

田文通,董建华,杨博,等.云南漾濞 6.4 级地震强地面运动三要素基本特征分析[J].地震工程学报,2021,43(4):760-766.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.760

TIAN Wentong, DONG Jianhua, YANG Bo, et al. Basic characteristics of the three elements of strong ground motion of the Yangbi M6.4 earthquake in Yunnan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 760-766. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.760

云南漾濞 6.4 级地震强地面运动 三要素基本特征分析

田文通^{1,2}, 董建华¹, 杨 博², 赵律华²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2021 年 5 月 21 日云南漾濞发生 6.4 级地震, 中国数字化强震动观测网络在主震中捕获 28 组加速度数据。对 84 条三分向加速度记录进行常规处理, 计算出对应的地震动参数, 并绘制震中附近水平向 PGA 和 PGV 等值线图, 结果显示其走向和形态与震后烈度调查结果相近。将实际观测的相对持时进行曲线回归, 求得相关系数, 并据此计算出 $T_d(5\% \sim 95\%)$ 持时对应的震源持续时间在 10.22~13.06 s 间, 与震源破裂过程反演结果基本一致。再通过分析近场 6 个台站记录的加速度反应谱, 并与抗震设计谱比较, 总结此次地震的频谱特性, 为该区域抗震设防提供参考依据。

关键词: 漾濞 6.4 级地震; 时程曲线; 反应谱

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)04-0760-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.760

Basic characteristics of the three elements of strong ground motion of the Yangbi M6.4 earthquake in Yunnan Province

TIAN Wentong^{1,2}, DONG Jianhua¹, YANG Bo², ZHAO Lühua²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: On May 21, 2021, an M6.4 earthquake occurred at Yangbi county, Yunnan Province. 28 groups of acceleration data were obtained by the CDSMON. In this paper, 84 three-component acceleration records were processed, and corresponding ground motion parameters were calculated. Horizontal PGA and PGV contour maps near the epicenter were drawn, and the results showed that the trend and shape are similar to the results of post-earthquake intensity survey. The corresponding source duration of $T_d(5\% - 95\%)$ is between 10.22 s and 13.06 s, which is basically consistent with the inversion results of source rupture process. To summarize the spectrum characteristics of the earthquake, the acceleration response spectra recorded by six typical

收稿日期: 2021-06-21

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH18049SX); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2017IESLZ06, 2019IESLZ04)

第一作者简介: 田文通(1977-), 男, 在读博士, 副研究员, 主要从事岩土地震工程研究工作。E-mail: tianwt0728@163.com。

通信作者: 董建华(1980-), 男, 博导, 教授, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: djhua512@163.com。

stations were analyzed and compared with the seismic design spectrum. The study results can provide a reference for seismic fortification in the study area.

Keywords: Yangbi M6.4 earthquake; time-history curve; response spectrum

0 引言

北京时间 2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分在云南省大理州漾濞县境内发生 6.4 级地震,震中位于 25.67°N,99.87°E,震源深度 8 km,地震造成 3 人死亡,32 人受伤。根据云南省地震局发布的《云南漾濞 6.4 级地震烈度图》,此次地震最高烈度为Ⅷ度,Ⅵ度区及以上面积约 6 600 km²,共涉及大理州 6 县市,其中Ⅵ度区土木房屋少数墙体开裂、梭掉瓦,框架房屋个别墙柱、墙梁结合部位开裂。Ⅶ度区土木房屋个别墙体倒塌,部分开裂、梭掉瓦,砖混房屋、框架房屋少数墙柱、墙梁结合部位开裂。Ⅷ度区土木房屋个别柱脚位移,少数墙体倒塌,部分局部倒塌,多数开裂,墙体外闪,普遍梭掉瓦,砖混房屋部分墙体开裂;框架房屋部分墙柱、墙梁结合部位开裂,少数剪裂^[1-2]。

