

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 亢川川. 2015. 2014 年云南鲁甸  $M_s6.5$  地震峰值加速度震动图. 地震学报, 37(3): 429–436. doi:10.11939/jass.2015.03.006.  
Chen K, Yu Y X, Gao M T, Kang C C. 2015. ShakeMap of peak ground acceleration for 2014 Ludian, Yunnan,  $M_s6.5$  earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 429–436. doi:10.11939/jass.2015.03.006.

## 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震峰值 加速度震动图<sup>\*</sup>

陈 鲲<sup>1),\*</sup> 俞言祥<sup>1)</sup> 高孟潭<sup>1)</sup> 亢川川<sup>1,2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

**摘要** 综合考虑震中地区地质构造背景、震源机制解结果、余震分布以及我国西部地区地震动参数衰减特征, 运用考虑场地效应的震动图快速生成方法, 将收集到的 62 组强震台站的峰值加速度作为插值使用, 估计了 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸  $M_s6.5$  地震峰值加速度震动图. 利用地震后获得的强震记录计算了强震台站观测值与借助经验性衰减关系得到的估计值之间的系统偏差, 校正了缺少台站地区借助经验性衰减关系得到的估计值, 获得了校正后的峰值加速度分布图. 结果显示, 鲁甸  $M_s6.5$  地震的地震动峰值加速度随距离的衰减速度比前人对我国西部衰减统计的结果更快, 对数偏差校正的结果更符合本次地震的衰减规律. 校正后的峰值加速度大于  $40 \text{ cm/s}^2$  的区域面积近  $8000 \text{ km}^2$ , 比未经校正的峰值加速度大于  $40 \text{ cm/s}^2$  的面积减小了 40% 左右.

**关键词** 震动图 峰值加速度分布 鲁甸地震 对数偏差校正

doi:10.11939/jass.2015.03.006 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

## ShakeMap of peak ground acceleration for 2014 Ludian, Yunnan, $M_s6.5$ earthquake

Chen Kun<sup>1),\*</sup> Yu Yanxiang<sup>1)</sup> Gao Mengtan<sup>1)</sup> Kang Chuanchuan<sup>1,2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Considering the geological structure background, focal mechanism solutions, aftershock distribution and attenuation characteristics of the ground motion in western China, ShakeMap of peak ground acceleration (PGA) for the Ludian, Yunnan,  $M_s6.5$  earthquake on 3 August 2014 was acquired, in which the method of rapid generation ShakeMaps considering site effects was used, and the PGAs of 62 strong motion stations for this earthquake were used as interpolation. Then, distribution of PGA was amended by using PGA observations to correct system bias of theoretical estimates in the area without PGA

\* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB13B19)、地震行业科研专项(201308018)及“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK15B01-04)共同资助.

收稿日期 2014-09-01 收到初稿, 2015-04-09 决定采用修改稿.

\* 通讯作者 e-mail: chenkun-6620@163.com

observations. The results show that the attenuation of ground motion with distance for the Ludian  $M_s 6.5$  earthquake was faster than that from previous studies on western China. The result by correction for bias in logarithmic regression was more consistent with attenuation law for this earthquake. The area with corrected PGA greater than  $40 \text{ cm/s}^2$  was nearly  $8000 \text{ km}^2$ , which was reduced by about 40% compared with that of uncorrected.

**Key words:** ShakeMap; distribution of peak ground acceleration; Ludian earthquake; logarithmic bias correction

## 引言

据中国地震台网中心测定, 2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分(北京时间)在云南省昭通市鲁甸县发生  $M_s 6.5$  地震, 震中位置  $27.1^\circ\text{N}$ 、 $103.3^\circ\text{E}$ , 震源深度 12 km. 地震造成 615 人死亡、114 人失踪、3000 多人受伤以及大量房屋倒塌和损毁. 地震发生后较短的时间内, 用考虑场地效应的震动图快速生成方法(Wald *et al.*, 2006; 陈鲲等, 2010), 并结合震中地区局部的地质构造环境, 借助于地震动参数衰减关系模型快速计算了鲁甸  $M_s 6.5$  地震第一版本的峰值加速度震动图. 随后根据收集到的本次地震的不同资料(全国地震台网的测震数据、震源机制解、震源破裂过程、强震加速度记录、余震精定位结果等)逐步校正了本次地震的峰值加速度震动图. 校正后的峰值加速度震动图能为应急救援、抗震减灾、震害评估以及科学研究提供依据.

