

NGA 模型在芦山地震区的适用性

冀 昆, 温瑞智, 任叶飞, 王宏伟, 黄旭涛

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以 2013 年 4 月 20 日四川 M_w 6.7 级芦山地震强震动记录为基础数据, 分析美国下一代衰减关系项目 NGA-West 1 与 NGA-West 2 两组模型在该地区的适用性。选用断层距 200 km 以内 42 个台站的主震记录为样本, 拟合地震动峰值加速度和典型周期加速度反应谱的衰减关系, 对比芦山地震观测数据与 NGA 模型预测值的差异。结果表明, 2 组 NGA 模型整体上均轻微低估了小于 0.2 s 的短周期处加速度反应谱值, 而在大于 1 s 的长周期处则存在明显的高估现象; NGA-West 2 模型在短周期处离散性比 NGA-West 1 模型有所改善, 长周期处的残差略有降低。

关键词: 地质力学; 芦山地震; NGA 模型; 地震动

中图分类号: P 55

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 1-2990-10

Applicability of the NGA model in Lushan earthquake region

Ji Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei, WANG Hongwei, HUANG Xutao

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: The M_w 6.7 Lushan earthquake on April 20, 2013 provided the opportunity to validate the applicability of American Next Generation Attenuation Relationship (NGA-West 1 and NGA-West 2 model). A total of 42 free-field strong-motion recordings within the rupture distance of 200 km were used in this study. Firstly we established an empirical attenuation relationship for the peak ground acceleration and spectral acceleration. The residuals analysis shows that the model can properly reflect the attenuation tendency of the parameters. It was found that the NGA models underestimate the parameters slightly in short period less than 0.2 s, overestimate significantly in long period over 1 s. Compared with the NGA-West 1 model, the NGA-West 2 model not only performs better for the discreteness of short period spectral acceleration, but also reduces the residuals in long period.

Key words: geomechanics; Lushan earthquake; NGA model; ground motion

1 引言

美国下一代衰减关系 NGA(next generation attenuation relationships)项目由美国太平洋地震工

程研究中心 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)研发。NGA-West1 项目于 2008 年完成, 从 5 个被广泛接受的已有模型出发, 基于残差分析和数值模拟的结果不断对模型函数形式进行评估和修正。此后研究人员基于不同区域的强震观

收稿日期: 2014-10-11; **修回日期:** 2015-01-07

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2014B06); 地震行业科研专项项目(201508005); 国家自然科学基金资助项目(51308515) Supported by Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(Grant No. 2014B06), Nonprofit Industry Research Project of China Earthquake Administration(Grant No. 201508005) and National Natural Science Fund(Grant No. 51308515)

作者简介: 冀 昆(1990-), 男, 2014 年于中国地震局工程力学研究所结构工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事工程地震方面的研究工作。E-mail: JKingN@163.com. 通讯作者: 温瑞智(1968-), 男, 现任研究员, 博士生导师。E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

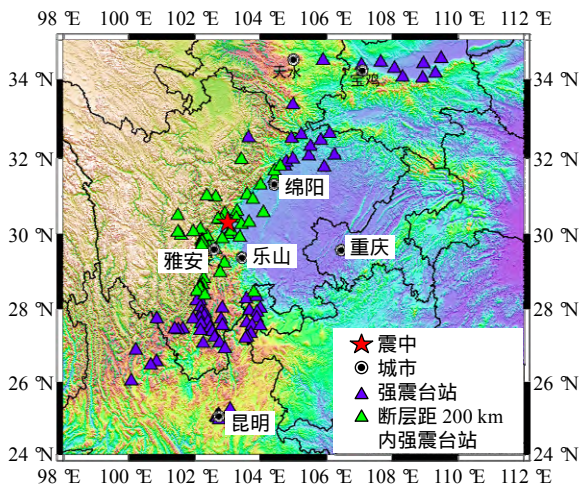
DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1374

测数据对其适用性做了探索^[1-3]。2008 年 5 月 12 日汶川地震之后，D. Wang 等^[4]将汶川地震数据与 NGA-West 1 模型的预测值进行对比，发现 NGA-West 1 模型不同程度低估了短周期地震动加速度反应谱值，高估了长周期地震动反应。PEER 于 2013 年底发布了 NGA-West 2 模型，所用数据库首次包括了汶川地震记录。我国 2007 年数字强震动台网运行以前，强震动记录以模拟记录为主，仪器动态范围小，获取记录的质量较差，捕获的强震动观测记录以大震的远场记录和余震的近场记录为主^[5]。由于缺少强震数据支撑，国外衰减关系在我国的适用性一直没有得到有效验证。

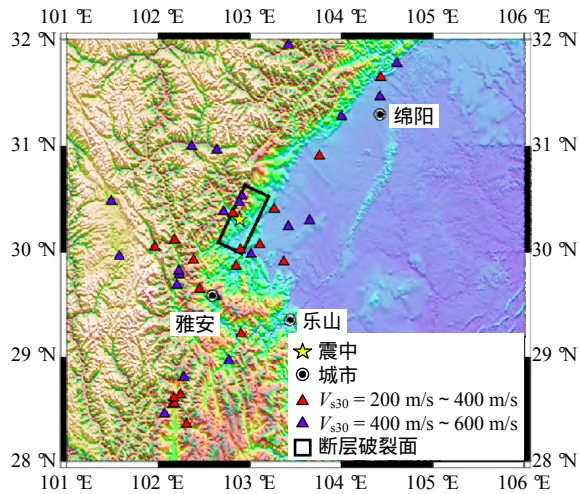
2013 年 4 月 20 日芦山地震是我国继汶川地震以来第二次比较全面地获得大批高质量的近场数字强震动记录，填补了我国大陆中等破坏强度地震记录的空白^[6]，为检验上述 2 组 NGA 模型的适用性提供了基础。本文首先拟合了芦山地震强震动记录对应的衰减关系，进而对比评估了各 NGA 模型的预测结果，最后对比了 NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型对不同周期加速度反应谱值的预测结果。

2 芦山地震强震动记录

芦山地震震中位于 30.3°N，103.0°E，距离成都市大约 100 km，是发生在龙门山断裂带南端的一次逆冲型地震，触发强震动台站地理位置如图 1(a)所示。王卫民等^[7]用有限断层反演方法得到地震破裂面的错动倾伏角、断层倾角、断层走向分别为 88.8°，38.5°，205°，震源深度为 10.2 km，震级为 M_w 6.7，断层破裂面见图 1(b)。