强震动记录是认识和研究地震动特征、岩土及结构地震反应的最直接和重要的基础资料,对工程抗震而言,强震动的特性可以通过地震记录的幅值、频谱、持时等关键要素表征,目前已广泛应用于地震

场地反应分析、震害预测评估、区域抗震设防等方面^[3-4],如温瑞智等^[5]研究了芦山 7.0 级地震强震动记录与震害的相关性;王文才等^[6]利用强震动记录研究了云南通海地震的地面运动和场地反应特性,取得了可靠的研究结果。

本文利用中国数字化强震动观测网络(CDSMON)布设在云南漾濞 6.4 级地震震区的 28 个强震动观测站捕获到的 84 条三分向加速度波形记录,以地震动的幅值、反应谱、持时为研究对象,分析了此次地震强地面运动的基本特征,旨在为本次地震的场地反应、灾害评估、地震动影响场估计以及抗震设防等提供参考^[7-8]。

1 强震动记录收集与处理

漾濞 6.4 级地震中有 28 个台站获得地面运动加速度记录,其中包括云南强震动台网 25 个台,四川强震动台网 3 个台。图 1 所示为此次地震的主震、余震、强震台位置和断层分布情况。28 个记录

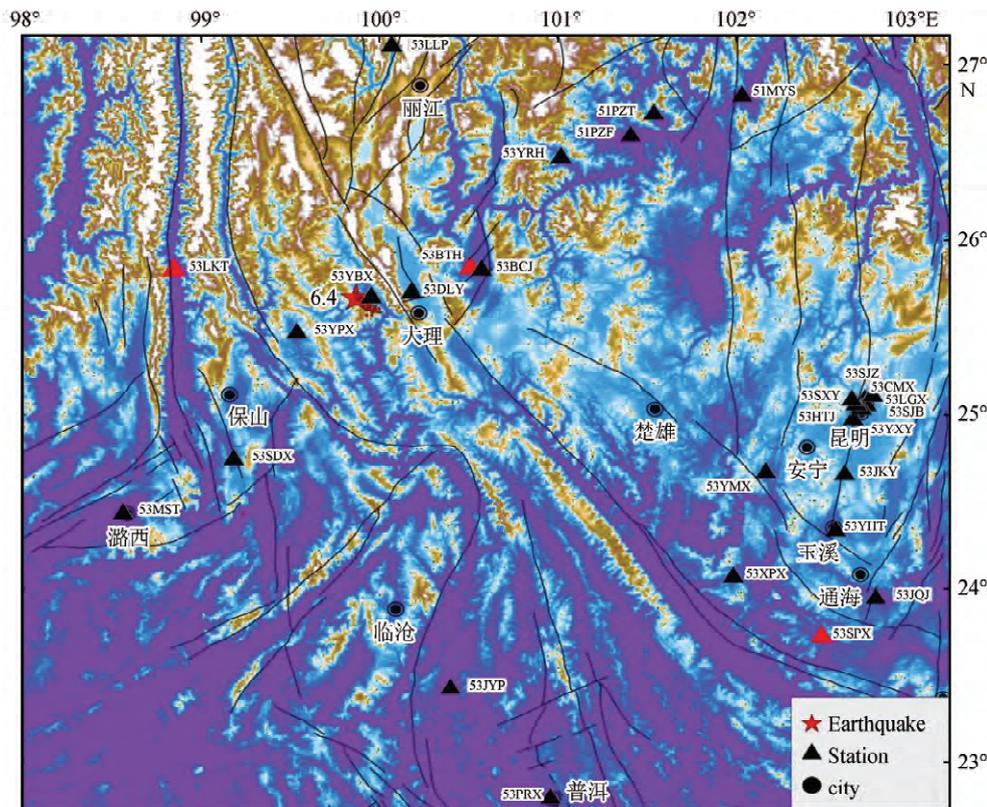


图 1 触发强震动台站分布图

Fig.1 Distribution of strong motion stations and main shock

台站分布在距震中 8.6~351.2 km 的范围内,其中 100 km 以内 5 个台,100~200 km 有 6 个台,200~300 km 有 13 个台,其余 4 个台的震中距大于 300 km。为了避免零线偏移对数据结果的影响,首先利用地震事件前 20 s 的数据对捕获的强震动观