## 1 数据

鲁甸  $M_s 6.5$  地震发生在昭通—鲁甸断裂附近. 该断裂总体走向为北东向, 为早更新世断裂, 断裂性质以逆冲为主(徐锡伟, 于贵华, 2014). 中国地震局地球物理研究所和美国地质调查局震后得出的地震矩张量解的结果显示此次地震为走滑型地震, 地震断层的两个节面分别为走向  $74^\circ$ 、倾角  $84^\circ$ 、滑动角  $177^\circ$  和走向  $165^\circ$ 、倾角  $87^\circ$ 、滑动角  $6^\circ$ (中国地震局地球物理研究所, 2014; USGS, 2014). 地震矩张量解结果与昭通—鲁甸断裂的逆冲性质并不一致, 而且断裂的走向与地震矩张量解的两个节面的走向也存在差异. 从震中附近地区地震构造特点来看, 该地区是两组断裂带交汇的地区, 既有北东向构造, 也有北西向构造, 这也是造成该地区强震频发的机制. 根据地震矩张量解的第二节面走向以及北西向展布的余震精定位结果(中国地震局地球物理研究所, 2014), 我们将本次地震的发震构造方向确定为北西向.

本文计算区域范围为  $101.8^\circ\text{—}104.7^\circ\text{E}$ ,  $25.8^\circ\text{—}28.3^\circ\text{N}$ . 最终版本的震动图考虑局部场地放大效应, 使用美国地质调查局地形坡度与  $v_s 30$  的关系, 综合考虑我国活跃构造区和稳定地块区的总体分区特征, 获得了研究区域地下 30 m 的平均剪切波波速数据(Wald *et al.*, 2006; Allen, Wald, 2007, 2009; Wald, Allen, 2007; 陈鲲等, 2010). 考虑震中空间位置、研究区域的地震构造信息、地震矩张量解及余震精定位分布结果, 将椭圆衰减关系模型的长轴取向定为  $165^\circ$ , 运用地震动峰值加速度衰减关系计算了研究区域内基岩参考面的峰值加速度. 其中衰减关系采用汪素云等(2000)回归的中国西部峰值加速度衰减关系, 本文简称 Wang2000. 最后考虑地震动参数的局部场地土层效应, 用  $v_s 30$  表征宏观场地分

类, 获得了依赖于幅值和频率的场地影响系数(Borcherdt, 1994). 将峰值加速度从基岩参考面校正到地表土层上, 得到了研究区域内峰值加速度震动图.

本文数据为从国家强震观测中心收集到的四川省和云南省共 54 组加速度记录以及中国地震局地球物理研究所布设的 11 台强震仪组成的巧家强震观测台阵的 33 条加速度记录(其中有 3 个台站数据异常). 台站数据示于附录表 1, 相应峰值加速度选取两个水平方向的最大值.

## 2 方法

对于未经校正的峰值加速度震动图, 利用快速生成考虑场地效应的震动图方法(陈鲲等, 2010), 考虑鲁甸  $M_s6.5$  地震的震中位置以及衰减关系椭圆模型的长轴取向, 计算了研究区范围内均匀网格点上的基岩峰值加速度值; 进一步考虑地震动参数的局部场地效应, 将基岩峰值加速度值转换到地表土层上, 获得了地表土层上峰值加速度的估计值, 对于均匀分布的峰值加速度估计值, 距离实际台站小于 15 km 的将被剔除, 而以实际台站观测到的峰值加速度值作为控制点; 最后利用反距离权重法进行空间插值, 获得了峰值加速度在地表上的空间分布, 结果见图 1a. 图中等值线间隔与国家质量技术监督局(2001)中的峰值加速度与烈度的对应关系一致.

