

云南景谷 $M_S6.6$ 地震地震动特征分析^①

戴嘉伟, 冀 昆, 温瑞智, 任叶飞

(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:2014 年 8 月 3 日云南省鲁甸发生 $M_S6.5$ 地震后, 10 月 7 日云南省内再次发生景谷 $M_S6.6$ 地震。对我国数字强震台网捕获的 39 组主震记录进行处理后, 分析幅值参数、Arias 强度以及持时参数的衰减特征, 发现两次地震触发台站远场记录的地震动参数均显著低于预测方程, 鲁甸地震的近场地震动参数略高于景谷地震; 而鲁甸地震地震动参数衰减快于景谷地震, 这可能与云南东部地区 Q 值低于西部地区的区域差异性特征相关。分析结果可以为研究该区域 6.5 级左右地震动衰减特征提供参考。

关键词: 景谷地震; 衰减特征; 强震动记录

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-0969-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0969

Ground Motion Characteristics of the Jinggu $M_S6.6$ Earthquake in Yunnan

DAI Jia-wei, JI Kun, WEN Rui-zhi, REN Ye-fei

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

Abstract: The Jinggu $M_S6.6$ earthquake that occurred on October 7, 2014 was another shallow earthquake following the Ludian $M_S6.5$ earthquake that occurred on August 3, 2014 in Yunnan. During the main shock, 39 recordings were obtained by the National Strong Motion Observation Network System of China. Within an area above intensity VI, only five stations were triggered by the earthquake. In this study, we calculated the peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) from these recordings. The PGA and spectral acceleration of site 053JYP, which captured the maximum PGA (543 gal), were significantly higher than the design specifications of a local area. A field survey around this station confirmed that structures were seriously damaged during the main shock. The site and topography effects may be explained by significant differences between the PGAs of sites 053JYZ and 053JGX. We then compared the attenuation characteristics of the PGA, PGV, spectral acceleration, Arias intensity, and significant duration of the Jinggu and Ludian earthquakes. In a near-field area, all observed values of these earthquakes were significantly higher than predicted values but were lower than those predicted in far-field areas. Except for the significant duration, all strong motion parameters from the Ludian earthquake were slightly higher than those of the Jinggu earthquake. We also found most far-field observed values to be lower than those predicted for these two earthquakes. The difference in Q

① 收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 公益性地震行业科研专项(201508005)、国家科技支撑计划课题(2014BAK03B01)

作者简介: 戴嘉伟(1991-), 男, 硕士生, 主要从事工程地震研究。E-mail: 00daijiawei@163.com。

通信作者: 温瑞智(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事工程地震强震动观测。E-mail: ruizhi@iem.ac.cn。

values in different regions of Yunnan may be the main reason for this phenomenon.

Key words: Jinggu earthquake; attenuation characteristics; strong motion records

0 引言

2014年8月3日云南省鲁甸 $M_s6.5$ 地震发生仅仅2个月后,10月7日21时49分在云南省普洱市景谷傣族彝族自治县再次发生破坏性地震。据中国地震台网正式测定,震中位于永平镇($23.4^\circ N$, $100.5^\circ E$),震级 $M_s6.6$,震源深度5 km。这是我国西南地区继 $M_s7.0$ 芦山地震、 $M_s6.5$ 鲁甸地震之后又一次造成较大损失的破坏性浅源地震^[1-2]。相比鲁甸地震,具有震源浅、震级高等特点,地震造成1人死亡、324人受伤、6 988间房屋倒塌,景谷县、思茅区、镇沅县、临翔区和双江县5个县区12.46万人受灾。

截止2014年10月8日,共获得3分量自由场地记录39组,其中震中附近的景谷永平台站(053JYP)获得峰值加速度超过500 gal($1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$)的强震记录。本文对主震的强震记录进行处理后分析近场数个台站的幅值特征;对比景谷地震和鲁甸地震捕获的强震记录,从不同角度研究地震动参数的衰减特征。