测数据进行基线调整^[9],然后运用低频截止频率为 0.05 Hz 的 4 阶 Butterworth 高通滤波器滤波,以消除低频干扰信号,最后对校正后的加速度时程曲线进行积分,得到可靠的速度时程曲线,表 1 所示为震中距 200 km 内记录台站的基本信息及强震动参数。

表 1 强震动记录相关参数

Table 1 Some related parameters of strong motion records

序号	台站代码	场地条件	震中距/km	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			峰值速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			持时/s		
				东西	南北	垂直	东西	南北	垂直	东西	南北	垂直
1	53YBX	土层	8.6	379.7	720.0	448.2	29.9	29.1	7.4	5.4	3.8	5.1
2	53DLY	土层	31.3	97.4	104.3	70.3	1.3	1.5	0.8	1.8	1.5	1.6
3	53YPX	土层	40.0	44.9	65.1	-	3.4	7.3	-	19.6	16.4	-
4	53BTH	基岩	67.7	7.4	6.9	6.0	0.5	0.8	0.6	18.0	17.8	16.5
5	53BCJ	土层	72.6	22.5	24.3	17.9	2.7	2.5	1.4	26.9	20.9	23.9
6	53LKT	基岩	103.5	10.15	9.7	12.8	0.5	0.5	0.3	22.9	22.8	22.7
7	53SDX	土层	124.0	19.1	27.3	9.6	3.2	4.4	0.8	36.1	24.3	36.7
8	53YRH	土层	145.1	6.2	4.2	3.1	0.6	0.5	0.2	19.7	19.7	27.7
9	53LLP	土层	160.0	2.4	3.2	1.6	0.3	0.2	0.1	33.4	35.9	35.1
10	51PZF	土层	184.6	2.4	1.1	2.7	0.3	0.2	0.3	36.0	41.6	31.0
11	53MST	土层	190.2	5.1	4.8	2.5	0.5	1.0	0.2	21.3	19.1	33.6

2 地面运动特征分析

2.1 幅值特征

由表 1 可知,漾濞台(53YBX)记录的地面运动幅值最大,其东西、南北、垂直向加速度峰值(PGA)分别为 -379.9 cm/s^2 、 -720.3 cm/s^2 、 -448.4

cm/s^2 ,速度峰值(PGV)分别为 30.4 cm/s 、 -29.8 cm/s 、 -7.2 cm/s ;53BTH 和 53LKT 台站由于处于基岩场地,其观测记录的幅值较小,其余土层台记录的 PGA 随距离的增大总体呈现减小趋势。图 2 为经基线校正后 53YBX 台三分向的加速度和速度时程曲线。