Wang2000 峰值加速度衰减关系是同时考虑不同震源机制地震的综合结果, 并不区分地震的发震断层类型. 即使相同震级的地震, 地震动衰减关系也存在地震事件间的不确定性. 针对特定的地震事件, 地震动衰减关系计算的估计值与观测值之间往往存在系统偏差(陈鲲等, 2013a). 本文选取峰值加速度大于  $10 \text{ cm/s}^2$  的 22 个强震台站峰值加速度(为减小峰值加速度可能产生较大不确定性的影响), 使用强震记录校正震动图的方法(陈鲲等, 2012, 2013a, b), 得到了校正后的峰值加速度震动图(图 1b). 该方法主要考虑局部场地土层效应的影响, 将台站观测值折算到基岩参考面, 然后基于峰值加速度衰减关系 3 倍标准差的判别准则剔除可能出现异常的数据, 利用对数线性拟合折算后的峰值加速度观测值与由衰减关系计算出的估计值, 得到两者之间的偏差因子(分别为  $c_0 = -2.89$ ,  $c_1 = 1.58$ ), 结果示于图 2. 利用上述偏差因子对没有台站地区的峰值加速度估计值进行系统偏差校正, 最后考虑局部土层效应, 将基岩参考面上校正后的峰值加速度估计值返算到地表上, 与真实的峰值加速度观测值一起插值, 等值线化后得到峰值加速度分布图, 结果示于图 1b. 本文衰减关系选用的是椭圆模型. 为便于表述, 图 3 中衰减关系的距离项是台站与震中连线经该线与短轴方向的夹角在椭圆上旋转得到的短轴距.

## 3 讨论与结论

图 1a 为考虑局部场地效应、震源机制、余震精定位分布以及强震加速度记录计算的峰值加速度震动图. 其中, 强震台站的加速度值只做插值使用, 强震台站用附录表 1 中的序号标注. 可以看出, 震动图的展布方向为北北西向, 最大峰值加速度在  $380 \text{ cm/s}^2$  以上. 震中位于该区域之外, 主要是因为龙头山镇的强震台记录到的峰值加速度达到  $949.1 \text{ cm/s}^2$ . 乐红乡、新店乡及火德红乡等位于  $190\text{—}380 \text{ cm/s}^2$  的区域内. 而峰值加速度为  $90\text{—}190 \text{ cm/s}^2$  的区域围绕震中呈近似椭圆分布, 长约 50 km、宽约 30 km. 峰值加速度为  $40 \text{ cm/s}^2$  以上的区域面积达到  $13000 \text{ km}^2$  左右, 主要从西北方向的金阳县土沟乡至东南的雨碌乡、西南

