

江鹏,李萍萍,李同林,等. 2023. 2022年四川泸定  $M_s$  6.8 地震强震动记录特征[J]. 地震研究, 46(4): 593–602, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0057.

Jiang P, Li P P, Li T L, et al. 2023. The characteristics of strong motion records of the 2022 Luding, Sichuan  $M_s$  6.8 earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4): 593–602, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0057.

## 2022年四川泸定 $M_s$ 6.8 地震强震动记录特征\*

江 鹏<sup>1</sup>, 李萍萍<sup>1</sup>, 李同林<sup>1</sup>, 曾 均<sup>1</sup>, 王 竞<sup>1</sup>, 苏金蓉<sup>1♣</sup>, 温瑞智<sup>2</sup>

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 对地震监测台网获取的2022年四川泸定  $M_s$  6.8 地震的1 799组强震动记录进行处理后计算地震动参数, 利用克里金插值方法得到峰值加速度  $PGA$ 、峰值速度  $PGV$  和加速度反应谱的空间分布图。结果表明: 基准站、基本站和一般站记录到的地震动峰值依次增大, 反映出局部地形和场地条件对地震动的放大作用。高烈度区仪器地震烈度和调查地震烈度较为一致, VI度以下区域仪器地震烈度和调查地震烈度等值线方向差异较大, 反映出在震害不显著情况下两种烈度的对应关系不太理想。初步震相分析发现, 近断层台站垂直方向峰值较大, 多个台站记录到水平向速度大脉冲现象。基于基岩地震动峰值统计了本次地震的衰减特性,  $PGV$  随距离衰减相比中国地震动参数区划图更慢, 综合震相特征认为本次地震更符合浅源地震的特点。为进一步分析地震动与震害的关系, 选取了2个震害较为严重乡镇的强震动记录计算5%阻尼比的拟加速度反应谱, 在设计地震反应谱特征周期  $T_g$  取值到1.5 s之间, 台站记录反应谱值远超出设计地震反应谱, 在部分周期区间还超出了罕遇地震设计反应谱值, 体现出反应谱与震害较好的相关性。

**关键词:** 泸定地震; 强震动记录; 反应谱; 衰减关系

**中图分类号:** P315.914

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2023)04-0593-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0057

## 0 引言

强震动观测记录是开展震害快速评估及地震动特性、震源机制、地震动衰减规律、结构地震破坏机理等研究最直接、最重要的基础资料。研究地震的震源机制、地震波的传播路径、局部场地条件等对地震动的影响, 可以为地震动参数区划图和行业抗震设计规范的编制与修订提供依据(温瑞智, 2016)。利用实时或近实时强震台站实测的地震动记录进行地震动强度(烈度)速报, 可以为地震应急和救灾提供基础依据(李山有等, 2002)。基于强震动记录的分区特性, 研究地震预警参数与震级线性关系的区域差异性有较强的适

用性(宋晋东等, 2017)。国家地震烈度速报与预警工程建设以前, 中国大陆强震动观测台站密度较低, 可用于工程地震的强震动记录很少, 尤其缺乏近断层强震动记录, 场地分类、衰减关系建立等方面的研究主要依托其它地区强震动记录, 通过转换方法结合少量本地记录进行使用(俞言祥, 汪素云, 2006; 雷建成等, 2007)。2013年四川芦山  $M_s$  7.0 地震后, 我国学者利用获取的强震动记录开展了数据处理、场地分类、方向性效应等方面的研究(温瑞智等, 2013; 任叶飞等, 2014)。2015年开始, 中国地震局在川滇交界区域部署基于MEMS传感器的烈度仪台站, 开展地震技术试验和验证。张红才等(2017)在时域和频域上对烈度仪与强震仪记录进行分析, 在1~10 Hz

\* 收稿日期: 2022-01-15.

基金项目: 四川省地震局科技专项(LY2303); 科技部重点研发专题项目(2018YFC1504003-04)。

第一作者简介: 江 鹏(1987-), 高级工程师, 主要从事地震监测和工程地震研究. E-mail: jiangpeng@scdzj.gov.cn.

♣ 通讯作者简介: 苏金蓉(1971-), 正研级高级工程师, 主要从事地震监测预警研究. E-mail: sujr0816@163.com.

频段,烈度仪获取的记录与强震仪有较好的一致性,但在低频段有一定的差异。2019 年以后,四川省获取了数量可观的密集台网强震动记录,其中 2020 年四川北川  $M_s4.7$  地震获得有效记录 532 组(江鹏等,2021),2021 年四川泸县  $M_s6.0$  地震获得有效记录 1 320 组(李萍萍等,2022),2022 年四川芦山  $M_s6.1$  地震获得有效记录 1 583 组。这些密集台站记录的获取,尤其是震中距 10 km 内记录的获取,极大提升了强震动记录的空间分辨率,对于开展震源特性、区域衰减特性以及地下结构等相关研究有重要意义(温瑞智,王宏伟,2020)。

2022 年泸定  $M_s6.8$  地震发生后,四川地震监测台网获取了丰富的地震动速度和加速度记录,计算产出了峰值加速度( $PGA$ )、峰值速度( $PGV$ )、仪器烈度等地震动参数,用于现场地震烈度调查和地震灾害损失的初步评定。本文对 2022 年泸定  $M_s6.8$  地震获取的强震动记录进行处理,并初步开展地震动空间分布、区域衰减特性和场地影响方面的研究,结合 2 个震害较重乡镇的观测记录,分析了震害与加速度反应谱的相关性。针对基准站、基本站和一般站观测条件的较大差异,简要分析三类台站获取记录的差异,以期分析强地面运动特征和区域构造特征等研究提供参考。

1 地震台网和观测记录

依托“数字观测台网”等项目,四川建成了 224 个基于自由场地表观测的强震动台站,主要分布于鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、龙门山断裂带及周边地区,安装有 SJL100 和 ES-T 两种力平衡式加速度计,采用阈值触发模式存储和传输数据,获取采样率为 200 sps 的高质量加速度记录。随着国家和省级地震烈度速报与预警工程的实施,四川建成了 269 个基准站、317 个基本站和 1 083 个一般站,大致均匀分布于全省,观测数据采样率为 100 sps。基准站布设在基岩场地,同时观测速度和加速度,安装(甚)宽频带地震计和力平衡式加速度计两种传感器,仪器观测墩建设于基岩面上。基本站参照强震动台站建设标准,以自由场土层地表观测为主,台站分布