1 强震动记录

地震发生后,中国地震局现场工作队依据《地震现场工作:调查规范》(GB/T 18208.3-2011)^[3]、《中国地震烈度表》(GB/T 17742-2008)^[4],通过灾区震害调查、强震动观测记录分析等工作,确定了此次地震的宏观烈度分布。此次地震的最高烈度为Ⅷ度,等震线长轴方向总体呈NW向,Ⅵ度区及以上总面积约11 930 km^2 。Ⅷ度区主要涉及普洱市景谷县永平镇、威远镇、益智乡、碧安乡共4个乡镇,面积约400 km^2 ;Ⅶ度区主要涉及7个乡镇,面积约1 750 km^2 ;Ⅵ度区面积约9 780 km^2 。地震烈度等震线及震中距200 km以内触发的强震台站分布如图1所示。

从图中可见,近场台站分布相对较为稀疏,Ⅵ度区内仅触发5个台站。

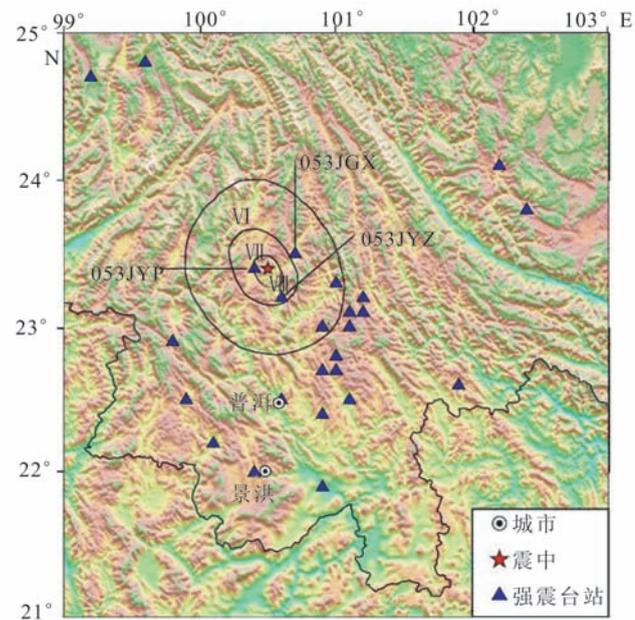


图1 景谷地震震中距200 km内强震台站分布
Fig.1 Distribution of strong motion stations within 200 km from the epicenter of Jinggu earthquake

对Ⅵ度区内台站捕获的强震记录进行基线校正和滤波处理($0.1 \sim 25 \text{ Hz}$)^[5]后,分别计算三分量的最大峰值加速度(PGA)和最大峰值速度(PGV),结果如表1所示。景谷地震共有两个台站捕获 PGA 超过100 gal的强震记录,分别是053JYP(景谷永平台)和053JYZ(益智台),最大水平向 PGA 为543 gal和137 gal。图2、图3分别给出了053JYP台和053JYZ台的加速度和速度时程曲线。值得注意的是,与053JYZ台震中距相仿的053JGX景谷台的 PGA 水平不足20 gal,显著低于053JYZ台。

表1 Ⅵ度区内强震动记录相关参数

Table1 Parameters of strong motion recordings within intensity Ⅵ regions		场地	震中距 /km	$PGA/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$			$PGV/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
名称	代码			EW	NS	UD	EW	NS	UD
景谷永平	053JYP	土层	10.2	491	543	-346	-32	-27	10
景谷	053JGX	基岩	23.3	-16	19	11	-1	-3	2
益智	053JYZ	土层	24.4	-137	129	-75	-7	6	3
正兴	053JZX	土层	52.2	79	91	36	-2	-3	-1
德化	053PDH	土层	60.3	22	18	-13	-2	-2	1

