183	-2.656	0.363	5.0	0.420
2.00	-4.559	0.612	-0.563	-0.060	5.0	0.256	-1.546	0.030	-2.255	0.286	5.0	0.403
2.40	-10.672	1.711	2.625	-0.648	5.0	0.249	-1.791	0.063	-2.397	0.301	5.0	0.392
3.00	-7.384	1.055	0.754	-0.298	5.0	0.239	-2.570	0.186	-2.115	0.237	5.0	0.373

为了检验本文回归得到的衰减关系的适用性,图7~9分别展示了基岩场地和土层场地类型地震动衰减模型对强震动数据的PGA、 $Sa(t = 0.3s)$ 以及 $Sa(t = 1.0s)$ 估计的残差随震

图3 本文结果与俞言祥等(2006)结果对比 ( $M_s = 5$ )图4 本文结果与俞言祥等(2006)结果对比 ( $M_s = 5.5$ )

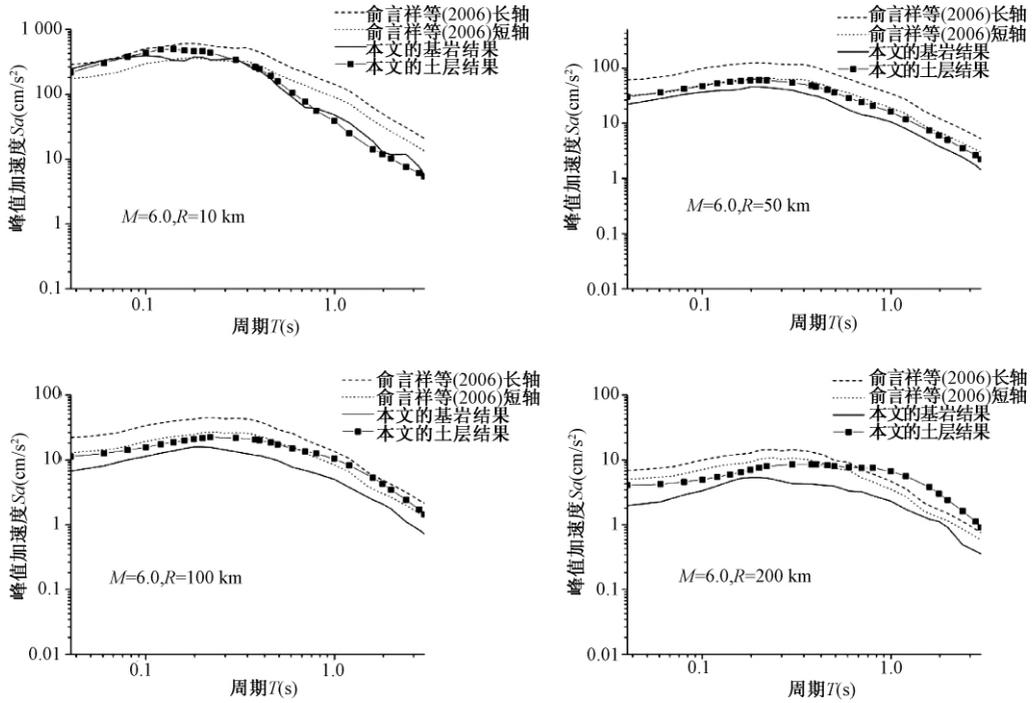


图5 本文结果与俞言祥等(2006)结果对比 ( $M_s = 6.0$ )