表 1 四川地震预警台网安装的传感器和数据采集  
主要技术指标

Tab. 1 The sensors and their main technical indicators in the  
Sichuan Earthquake Early Warning Network

仪器	技术指标	指标内容
宽 频 带 地 震 计	技术架构	力平衡速度传感器
	观测分量	EW、NS、UD 三向正交
	灵敏度	2 000 V·s/m, 误差≤3%
	满量程	±20 V
	线性度误差	≤0.1%
	幅频特性	60 s~40 Hz
	动态范围	大于 140 dB (10 Hz)
力 平 衡 加 速 度 计	最低寄生共振频率	≥80 Hz
	技术架构	力平衡加速度传感器
	观测分量	EW、NS、UD 三向正交
	灵敏度	2.5 V/gn 或 1.25 V/gn, 误差≤3%
	满量程	±2.0 gn 或 ±4.0 gn
	线性度误差	≤1%
	频率响应	0~80 Hz, 相位为线性
数 据 采 集 器	动态范围	大于 140 dB (0.01 Hz 以上)
	噪声	<10 <sup>-6</sup> gn (均方根值)
	信号输入方式	双端平衡差分输入
	分辨力	≥24 bit
	量程	满量程±20 V; 多档位程控可调
	动态范围	不低于 135 dB@50 sps/ch
	输入电阻	单端 100 KΩ, 双端 200 KΩ
烈 度 仪	零输入噪声	<4 μV (±20 V 量程, 24 bitADC)
	采样率	1、10、20、50、100、200、500 sps
	频带宽度	0~0.4、4、10、20、40、80 Hz
	数字滤波器	FIR 数字滤波器, 可选线性相移和最小相移滤波器
	校时方式	GNSS 授时, 时钟守时精度≤1 ppm NTP 网络授时
	技术架构	MEMS 加速度传感器
	观测分量	EW、NS、UD 三向正交
宽 频 带 地 震 计	加速度测量范围	±2.0 gn, 垂直向-1~3 gn
	加速度测量误差	<5% (0.1~20 Hz)
	动态范围	≥80 dB
	采样率	50、100、200 sps
	滤波器	FIR 数字滤波器, 可选线性相移和最小相移滤波器
烈 度 仪	校时方式	NTP 网络授时

在乡镇政府、中小学校等人口密集区域, 安装力平衡式加速度计传感器, 仪器观测墩通过钢筋与场地土紧密连接。一般站以服务于地震预警和地震烈度速报为目标, 建在通信铁塔站点的机房内, 安装 MEMS 传感器烈度仪, 烈度仪安装在水泥地面或固定在不高于地面 30 cm 的墙体上 (江鹏等, 2021)。由于通信铁塔一般建在空旷区域的居高点上, 一般站多数位于山坡和山顶上, 观测数据受到一定程度的地形影响。

泸定  $M_s6.8$  地震发生在巴颜喀拉地块东缘区域, 震中位于鲜水河断裂带南东段磨西断裂附近。鲜水河断裂带是青藏高原东部的一条大型左旋走滑断裂, 南与安宁河断裂在康定一带相接, 北与甘孜—玉树断裂相接, 是我国动力作用环境和地壳运动变形最强烈的断裂带之一, 历史上具有较强的地震活动性, 曾发生多次强烈地震。泸定  $M_s6.8$  地震后中小余震频发, 截至 2022 年 10 月 8 日 10 时共记录到余震 5 527 次, 余震整体趋势呈 NW—SE 走向, 中段密集区呈团状分布。初步震源机制解显示此次地震为走滑破裂, 反演显示破裂方向以南东侧为主, 主要破裂长度约 20 ~ 25 km。扣除个别记录错误和受到干扰的数据, 泸定  $M_s6.8$

地震共获取 1 799 组加速度记录, 其中基准站 194 组、基本站 371 组、一般站 1 234 组, 记录数量相比以往中强地震有量级上的提升, 仅震中距 100 km 内就有 128 个台站获得加速度记录, 本次地震获取记录的台站分布情况如图 1 所示。地震造成部分监测台站停电或通信中断, 导致震中附近 6 个台站获取的记录不完整, 另外 T2402、T2404 台站记录到的垂直向数据有误, 本文仅采用这两个台的水平向数据。值得注意的是, 本次地震中还获取了 36 组基本站和一般站同台址观测数据, 经过初步对比分析, 两种仪器记录的加速度时程在幅值和频谱上基本一致。

受观测仪器本身及近断层绝对位移等原因的影响, 观测台网获取的原始地震记录会产生零线偏移的现象。少量台站受到通信和其它干扰等影响, 导致记录存在中断、丢包、失真、信噪比过低等现象。本文对获取的强震动记录采用以下方法进行预处理: ①剔除波形不完整或者波形有明显错误的记录; ②剔除信噪比过低的记录; ③对记录进行格式转换并去除仪器响应; ④多数记录通过减去 P 波前 10 s 无干扰噪声的平均值去除零线偏移, 少量干扰较多的数据通过减去全时程平

