

吉林松原 $M_s 5.7$ 、 $M_s 5.1$ 地震强震动记录特征分析*

徐 钦¹, 陈琳荣^{2*}, 张 宇², 王文才¹, 石文兵¹

(1. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 吉林省地震局, 吉林 长春 130000)

摘要: 2018年5月28日和2019年5月18日在吉林省松原市先后发生 $M_s 5.7$ 和 $M_s 5.1$ 地震, 对吉林省和黑龙江省强震动台网收集的24组地表强震动记录进行整理、基线校正和滤波等常规处理, 分析2次地震记录的幅值、加速度反应谱特征, 结果表明: ①2次地震记录多为中远场(100 km以外), 近场记录较少; ② $M_s 5.7$ 地震事件获得的强震动记录 PGA 范围为2.25~192.30 gal, $M_s 5.1$ 地震事件获得的强震动记录 PGA 范围为1.08~176.92 gal, 最大 PGA 均由风华台获取; ③将 PGA 观测值与第五代《中国地震动参数区划图》(中强地震区)地震动衰减关系进行了对比发现垂直向和预测值吻合度较高; ④比较获取记录仪器烈度和地震调查烈度, 达里巴台与调查烈度值完全吻合; 最后对典型台站2次地震反应谱和设计谱进行了分析发现, $M_s 5.7$ 长周期分量大于 $M_s 5.1$; ⑤同一台站不同震级反应谱形状接近, 且高频优于低频。

关键词: 松原地震; 强震动记录; 反应谱; 衰减关系; 强震动观测

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0627-08

0 引言

2018年5月28日1时50分, 吉林省松原市宁江区(45.27°N, 124.71°E)发生 $M_s 5.7$ 地震, 震源深度13 km。此次地震发生在松辽断陷盆地中央沉降带内, 位于NE向松原(扶余)一肇东断裂带和NW向第二松花江断裂带交汇部位。截至2018年6月13日共记录到地震823次, 最大余震为2018年5月29日14时36分 $M_L 4.2$ 地震(盘晓东等, 2018)。2019年5月18日6时24分吉林省松原市宁江区(45.30°N, 124.75°E)发生 $M_s 5.1$ 地震, 震源深度10 km, 本次地震震中距2018年5月28日 $M_s 5.7$ 地震震中4.6 km, 距松原市19 km, 距长春市171 km。东北地区地震活动性较弱, 对该区强震动记录的分析可为我国东北地区地震动特征和工程震害调查提供参考资料。张仁鹏和雷焕珍(2017)、李永振(2011)曾对吉林省2013年和2009年地震获得的强震动记录进行了初步分析, 从地震动特征角度解释了

松原地震地面运动较强烈而震害相对较轻的原因。本文在分析总结 $M_s 5.7$ 和 $M_s 5.1$ 地震加速度记录特征的基础上, 对比研究2次地震仪器烈度与调查烈度、加速度幅值、衰减特性以及反应谱特性, 了解2次地震的异同。

1 强震动记录的收集与处理

吉林省强震动台网由15个强震动台站组成, “十五”期间建设并投入使用的强震动台有10个, 主要沿“公主岭—长春—德惠—榆树”沿线分布; 依托中国地震背景场探测项目建设完成的有5个强震动台, 主要沿“长春—松原”一线分布(张仁鹏, 雷焕珍, 2017)。黑龙江省强震动台网由13个强震动台站组成, 其中“十五”期间建设有8个强震动台, 中国地震背景场探测项目建设有5个强震动台。这两次地震与上述强震台震中距100~200 km, 近场记录较少, 触发台站分布见图1。其中吉林省强震动台网获取 $M_s 5.7$ 地震11组33条记录、 $M_s 5.1$ 地震11组33条记录; 黑龙江省强震动

* 收稿日期: 2019-06-10.

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展野外站基金(2019Y01)、中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-201901049)资助.

✉ 通讯作者: 陈琳荣(1975-), 女, 工程师, 主要从事地震应急、地震安全性评价、活断层探测、地震活动性相关工作. E-mail: 965472945@qq.com.

台网获取 $M_s5.7$ 地震 2 组 6 条记录。

对获取的记录进行基线校正、滤波等常规数据处理（于海英等，2009）：①先计算原始加速度记录前时间记录的平均值，然后将原始加速度记录数据减去事前记录平均值，对个别有零线漂移的加速度记录作调整，消除对时程的影响。②对于零线进行调整之后的加速度记录，利用 Butterworth 数字滤波器进行双向高通滤波，低频截止频率的下限取该记录时长倒数的 2 倍，根据谢礼立等（1983）和周宝峰（2012）的研究，高频截止频率对强震动记录位移时程基线偏移的影响很小，考虑到抗震结构设计中比较感兴趣的频带范围，本文高频截止频率取 35 Hz。③对于滤波之后加速度记录作积分，求出速度与位移时程，对于后者运