(a) 芦山地震所有触发强震动台站分布



(b) 芦山地震断层距 200 km 内台站 V_{s30} 分组

图 1 芦山地震触发台站分布及场地分组

Fig.1 The location and V_{s30} groups of triggered stations in Lushan earthquake

为保证与 NGA 模型所用参数一致，本文统一以断层距(R_{rup})作为距离项参数，选取断层距 200 km 以内 42 个强震观测台站为研究对象。我国强震动台站通常只有覆盖土层厚度小于或等于 20 m 的土层剪切波速钻孔资料，而 NGA 模型以 30 m 土层等效剪切波速(V_{s30})来标定场地类型。NGA-West 2 数据库中收录了汶川地震数据，2 次地震触发台站存在交叉，研究区域大部分台站的 V_{s30} 信息可直接在该数据库中查出。剩余台站 V_{s30} 利用覆盖土层厚度和等效剪切波速进行经验插值得到^[4]。将所研究区域(断层距 200 km 内)台站按照 V_{s30} 分成 200~400 与 400~600 m/s 两组(见图 1(b))。

采用 D. M. Boore^[8]提出的方法对部分近场台站记录进行了基线校正处理。对记录采用 Butterworth 非因果滤波，滤波范围为 0.1~30 Hz。水平向峰值加速度(PGA)采用 EW 向和 SN 向的几何平均值，并以同样方式计算了各周期处的加速度反应谱(S_a)。虽然本文并未按照 NGA 模型中所使用的旋转水平记录的方式来合成水平地震动，但是研究表明水平向地震动 PGA 和 S_a 的几何平均值与该方法的结果相差不大^[9]。最后将所选台站的名称，位置，断层距， V_{s30} 以及经过处理后各记录的地震动参数见表 1。

3 芦山地震衰减关系拟合

在与 NGA-West 1 和 NGA-West 2 模型对比之前，首先基于芦山地震记录拟合出对应的衰减关系作为参考(即芦山地震衰减关系)，选取断层距 R_{rup} ， V_{s30}

表 1 芦山地震断层距 200 km 内台站信息及记录参数
Table 1 The information of stations and records within rupture distance of 200 km

台站名称	台站编号	经度/(°)	纬度/(°)	$V_{s30}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	断层距/km	PGA 几何平均/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	$S_a(T=1.0 \text{ s})$ 几何平均值/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$
芦山飞仙	51LSF	102.9	30.0	517*	4.11	371.90	101.21
雅安专业	51YAD	103.0	30.0	354*	9.42	457.19	110.16
邛崃油榨	51QLY	103.3	30.4	508*	11.24	292.55	146.65
名山科技	51YAM	103.1	30.1	600*	13.32	374.35	95.06
荣经石龙	51YAL	102.9	29.9	535*	14.93	202.76	69.85
宝兴民治	51BXZ	102.9	30.5	394*	15.58	429.55	77.82
宝兴盐井	51BXY	102.9	30.5	332*	15.82	358.01	45.62
宝兴地办	51BXD	102.8	30.4	585*	16.59	909.92	119.80
宝兴明礼	51BXM	102.7	30.4	398	22.53	278.15	156.65
蒲江大兴	51PJD	103.4	30.2	390*	32.16	168.25	86.04
天全两路	51TQL	102.4	29.9	526*	38.62	277.72	35.50
洪雅科技	51HYT	103.4	29.9	437*	43.80	68.43	37.14
蒲江五星	51PJW	103.7	30.3	338*	49.74	99.16	73.86
康定姑咱	51KDZ	102.2	30.1	500	51.04	25.23	8.79
小金达维	51XJW	102.6	31.0	343	51.89	44.68	19.23
汉源清溪	51HYQ	102.6	29.6	362*	53.29	61.58	43.30
汉源宜东	51HYY	102.5	29.7	475*	55.38	167.08	27.43
泸定甘谷	51LDG	102.2	29.8	353	55.82	63.73	32.96
泸定冷碛	51LDL	102.2	29.8	349*	57.59	99.92	27.39
泸定加郡	51LDJ	102.2	29.7	338*	66.26	63.53	18.43
郫县走石	51PXZ	103.8	30.9	418*	67.79	12.56	19.96
康定专业	51KDT	102.0	30.1	628*	70.42	68.42	10.11
小金地办	51XJD	102.4	31.0	370*	72.28	31.17	6.71
成都中和	51CDZ	104.1	30.6	297*	85.11	52.32	35.98
汉源乌斯	51HYW	102.9	29.2	442*	85.13	52.01	6.28
康定呷巴	51KDG	101.6	30.0	303*	107.48	16.09	3.77
什邡八角	51SFB	104.0	31.3	379*	112.83	65.46	19.20
康定新都	51KDX	101.5	30.0	403	113.99	13.97	2.54
甘洛气象	51GLQ	102.8	29.0	373	114.46	19.68	8.65
道孚八美	51DFB	101.5	30.5	372	122.54	19.35	3.99
冕宁拖乌	51MNW	102.3	28.8	388	145.12	42.91	35.38
黑水色尔	51HSS	103.4	31.9	357	154.19	17.44	3.94
安县塔水	51AXT	104.4	31.5	376*	155.88	20.40	12.59
冕宁曹古	51MNC	102.2	28.6	490*	163.13	31.96	17.65
冕宁惠安	51MNA	102.2	28.6	563*	169.36	18.30	14.90
北川地办	51BCD	104.4	31.6	432	170.12	14.64	8.46
冕宁地办	51MNJ	102.2	28.6	450*	175.20	17.50	14.69
冕宁专业	51MNT	102.2	28.6	446	176.21	44.62	18.63
冕宁回龙	51MNH	102.1	28.5	371*	188.85	27.92	15.68
喜德冕山	51XDM	102.3	28.4	417*	190.68	22.66	25.14
雷波黄琅	51LBH	103.8	28.4	391*	192.18	44.64	29.41
江油含增	51JYH	104.6	31.8	323*	192.23	25.80	4.91