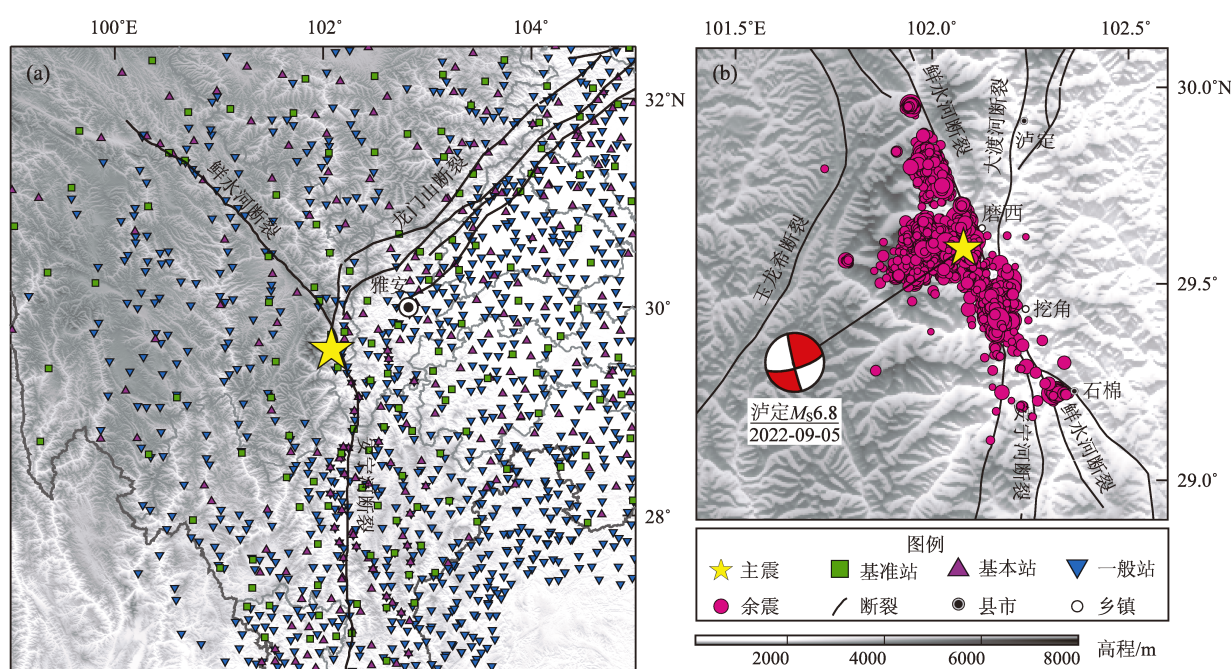


图 1 获取到泸定  $M_s6.8$  地震记录的台站分布 (a) 及泸定  $M_s6.8$  地震余震分布 (b)

Fig. 1 Distribution of the strong-motion stations recording the Luding  $M_s6.8$  earthquake (a) and distribution of the Luding aftershocks (b)

均值的方法去除零线偏移；⑤强震动记录的零线偏移和干扰噪声对加速度积分过程有较大影响，在仿真速度和频谱分析前进行4阶巴特沃斯高、低通滤波处理（Boore，2005；金星等，2004），参考仪器烈度计算标准，滤波范围选择为0.1~10 Hz；⑥仿真加速度、速度和位移；⑦计算PGA、PGV、仪器烈度等参数。表2列出了震中距50 km范围内的强震动记录及其参数。

表 2 震中距 50 km 范围内强震动记录及相关参数

Tab. 2 Seismic records and relate parameters within the range of 50 kilometers from the epicenter

台站代码	震中距/km	PGA/(cm·s <sup>-2</sup> )			PGV/(cm·s <sup>-1</sup> )			仪器烈度
		EW	NS	UD	EW	NS	UD	
SC. V2411	2.1	-351.20	-639.34	-561.44	21.93	-31.96	-15.83	8.5
SC. V2204	6.9	-449.72	-325.27	-404.25	67.64	-26.69	-43.76	9.4
SC. V2201	10.4	279.63	-396.77	-179.71	21.24	37.24	14.11	8.5
SC. V2271	11.7	348.89	519.57	-479.51	59.07	-131.76	59.68	10.1
SC. XXXJ	16.0	-217.63	185.04	-174.79	24.50	-6.58	-7.80	8.0
SC. 51LDJ	16.4	110.06	-305.94	161.14	-11.82	40.14	-7.38	8.6
SC. SMCK	19.9	-701.94	619.77	-469.62	19.98	-48.32	-18.30	8.9
SC. T2402	21.6	406.28	328.52	-	-33.37	-34.71	-	8.5
SC. CNXJ	22.4	873.92	1368.53	852.70	16.41	26.53	-18.01	8.2
SC. T2404	23.0	-332.93	379.73	-	-51.11	-56.68	-	9.4
SC. 51SMW	23.7	-367.50	447.52	-579.06	-53.16	-56.05	19.68	9.4
SC. VL002	24.3	-388.97	-416.18	169.97	-29.08	-32.10	-5.99	8.4
SC. 51LDL	26.0	303.86	-199.30	207.74	11.99	-11.14	-6.32	7.2
SC. T2471	28.4	634.05	-482.55	255.37	49.48	32.19	-17.43	9.1
SC. V2203	28.6	-190.07	101.59	-124.57	-21.60	7.95	16.73	8.0
SC. T2307	30.6	-98.90	158.42	41.87	-7.20	9.25	-4.28	6.8
SC. T2371	34.7	84.27	-175.14	-44.41	-5.61	-8.27	3.09	6.6
SC. HYYD	37.6	34.35	-46.57	19.46	-4.11	-7.88	-1.98	6.1
SC. VL001	37.9	101.33	-155.79	-147.60	4.88	-3.97	2.91	6.3
SC. 51LDS	38.4	-62.93	44.92	89.92	3.94	-2.67	-1.65	5.8
SC. 51SMX	39.5	178.25	185.23	167.49	10.57	-8.41	12.38	7.1
SC. T2405	39.5	177.56	-184.63	-169.65	10.72	-12.32	8.65	7.1
SC. TS003	39.5	179.44	-188.10	-167.41	10.62	-12.44	8.62	7.1
SC. T2311	43.8	62.43	-105.76	32.63	4.77	5.33	3.81	6.2
SC. T2408	47.4	-97.05	-109.07	-74.40	-7.78	7.01	-3.54	6.6
SC. TT001	47.8	-109.02	82.64	55.98	-2.06	3.35	1.56	5.9
SC. T2406	47.9	271.67	-380.07	111.06	-9.03	-12.38	4.06	7.1
SC. V0172	48.1	-36.73	30.15	-16.76	-1.91	-1.68	1.00	5.0
SC. 51SMM	48.2	317.00	394.68	116.78	-9.18	-4.24	12.65	7.2
SC. TY001	48.4	-178.13	124.87	28.82	-5.67	6.06	1.48	6.2
SC. SMMML	48.9	-95.74	-164.89	5.75	-4.73	-8.46	0.32	6.7
SC. T2205	50.2	81.83	58.80	34.03	3.31	-4.11	-1.40	6.1