用最小二乘法调整零线来消除线性趋势，通过分析计算出 $M_s5.7$ ， $M_s5.1$ 地震典型强震记录的基本信息及相关参数，见表 1，2，采用式（1）计算合成水平向加速度记录，采用式（3）计算水平向加速度峰值。利用式（2）计算合成水平方向速度记录，利用式（4）计算水平方向速度峰值，具体计算公式如下：

$$a(t_i) = \sqrt{a(t_i)_{E-W}^2 + a(t_i)_{N-S}^2}$$

(1)

$$v(t_i) = \sqrt{v(t_i)_{E-W}^2 + v(t_i)_{N-S}^2}$$

(2)

$$PGA = \max[a(t_i)]$$

(3)

$$PGV = \max[v(t_i)]$$

(4)

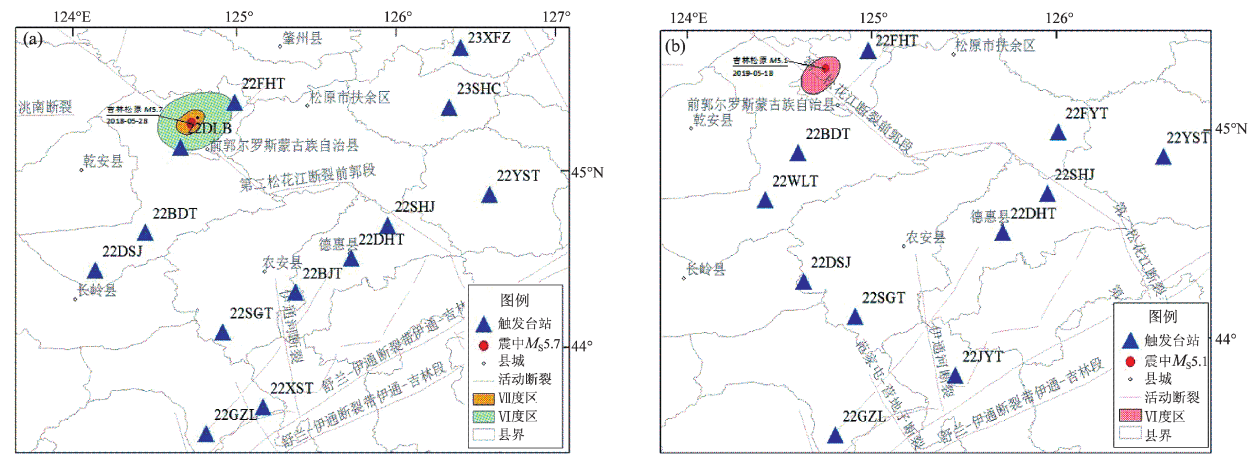


图 1 $M_s5.7$ (a), $M_s5.1$ (b) 地震触发台站分布
Fig. 1 Distribution of strong motion stations of the $M_s5.7$ (a) and $M_s5.1$ (b) earthquake

表 1 $M_s5.7$ 地震获取的台站强震动记录及其相关参数

Table 1 Typical Strong motion records and some related parameters of the $M_s5.7$ earthquake

台站名称	台站代码	场地类型	震中距/km	$PGA/(cm \cdot s^{-2})$			$PGV/(cm \cdot s^{-1})$			烈度
				EW	SN	垂直	EW	SN	垂直	
达里巴台	22DLB	土层	15.46	161.66	132.82	165.97	-4.09	4.94	1.66	VI
风华	22FHT	土层	24.97	140.08	192.30	35.74	-2.63	-2.66	-0.47	VI
宝甸	22BDT	土层	43.13	25.76	26.10	9.15	0.63	-0.71	0.10	IV
东三家子	22DSJ	土层	112.48	-30.80	-23.64	-6.80	-1.00	0.75	-0.41	IV
德惠台	22DHT	土层	116.35	-9.72	15.77	6.73	-0.18	-0.24	0.11	II
松花江	22SHJ	土层	116.92	23.27	-29.38	8.97	-0.48	0.75	0.14	IV
鲍家台	22BJT	土层	118.43	19.86	-15.08	8.48	-0.34	0.25	0.09	III
双城台	23SHC	土层	127.08	86.72	-91.28	-38.98	3.15	-3.97	1.23	IV
三岗	22SGT	土层	132.16	-13.05	8.16	-3.32	-0.18	-0.17	0.07	III
新发震台	23XFZ	土层	140.48	-48.69	-44.46	64.05	-3.18	2.36	2.31	III
榆树台	22YST	土层	153.44	5.99	5.18	4.01	0.15	-0.13	-0.06	II
响水台	22XST	土层	182.55	-8.16	-5.59	-2.23	0.10	0.09	0.02	II
公主岭	22GZL	土层	195.83	2.97	2.36	-2.25	-0.05	-0.07	0.02	I

表2 $M_s5.1$ 地震获取的近场强震动记录及其相关参数

Table 2 Typical strong motion records and some related parameters of the $M_s5.1$ earthquake