求出053JYP台和053JYZ台强震记录在阻尼

比5%下水平向加速度反应谱,与所在地区设计反

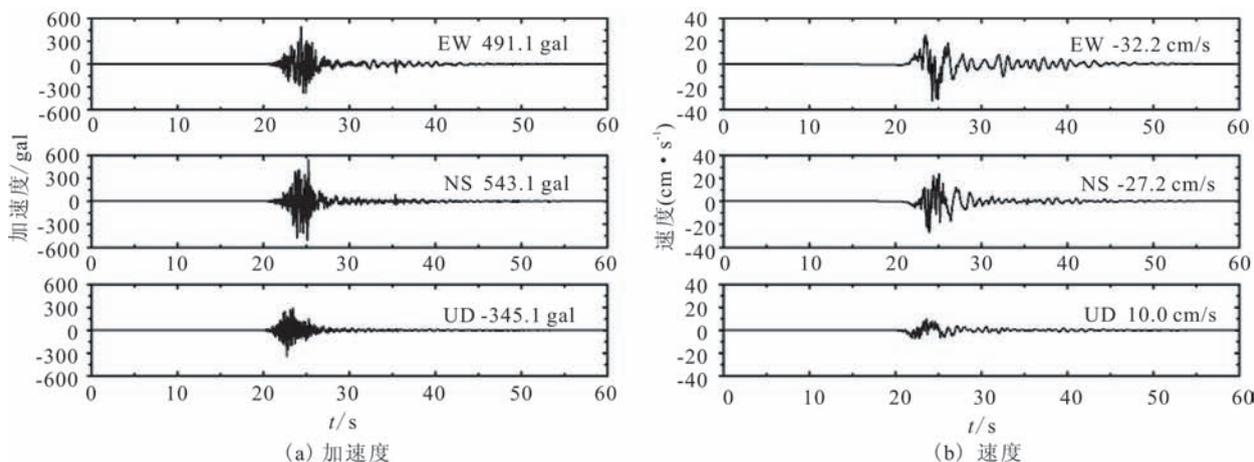


图 2 053JYP 加速度与速度时程曲线

Fig.2 Acceleration and velocity time histories for 053JYP

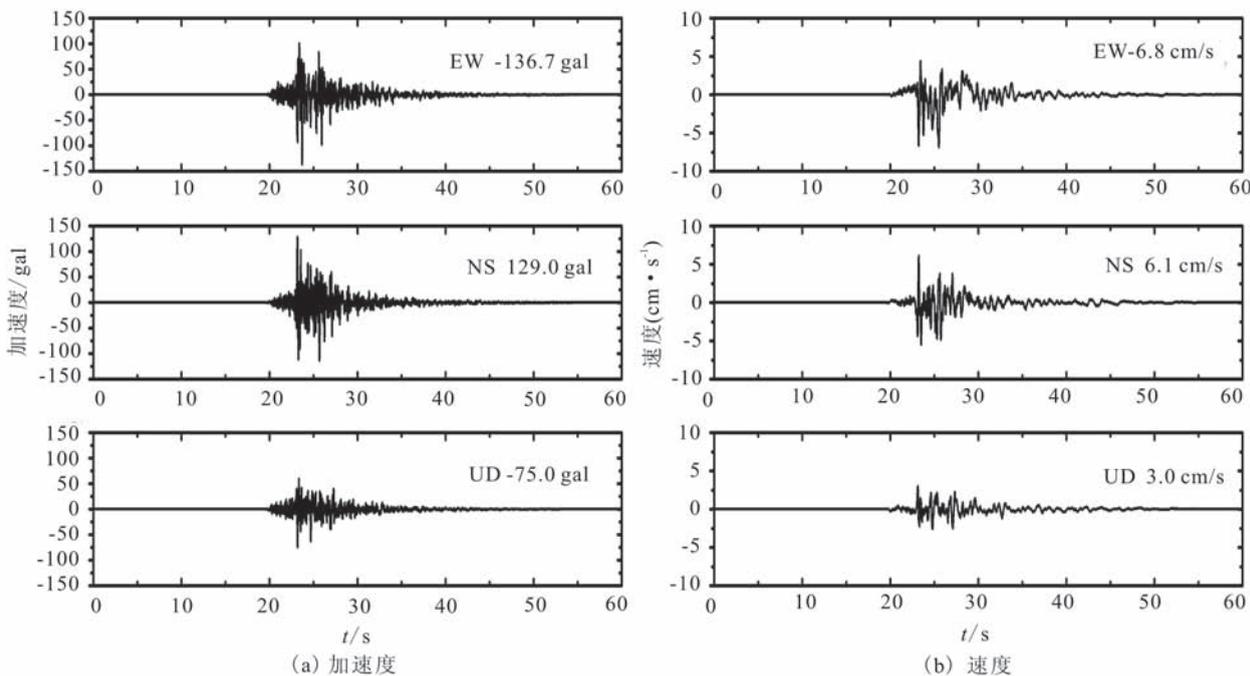


图 3 053JYZ 加速度与速度时程曲线

Fig.3 Acceleration and velocity time histories for 053JYZ

应谱进行对比,结果如图 4 所示。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[6] 规定,该地区抗震设防烈度均为Ⅶ度,设计基本地震加速度值都为 $0.15g$,设计地震分组同为第三组,场地类型为Ⅱ类。053JYP 台的 PGA 为设计基本地震加速度的 3 倍以上,且远超出该地区罕遇地震下的设计要求 (310 gal)。反应谱卓越周期约在 0.25 s 左右,在周期小于 0.6 s 的范围内,明显高于该地区罕遇地震设防标准下的设计反应谱。通过景谷地震主震发生数日后笔者对Ⅵ度区几个台站的实地考察,发现 053JYP

台位于景谷县第二中学内,海拔 $1\ 060 \text{ m}$ 。图 5 和图 6 给出了 053JYP 台站附近建筑物的破坏情况。图 5 中教学楼的女儿墙全部脱落,图 6 中结构墙体出现“X”型贯通裂缝,房屋受损严重,无法继续使用。053JYZ 台记录的反应谱值在整个周期段内均明显低于设计谱,台站周围建筑物受地震影响较小,震害相对较轻。