本次地震最大  $PGA$  由 SC. CNXJ 台获取, 因记录的零线发生不规则偏移, 对其进行分段调零后三分向  $PGA$  分别为 873.92、1 368.53、852.70  $\text{cm/s}^2$ ,  $PGV$  分别为 16.41、26.53、-18.01  $\text{cm/s}$ , 计算得到仪器烈度为 8.2。在震相分析中发现, 本次地震强震动记录有 3 个特点: ①垂直方向峰值较大, 多个台站垂直向  $PGA$  超过 0.3 g, 最大达到 0.8 g。②P 波峰值大于 S 波峰值的“大头波”现象较多, 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震中该区域台站同样记录到该现象; ③近场加速度记录的长周期成分非常显著, 多个近断层台站记录到速度大脉冲现象, 如记录到本次地震最大仪器烈度的 SC. V2271 台,  $PGA$  为 519.57  $\text{cm/s}^2$ , 但  $PGV$  达到 -131.76  $\text{cm/s}$ 。

## 2 地震动空间分布

$PGA$ 、 $PGV$  和仪器烈度作为表征地震动特性的重要参数, 由传感器直接记录或计算获得, 其空间分布情况可以客观反映出地震的破坏程度, 为地震烈度评估和灾情快速判断提供重要依据。本文统计了本次地震获取的 1 799 组加速度记录的地震动参数, 计算三分向矢量合成  $PGA$ 、 $PGV$  和仪器烈度, 采用克里金法对台站空区进行插值, 插值精度为  $0.01^\circ$ , 绘制了仪器地震烈度的等值线。

图 2 为本文得到的仪器地震烈度的影响范围和中国地震局发布的调查地震烈度等震线 (四川省地震局, 2022)。从图中可看出, 鲜水河断裂两侧的仪器烈度影响范围相当, 并未表现出明显的滑动盘地震动幅值偏大的现象。Ⅶ度以上区域, 仪器地震烈度与调查地震烈度的长轴方向和面积一致性较好, 仪器地震烈度等值线长轴为 SE 向并沿鲜水河断裂带展布, 在震中 NE 向沿大渡河断裂发生倾斜, 可较好印证断裂带对地震动的空间分布有较强的控制作用。Ⅶ度以下区域, 仪器地震烈度和调查地震烈度的长轴方向和面积差异非常大, 调查地震烈度Ⅵ度区长轴为 NW 向, 仪器地震烈度等值线长轴转变为与断裂带垂直的 NE 向。调查地震烈度主要由技术人员以现场调查的震害严重程度为判定指标, 仪器烈度由传感器直接观测地面运动数据计算得到, 客观反

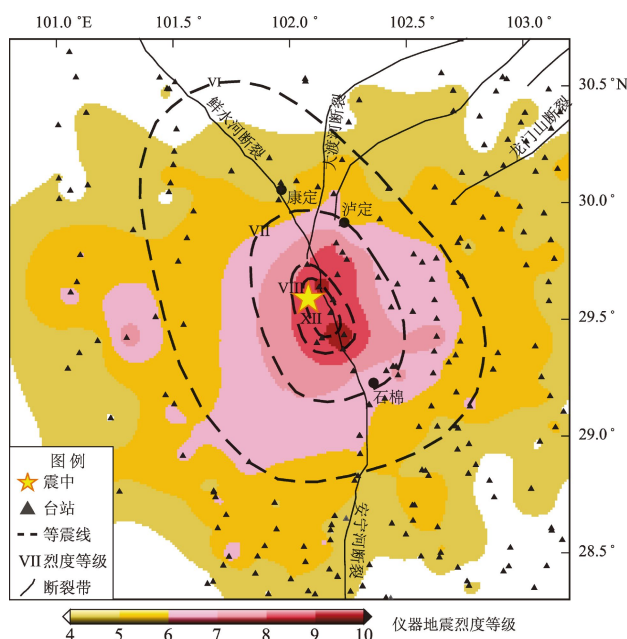


图 2 泸定  $M_s6.8$  地震的仪器地震烈度及调查地震烈度空间分布

Fig. 2 The intensity determined through strong ground-motion instruments and isoseisms determined through field investigation

映的是地震动强弱程度, 不能直接等同震害情况。除地震动强度之外, 地震设防要求、结构体抗震能力、经济发展水平平均会影响震害的严重程度。根据《中国地震烈度表》(GBT 17742—2020) 的评定指标, Ⅵ度区结构震害为少数未设防的土木、砖木、砖混结构轻微破坏, 设防结构绝大多数完好; Ⅴ度区基本不发生破坏。震害现象不显著会增加调查人员判断的难度, 降低评定结果的可靠性。虽然仪器地震烈度和调查地震烈度的含义和确定因素不一样, 但多数情况下两者较为一致。《中国地震烈度表》(GBT 17742—2020) 提出, 具备使用仪器测定地震烈度条件的地区, 宜采用仪器测定的地震烈度。从本次地震两种地震烈度的对比结果看, 还需要进一步研究调查地震烈度与仪器地震烈度的对应关系, 仪器烈度如要代替调查烈度还需建立更可靠的统计模型。

## 3 衰减特性

通过转换方法得到的衰减关系, 会产生一些不确定因素, 更适用于反映区域地震动衰减的一

般特性（胡聿贤，张敏政，1984）。在地震较多的地区采用实际观测记录进行拟合可以获取更合理的区域地震动预测方程（GMPE）（李宏男，陈国兴，2013）。为减少场地项的影响，采用基岩台获取的记录直接拟合水平向峰值加速度和峰值速度基岩地震动衰减关系。本文选取泸定  $M_s6.8$  地震获取的 318 组加速度记录，其中基准站 190 组，震中距为 15 ~ 590 km；一般站 128 组，震中距小于 150 km。《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2015，以下简称“五代图”）提供的模型为：

$$\lg Y = A + BM + Clg(R + De^{EM})$$

(1)