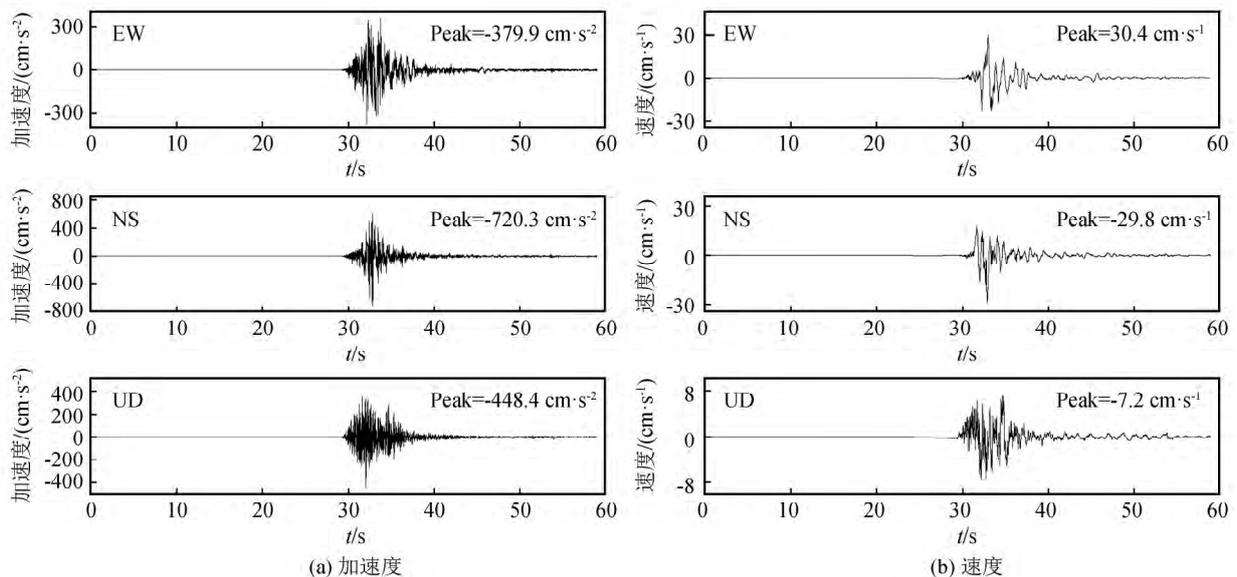


图 2 53YBX 台加速度时程和速度时程

Fig.2 The acceleration and velocity time-history curves of 53YBX station

利用表 1 的地震动参数,通过计算各台水平向记录 PGA 和 PGV 的几何平均值,并采用克里金插值方法得到震中区域 PGA、PGV 水平向的等值线

(图 3)。可以看出此次地震的 PGA 和 PGV 等值线图均呈北西-东南方向展布,这与地震宏观烈度调查图的长轴走向具有很好的一致性。

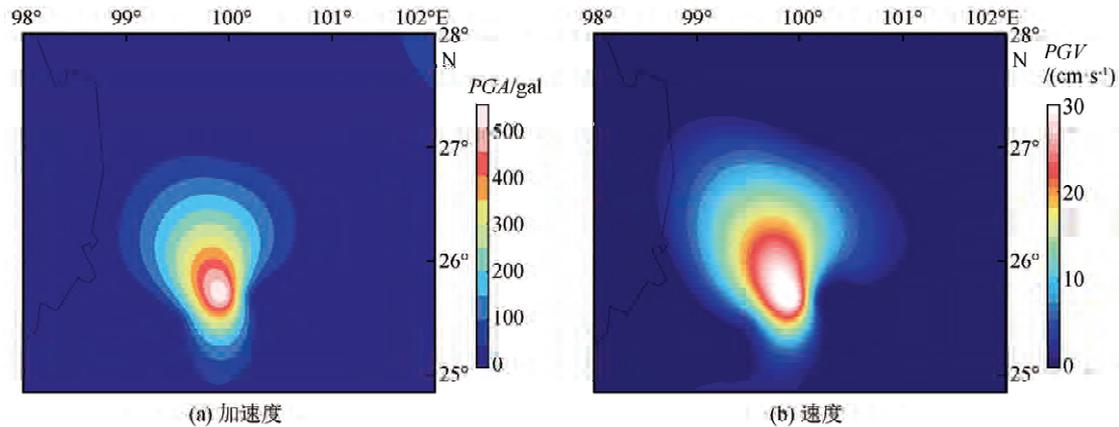


图 3 震中附近水平向 PGA 和 PGV 等值线图

Fig.3 Contour map of horizontal PGA and PGV near the epicenter

2.2 反应谱特征

根据震中距最近、幅值较大的 6 个台捕获的强震记录,通过计算其单自由度线弹性体系的加速度反应谱(阻尼比取 5%),并与我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[10]规定的抗震设计谱比较,如图 4 所示。其中 53YBX、53DLY、53YPX、53BCJ 强震台建于中硬土上,属于 II 类场地,53BTH 和 53LKT 为基岩场地台站。根据规范 GB 50011—2010 规定 53YBX、53DLY、53BCJ、53BTH 和 53LKT 所在区域设防标准为 VIII 度设防,53YPX 所在永平县为 VII 度设防区域。53YBX 和 53YPX 台采用第三组设计地震动,其余台站均采用第二组。