注：*表示数据来源于 NGA-West 2 数据库，其余数据采用经验方法插值计算^[4]。

作为距离项与场地项变量，衰减模型方程如下：

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln(R_{\text{rup}} + a_2) + a_3 \ln V_{s30} + a_4 R_{\text{rup}} + \varepsilon \tag{1}$$

式中： Y 为所拟合的强震动参数，包括峰值加速度 (PGA) 以及不同周期点的加速度谱值 (S_a) 等； a_0 ， a_1 ，

a_2 ， a_3 ， a_4 可通过最小二乘法回归得出，其中 a_1 ， a_4 分别为几何衰减项和非弹性衰减项系数， a_3 为场地放大项系数， ε 代表拟合方程观测值与预测值的残差。

表 2 给出了芦山地震峰值加速度 PGA 以及 $T=1.0 \text{ s}$ 处加速度反应谱 $S_a(T=1.0 \text{ s})$ 的系数拟合结果，

表 2 芦山地震衰减关系拟合参数

Table 2 Regression coefficients for the Lushan earthquake attenuation relationship

拟合参数 $Y/$	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\sigma_{\ln Y}$	相关系数 ρ
PGA	18.574	- 3.045	25.350	- 0.301	0.014 6	0.57	0.80
$S_a(T = 1.0 \text{ s})$	21.744	- 3.614	25.010	- 0.700	0.023 5	0.69	0.81

以及残差对数值的标准差 $\sigma_{\ln Y}$ 。将观测数据按照 V_{s30} 分组后与该模型的拟合曲线进行对比(见图 2)。曲线基本从散点中部穿过,说明拟合结果较好地反映了强震参数的变化趋势。 PGA 与 $S_a(T = 1.0 \text{ s})$ 拟合结果的 $\sigma_{\ln Y}$ 均在 0.7 以内,整体的相关系数 ρ 在 0.80 左右,可以认为拟合结果较为理想。

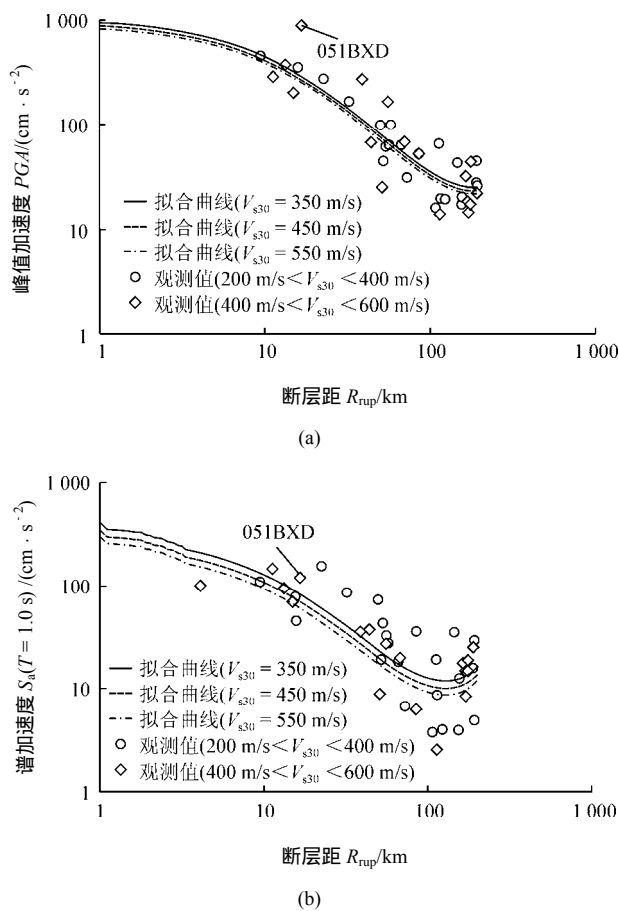


图 2 观测值与芦山地震衰减关系拟合结果对比

Fig.2 Comparison of the observed data with Lushan ground motion attenuation relationship

值得注意的是, PGA 拟合结果对不同 V_{s30} 分组的变化并不敏感,若以 350 m/s 组作为参考标准,450 m/s 与 500 m/s 组的计算结果与之相差仅为 7% 和 5%。另外,在此次地震中获得最大记录的 051BXD 台站的 PGA 观测值远远高于衰减关系的预测值,而较长周期处却基本与衰减关系相符,温瑞

智等^[10]认为,该台站较大的 PGA 是由于其特殊的陡坡地形放大了高频段反应,为避免该异常值影响结论的一般性,在后面的研究中排除了该记录。

4 NGA 衰减关系对比

NGA-West 1 模型共包含 5 个衰减模型:即 AS08^[11], BA08^[9], CB08^[12], CY08^[13]和 I08^[14]。NGA-West 2 模型同样包括 5 个:ASK14^[15], BSSA14^[16], CB14^[17], CY14^[18]以及 I14^[19]模型,其中 I08 和 I14 模型仅适合计算近场坚硬场地,本文未考虑与该模型对比。