式中： $Y$  为  $PGA$  或  $PGV$ ，取 2 个水平方向记录矢量合成的最大值； $M$  为面波震级； $R$  为震中距； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $E$  为回归系数； $\sigma$  为事件内残差的标准差。本文采用式（1）拟合泸定  $M_s6.8$  地震的  $PGA$  和  $PGV$  衰减关系，回归系数见表 3。

为直观地反映泸定  $M_s6.8$  地震的衰减特性，图 3 给出了 1 799 组加速度记录的水平向合成

$PGA$ 、 $PGV$  随震中距的分布情况，选用五代图中  $M \geq 6.5$  地震的青藏区长轴衰减关系（俞言祥等，2013）作为对比的 GMPE，其适用范围为  $M \geq 6.5$  地震、震中距 200 km 以内。从图 3 可以看出，本文拟合的泸定  $M_s6.8$  地震  $PGA$  衰减关系与五代图 GMPE 一致性较好，震中距 200 km 内基准站和基本站的实测  $PGA$  基本在五代图 GMPE 预测值的 1 倍标准差范围内，一般站实测  $PGA$  普遍比五代图 GMPE 预测值偏大。本文拟合的泸定  $M_s6.8$  地震  $PGV$  衰减关系与五代图 GMPE 区别较大，对其进行分析认为，一是由于近场数据样本点过少，震中距 30 km 范围内仅有 6 组观测数据，拟合的  $PGV$  衰减关系与五代图 GMPE 有较大偏差，没有体现真实的近场饱和和效应；二是震中距 200 km 以上，远场台站实测  $PGV$  比五代图 GMPE 的预测值明显偏大，反映出衰减变慢的特征。

在获取的泸定  $M_s6.8$  地震强震动记录中，有较多近断层记录出现明显的长周期成分，这与近断层记录以高频为主的特点差别较大。本文计算统计各周期拟加速度反应谱（PSA）随震中距的分布情况，并与五代图 GMPE 进行对比分析。从图 4 可以看出，0.3、0.5 和 1 s 的 PSA 出现多个异常偏大的台站点，此周期范围内恰恰是震区主要建筑结构自振周期的主要范围，这与部分乡镇出现较严重震害现象相一致。

表 3  $PGA$  和  $PGV$  衰减关系回归系数

Tab. 3 Regression parameters of the  $PGA$  and the  $PGV$  attenuation relationship

衰减关系	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	$\sigma$
$PGA$	1.045 4	0.808 8	-2.435 3	0.999 8	0.498 5	0.334 4
$PGV$	0.479 0	0.357 2	-1.310 0	0.950 2	0.159 2	0.274 5

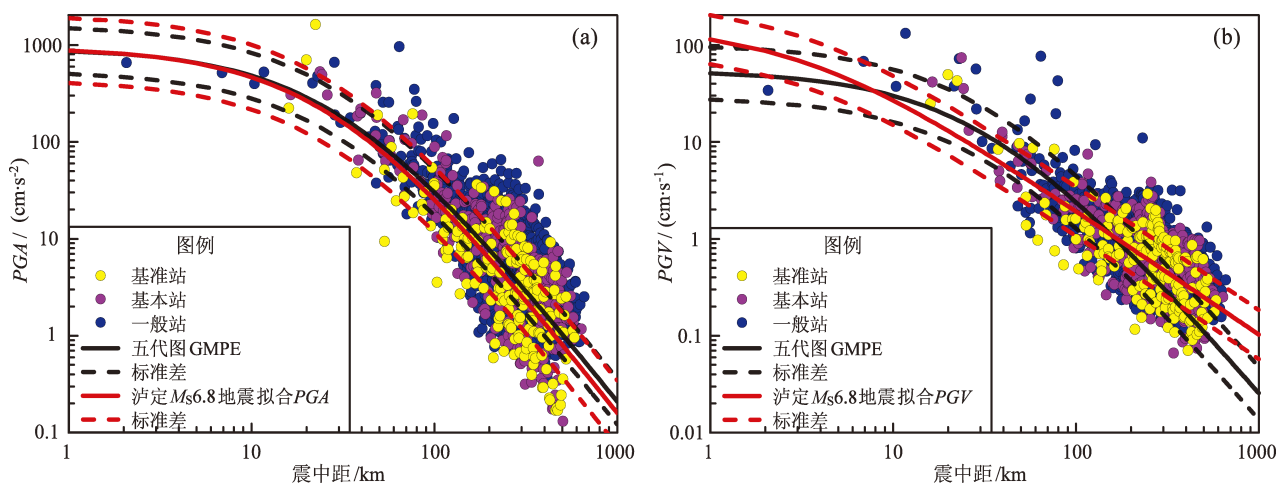


图 3 1 799 组加速度记录的泸定  $M_s6.8$  地震  $PGA$  (a) 和  $PGV$  (b) 随震中距的分布情况

Fig. 3 Attenuation of the  $PGA$  (a) and the  $PGV$  (b) of 1 799 pieces of acceleration records along with epicentral distance