与 053JYZ 台震中距相仿的 053JGX 台,水平向 PGA 不足 20 gal 。经过现场实地考察,053JGX 台站场地属于基岩场地,而 053JYZ 台所在场地为相

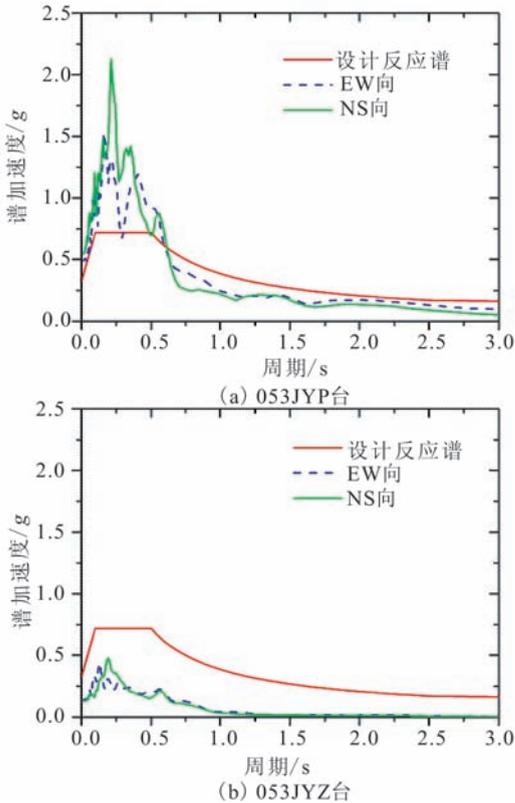


图4 053JYP台和053JYZ台水平向5%阻尼比加速度反应谱与设计反应谱对比

Fig.4 Comparison of horizontal 5% damping-ratio spectral acceleration among 053JYP, 053JYZ, and code spectrum



图5 建筑物女儿墙脱落

Fig.5 Falling-down of the building's parapet

对较软的土层。另外,053JYZ台处于一个阶梯形地貌的平台段,后方为一近乎垂直的陡坎,下前方为一平坦的空地,这种特殊的陡坎地形对该台站的地震动也有一定的放大作用。上述问题在历次地震中均有体现,如我国2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震中,温瑞智等^[7]认为宝兴地办台站捕获超过 $1g$ 的强震记录也是因为类似的特殊地形导致。在2013年7月22日岷县漳县 $M_s6.6$ 地震中,王爱国等^[8]认为,研究区黄土及山坡的双重放大效应造成了极