4.1 总残差分析

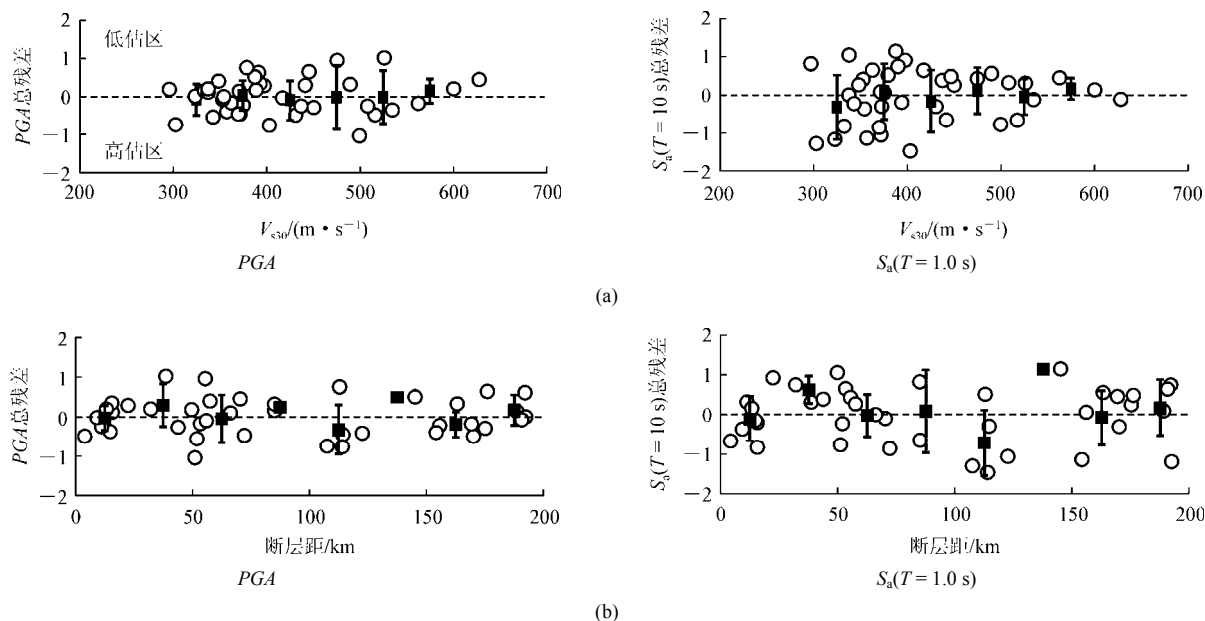
在地震动衰减关系残差分析理论中,总残差代表观测值和预测值的整体差异,可以分为事件间残差和事件内残差两部分^[20]。事件间残差代表该衰减关系对于某次地震事件的预测偏差程度,而事件内残差则主要体现同一地震事件内台站与台站预测结果之间的差异,具体定义如下:

$$\ln Y_{ij} = f(M, R, site) + \sigma = f(M, R, site) + \theta_j + \varepsilon_{ij}$$

(2)

式中: Y_{ij} 为 j 号地震下 i 号台站的记录观测值, $f(M, R, site)$ 为衰减关系的计算结果, σ 为总残差, i 为台站编码, j 为事件编码, θ_j 为事件间残差, ε_{ij} 为事件内残差。对一次地震事件而言,某衰减关系预测结果的事件间残差是固定的,存在于每个台站的预测结果中。

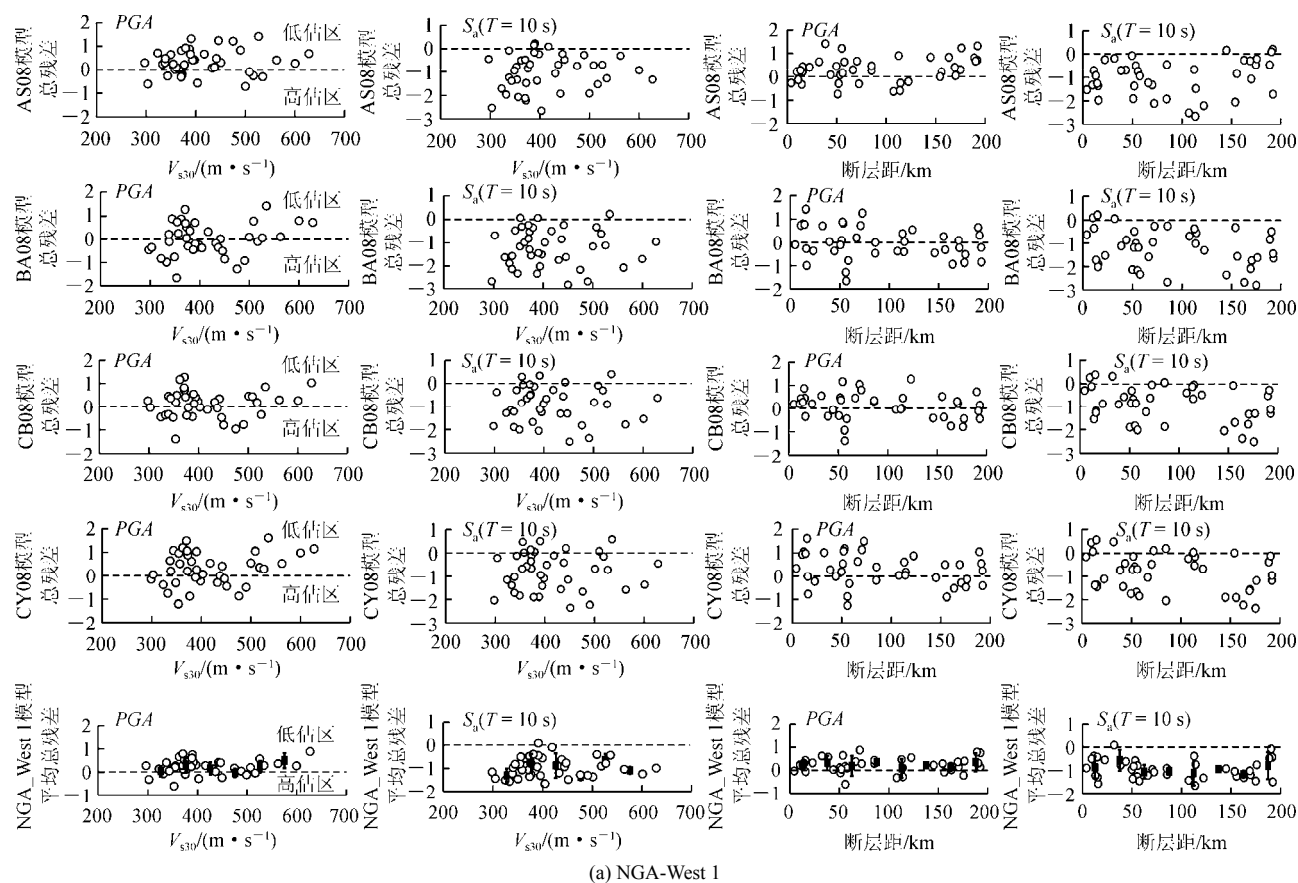
图 3 给出了上文芦山地震衰减关系的总残差随 V_{s30} 和断层距的变化情况,并给出了加减一倍标准差的误差线(见图中虚线)。除个别点外, PGA 与 $S_a(T = 1.0 \text{ s})$ 的总残差变化范围都在 - 1.0 ~ 1.0 范围。随 V_{s30} 和断层距变化的误差线接近零轴,与距离和场地项变量的相关性并不显著,可以认为该衰减关系的拟合结果在这 2 个周期点均没有出现明显的系统偏差。对样本进行最小二乘拟合的基本假设为本残差服从正态分布,经过 Kolmogorov-Smirnov 假设检验^[21]后发现:0.05 的显著水平下,接受残差服