由图 4 可知:(1) 53YBX 台在 0.05~0.15 s 的周期内,三分向的谱加速度均为“单峰”型,且不同程度的大于 VIII 度罕遇地震的设计谱值,其中 EW 向的反应谱值远大于其余两分向的反应谱值。在 0.15~0.45 s 的平台周期内,三分向的谱加速度值均低于 VIII 度罕遇地震的设计谱值,但 EW 和 NS 向的幅值仍然大于 VIII 度设防地震的设计谱值。甚至在 0.45~1.5 s 的中等周期范围内,53YBX 台 EW 和 NS 向的反应谱幅值也不同程度的大于 VIII 度设防地震的设计谱值。因此,本次地震在 53YBX 台附近,自振周期在上述范围内的建(构)筑物,将产生比较严重的破坏。(2)由《住宅设计规范》^[11]可知,震区中小城镇主要建筑的自振周期为 0.3~1 s,而 53DLY 台 EW 和 NS 向的谱加速度值仅在 0.05~0.1 s 的范围内大于 VIII 度设防地震的设计谱值,在 0.1~3.0 s 的周期范围内始终小于 VIII 度设防地震的设计谱值。因此,从作用周期范围看,本次地震对 53DLY 台附近进行了 VIII 度设防的建筑物影响较小。(3)53SPX 台由于 UD 向传感器故障,仅计算出水平向的谱加速

度,可以看出 EW 向的谱加速度显著大于 NS 向的谱加速度,并且在 0.45~1.5 s 的中等周期范围内大于 VIII 度多遇地震的设计谱值,但始终小于 VIII 度设防的地震动设计谱,说明地震动传播到 53SPX 台附近时,从幅度看已不足以对当地满足抗震设防要求的建筑物构成严重威胁。(4)53BCJ 台的反应谱值始终小于 VIII 度多遇的地震动设计谱值,53BTH 和 53LKT 台由于是基岩场地台站,其反应谱值远小于附近土层台站记录的反应谱值,也始终小于 VIII 度多遇地震的设计谱。

2.3 持时特征

当地震动使结构应力-应变关系超过弹性极限时,持续时间越长,引起结构的破坏越严重。目前有 30 多种持时,但主要分为绝对持时和相对持时 2 类。其中 T_d (5%~95%) 相对持时定义为 5%~95% 的 Arias 强度之间的时间间隔^[12-13]。表 1 列出了各台站对应的 T_d (5%~95%) 相对持时的计算结果。为更好地描述此次地震持时的空间变化规律,采用式(1)对各台站处记录的地震动持时进行曲线回归。

$$T_d = c_1 + c_2 R + \sigma \quad (1)$$

式中: T_d 为相对持时; R 为震中距,采用最小二乘法得到回归系数 c_1 和 c_2 ,以及标准差 σ 列于表 2 中。

由图 5 中的回归曲线可以看出,随着断层距的增加,三个方向上的地震动持续时间均增大,53YBX 和 53DLY 的持时相对拟合曲线而言离散性较大,可能由于震中距小于 40 km 的记录数量较少造成的。当震中距为零时,图 5 中曲线与纵轴的截距对应的持时为震源持续时间,由式(1)计算的 T_d (5%~95%) 持时在 EW、NS、UD 三个方向上拟合得到的震源持续时间分别为 13.06 s、11.43 s、