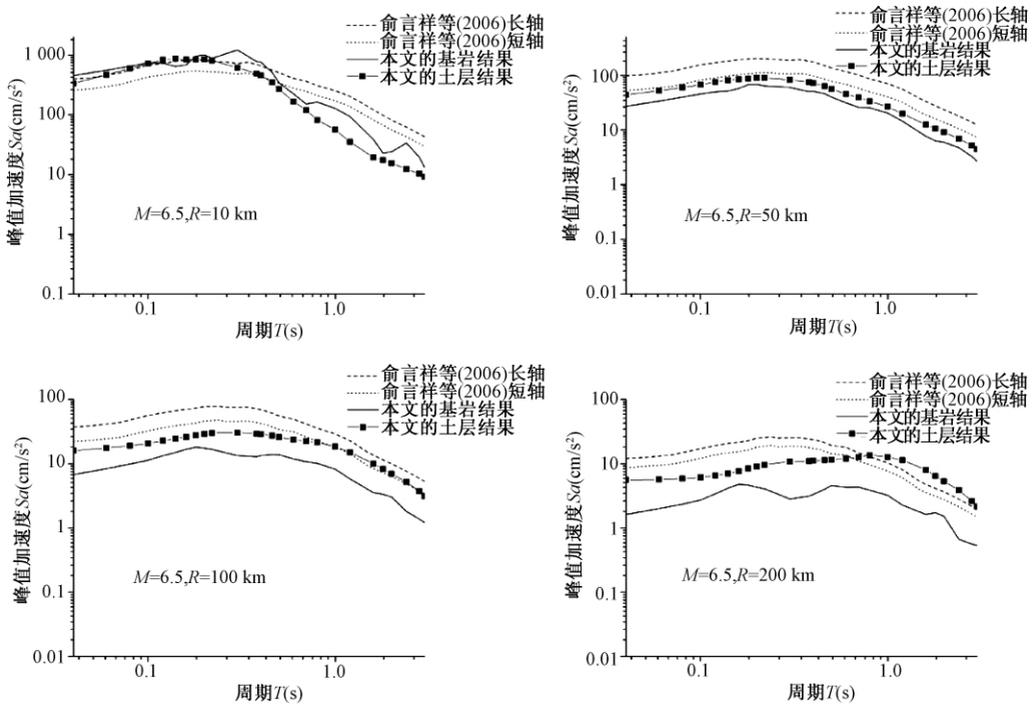


图6 本文结果与俞言祥等(2006)结果对比 ( $M_s = 6.5$ )

中距的分布情况。从图中可以看出:对于基岩场地和土层场地,近场小于 20km 范围内的强震动数据较少,模型估计精度差,在此范围内模型的估计偏大。土层场地的强震动数据较多,模型整体上对强震动数据拟合良好,没有出现明显的与距离相关的系统误差。结合图 1 和 2 的强震动数据震级-震中距分布情况,考虑到样本特征对参数回归的影响,本文得到的地震动衰减关系适用范围为:震级区间为 4.7 ~ 6.0,距离范围为 20km ~ 200km。