图3 芦山地震衰减关系 PGA 与 $S_a(T=1.0\text{ s})$ 总残差散点分布Fig.3 Residuals distribution at PGA and $S_a(T=1.0\text{ s})$ of Lushan ground motion attenuation relationship

从正态分布的基本假设,证明之前采用最小二乘法拟合芦山地震衰减关系参数是可行的。

图4给出了 PGA 与 $S_a(T=1.0\text{ s})$ 处 NGA 各模型预测结果总残差随断层距和 V_{s30} 的变化情况。无论是 NGA-West 1(见图4(a))还是 NGA-West 2(见图4(b))

模型,对 PGA 预测值的总残差均在零线附近做小幅波动,大部分绝对值在 1.0 以内,随 V_{s30} 与断层距的变化趋势都很轻微;但在较长周期(1.0 s)处总残差大部分为负值。与芦山地震衰减关系总残差对比发现,2 组 NGA 模型在 PGA 处的预测结果较为可靠,但



(a) NGA-West 1

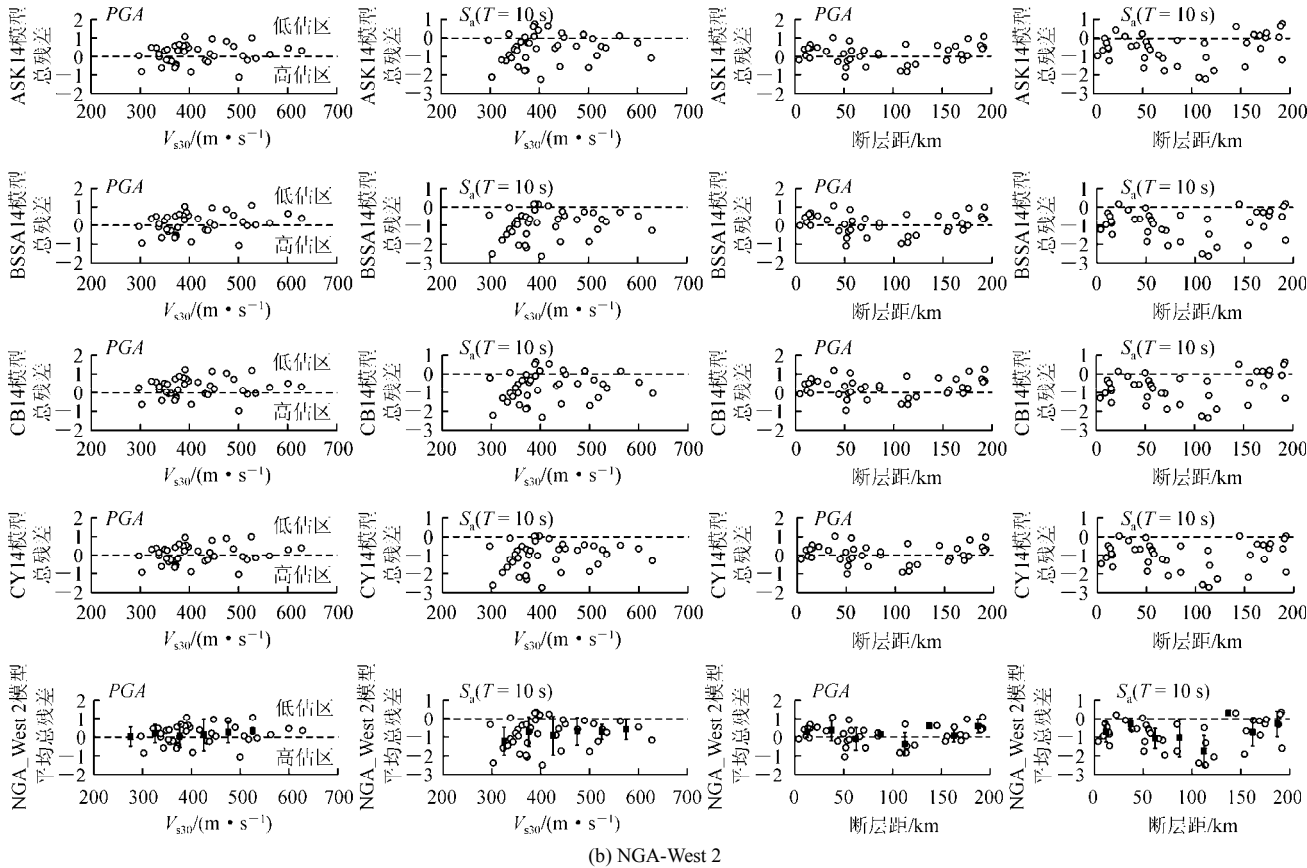


图 4 PGA 与 $S_a(T=1.0\text{ s})$ NGA 各模型总残差散点分布

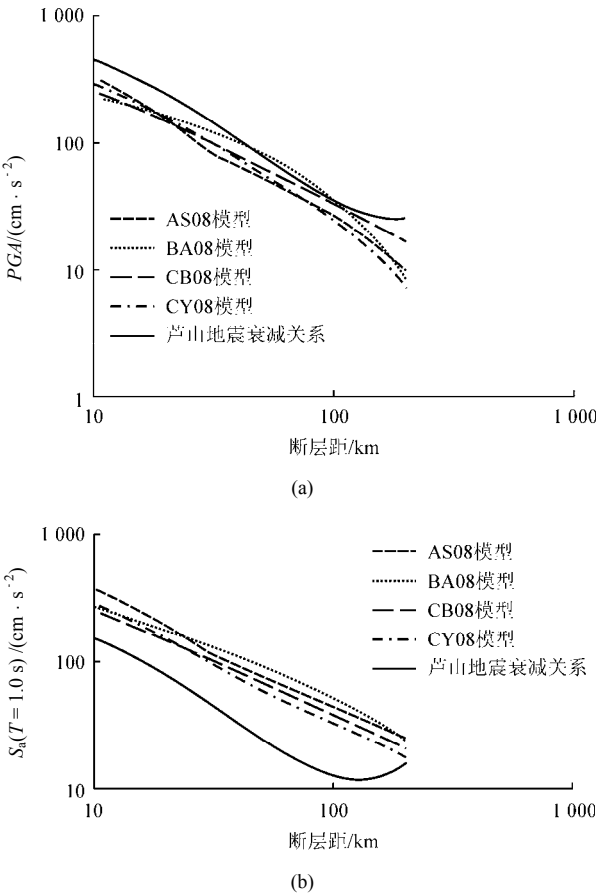
Fig.4 Comparison of residuals between NGA models in PGA and $S_a(T=1.0\text{ s})$