10.22 s。根据震源破裂过程反演结果^[14],此次地震能量主要集中在前约 8~10 s 内释放完毕。可见由

拟合曲线计算的震源持续时间与主震震源破裂过程持续时间基本一致,符合实际震源能量释放过程。

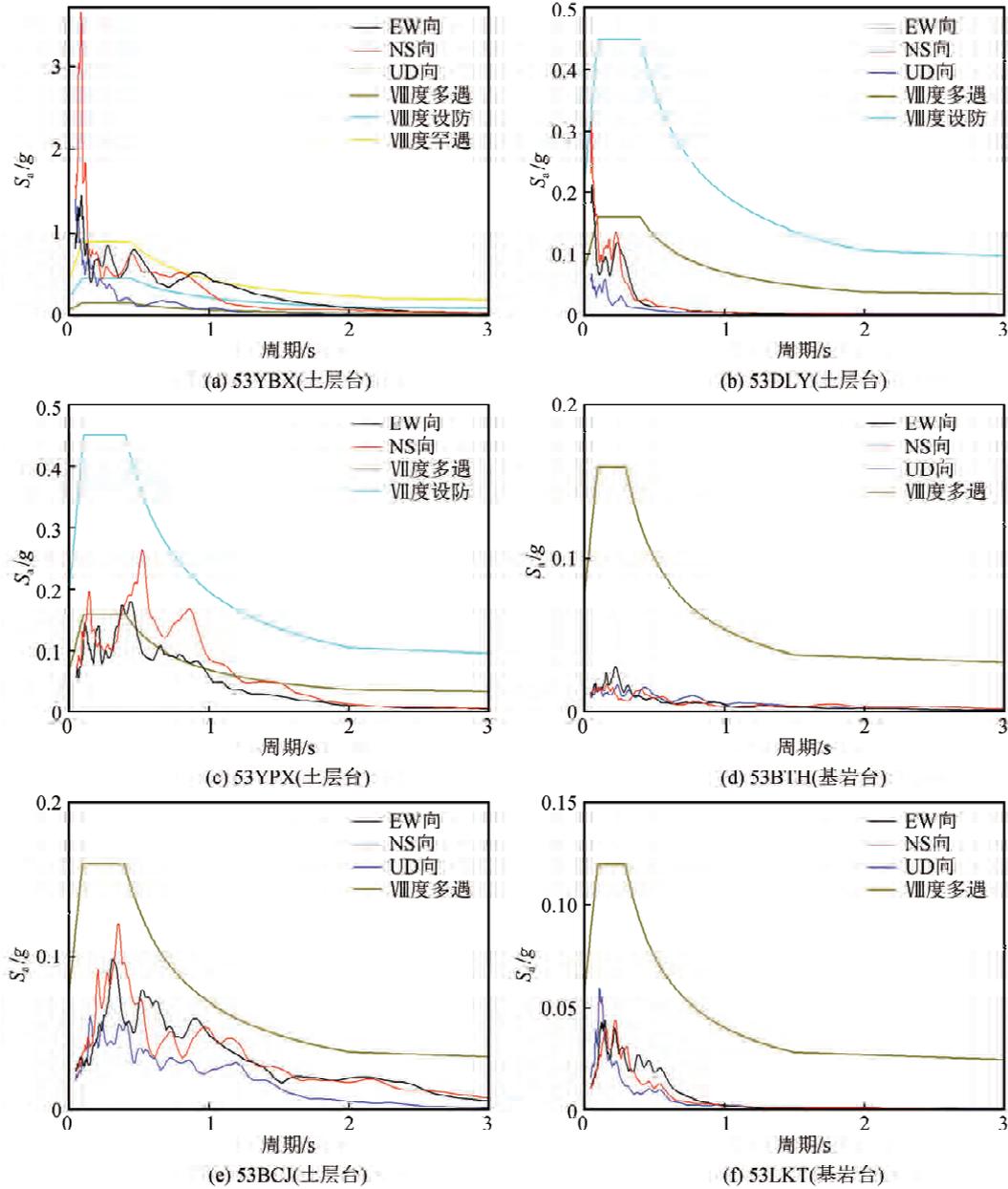


图4 观测记录的反应谱与设计反应谱比较

Fig.4 Comparison between the response spectrum of observation records and design response spectrum