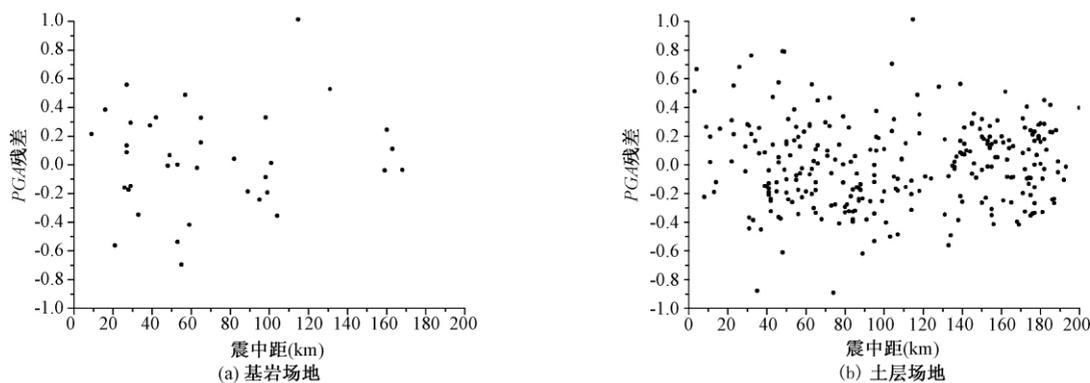


图 7 本文衰减关系模型  $PGA$  残差随震中距的分布

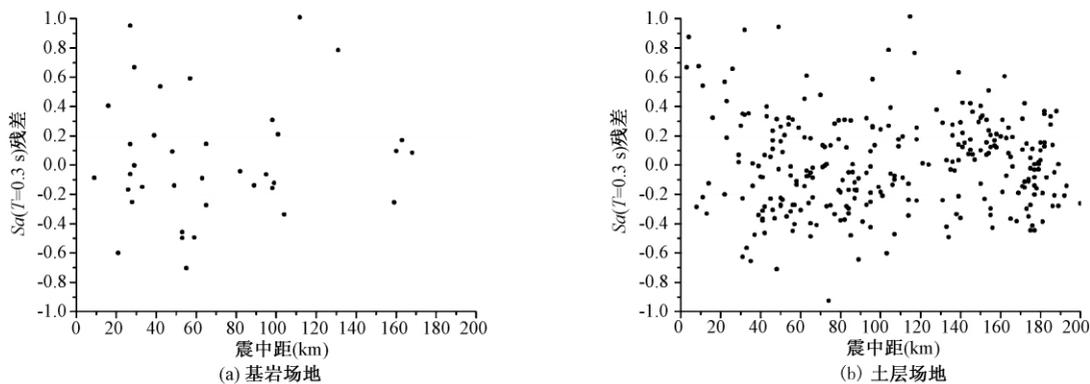


图 8 本文衰减关系模型  $Sa(T=0.3s)$  残差随震中距的分布

#### 4 与其它地震动衰减关系的对比

川滇地区地震频繁、地震资料丰富,一直是我国地震动衰减关系研究的热点地区,衰减关系模型较多。考虑到本文结果的适用震级范围,图 10 展示了川滇地区基岩场地地震动衰减关系对 5.5 级地震产生的地震动参数的估计结果对比。从图中可以看出,本文结果和康兰池等(2009)给出的衰减趋势一致,但本文结果约为康兰池等(2009)结果的 50%。且本文结果与雷建成等(2007)的结果相比,地震动随距离衰减较慢。这些差异可能是由于分析方法不同以及地震动地区差异性造成的。本文结果主要是基于云南省的强震记录直接获取的,康兰池等(2009)的结果是基于四川地区宽频带速度记录转换加速度时程计算反应谱再进行回归分析而取得的,雷建成等(2007)是基于烈度转换方法得到的地震动衰减关系。图

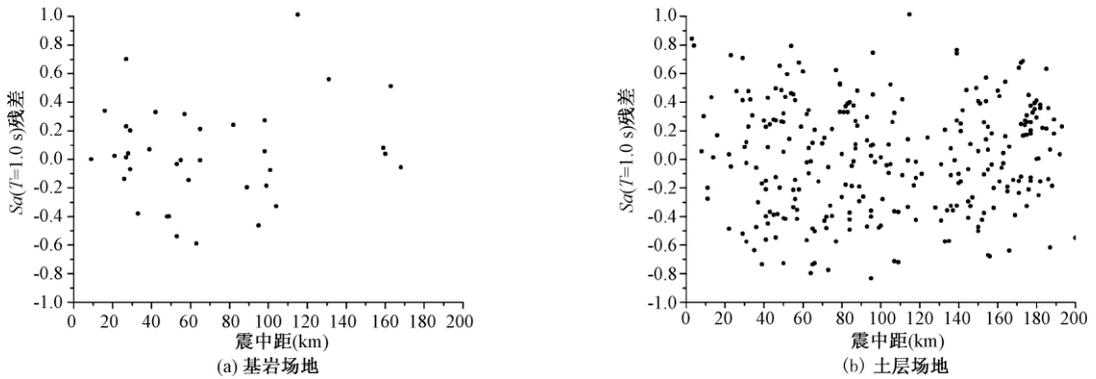


图9 本文衰减关系模型  $S_a (T = 1.0s)$  的残差随震中距的分布

11 展示了川滇地区土层场地地震动衰减关系对 5.5 级地震产生的  $PGA$  估计结果对比。其中,王玉石等(2013)的结果主要是基于汶川地震主震及其强余震的强震动数据回归分析;崔建文等(2006)的结果主要采用的是 2001 年以前的模拟式记录回归分析。从图中可以看出,本文结果与王玉石等(2013)的结果衰减趋势一致,但整体上小 50%,这种差异与本文基岩结果中与康兰池等(2009)的结果差异一致。这可能是川滇两省的地震动差异造成的。本文结果在近场与崔建文等(2006)结果一致,对于远场而言则本文的结果要大于后者。