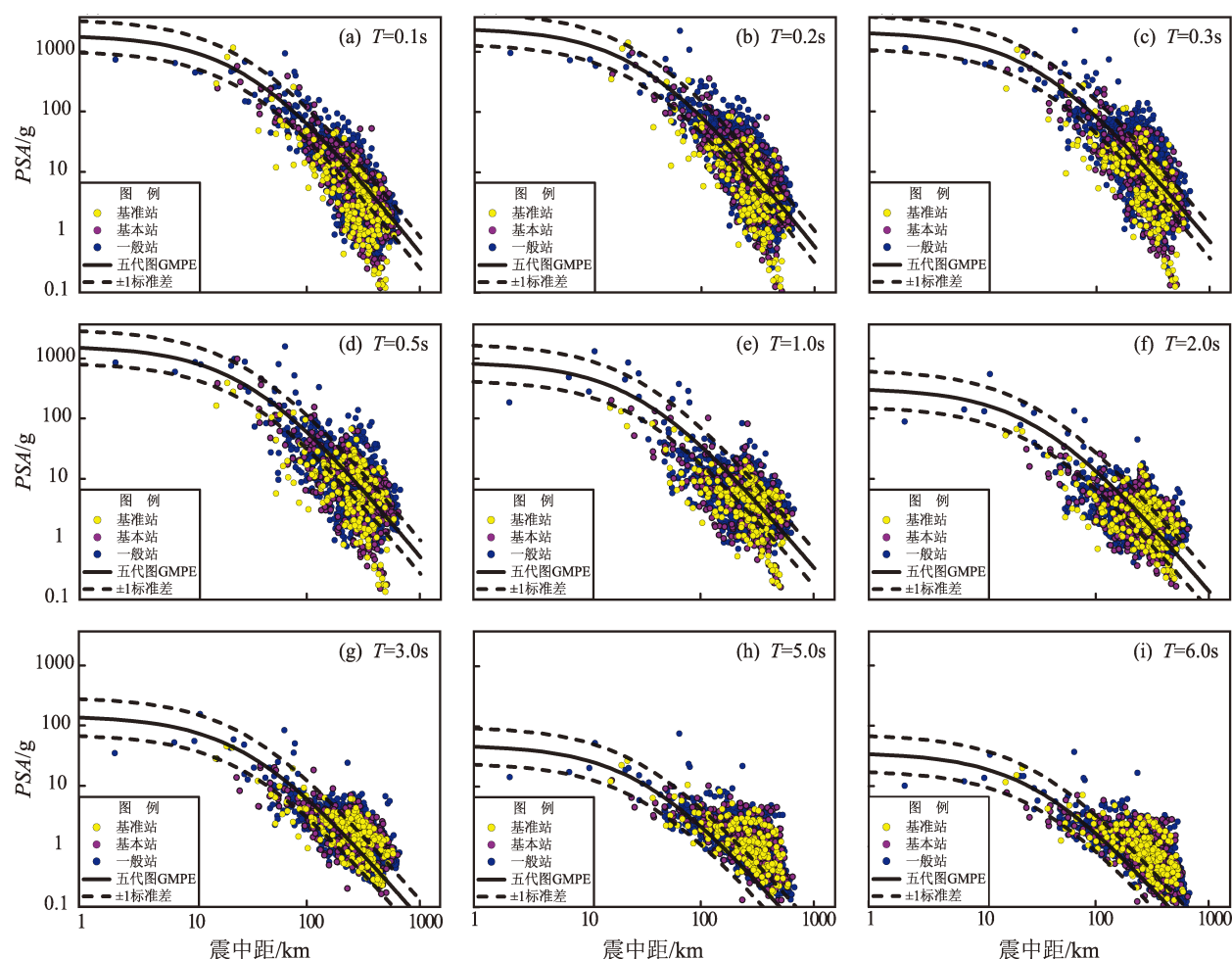


图4 各周期 5% 阻尼比拟加速度反应谱 (PSA) 随震中距的分布

Fig. 4 Distribution of 5% damping ratio pseudo-acceleration response spectra along with epicentral distance in each period

## 4 震害相关性

为进一步分析场地和反应谱特征与震害的相关性, 本文选取震害较为严重的泸定县磨西镇和石棉县挖角乡所获取的地震动进行分析。场地分类优先采用《建筑抗震设计规范》(GB 5011—2010) 规定的方法, 以场地覆盖土层厚度  $H$  和深度为 20 m (当  $H < 20$  m 时取  $H$ ) 的等效剪切波速为分类指标; 没有钻孔资料的台站尝试用水平/竖向 ( $H/V$ ) 谱比法进行分类。为排除强地震作用下土层发生非线性反应的情况, 选取同台站获取的中小地震加速度记录, 计算水平向速度反应谱的平均谱比曲线, 以卓越周期、平坦系数和形状一致性为关键参数, 匹配不同场地类别的  $H/V$  谱比

标准曲线 (Ji *et al.*, 2017) 确定台站场地类别。本文计算了 SC. V2204 和 SC. 51SMW 台站的 5% 阻尼比 PSA, 并选取 2013 年芦山  $M_s 7.0$  地震中 51BXD 台站和 51LSF 台站获取的加速度记录进行对比, 分析地震烈度相同、震中距相近的反应谱特征。

泸定县磨西镇抗震设防烈度为 VIII 度, 设计基本地震加速度值为 0.2 g, 设计地震分组为第二组 (建筑抗震设计规范, GB 50011—2010)。SC. V2204 台站距离磨西镇中心区约 0.6 km, 震中距为 6.9 km。该台未进行场地钻孔测试, 但现场目测可见少量基岩出露, 结合余震记录速度反应谱谱比结果初步判定该台场址为 I 类场地, 设计地震反应谱特征周期  $T_g$  取 0.3 s。从图 5a 可以看出, 在 0.1 ~ 0.3 s, SC. V2204 台的水平方向 PSA 远小于 2013 年芦山  $M_s 7.0$  地震中 SC. 51BXD 台站



水平方向  $PSA$ , 但仍大于Ⅷ度设防地震反应谱和多遇地震反应谱。在  $0.3 \sim 1.5$  s, SC. V2204 台水平方向  $PSA$  明显大于 SC. 51BXD 台的  $PSA$  和设计地震反应谱, 尤其在 1 s 时, SC. V2204 台 EW 向  $PSA$  大约为Ⅷ度设防罕遇地震反应谱值的 2 倍, 是 SC. 51BXD 台  $PSA$  的 6 倍。磨西镇的建筑以 3 ~ 6 层的砖木、砖混结构为主, 夹杂少量 10 层左右的框架结构, 初步估计结构的卓越周期在  $0.3 \sim 1$  s, 恰好是地震动作用在结构上的强烈反应的阶段, 因而产生较为严重的结构破坏, 这一现象与实际调查的震害情况基本一致。