均不同程度高估了长周期处的地震反应。

4.2 事件间残差分析

由式(2)可知,事件间残差主要用来表征衰减关系预测某地震事件的整体偏差。以芦山地震衰减关系作为参考,计算 NGA 各模型预测本次地震的事件间残差^[22],结果如图 5 和表 3 所示。对于 PGA , NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型与芦山地震衰减关系差别不大,事件间残差绝对值在 0.4 以内;但是对于 $S_a(T=1.0\text{ s})$,上述 NGA 模型的预测结果明显偏高,事件间残差水平接近 -1.0。证明 NGA-West 1 模型与 NGA-West 2 模型预测芦山地震长周期地震动时确实存在整体偏差。

D. Wang 等^[4]指出,若仅研究一次单独事件,各台站之间记录的差异仅体现在事件内残差中,且服从均值为 0 的正态分布,将各台站记录总残差进行平均之后即可近似得到各参数(PGA, S_a)的事件间残差。图 6 分别给出了断层距 0~50, 50~100, 150~200, 以及 0~200 km 四个区间内各周期点的事件间残差变化情况。整体来看,在上述 4 个区间, NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型均表现出了短周期事件间残差为正,长周期为负的趋势。在周期为



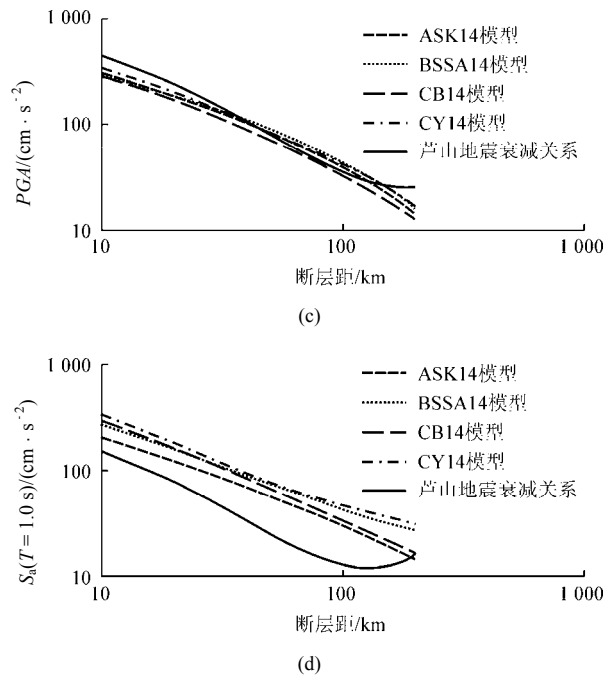


图5 NGA 各模型与芦山地震衰减关系计算结果对比
($V_{s30} = 350$ m/s)

Fig.5 Comparison between NGA model and Lushan ground motion attenuation relationship($V_{s30} = 350$ m/s)

表3 NGA 各模型 PGA 和 $S_a(T = 1.0\text{ s})$ 事件间残差计算结果
Table 3 Inter-event residuals at PGA and $S_a(T = 1.0\text{ s})$ for different NGA models

模型及编号	PGA	$S_a(T = 1\text{ s})$
NGA-West1 模型	AS08	0.468
	BA08	0.272
	CB08	0.211
	CY08	0.546
	平均值	0.370
NGA-West2 模型	ASSK14	0.116
	BSSA14	0.025
	CB14	0.268
	CY14	0.026
	平均值	0.110

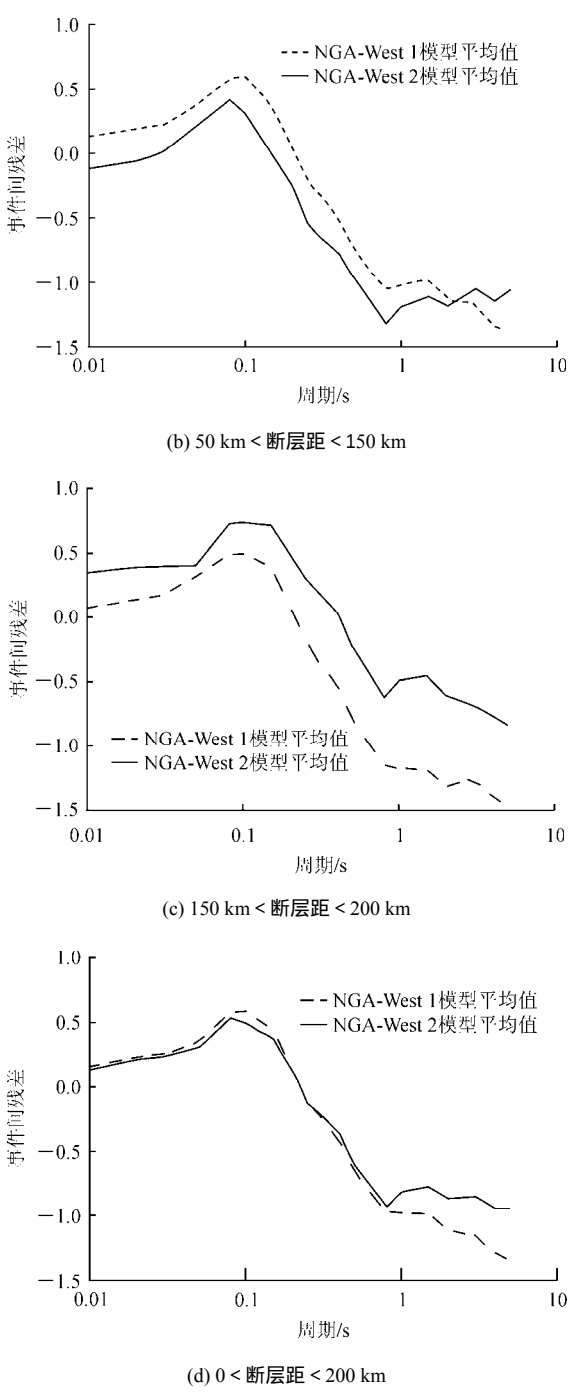
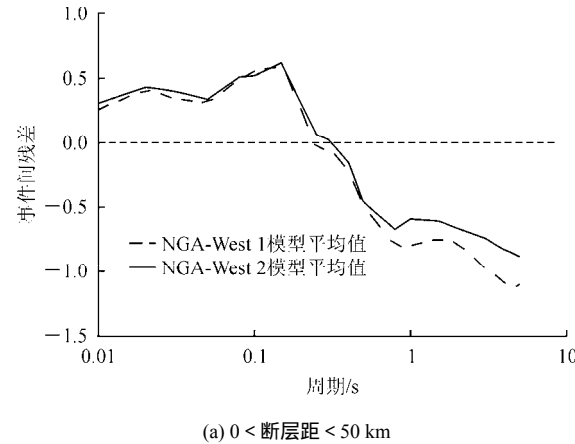