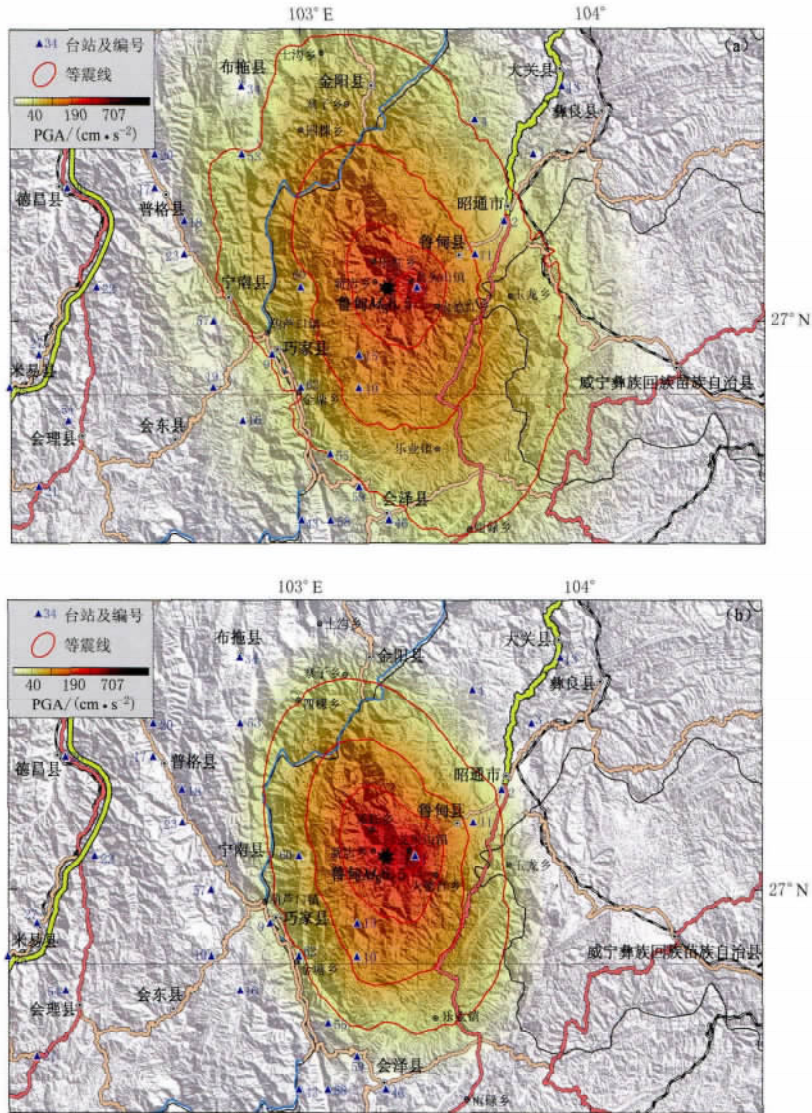


图1 鲁甸  $M_s6.5$  地震峰值加速度震动图

(a) 未经校正的峰值加速度; (b) 经台站观测值校正的峰值加速度

Fig. 1 ShakeMaps of peak ground acceleration for the Ludian  $M_s6.5$  earthquake

(a) Peak ground acceleration without correction; (b) Peak ground acceleration corrected with observations

的巧家县至东北的昭通市附近。昭通市虽然位于峰值加速度大于  $40 \text{ cm/s}^2$  的区域内,但昭通台的峰值加速度观测值却只有  $14.9 \text{ cm/s}^2$ ,因此该地区为明显的加速度异常区。峰值加速度大于  $40 \text{ cm/s}^2$  区域的西北方向受布拖拖觉台及布拖地办台较低观测值的影响(分别为  $17 \text{ cm/s}^2$  和  $2.4 \text{ cm/s}^2$ ),  $40 \text{ cm/s}^2$  的等值线明显内凹。图 1b 为校正后的峰值加速度震动图,强震台站的标注同图 1a。

图 2 和图 3 给出了强震台站峰值加速度偏差校正的结果。可以看出,鲁甸  $M_s6.5$  地震收集到的大于  $10 \text{ cm/s}^2$  的强震台站峰值加速度值均在 Wang2000 峰值加速度衰减关系的  $\pm 3\sigma$  之内,但随距离的衰减比 Wang2000 的结果快。本文对数偏差校正的结果更符合本次

地震的衰减规律. 图 1b 显示校正后峰值加速度大于  $40\text{ cm/s}^2$  的区域面积近  $8000\text{ km}^2$ , 比未经校正的大于  $40\text{ cm/s}^2$  的面积减小了  $40\%$  左右. 西南从葫芦口镇、金塘乡附近起至东北昭通市、玉龙乡附近, 跨度约为  $80\text{ km}$ ; 东南从乐业镇起至西北四棵乡、寨子乡附近, 跨度约为  $120\text{ km}$ . 峰值加速度偏差校正的结果最高的峰值加速度为  $380\text{ cm/s}^2$  以上, 龙头山镇位于该值区域内.

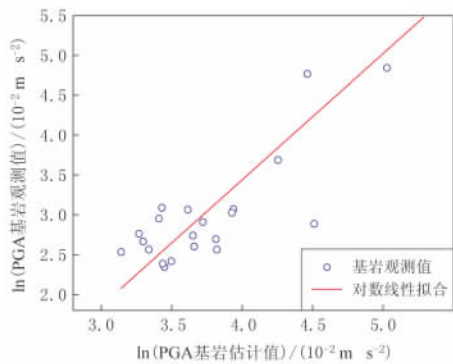


图 2 鲁甸  $M_s6.5$  地震强震台站基岩观测值与估计值的对数拟合关系

Fig. 2 Logarithmic fitting between observed values and estimated values on bedrock beneath strong motion stations for the Ludian  $M_s6.5$  earthquake

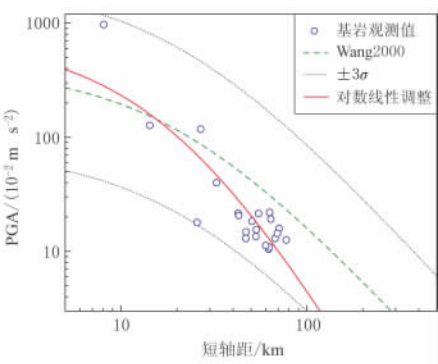


图 3 鲁甸  $M_s6.5$  地震强震台站峰值加速度校正结果

Fig. 3 Peak ground acceleration results of strong motion stations by bias correction for the Ludian  $M_s6.5$  earthquake