台站名称	台站代码	场地类型	震中距/km	$PGA/(cm \cdot s^{-2})$			$PGV/(cm \cdot s^{-1})$			烈度
				EW	SN	垂直	EW	SN	垂直	
风华	22FHT	土层	20.57	-86.33	176.92	48.09	-1.52	2.40	-0.40	VI
宝甸	22BDT	土层	47.09	41.02	16.11	-13.69	-1.03	-0.28	0.10	IV
乌兰塔拉	22WLT	土层	75.75	36.86	20.43	-9.78	0.71	-0.39	-0.12	IV
扶余台	22FYT	土层	104.66	-25.14	-26.16	10.61	-0.46	-0.96	-0.22	IV
东三家子	22DSJ	土层	116.03	10.71	13.93	3.26	0.45	0.56	0.07	IV
松花江	22SHJ	土层	116.21	26.18	17.53	6.43	-0.38	0.51	-0.14	III
德惠台	22DHT	土层	116.75	15.11	12.14	6.15	0.28	0.19	0.09	III
三岗台	22SGT	土层	135.14	7.87	-6.76	-1.26	-0.25	-0.16	0.02	II
榆树台	22YST	土层	151.42	-4.52	-5.55	2.24	0.11	-0.14	-0.04	II
净月台	22JYT	基岩	175.77	1.08	1.17	1.18	-0.02	-0.02	0.02	I
公主岭	22GZL	土层	199.08	4.53	-4.10	-1.16	-0.11	-0.06	0.02	I

2 仪器烈度

根据《吉林松原 5.7 级地震烈度图》(吉林省地震局,2018), $M_s5.7$ 地震的最大烈度为Ⅶ度,Ⅵ度和Ⅶ度烈度区呈椭圆型分布,椭圆长轴总体呈 NE 走向,Ⅵ度及以上区域总面积为 1 037 km²。Ⅶ度区主要涉及吉林省松原市宁江区毛都站镇、伯都乡、新城乡和前郭县平凤乡,面积为 157 km²。Ⅵ度区主要涉及吉林省松原市宁江区毛都站镇、伯都乡、新城乡、大洼镇、兴原乡和前郭县平凤乡、长山镇、达里巴乡,以及黑龙江省大庆市肇源县极少部分无居民点地区,面积为 880 km²。此外,位于Ⅵ度区之外的部分地区也受到波及,部分老旧房屋出现破坏受损现象。根据《仪器地震烈度计算暂行规程》(中国地震局监测预报司,2015)计算此次地震的仪器烈度,并与《吉林松原 5.7 级地震烈度图》进行对比可见,22DLB 台位于Ⅵ度区,仪器烈度与调查烈度值完全吻合,除 22FHT 台为Ⅵ度,其余台站仪器烈度均为Ⅳ度及以下,未进入公布的烈度圈内。

根据《吉林松原 5.1 级地震烈度图》(吉林省地震局,2019), $M_s5.1$ 地震最大烈度Ⅵ度,Ⅵ度区等震线长轴总体呈 NE 走向,长轴半径约 11 km,短轴半径约 7 km,总面积 237 km²。Ⅵ度区主要涉及吉林省松原市宁江区毛都站镇、伯都乡、新城乡和前郭县平凤乡。根据中国地震局仪器烈度计算暂行规程(中国地震局,2015)计算此次地震的仪器烈度,

并与《吉林松原 5.1 级地震烈度图》对比,触发台站均未进入公布的烈度圈内。该烈度图只绘制了Ⅵ度区域,强震动记录 22FHT 台仪器烈度为Ⅵ度并未包含在烈度区内,因为震后烈度调查资料是一定区域内平均或延伸,而强震数据只是个别点上的数据,二者具有差异性(马强等,2014),若进一步针对该强震动台站场地等周边环境进行调查,可降低统计关系的离散性。

3 幅值特征

3.1 加速度幅值特征

$M_s5.7$ 地震获得的强震动记录 PGA 为 2.25 ~ 192.30 gal,震中距为 15.46 ~ 195.83 km。最大 PGA 由 22FHT 台 EW 向获取,震中距为 24.97 km,其次是 22DLB 台垂直向(165.97 gal),震中距为 15.46 km。 $M_s5.7$ 地震触发台站在 NW 向第二松花江断裂带 EN 方向的台站相似震中距 PGA 整体大于 EW 向,该特性与《吉林松原 5.7 级地震烈度图》的烈度圈分布走向一致,是否与场地效应有关需要根据台站钻孔资料等做进一步分析。

$M_s5.1$ 地震获得的强震动记录 PGA 为 1.08 ~ 176.92 gal,震中距为 20.57 ~ 199.08 km。最大 PGA 由 22FHT 台 SN 向获取,震中距为 20.57 km,其次是 22BDT 台 EW 向(41.02 gal),震中距为 47.09 km。当震中距约为 50 km 时, PGA 衰减到大约 41 gal,衰减约 76%,震中距大于 50 km,随震中距增大 PGA 逐步衰减直至降为零,基本不再会对人和建筑物造

成危险和破坏。此外, $M_s5.1$ 地震基岩场地 22JYT 台的 PGA 明显低于相似震中距的台站, 同样特性在九寨沟 $M_s7.0$ 地震中也有所表现(徐钦等, 2018), 由此可见局部场地条件对 PGA 有相当大的影响。