图6 不同断层距区间内事件间残差对比

Fig.6 Inter-event residuals for different rupture distance ranges

0.01 ~ 0.20 s 时, 事件间残差随着周期变长略微增大, 变化范围为 0.0 ~ 0.5。约在 0.3 s 之后事件间残差为负, 模型预测值开始出现高估。伴随周期变长, 偏差逐渐变大, 直至在周期 1.0 s 处达到最大偏离。上述模型在长周期段明显地高估了实际的地震反应, 而短周期段相对较轻地低估了实际地震反应。该结果验证了上文总残差的分析结果, 与采用 NGA-West 1 模型计算汶川地震得到的结论相同^[4]。

对比 0 ~ 200 km 内 NGA-West 1 与 NGA-West 2

模型的事件间残差,短周期段二者计算结果差别较小,但是在大于1.0 s的长周期段,NGA-West 2 模型计算结果的偏差程度要低于 NGA-West 1 模型。0~50,50~150 km 断层距区间内,二者事件间残差整体差别不大,但是在相对较远的150~200 km 范围,计算结果差异显著。

NGA-West 2 在 NGA-West 1 数据库的基础上补充了大量中小型地震,并依据该批数据对原模型中的非弹性衰减项系数做了重新标定。在长周期部分,降低了所对应的非弹性衰减项系数的绝对值^[16];另外,NGA-West 2 模型利用汶川记录进行了区域性修正,四川地区品质因子整体较高也可能是导致150~200 km 的相对较远区域二者预测结果差异显著的原因之一。

NGA 模型在各震级均选取了全球大量地震事件进行参数拟合,因此有必要将芦山地震与 NGA 数据库中其余事件的计算结果对比分析。以 NGA-West 1 中的 AS08 模型为例,计算各事件 $S_a(T=0.2\text{ s})$ 与 $S_a(T=1.0\text{ s})$ 的事件间残差,结果如图7所示。 $S_a(T=0.2\text{ s})$ 处芦山地震事件间残差值约为0.25,基本

处在 NGA-West 1 数据库相近震级地震事件预测结果的残差散点范围内; $S_a(T=1.0\text{ s})$ 处的事件间残差约为-1.0,绝对值远远高于其余地震的事件间残差水平。作为参考,将 D. Wang 等^[4]计算的汶川地震事件间残差结果也表示于图7。

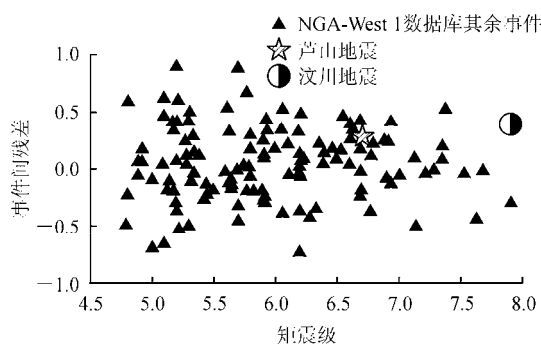
由于最新的 NGA-West 2 模型公布时间较短,目前无法与我国其余地震事件的事件间残差加以对比,但从芦山地震强震动资料的分析结果来看,NGA-West 2 模型并未从根本上改善 NGA-West 1 长周期处的预测偏差。使用该衰减模型预测我国西部地区中强地震的长周期地震动并不适用。

严格意义上来讲,仅通过一次地震事件来对衰减模型结果进行修正是缺乏统计意义的。随着我国强震记录的积累,获得多次类似震级的地震数据后,可参考本文思路对预测结果进行残差分析,利用计算得到的事件间残差平均值对结果进行修正,或进一步考虑 NGA-West 2 模型中衰减项与场地项系数的重新标定,从根源上消除上述模型预测我国地震的误差。由于目前强震数据基础尚不完善,本文不对这一问题加以深入讨论。

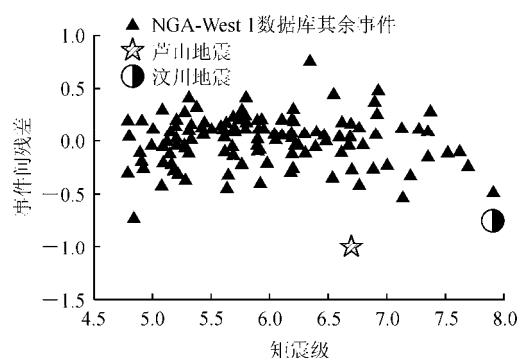
4.3 残差离散性分析

预测结果的离散性同样是衡量衰减模型适用性的重要指标,而其衡量指标通常为残差的标准差。为了更好地进行对比,首先计算出芦山地震衰减关系各周期点预测结果的残差标准差,进而对比 NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型的计算结果(见图8)。

可以看到,2组 NGA 模型标准差变化的整体趋势与上文芦山地震衰减关系基本一致:在周期0.01~1 s,残差标准差随着周期变长而增大,在1 s左右达到最大值,此后离散性逐渐降低。即各模型在短周期段预测结果比较稳定,随着周期变长离散性随之增大。在周期0.01~0.1 s,NGA-West 2 模型的残差标准差计算结果比 NGA-West 1 模型整体低0.2左右,但在周期1 s之后 NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型离散性差别不大。