图6 教学楼内墙体X型裂缝

Fig.6 X-shaped wall cracks of the teaching building

震区水平峰值加速度达 $0.52g \sim 0.55g$ 。因此可以初步认为土层场地放大以及地形效应是造成053JYZ台与053JGX台的PGA水平相差约5倍的主要原因。

2 与鲁甸地震动特征对比

2.1 地震动衰减关系

景谷地震与之前数月发生的 $M_s6.5$ 鲁甸地震不仅具有相近的面波震级,且破裂形式均以走滑为主,下文针对这两次地震中不同参数的衰减特征进行对比。首先分析峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)以及不同周期的加速度反应谱值(S_a)参数的衰减特征。

为保证结果的可靠性,选取不同学者提出的多组衰减关系作为参考。PGA衰减关系共4组^[9-13]:俞言祥和汪素云的中国西部地区、雷建设等的中国西南地区、第五代区划图中的中强地震区及霍俊荣的中国西南地区。PGV衰减关系共2组^[11-12]:第五代区划图中的中强地震区、霍俊荣的中国西南地区。 S_a (加速度反应谱值)的衰减关系共3组^[9-10,12]:俞言祥和汪素云的中国西部地区、雷建成等的中国西南地区及霍俊荣的中国西南地区。

结合这两次地震的台站分布情况,同时考虑到上述衰减关系的距离适用范围,以震中距200 km内的台站为研究对象,衰减关系震级统一取值为 $M_s6.6$ 。首先将两次地震的水平向平均PGA与PGV与上述衰减关系的预测值进行对比,结果如图7所示。整体上来看,除近场个别台站外,景谷地震与鲁甸地震中各台站的观测值均不同程度低于预测值,印证了这两次地震破坏集中于近场,远场震害相对较轻的特点。值得注意的是,在100 km以内的数个近场台站,鲁甸地震的PGA、PGV水平均要高于景谷地震,但在震中距100 km以外,鲁甸地震触

发的绝大多数台站的地震动强度反而要低于景谷地震。

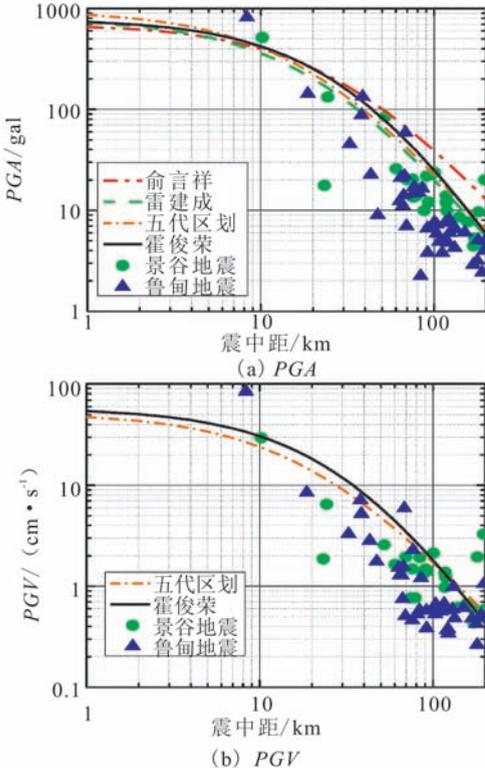


图 7 水平向 PGA 与 PGV 衰减特征

Fig.7 Attenuation of the horizontal PGA and PGV

以 0.5 s、1.0 s 及 2.0 s 为代表值,研究不同周期点谱加速度 S_a 与理论模型的计算结果的差异,如图 8 所示。整体上各周期点均表现出了与上文 PGA、PGV 相似的低于预测值的趋势。这种趋势随着周期变长变得更为明显,在周期 1.0 s 后,尤其在 2.0 s 处两次地震的观测值均已经显著低于各衰减关系的预测值。