2 次地震获得的强震动记录 PGA 整体随震中距

的增大而快速衰减, 同一震中距(或震中距基本相等)的 22SHJ 台 PGA 均大于 22DHT 台、22DSJ 台, 且递减规律一致, 该特性可能与当地的场地条件和地震传播特性有关, 需作进一步研究。典型台站时程曲线如图 2, 3 所示。

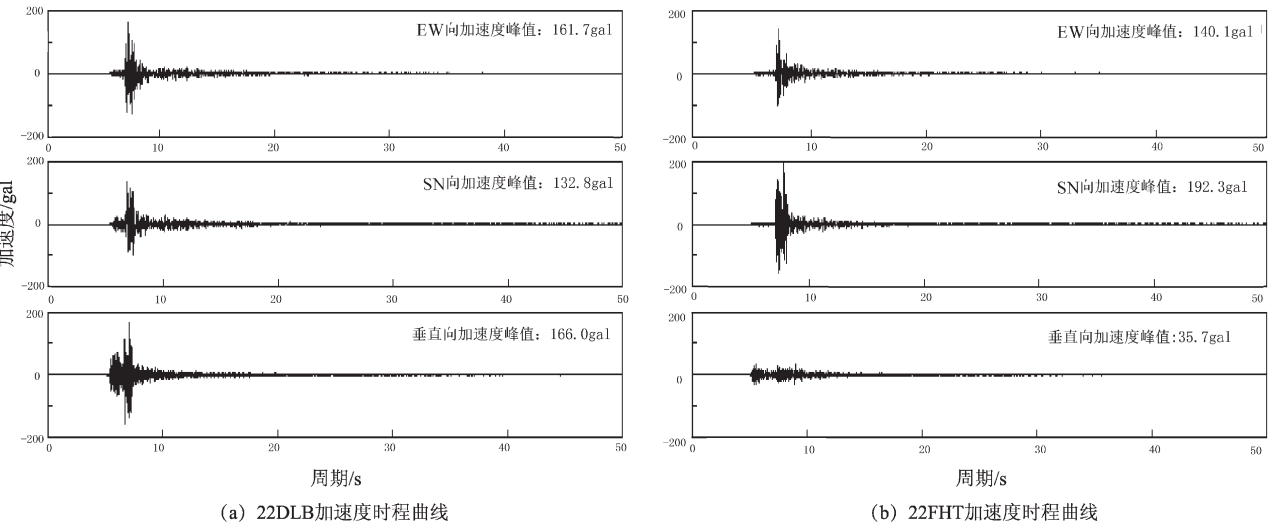


图 2 $M_s5.7$ 地震中记录到的典型强震动记录加速度时程曲线

Fig. 2 The acceleration time history of typical strong motion record obtained in the $M_s5.7$ event

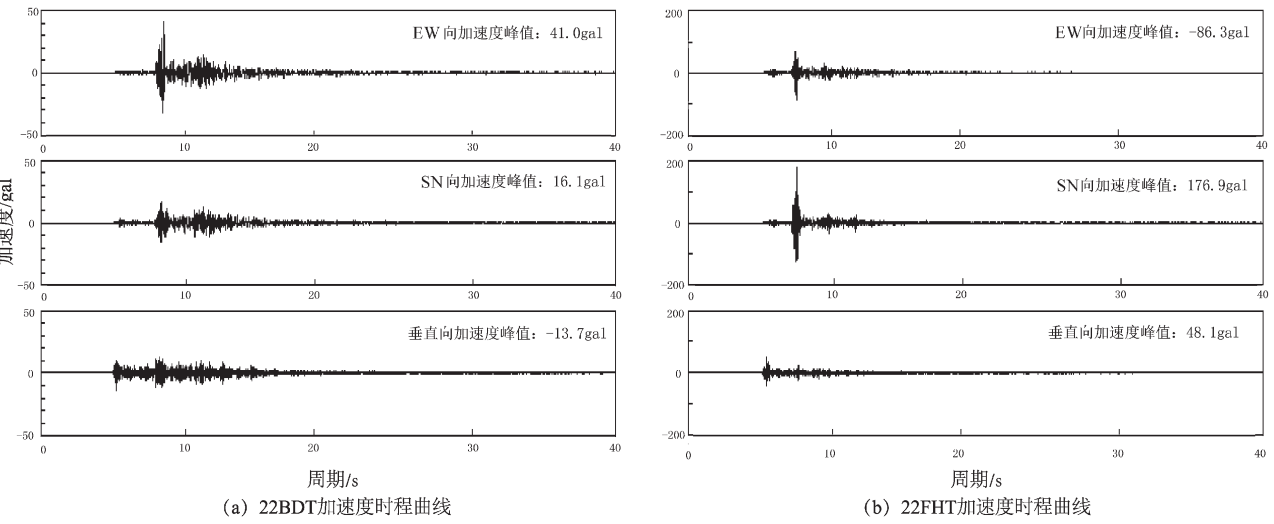


图 3 $M_s5.1$ 地震中记录到的典型强震动记录加速度时程曲线

Fig. 3 The acceleration time history of typical strong motion record obtained in the $M_s5.1$ event