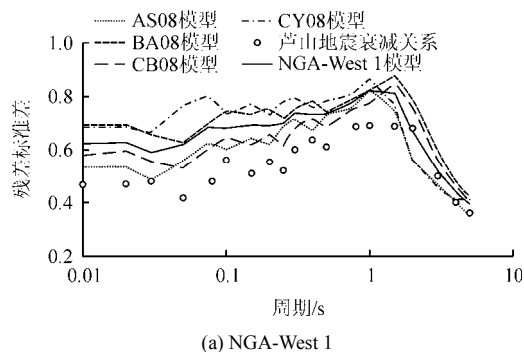
(a) $S_a(T=0.2\text{ s})$



(b) $S_a(T=1.0\text{ s})$

图7 芦山地震、汶川地震与 NGA-West 1 数据库其余地震的事件间残差对比

Fig.7 Comparison of the inter-event residuals of earthquake in NGA-West 1 database, Lushan earthquake and Wenchuan earthquake



(a) NGA-West 1

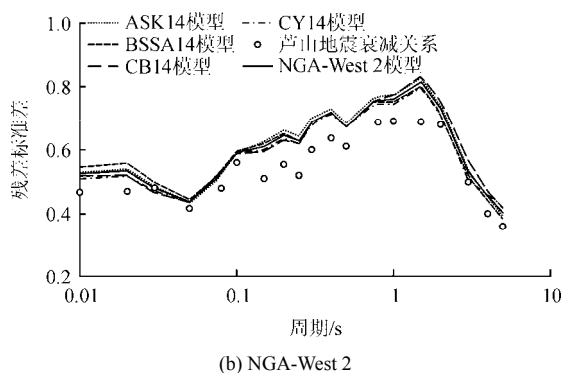


图 8 芦山地震衰减关系模型残差标准差对比

Fig.8 Comparison of the standard deviation from Lushan earthquake attenuation relationship

5 结 论

本文基于芦山地震断层距 200 km 内的强震数据,拟合出了适用于芦山地震事件的衰减关系,在其基础上,对 NGA-West 1 与 NGA-West 2 模型在该地区的适用性加以研究,得出以下结论:

(1) 2 组 NGA 模型在 PGA 处的预测值与观测结果较为吻合,在低于 0.2 s 的短周期处预测结果出现轻微低估,超过 1 s 的长周期处预测值存在明显高估现象。

(2) 2 组 NGA 模型预测结果的离散程度随周期变长而逐渐变大,在 $S_a(T=1.0\text{ s})$ 处离散程度最大。

(3) NGA-West 2 模型长周期处的事件间残差表现要略优于 NGA-West 1 模型,短周期处预测结果的离散性要小于 NGA-West 1 模型。

综上所述,NGA-West 1 和 NGA-West 2 模型在短周期段可以较好预测芦山地震数据,但是长周期段预测值存在不可忽视的高估现象,上述模型预测我国西部地区破坏性地震时存在整体性偏差。芦山地震是我国继汶川地震以来强震记录获取数量最多,质量最好的地震事件,可以考虑将芦山地震数据补充进 NGA-West 2 基础数据库,以改善其预测结果。

致谢 感谢中国地震局工程力学研究所强震动台网中心提供了芦山地震主震观测数据。

参考文献(References):

[1] SCASSERRA G, STEWART J P, BAZZURRO P, et al. 2009. A comparison of NGA ground-motion prediction equations to italian data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009,

99(5): 2 961–2 978.

- [2] STAFFORD P J, STRASSER F O, BOMMER J F, et al. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-mediterranean region[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(2): 149–177.
- [3] SHOJA-TAHERIA J, NASERIEHB S, HADI G. 2010. A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2010, 14(2): 278–292.
- [4] WANG D, XIE L L, ABRAHAMSON N A, et al. Comparison of strong ground motion from the Wenchuan, China, earthquake of 12 May, 2008 with the next generation attenuation(NGA) ground-motion models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2 381–2 395.
- [5] 周雍年. 中国大陆的强震动观测[J]. 国际地震动态, 2006, 335(11): 1–6.(ZHOU Yongnian. Strong motion observation in chinese continent[J]. Recent Development in World Seismology, 2006, 335(11): 1–6.(in Chinese))
- [6] 温瑞智, 任叶飞, 黄旭涛, 等. 芦山 7.0 级地震强震动记录及其震害相关性[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 1–14.(WEN Ruizhi, REN Yefei, HUANG Xutao, et al. Strong motion records and their engineering damage implications for Lushan earthquake on April 20, 2013[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 1–14.(in Chinese))
- [7] 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 412–1 417.(WANG Weimin, HAO Jinlai, YAO Zhenxing. Preliminary result for rupture progress of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1 412–1 417.(in Chinese))
- [8] BOORE D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1 199–1 211.
- [9] BOORE D M, ATKINSON G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA , PGV , and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 99–138.
- [10] 温瑞智, 任叶飞, 齐文浩, 等. 2013 年 4 月 20 日芦山地震最大加速度记录分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 783–791.(WEN Ruizhi, REN Yefei, QI Wenhao, et al. Maximum acceleration recordings

- from Lushan earthquake on April 20, 2013[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 783–791.(in Chinese)
- [11] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 67–97.
- [12] CAMPBELL K W, BOZORGNIYA Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 139–171.
- [13] CHIOU B S J, YOUNGS R R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 173–215.
- [14] IDRIS I M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 217–242.
- [15] ABRAHAMSON N A, SILVA W J, KAMAI R. 2013. Update of the AS08 Ground-motion prediction equations based on the NGA-West2 data set[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [16] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, et al. NGA-West2 equations for predicting response spectral accelerations for shallow crustal earthquakes[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [17] CAMPBELL K W, BOZORGNIYA Y. NGA-West2 campbell-bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [18] CHIOU B S J, YOUNGS R P. 2013. Update of the chiou and youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [19] IDRIS I M. NGA-West2 Model for estimating average horizontal values of pseudo absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [20] ABRAHAMSON N A, YOUNGS R R. A stable algorithm for regression analysis using the random effects model[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(1): 505–510.
- [21] MASSEY F J. The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit[J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(1): 68–78.
- [22] ATIK L A, ABRAHAMSON N, BOMMER J, et al. The variability of ground-motion prediction models and its components[J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(5): 794–801.