苏有锦等^[14]认为云南地区的 Q 值(介质品质因子)具有区域性差异特征,云南西部地区 Q 值相对较高,东部地区相对较低,滇中地区最低,滇西北地区次之。而且云南地区 Q 值的这种区域差异性与该区构造活动、地震活动、地壳速度结构及热活动状态的区域差异性有较好的一致性,活动强烈、高热活动、低速区为相对低 Q 值区,地震波衰减较快。景谷和鲁甸分别位于云南的西部地区和东部地区,从图 7 和图 8 的 PGA、PGV 及 S_a 的衰减关系可以看出,当震中距大于 50 km 时,鲁甸地震触发台站的地震动参数明显低于景谷地震,说明鲁甸地震的地震动参数衰减要快于景谷地震,可能与鲁甸地区 Q 值相对较低的特性有关。

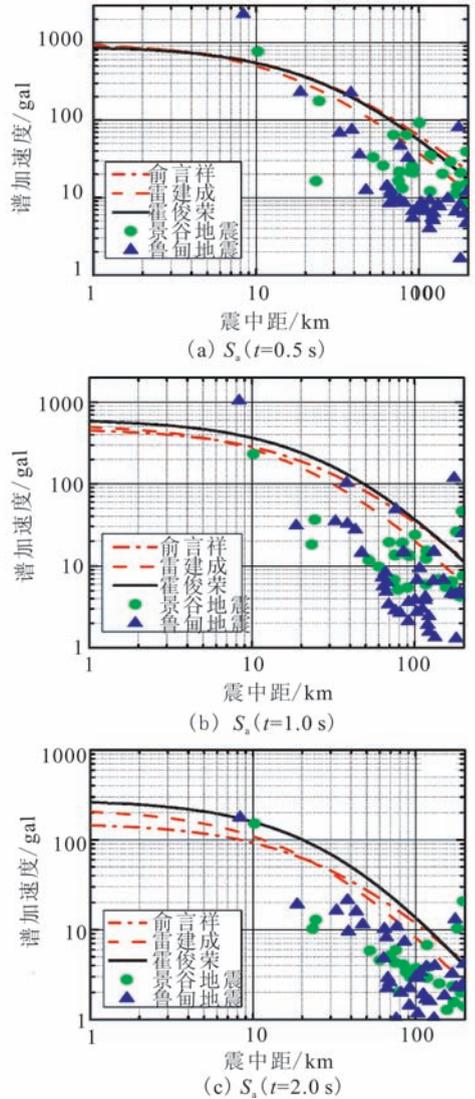


图 8 谱加速度 S_a 的衰减特征

Fig.8 Attenuation of the spectral acceleration

2.2 Arias 强度和显著持时衰减特征

除上述与地震动幅值直接相关的强度指标外,表征地震动能量的参数在震害分析中的作用也日益得到重视。阿里亚斯(Arias)强度由 Arias 等^[15]于 1970 年提出,主要为了表征地震动输入在单自由度体系中的能量,一般用于仪器烈度计算或者结构震害分析,定义为

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt \quad (1)$$

其中: g 代表重力加速度; T_d 代表地震动的持续时间; $a(t)$ 代表加速度时程。

计算上述台站水平向 Arias 强度的平均值,以 Travararou 等^[16]统计的 B 类场地下 Arias 强度衰减关系作为参考,两次地震的对比结果如图 9 所示。

与理论模型相比,除近场区域部分台站高于预测值外,其余均低于预测值,鲁甸地震在远场区域更是低于1倍标准差之外,这与两次地震震害均集中于近场小范围区域内的实际调查结果是一致的。为了使结果具有可比性,选取两次地震中震中距接近、场地情况类似的两组近场台站进行对比。053JYP台和与鲁甸地震中的龙头山台站(053LLT台)均位于震中距约10 km处,其Arias强度分别为171.73 cm/s和619.54 cm/s,相差五倍之多。笔者在两次地震后对其进行现场调查发现:053LLT台站所在的龙头山镇房屋损毁严重,房屋局部倒塌现象普遍,基本无法修复,区域宏观烈度为IX度;而053JYP台站所处区域虽然破坏也较严重,但房屋倒塌现象较少,大部分房屋修理后可以继续使用,区域宏观烈度为VIII度。类似的情况还有震中距20 km附近的053JYZ台与053QQC台(鲁甸地震),Arias强度分别为11.66 cm/s和26.38 cm/s,相差一倍多。遗憾的是,两次地震尤其是景谷地震近场触发台站数量过少,无法做进一步对比验证。