3.2 幅值衰减特征

选用《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)(闻满华, 2017)中强地震区(包含东北地震区、鄂尔多斯带、长江中游带、右江带)分区衰减关系(俞言祥等, 2013)对比研究此次地震的 PGA 幅值

衰减特征, 衰减关系模型为:

$$\lg Y = A + BM + Clg(R + De^{EM}) \tag{5}$$

式中: Y 为地震动参数(加速度峰值); M 为面波震级; R 为震中距; A, B, C, D 和 E 为回归系数。图 4, 5 是 2 次地震 PGA 观测值和和预测衰减关系对比。

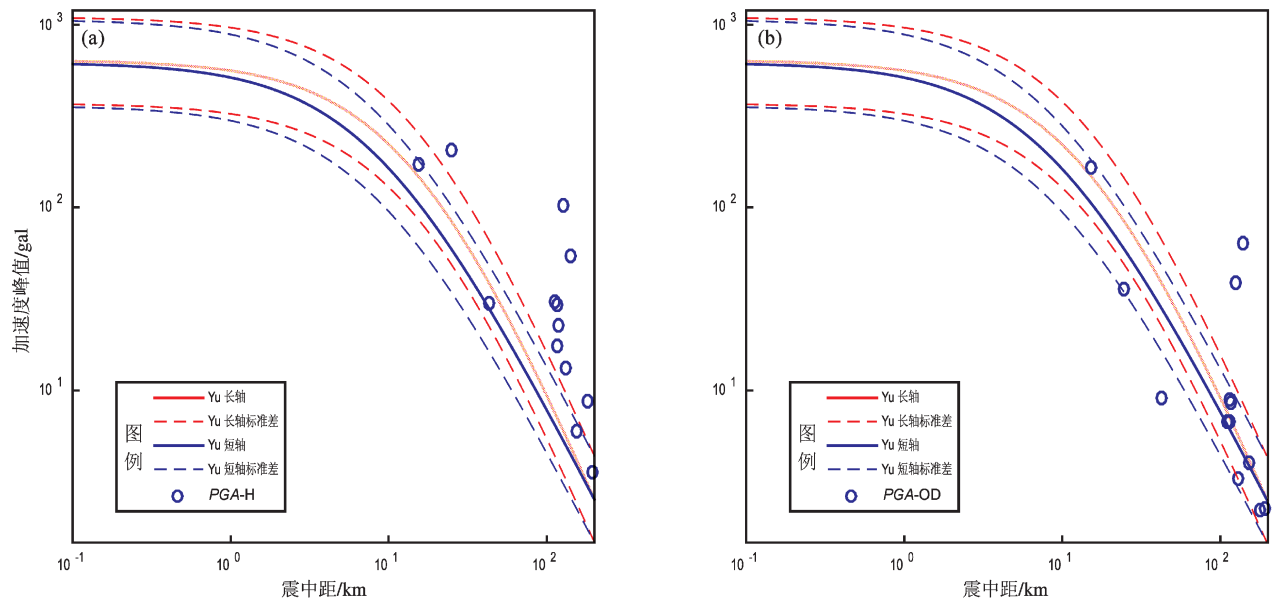


图4 $M_s5.7$ 地震水平向(a)、垂直向(b)加速度峰值与衰减关系对比
Fig. 4 Comparison of the synthetic horizontal(a) and vertical(b)PGA and the attenuation relationships of the $M_s5.7$ event