鲁甸  $M_s6.5$  地震造成了重大的人员伤亡和经济损失, 本文旨在震后根据快速收集到的有限信息, 快速给出峰值加速度震动图, 为震后的震害评估、地震地质灾害评估、应急救援、抗震减灾以及科学研究等提供基本信息. 虽然地震引起的震害与该地区的震动程度相关联, 但实际的调查烈度结果则主要来自于对地震影响的评价. 本文的烈度则是直接与地面运动参数相关联的震动烈度, 与实际的调查烈度存在一定差别. 尽管如此, 作者也将本文的研究结果与实际的调查烈度图进行了比较, 结果表明两者的空间分布大致相当, 但本文所描述的Ⅵ度以上区域面积略小于实际调查烈度的面积. 其原因主要是因为  $40\text{ cm/s}^2$  等值线外围均受小幅值的台站观测值影响所致. 鲁甸  $M_s6.5$  地震发生后短时间内, 在未获得震源机制解结果、震源破裂过程、余震精定位分布及强震记录结果时, 主要依据地震地质构造背景确定地震动参数椭圆衰减模型的长轴取向. 然而在地质构造复杂地区, 特别是发震断层具有新生性的地区, 仅依据地震地质构造背景确定地震动参数椭圆衰减模型的长轴取向并不一定十分准确, 因此根据随后收集到的本次地震的资料, 逐步校正峰值加速度震动图是非常必要的. 另外, 利用研究区域范围外未限幅的测震台站以及区域范围内强震台站的地震动参数峰值的空间分布信息, 也有助于判定地震动参数椭圆衰减模型的长轴取向.

本文台站数据资料引自国家强震动台网中心网站, 中国地震局地球物理研究所布设的巧家强震观测台阵的加速度记录由许力生研究员提供, 在此一并表示感谢.

## 参 考 文 献

- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究[J]. 中国地震, 26(1): 92–102.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. 2010. Research on ShakeMap system in terms of the site effect[J]. *Earthquake Research in China*, 26(1): 92–102 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 冯静. 2012. 用有限强地震动记录校正等震线的估计研究[J]. 地震学报, 34(5): 633–645.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T, Feng J. 2012. Study on bias correction of ShakeMaps based on limited acceleration records [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 34(5): 633–645 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭. 2013a. 基于地震记录的震动图校正方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 21(4): 679–691.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. 2013a. Research on correction method for ShakeMap based on seismic data[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21(4): 679–691 (in Chinese).
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 高景春. 2013b. 利用强震记录校正的芦山 7.0 级地震峰值加速度震动图[J]. 地震地质, 35(3): 627–633.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T, Gao J C. 2013b. ShakeMap of peak ground acceleration with bias correction for the Lushan, Sichuan earthquake on April 20, 2013[J]. *Seismology and Geology*, 35(3): 627–633 (in Chinese).
- 国家质量技术监督局. 2001. 中国地震动参数区划图(GB/T 18306—2001)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1.
- General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China. 2001. *Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China (GB/T 18306—2001)*[S]. Beijing: China Standards Press: 1 (in Chinese).
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 16(2): 99–106.
- Wang S Y, Yu Y X, Gao A J, Yan X J. 2000. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. *Earthquake Research in China*, 16(2): 99–106 (in Chinese).
- 徐锡伟, 于贵华. 2014. 云南鲁甸(北纬 27.1 度, 东经 103.3 度)6.5 级地震发震构造图[EB/OL]. [2014-08-03]. <http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/云南6.5级地震发震构造图0805.TIF>.
- Xu X W, Yu G H. 2014. Picture of seismogenic structure for Ludian  $M_s 6.5$  earthquake (27.1°N, 103.3°E), Yunnan Province[EB/OL]. [2014-08-03]. <http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/云南6.5级地震发震构造图0805.TIF>.
- 中国地震局地球物理研究所. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 6.5 级地震[EB/OL]. [2014-08-03]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/270724.shtml>.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2014. Ludian  $M_s 6.5$  earthquake on 3 August 2014, Yunnan Province[EB/OL]. [2014-08-03]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/270724.shtml>.
- Allen T I, Wald D J. 2007. *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ( $v_s^{30}$ ) and Amplification Around the Globe*[R]. U S Geological Survey Open-File Report 2007-1357: 69.
- Allen T I, Wald D J. 2009. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions ( $v_s^{30}$ )[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 99(2A): 935–943.
- Borcherdt R D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)[J]. *Earthq Spectra*, 10(4): 617–653.
- USGS. 2014. M6.1–11 km W of Wenping, China[EB/OL]. [2014-02-12]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000rzmzg#scientific>.
- Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, Pandow K L. 2006. *ShakeMap Manual: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide*[R]. U S Geological Survey: 156.
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(5): 1379–1395.