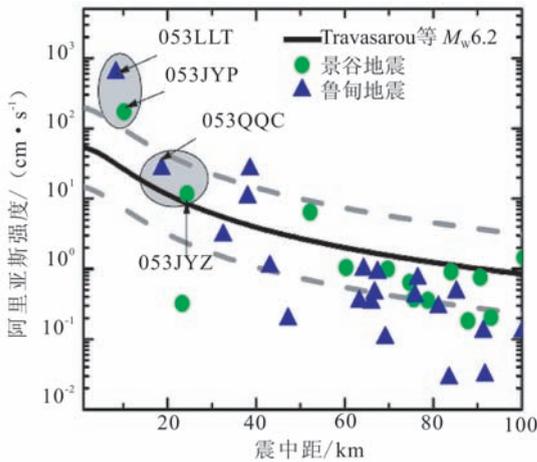


图9 阿里亚斯强度的衰减特征

Fig.9 Attenuation of the Arias intensity

以广泛被接受的显著持时(5%~95%)^[17]作为持时指标,将理论衰减关系计算结果与观测值进行对比。选用Kempton等^[18]统计的持时衰减关系作为参考,震级取 $M_w 6.2$,对比结果如图10所示。两次地震的显著持时参数随震中距的变化趋势与理论模型基本一致,但景谷地震整体要略低于鲁甸地震,远场区域的差异更为明显。

3 结论

本文对景谷地震中我国数字强震动观测台网获得的主震强震动记录进行处理后,针对近场典型台

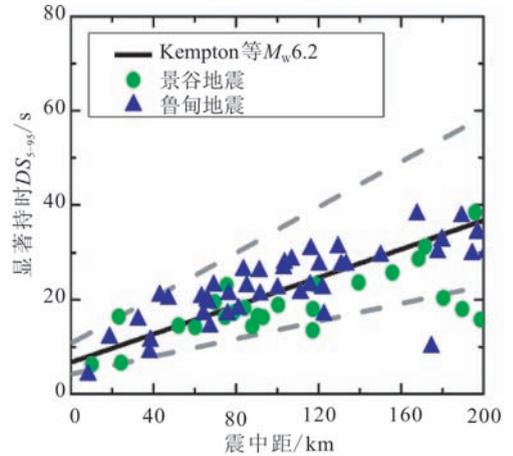


图10 显著持时的衰减特征

Fig.10 Attenuation of the significant duration

站记录的幅值和频谱特性加以分析,进而对不同地震动参数在鲁甸地震与景谷地震中的衰减特征进行对比研究。主要结论如下:

(1) 景谷地震中捕获最大加速度记录的053JYP台,不仅强震幅值超过了该地区设防要求,加速度反应谱在0~0.6 s段也超过了设计反应谱,与实际震害调查结果基本一致。

(2) 053JYZ、053JGX台震中距相差不大,但强震记录的PGA(加速度峰值)却相差数倍,经过现场调查,初步认为场地土层放大以及053JYZ的陡坎地形效应是造成差异的两个主要原因。

(3) 对比地震动参数在鲁甸地震和景谷地震的衰减特征发现:在近场区域,虽然两次地震触发台站数量均不多,但幅值参数(PGA、PGV、 S_0)以及Arias强度均高于理论模型;而远场触发台站的地震动参数却均显著低于预测值。其次,鲁甸地震的地震动参数衰减要快于景谷地震,可能与云南东部地区Q值低于西部地区的区域差异性特征相关。

值得一提的是,景谷地震震中所处区域和鲁甸地震相比,具有房屋结构整体较好、人口密度低、植被覆盖好的特点,震后也没有发生严重的诱发地质灾害,这些原因也是景谷地震人员伤亡和经济损失相对较小的原因之一。