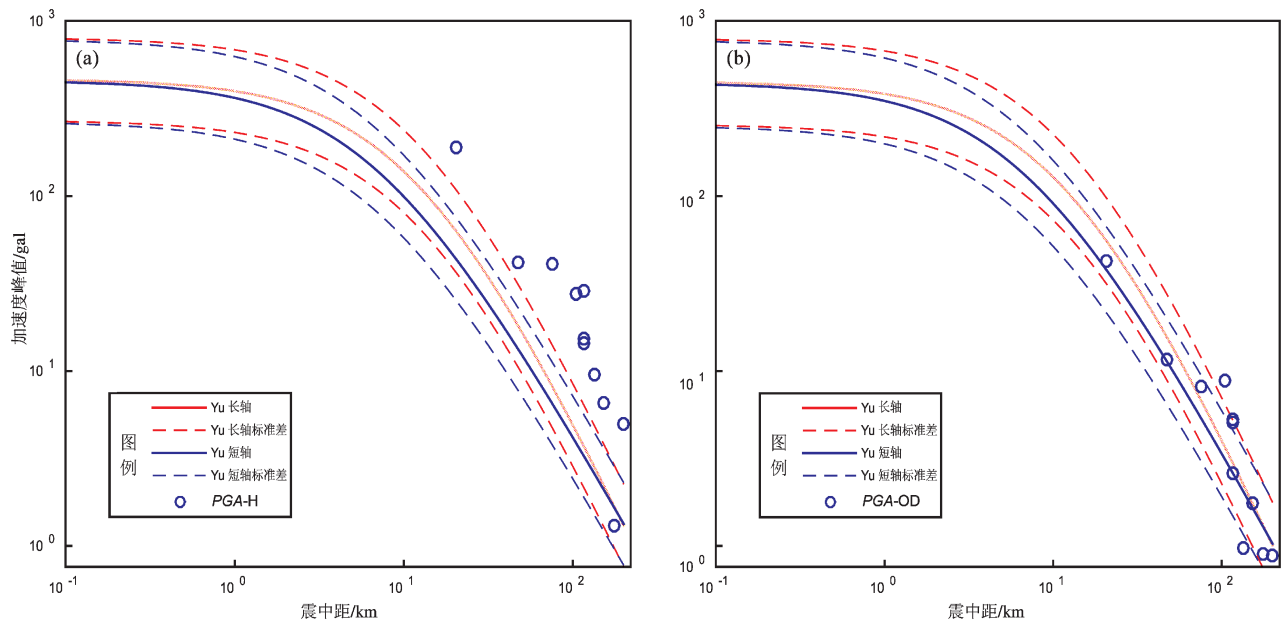


图5 $M_s5.1$ 地震水平向(a)、垂直向(b)加速度峰值与衰减关系对比
Fig. 5 Comparison of the synthetic horizontal(a) and vertical(b)PGA and the attenuation relationships of the $M_s5.1$ event

2次地震均表现出UD向观测值和预测值吻合度高,100 km内全部在预测区间内, $M_s5.7$ 地震的UD向观测值比 $M_s5.1$ 地震衰减要缓慢一些;水平向二者观测值和预测值差值较大, $M_s5.7$ 地震在近场与预测值吻合较好, $M_s5.1$ 地震观测值与预测值相差较大,整体大于预测值。

4 加速度反应谱特征

4.1 与设计反应谱比较

选取 $M_s5.7$ 地震震中距最小的22DLB台和 $M_s5.1$ 震中距最小的22FHT台加速度反应谱与该

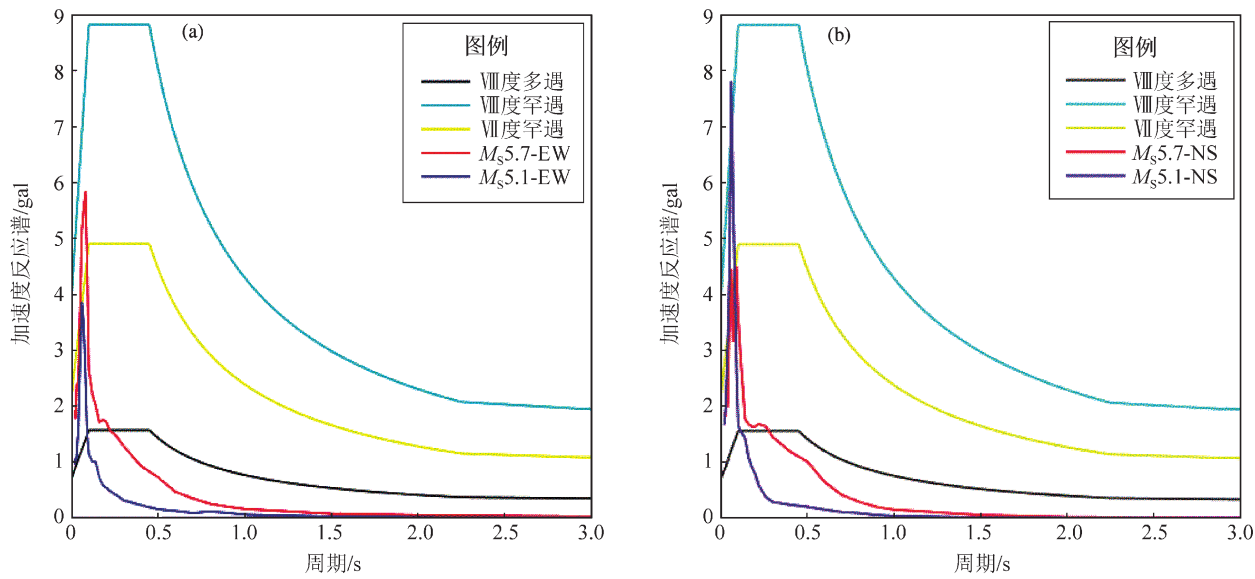


图6 $M_s5.7$ 、 $M_s5.1$ 地震EW向(a)和SN向(b)反应谱与设计反应谱比较
Fig. 6 Comparison of east – west(a) and south – north(b) response spectrum and design response spectrum of the $M_s5.7$ and $M_s5.1$ events