表2 持时与断层距空间变化关系的回归系数

Table 2 Regression coefficient of the relationship between duration and spatial variation of fault distance

系数	$T_d(5\% \sim 95\%)$		
	EW	NS	UD
c_1	-2.354	-5.101	-6.757 0
c_2	0.092 2	0.101 7	0.121 9
σ	15.422	16.529	16.977

3 结论

利用云南、四川强震动观测网络在 2021 年云南

漾濞 6.4 级地震中捕获的 84 条三分向加速度记录,通过对数据处理,从地震动的幅值、反应谱、持时三要素方面研究了此次地震强地面运动的基本特征,得到如下结论:

(1) 震中附近水平向 PGA 和 PGV 等值线图与烈度调查图的走向基本相同,可以为震后快速应急响应、灾害评估、地震动影响场估计和未来区域抗震设计提供参考依据;

(2) 不论从幅值还是作用周期来看,本次地震

都会对 53YBX 台附近的建(构)筑物造成一定的破坏影响,但对 53DLY、53SPX 台附近符合抗震设计

规范的建筑影响较小。此外,两个基岩台记录的地震动幅值远小于同等震中距土层台的值;

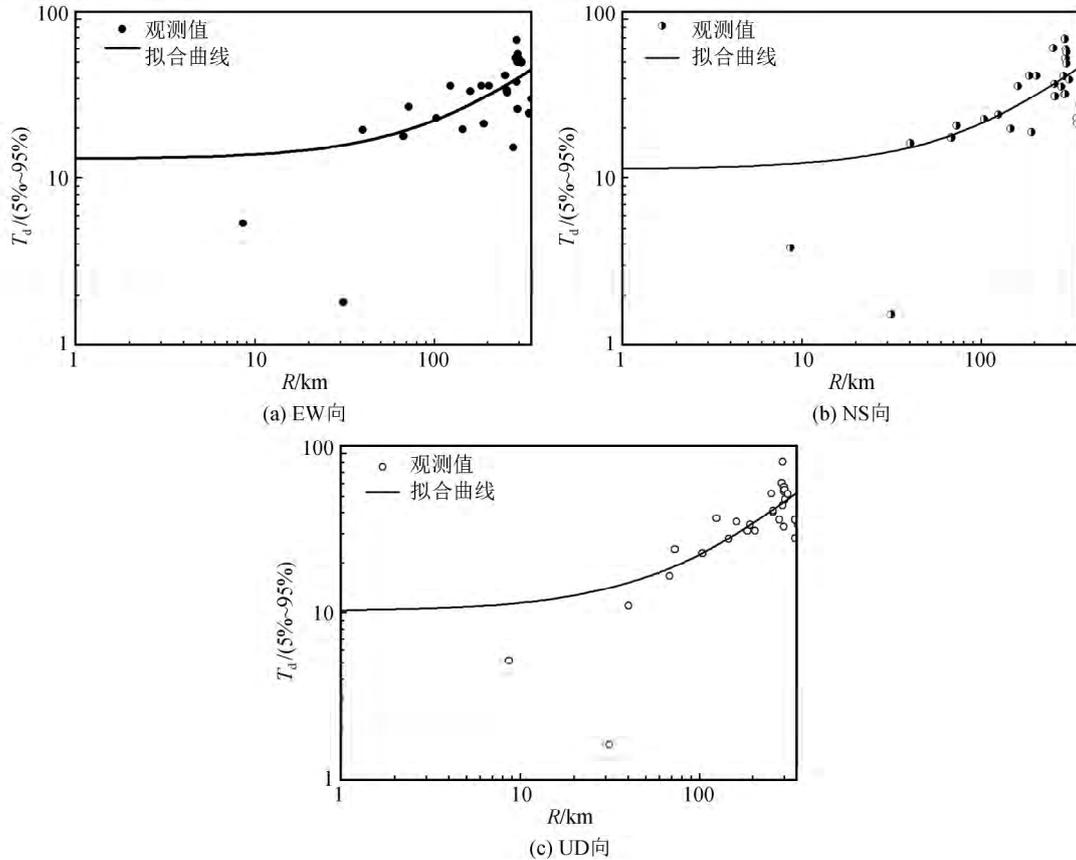


图 5 $T_d(5\% \sim 95\%)$ 持时与震中距的关系

Fig.5 The relationship between $T_d(5\% \sim 95\%)$ and epicenter distance

(3) $T_d(5\% \sim 95\%)$ 持时在 EW、NS、UD 三个方向上拟合得到的震源持续时间在 10.22~13.06 s 间,与震源破坏过程反演结果对应的地震矩释放过程相似。

致谢:中国地震局工程力学研究所为本研究提供数据支持,云南省地震局从事强震动观测的工作人员在数据的收集整理过程中付出了辛勤劳动,以及甘肃省地震局王文才工程师对数据处理提供的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

[1] 云南省地震局.云南漾濞 6.4 级地震烈度图[EB/OL].http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html.
Yunnan Earthquake Agency.Intensity map of the Yangbi M6.4 earthquake in Yunnan[EB/OL].http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html.

[2] 戴君武,孙柏涛,李山有.四川九寨沟 7.0 级地震之工程震害

[M].北京:地震出版社,2018.
DAI Junwu, SUN Botao, LI Shanyou. Engineering damage in Jiuzhaigou M7.0 earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 2018.

[3] 陈国兴.岩土地震工程学[M].北京:科学出版社,2007.

[4] 李宏男,陈国兴.地震工程学[M].北京:机械工业出版社,2013.

[5] 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(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(4): 1-14.

[6] 王文才,尹志文,田秀丰,等.2018 年云南通海 2 次 5.0 级地震强震动记录特征及其场地反应分析[J].地震研究,2019,42(4):635-641.