石棉县挖角乡抗震设防烈度为Ⅷ度, 设计基本地震加速度值为  $0.2$  g, 设计地震分组为第三组 (建筑抗震设计规范, GB 50011—2010)。SC. 51SMW 台站位于挖角乡中心小学内, 震中距为 23.7 km, 场地为大渡河二级阶地, 地势平坦, 属中山河谷地形, 覆盖层主要为第四系人工杂填土、冲洪积的砂卵石层等, 厚度大于 22 m。依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010), 该台址为Ⅱ类场地, 依据中小地震记录速度反应谱谱比计

算结果判定其同样为Ⅱ类场地, 设计地震反应谱特征周期  $T_g$  取  $0.45$  s, 在计算罕遇地震加速度反应谱时特征周期均增加  $0.5$  s。从图 5b 中可以看出, SC. 51SMW 台  $PSA$  表现出典型的“双峰”现象, 第一个峰值集中在  $0.1 \sim 0.3$  s, 第二个峰值集中在  $0.45 \sim 1.5$  s, 且水平向的  $PSA$  平台周期跨度较宽。在第 1 个周期区间, SC. 51SMW 台垂直向  $PSA$  远大于设计地震反应谱, 这种情况极易对低矮建筑造成破坏。在第 2 个周期区间, SC. 51SMW 台水平向  $PSA$  大约是罕遇地震设计地震反应谱的 2 倍, 是设防地震反应谱值的 4 倍, 是 SC. 51LSF 台  $PSA$  的 15 倍。挖角乡的建筑以 1 ~ 4 层的砖混结构为主, 夹杂少量 6 ~ 8 层的框架结构, 在乡镇外围有一定数量的砖、土结构农居房屋, 初步估计结构的卓越周期集中在  $0.2 \sim 0.6$  s, 现场调查挖角乡震害严重的主要为低矮农居结构, 与反应谱呈现的特征相吻合。SC. 51SMW 台的  $PSA$  明显大于 SC. V2204 台, 也与 SC. 51SMW 台的场地更软、覆盖层较厚有关, 还与该台位于地震破裂的发育方向上, 产生多普勒效应有关。

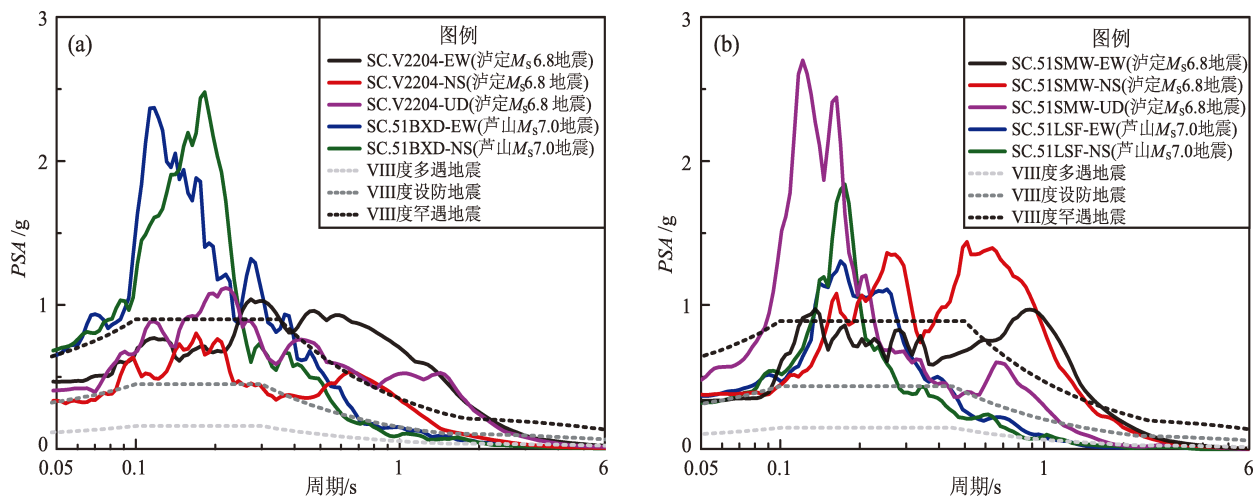


图 5 SC. V2204 (a) 和 SC. 51SMW (b) 台站的 5% 阻尼比拟加速度反应谱

Fig. 5 5% damping pseudo-acceleration response spectra at SC. V2204 station (a) and SC. 51SMW station (b)

## 5 结论

本文从震相、地震动空间分布及衰减特性等方面分析了泸定  $M_s 6.8$  地震的地震动特征, 并初

步研究了场地条件、反应谱与震害的相关性, 主要得出以下结论:

(1) 泸定  $M_s 6.8$  地震强震动记录具有幅值大、密度高、周期长等显著特征, 这些高密度地震动记录的获取对于研究中强地震的地震动特征和区



域构造具有重要意义。震相表现出了垂直方向幅值较大、P 波峰值较大和近场加速度记录长周期成分非常显著的特点。基准站、基本站和一般站记录到的地震动峰值依次增大,反映出地形和场地对地震动的放大作用。

(2) 泸定  $M_s6.8$  地震的仪器地震烈度分布较好印证了区域构造对地震动传播的影响。Ⅶ度以上区域仪器地震烈度等值线长轴为 SE 向并沿断裂带展布,在震中 NE 向沿大渡河断裂发生倾斜,调查地震烈度与仪器地震烈度一致性较好。Ⅶ度以下区域仪器地震烈度等值线长轴扭转为与断裂带垂直的 NE 向,仪器地震烈度与调查地震烈度的等值线方向和面积均有较大差异,表明在震害不显著情况下两种烈度的对应关系不太理想,还需要进一步研究调查地震烈度与仪器地震烈度的对应关系。

(3) 泸定  $M_s6.8$  地震  $PGA$  衰减特性与五代图青藏区 ( $M \geq 6.5$  地震)  $GMPE$  基本一致,  $PGV$  衰减关系比五代图  $GMPE$  更慢,出现多个近场  $PGV$  远大于五代图  $GMPE$  预测值的台站。在  $PSA$  的衰减方面,可以看出周期越大  $PSA$  随震中距衰减越慢。综合震相特征认为本次地震更符合浅源地震的特点。