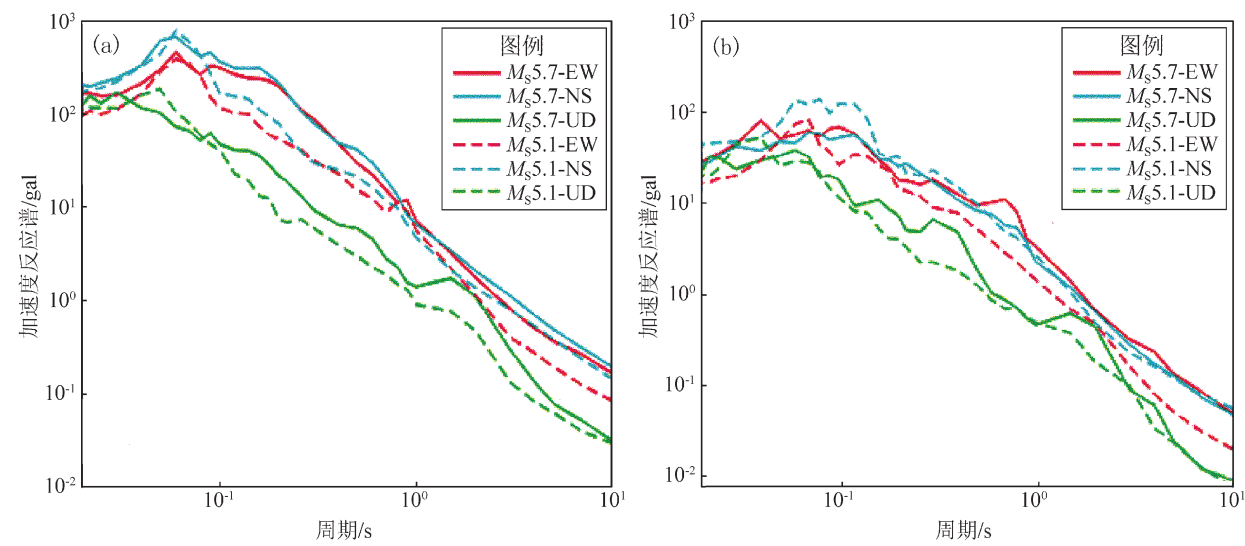


图7 22FHT(a)和22BDT(b)不同震级反应谱对比
Fig. 7 Different magnitudes response spectrum comparison of 22FHT(a) and 22BDT(b)

台站所在地设计反应谱(建筑设计抗震规范,GB 50011—2010)进行比较,如图6,7所示: $M_s5.7$ 的NS,EW向加速度反应谱高于Ⅷ度多遇地震,EW向反应谱高于Ⅶ度罕遇, $M_s5.1$ 地震的NS,EW向加速度反应谱超过Ⅷ度多遇地震小于Ⅷ度罕遇地震,NS向反应谱超过Ⅶ度罕遇。
 $M_s5.7$ 和 $M_s5.1$ 地震的反应谱形状相近,反应谱峰值周期均在0.3 s以内,卓越平台窄,EW向反应谱在对应设计谱特征周期($T_g=0.45$ s)之前衰减

迅速。对比2次地震的反应谱发现, $M_s5.7$ 低频分量大于 $M_s5.1$, $M_s5.7$ 地震反应谱平台值更大。2次地震发生1 s后反应谱峰值达到 1 m/s^2 以下甚至接近于0,因此不会对自振较长的大坝、桥梁、高层及超高层建筑造成严重破坏,对该地区非设防结构,低矮短周期结构破坏较大(张苏平等,2017)。
4.2 同一台站不同震级对比
选取22FHT和22BDT这2个台站,分别对其2次地震加速度反应谱进行对比分析,由于震级接

近,2台站2次地震反应谱曲线形状基本相似,高频分量优于低频。22FHT台的反应谱峰值 $M_s5.7$ 地震在 0.1 s 以后高于 $M_s5.1$ 地震,但 22BDT台 NS向 $M_s5.7$ 地震的反应谱整体低于 $M_s5.1$ 地震。

本节所涉及到的加速度反应谱均为阻尼比为 5% 的单自由度弹性反应谱(S_a)。

5 结论

本文对吉林松原宁江区 2018 年 5 月 28 日发生的 $M_s5.7$ 地震和 2019 年 5 月 18 日 $M_s5.1$ 地震获取的强震动观测记录进行整理、基线校正和滤波等常规处理,在分析加速度记录特征的基础上,对比研究 2 次地震仪器烈度与调查烈度、加速度幅值以及衰减特性、加速度反应谱特性。得到以下主要结论:

(1) 2 次地震记录多为中远场(100 km 以外),近场记录较少。 $M_s5.7$ 地震事件中获得的强震动记录 PGA 范围为 2.25 ~ 192.30 gal,震中距 15.46 ~ 195.83 km。最大 PGA 由 22FHT 台 EW 向获取,震中距为 24.97 km。 $M_s5.1$ 地震事件中获得的强震动记录 PGA 范围为 1.08 ~ 176.92 gal,震中距 20.57 ~ 199.08 km。最大 PGA 由 22FHT 台 NS 向获取,震中距为 20.57 km。