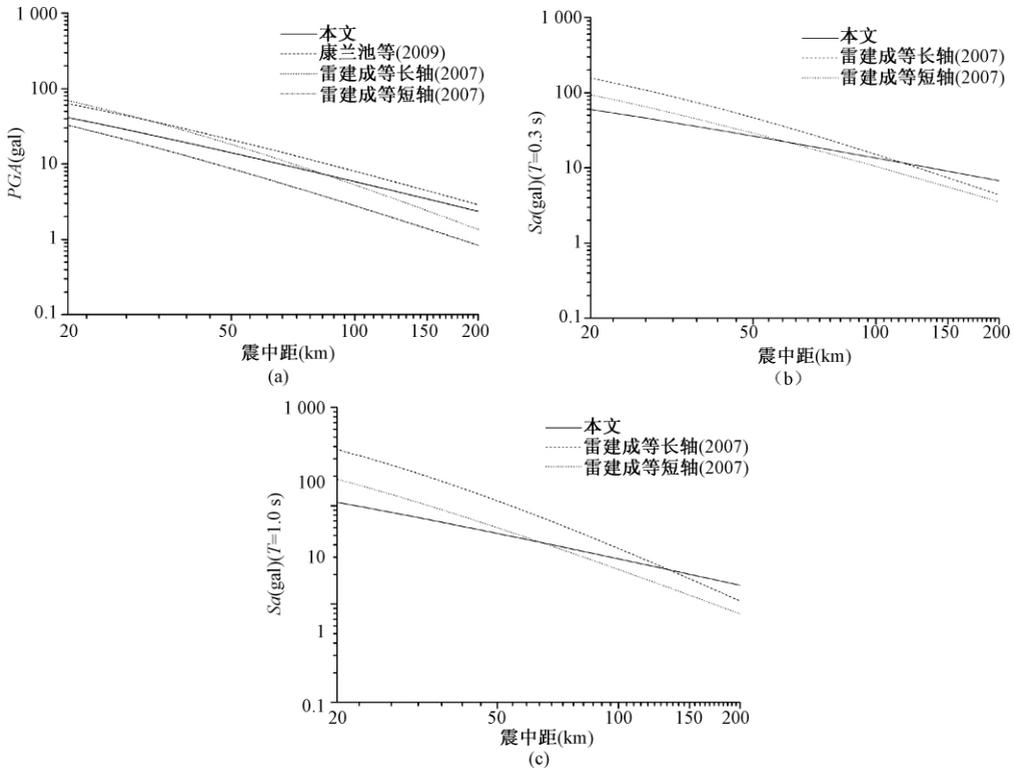


图10 基岩地震动衰减关系对 5.5 级地震地震动参数估计结果对比

## 5 结论

本文基于川滇地区中小震强震记录,用统计分析方法得到了川滇地区中小震基岩场地和土层场地峰值加速度、峰值速度以及加速度反应谱的衰减关系。通过与俞言祥等(2006)结果的对比,验证了模型的合理性。同时,通过与川滇地区已有的地震动衰减关系的对比分析,研究了本文结果的适用性。由于分析所用的强震动数据的分布有缺陷,本文得到的基岩场地地震动衰减关系对于中小震的中远场地震动的估计比较可靠,但对大震以及小震的近场地震动估计可靠性不高;本文得到的土层场地地震动衰减关系对于中远场地震动估计可靠,但对于中近场地震动估计的可靠性需要进一步资料的佐证。

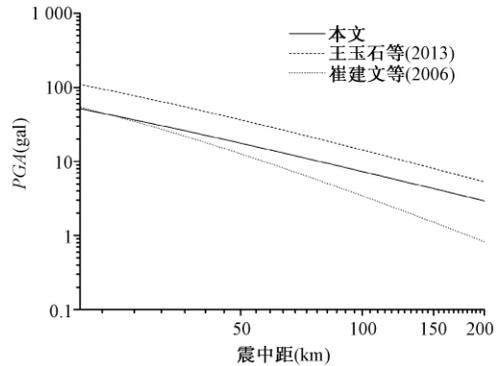


图 11 各种土层地震动衰减关系对 5.5 级地震地震动参数估计结果对比

## 参考文献

- 崔建文、李世成、高东等,2006,云南分区地震动衰减关系,地震研究,29(4),386~392。
- 霍俊荣、胡聿贤、冯启民,1992,关于通过烈度资料估计地震动的研究,地震工程与工程振动,12(3),1~15。
- 康兰池、金星,2009,四川地区中小地震地震动衰减规律研究,地震学报,31(4),403~410。
- 雷建成、高孟潭、俞言祥,2007,四川及邻区地震动衰减关系,地震学报,29(5),500~511。
- 李小军、阎秀杰、潘华,2005,中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析,地震工程与工程振动,25(1),1~7。
- 卢大伟、李小军、崔建文,2010,汶川中强余震地震动峰值衰减关系,应用基础与工程科学学报,18,138~151。
- 陶夏新、陶正如、王立媛,2010,对中国地震动衰减研究的若干看法,土木建筑与环境工程,32(2),138~142。
- 王国新,2001,强地震动衰减研究,哈尔滨:中国地震局工程力学研究所。
- 汪素云、俞言祥、高阿甲等,2000,中国分区地震动衰减关系的确定,中国地震,16(2),99~106。
- 王玉石、李小军、周正华,2013,川滇地区水平向强地震动衰减关系研究,地震学报,35(2),238~249。
- 喻焯、李小军,2011,基于 NGA 模型的汶川地震区地震动衰减关系,岩土工程学报,11,44~54。
- 俞言祥、汪素云,2006,中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系,震灾防御技术,1(3),206~217。
- Abrahamson N A, Atkinson G M, Boore D M, et al,2008,Comparisons of NGA Ground-Motion Relations, Earthquake Spectra, 24(1), 45~66。

## **Analysis of ground motion attenuation characterization for moderate earthquakes in the Sichuan–Yunnan region**

*Yu Tian*<sup>1)</sup> *Cui Jianwen*<sup>2)</sup> *Li Xiaojun*<sup>3)</sup> *Yang Liwei*<sup>2)</sup>

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

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

**Abstract** The ground motion attenuation model for PGA, PGV and response spectrum at rock sites and soils sites are derived separately from the digital strong motion records of moderate earthquakes in the Sichuan–Yunnan region after 2007. By comparison with Yu Yanxiang's attenuation model for rock sites in Western China, reliability of the model is verified for moderate earthquakes. According to the distribution of strong motion data with earthquake magnitude and epicentral distance, the applicability and reliability of the results in this paper is discussed.

**Key words:** The Sichuan–Yunnan region Ground motion Attenuation model