致谢:国家强震动台网中心、云南省地震局提供了强震动观测数据。

参考文献(References)

[1] 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 Rui-zhi, REN Ye-fei, HUANG Xu-tao, Strong Motion

- Records and Their Engineering Damage Implications for Lushan Earthquake on April 20, 2013 [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(4): 1-14. (in Chinese)
- [2] 冀昆,温瑞智,崔建文,等.鲁甸 $M_s6.5$ 级地震强震动记录及震害分析[J].震灾防御技术,2014,9(3):325-339.
JI Kun, WEN Rui-zhi, CUI Jian-wen, et al. Observation of Strong Motion and Damage Investigation for $M_s6.5$ Ludian Earthquake[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2014, 9(3): 325-339. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 18208.3-2011,地震现场工作第 3 部分:调查规范[S].北京:中国标准出版社,2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 18208.3-2011. Post-earthquake Field Works-Part 3: Code for Field Survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 17742-2008,中国地震烈度表[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 17742-2008. The Chinese Seismic Intensity Scale[S]. Beijing: China Standards Press, 2008. (in Chinese)
- [5] Boore D. 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): 1199-1211.
- [6] 中华人民共和国城乡建设部.GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 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 Rui-zhi, REN Ye-fei, QI Wen-hao, et al. Maximum Acceleration Recording from Lushan Earthquake on April 20, 2013 [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(5): 783-791. (in Chinese)
- [8] 王爱国,刘方斌.岷县漳县 6.6 级地震极震区峰值加速度估算[J].地震工程学报,2013,35(3):483-488.
WANG Ai-guo, LIU Fang-bin. Estimation of Peak Ground Acceleration in Magistoseismic Area of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 483-488. (in Chinese)
- [9] 俞言祥,王素云.中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J].震灾防御技术,2006,1(3):206-207.
YU Yan-xiang, WANG Su-yun. Attenuation Relations for Horizontal Peak Ground Acceleration and Response Spectrum in Eastern and Western China [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(3): 206-217. (in Chinese)
- [10] 雷建成,高孟潭,俞言祥.四川及邻区地震动衰减关系[J].地震学报,2007,29(5):500-511.
LEI Jian-cheng, GAO Meng-tan, YU Yan-xiang. Seismic Motion Attenuation Relations in Sichuan and Adjacent Areas [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(5): 500-511. (in Chinese)
- [11] 俞言祥,李山有,肖亮,等.为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J].震灾防御技术,2013,8(1):24-33.
YU Yan-xiang, LI Shan-you, XIAO Liang, et al. Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic Hazard Map of China [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2013, 8(1): 24-33. (in Chinese)
- [12] 霍俊荣.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,1989.
HUO Jun-rong. Study on the Attenuation Laws of Strong Earthquake Ground Motion Near the Source [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 1989. (in Chinese)
- [13] 黄旭涛,温瑞智,任叶飞,等.2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震强震记录及特征分析[J].地震工程学报,2013,35(3):489-496.
HUANG Xu-tao, WEN Rui-zhi, REN Ye-fei, et al. Strong Motion Records and Its Characteristics in Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake on July 22, 2013 [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 489-496. (in Chinese)
- [14] 苏有锦,刘杰,郑斯华,等.云南地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究[J].地震学报,2006,28(2):206-212.
SU You-jin, LIU Jie, ZHENG Si-hua, et al. Q Value of Anelastic S-wave Attenuation in Yunnan Region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(2): 206-212. (in Chinese)
- [15] Arias A. A Measure of Earthquake Intensity, in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*[M]. Cambridge Massachusetts: MIT Press, 1970: 438-483.
- [16] Thaleia Travarasou, Jonathan D Bray, Norman A Abrahamson. Empirical Attenuation Relationship for Arias Intensity [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32(7): 1133-1155.
- [17] Trifunac M D, Brady A G. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1975, 65(3): 851-626.
- [18] Justin J Kempton, Jonathan P Stewart. Prediction Equations for Significant Duration of Earthquake Ground Motions Considering Site and Near-source Effects [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(4): 985-1013.