附录

表 1 鲁甸  $M_s6.5$  地震 62 个强震台站的峰值加速度

Table 1 Peak ground acceleration of 62 strong motion stations for the Ludian  $M_s6.5$  earthquake

序号	台站名称	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$	最大加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	
				东西向	南北向
1	鲁甸龙头山	103.4	27.1	949.1	705.9
2	昭通	103.7	27.3	9.4	14.9
3	靖安	103.8	27.5	10.1	12.0
4	茂林	103.6	27.6	24.6	18.0
5	大关寿山乡	103.9	27.9	4.7	5.1
6	绥江	103.9	28.6	3.2	3.2
7	水竹	103.7	27.9	8.4	6.9
8	甸沙乡	103.1	25.4	2.2	2.7
9	巧家	102.9	26.9	24.8	20.6
10	马树	103.2	26.8	135.2	133.4
11	茨院	103.6	27.2	45.9	44.8
12	程海乡	100.7	26.5	2.7	4.9
13	大关	103.9	27.7	4.2	3.4
14	吉利镇	104.0	28.0	8.9	7.4
15	铅厂	103.2	26.9	146.0	140.3
16	会东铅锌	102.8	26.7	22.0	21.9
17	普格地办	102.5	27.4	18.2	12.4
18	普格白水	102.6	27.3	14.9	14.6
19	会东新街	102.7	26.8	12.1	12.5
20	普格荞窝	102.5	27.5	6.5	6.8
21	会理凤营	102.1	26.5	6.4	6.6
22	会理云甸	102.3	27.1	7.2	7.3
23	宁南松新	102.6	27.2	6.1	7.9
24	攀枝同德	101.5	26.7	4.7	5.4
25	米易撒莲	102.0	26.8	7.3	5.9
26	德昌农科	102.2	27.4	5.4	4.9
27	米易攀莲	102.1	26.9	6.4	3.6
28	盐边红格	101.9	26.5	6.5	5.6
29	马边地办	103.5	28.8	4.9	3.3
30	泸定加郡	102.2	29.7	1.6	1.0
31	冕宁惠安	102.2	28.6	2.6	1.5
32	冕宁拖乌	102.3	28.8	2.8	2.3
33	盐源卫城	101.6	27.4	3.0	2.8
34	布拖地办	102.8	27.7	2.4	2.1
35	昭觉气象	102.8	28.0	4.8	3.0
36	石棉先锋	102.3	29.3	2.5	1.9
37	沐川利店	103.7	29.0	4.7	3.2
38	峨眉交大	103.4	29.6	3.3	2.8
39	宜宾永兴	104.6	29.0	1.9	2.4
40	珙县中学	104.7	28.4	2.1	4.7
41	泸州专业	105.4	28.9	1.6	2.0
42	寻甸	103.2	25.3	5.3	4.7
43	拖布卡	103.0	26.4	16.5	16.5
44	法者乡	103.0	26.0	6.0	5.9
45	阿旺乡	103.3	25.9	4.3	4.2

续表 1

序号	台站名称	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$	最大加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	
				东西向	南北向
46	会泽	103.3	26.4	16.1	17.8
47	汤丹镇	103.1	26.2	6.5	5.3
48	昆明市粮食局第二直属粮库	102.7	25.0	2.0	1.7
49	仁和镇	101.0	26.5	2.3	1.6
50	金官镇	100.7	26.8	3.8	3.0
51	九河乡	100.0	26.8	2.0	1.2
52	片角乡	100.6	26.0	2.1	2.0
53	布拖拖觉	102.8	27.5	11.6	17.0
54	会理地办	102.2	26.7	8.2	-7.0
55	昭通强震观测台阵 1	103.1	26.6	15.5	10.6
56	昭通强震观测台阵 2	103.1	26.2	11.5	14.5
57	昭通强震观测台阵 3	102.7	27.0	12.2	12.9
58	昭通强震观测台阵 4	103.1	26.4	19.5	25.2
59	昭通强震观测台阵 5	103.2	26.5	21.1	17.9
60	昭通强震观测台阵 6	103.0	27.1	12.3	20.6
61	昭通强震观测台阵 7	102.6	26.1	6.2	6.3
62	昭通强震观测台阵 8	103.0	26.8	19.0	23.7