(2) 与第五代《中国地震动参数区划图》中的分区(中强地震区)地震动衰减关系对比发现,2 次地震均表现出 UD 向和预测值吻合度高,水平向整体观测值和预测值差值较大的特点, $M_s5.7$ 地震在近场与预测值吻合较好。

(3) 对比分析了 2 次地震的仪器烈度和调查烈度发现, $M_s5.7$ 地震中 22DLB 台位于 VI 度区,仪器烈度与调查烈度值完全吻合,其余台站均未进入公布的烈度圈内。

(4) 对比 2 次地震震中距最近的台站反应谱与抗震设计谱发现, $M_s5.7$ 地震的长周期分量大于 $M_s5.1$ 地震,反应谱宽度较 $M_s5.1$ 增大更加明显。2 次地震 1 s 之后反应谱峰值降到 1 m/s^2 以下甚至接近于 0,因此不会对自振较长的大坝、桥梁、高层及

超高层建筑造成严重破坏,但对该地区非设防结构,低矮短周期结构破坏较大;同一台站不同震级反应谱形状接近,台站反应谱曲线形状基本相似,高频分量优于低频。

感谢吉林省地震局强震动观测人员在此次地震观测、记录收集工作中的辛勤劳动。感谢中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”为本研究提供数据支持。

参考文献:

- 吉林省地震局. 2018. 吉林松原 5.7 级地震烈度图及说明[EB/OL] (2018-05-31) [2019-06-10]. <http://111.26.194.22:8888/synjq/20180531/22264.html>.
- 吉林省地震局. 2019. 吉林省地震局发布吉林松原 5.1 级地震烈度图[EB/OL] (2019-05-20) [2019-06-10]. <http://111.26.194.22:8888/zwyw/20190520/23822.html>.
- 李永振. 2011. 吉林伊通 $M_4.3$ 地震强震记录分析[J]. 地震地磁观测与研究, 32(6): 11-15.
- 马强, 李水龙, 李山有, 等. 2014. 不同地震动参数与地震烈度的相关性分析[J]. 地震工程与工程振动, 34(4): 83-90.
- 盘晓东, 刘俊清, 贾若, 等. 2018. 2018 年 5 月 28 日吉林松原宁江 5.7 级地震研究概述[J]. 国际地震动态, (8): 151-152.
- 闻清华. 2017. 《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015) 编图方法在云南地区的应用实践[J]. 地震研究, 40(2): 257-263.
- 谢礼立, 李沙白, 钱渠杭, 等. 1983. 我国强震记录处理和分析方法的若干特点[J]. 地震工程与工程振动, 3(1): 1-14.
- 徐钦, 古云鹤, 孙艳萍, 等. 2018. 四川九寨沟 7.0 级地震强震动记录及特征分析[J]. 地震工程学报, 40(4): 844-1000.
- 于海英, 王栋, 杨永强, 等. 2009. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 29(1): 1-13.
- 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.
- 张仁鹏, 雷焕珍. 2017. 2013 年 11 月 23 日吉林松原地震强地面运动三要素特征分析[J]. 防灾科技学院学报, 19(1): 19-25.
- 张苏平, 聂高众, 孙艳萍, 等. 2017. 甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震重灾区房屋类型与致死的关系研究[J]. 地震工程学报, 39(4): 781-789.
- 中国地震局监测预报司. 2015. 仪器地震烈度计算暂行规程[S]. 地震出版社.
- 周宝峰. 2012. 强震观测中的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范[S].

The Characteristics of Strong Motion Records of the Songyuan $M_s5.7$ and $M_s5.1$ Earthquakes, Jilin Province

XU Qin¹, CHEN Linrong², ZHANG Yu², WANG Wencai¹, SHI Wenbing¹

(1. Lanzhou National Geophysical Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Jilin Earthquake Agency, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract

On May 28, 2018 and May 18, 2019, two $M_s5.7$ and $M_s5.1$ earthquakes occurred successively in Ningjiang district, Songyuan city, Jilin province. The 24 groups of strong ground motion records collected by the strong motion networks in Jilin province and Heilongjiang province were routinely processed, including classification, baseline correction and filtering. The amplitude and acceleration response spectrum characteristics of the two seismic records were analyzed. Most of the two seismic records were from the far and medium field (100km away), while few were from the near field. The $M_s5.7$ PGA ranges from 2.25 to 192.30 gal, the $M_s5.1$ PGA ranges from 1.08 to 176.92 gal, and the maximum PGA value was obtained by 22FHT. The observed PGA values were compared with the attenuation relationship of the fifth generation seismic zoning map (medium and strong seismic zones) in China, and the vertical direction (UD) was consistent with the predicted values. The instrumental intensity obtained was compared with the seismic investigation intensity, and the 22DLB station was completely consistent with the investigation intensity value. Finally, the response spectrum and design spectrum of two typical stations are analyzed, among which the long – period component of the $M_s5.7$ event is larger than that of the $M_s5.1$ event. The response spectra of different magnitudes of the same station are similar in morphology, and the high frequency response is better than the low frequency response.

Keywords: Songyuan earthquake; strong motion records; acceleration response spectrum; attenuation relationships; strong motion observation