WANG Wencai, YIN Zhiwen, TIAN Xiufeng, et al. Strong motion record characteristics and site response analysis of the Tonghai M_s5.0 earthquake sequence in Yunnan Province, 2018 [J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4): 635-641.

[7] 任叶飞,温瑞智,周宝峰,等.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,2014,57(6):1836-1846.
- REN Yefei, WEN Ruizhi, ZHOU Baofeng, et al. The characteristics of strong ground motion of Lushan Earthquake on April 20, 2013[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1836-1846.
- [8] 王文才, 尹志文, 苏小芸, 等. 2018年陕西宁强 5.3 级地震强地面运动特征及局部场地效应分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1700-1705.
- WANG Wencai, YIN Zhiwen, SU Xiaoyun, et al. Characteristics of strong ground motion of the 2018 Ningqiang $M_{5.3}$ earthquake in Shaanxi Province and local site response analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1700-1705.
- [9] BOORE D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1199-1211.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅设计规范: GB 50096-2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for residential buildings: GB 50096-2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [12] TRIFUNAC M D, BRADY A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 65(3): 581-626.
- [13] BOMMER J J, STAFFORD P J, ALARCÓN J E. Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(6): 3217-3233.
- [14] 张旭, 张勇, 许力生, 等. 云南大理州漾濞县 $M_{5.4}$ 级地震破裂过程的初步结果[EB/OL]. <http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278248.html>. ZHANG Xu, ZHANG Young, XU Lisheng, et al. Primary results of rupturing process of $M_{5.4}$ earthquake in Yangbi County, Dali Prefecture, Yunnan Province [EB/OL]. <http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278248.html>. <http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278248.html>.