(4) 通过  $H/V$  谱比方法和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 的分类指标对震中附近震害较为严重地区 2 个台站 SC. V2204 和 SC. 51SMW 的场地类别进行确定,对比了这两个台站的 5% 阻尼比  $PSA$  与区域地震设计反应谱, SC. 51SMW 相比 SC. V2204 场地更软,获取记录的  $PSA$  卓越周期更大,反映出场地覆盖层对长周期地震动的放大作用较为明显。在设计地震反应谱特征周期  $T_g$  取值到 1.5 s 之间,两个台站记录的水平向  $PSA$  均超出了多遇地震设计反应谱,在部分周期区间 SC. 51SMW 的水平向  $PSA$  还超出了罕遇地震设计反应谱值,这较好解释了这两个台站所在乡镇震害严重的原因。

泸定  $M_s6.8$  地震获取的强震动记录相比以往国内中强地震记录数量有 10 倍以上的增加,尤其是近断层记录的大量获取,对于研究震源特性和地震动的特征提供了重要依据。在数据整理过程中,笔者还发现了较多的速度大脉冲记录和 P 波峰值超过 S 波的现象,这些异常记录值得深入研究。

## 参考文献:

- 胡聿贤,张敏政. 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估计方法[J]. 地震工程与工程振动,4(1):1-11.
- 江鹏,李萍萍,李同林,等. 2021. 2020 年 10 月 22 日四川北川  $M_s4.7$  地震强震动特征分析[J]. 地球与行星物理论评,52(2):1-7.
- 金星,马强,李山有. 2004. 利用数字强震仪记录实时仿真地动速度[J]. 地震工程与工程振动,24(1):49-54.
- 雷建成,高孟潭,俞言祥. 2007. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. 地震学报,29(5):500-511.
- 李宏男,陈国兴. 2013. 地震工程学[M]. 北京:机械工业出版社.
- 李萍萍,江鹏,李同林,等. 2022. 2021 年 9 月 16 日四川泸县  $M_s6.0$  地震强地面运动特征分析[J]. 地震学报,44(2):260-270.
- 李山有,金星,陈先,等. 2002. 地震动强度与地震烈度速报研究[J]. 地震工程与工程振动,22(6):1-7.
- 任叶飞,温瑞智,周宝峰,等. 2014. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学报,57(6):1836-1846.
- 四川省地震局. 应急管理部发布四川泸定 6.8 级地震烈度图[EB/OL]. [2022-09-11] (2022-01-10). [http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202209/t20220911\\_53440.html](http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/fzjzyw/202209/t20220911_53440.html).
- 宋晋东,汪源,李山有,等. 2017. 基于中国大陆强震数据的地震预警震级统计关系[C]//中国地球物理学会. 2017 中国地球科学联合学术年会论文集. 北京:1879-1881.
- 温瑞智,任叶飞,黄旭涛,等. 2013. 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,33(4):1-14.
- 温瑞智,王宏伟. 2020. 2020 年 7 月 12 日唐山古冶  $M_s5.1$  地震的强震动特征[J]. 地震科学进展,50(7):9-13.
- 温瑞智. 2016. 我国强地震动记录特征综述[J]. 地震学报,38(4):550-563.
- 俞言祥,李山有,肖亮. 2013. 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,8(1):24-33.
- 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[J]. 震灾防御技术,3(1):206-217.
- 张红才,金星,王士成,等. 2017. 烈度仪记录与强震及测震记录的对比分析——以 2015 年河北昌黎  $M_L4.5$  地震为例[J]. 地震学报,39(2):273-285.
- Boore D M. 2005. On pads and filters: processing strong-motion data. [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,95(2):745-750.
- Ji K, Ren Y, Wen R. 2017. Site classification for National Strong Motion Observation Network System (NSMONS) stations in China using an empirical H/V spectral ratio method[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 147(1):79-94.
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB/T 17742—2020, 中国地震烈度表[S].

## The Characteristics of Strong Motion Records of the 2022 Luding, Sichuan $M_s6.8$ Earthquake

JIANG Peng<sup>1</sup>, LI Pingping<sup>1</sup>, LI Tonglin<sup>1</sup>, ZENG Jun<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, SU Jinrong<sup>1</sup>, WEN Ruizhi<sup>2</sup>

(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract

At 12:52 on September 5, 2022, an  $M_s6.8$  earthquake occurred in Luding County, Sichuan Province, China. The Sichuan Earthquake Early Warning Network acquired 1 799 sets of seismic records. The acquisition of high-density strong motion records has great significance for the study of regional ground motion characteristics and source characteristics. In this paper, we calculate the ground motion related parameters of the strong motion records. Using the Kreging interpolation method, we obtain the spatial distribution maps of  $PGA$ ,  $PGV$ , and acceleration response spectrum based on those related parameters. This shows that the peak values of ground motion recorded by the reference stations, the basic stations and the general stations increase successively, reflecting the amplification effect of terrain and site conditions. In the high intensity area, the intensity determined through strong ground motion instruments is consistent with the intensity determined through field investigation. While in the VI – degree area, there is a striking difference between the instrumental-intensity contour and the survey-intensity contour, which reflects that the instrumental intensity is not consistent with survey intensity in the area where the earthquake damage is light. The seismic phase analysis shows that the peak value in the vertical direction recorded by the stations near the fault is larger, and large horizontal velocity pulses are recorded at several stations. Based on the peak values of ground motion of bedrock, we analyze the attenuation characteristics of the Luding  $M_s6.8$  earthquake. Compared with  $PGV$  proposed in the *Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China* (GB18306—2015),  $PGV$  in this Luding earthquake event decays with distance more slowly. The characteristics of seismic phases show this earthquake is more consistent with the characteristics of shallow earthquakes. To further analyze the relationship between the ground motion and the earthquake damage, we select the strong motion records in two areas with severe earthquake damage, and calculate the pseudo-acceleration response spectrum of 5% damping ratio. In the period  $T_g - 1.5$  s, the acceleration response spectrum value exceeds the design response spectrum value. In some periods, the acceleration response spectrum value exceeds the response spectrum value of rare earthquakes. Response spectrum has a good correlation with earthquake damage.

**Keywords:** the Luding  $M_s6.8$  earthquake; strong motion records; response spectrum; attenuation relation