

doi: 10. 11720/wtyht. 2020. 1430

陈挺,严迪,杨剑,等. 基于重力值标准差研究长宁 6.0 级地震活动性[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 480–488. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1430](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1430)

Chen T, Yan D, Yang J, et al. A study of seismic activity of Changning M_s 6.0 earthquake based on standard deviation of gravity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 480–488. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1430](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1430)

基于重力值标准差研究长宁 6.0 级地震活动性

陈挺¹, 严迪¹, 杨剑², 廖国忠², 武斌¹, 冉中禹¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局物探队, 四川 成都 610072; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610082)

摘要: 通过对长宁 6.0 级地震前后经固体潮和零点位移改正后的重力静态观测数据、重力仪实时观测标准差 (S. D.) 和舍弃数量 (REJ) 数据的分析, 认为发震时检测到的重力值变化往往是重力仪震动滤波功能失效, 导致重力仪读数错误。长宁 6.0 级地震在地震波到达之前未能观测到有效的重力异常变化信号, 这是因为当重力仪震动滤波功能开启时, 大于 4~6 倍标准差的高频噪声将被自动拒绝, 重力场的瞬时变化在重力静态观测数据中反映不出来, 但是这种变化可以通过 S. D. 指标来反映。由于 S. D. 值包括了重力仪自身噪声和环境震动等重力高频干扰信号, 它可以用来衡量信号噪声的大小。通过对地震发生时重力仪在不同时刻记录 S. D. 值与地震震级相关性分析认为, 地震震级与重力仪记录 S. D. 值呈明显的正相关关系。在记录到的 21 次地震中, 在发震前有 2 次重力仪记录 S. D. 值有明显突变, 有 1 次在发震前 8 min 观测到 REJ 值的突变, 因此可以根据 S. D. 值的突变并结合重力值和 REJ 值的变化来预报地震和判定单次地震活动持续时间。

关键词: 长宁地震; 标准差; 重力异常; 地震预报

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)03-0480-09

0 引言

CG-5 相对重力仪是加拿大 Scintrex 公司制造生产的新型数字重力仪^[1], 分辨率为 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 重复率优于 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。广泛应用于重力研究、地震预报等领域^[2]。当地震活动突然爆发时, 地下岩石的空间位置以及密度分布形态发生改变, 从而引起观测重力值的变化。吴云成等使用拉科斯特重力仪在辽宁西部地区进行重力复测, 分析了朝阳 4.9 级地震前后重力异常变化情况^[3]。王武星分析了昆仑山口西 8.1 级地震和印尼 8.9 级地震前后部分重力观测的变化, 并对这些采样间隔在 1 min 以下的重力数据进行了高通滤波和频谱分析^[4]。车兆宏分析了张北 6.2 级地震前后华北地区水准、GPS、重力、定点形变、流动形变、地应变观测资料及前兆的演化过程^[5]。祝意青等通过流动重

力测量, 观测到较可靠的重力随时间变化数据^[6-10]。梁伟锋等基于河西地区流动重力观测资料获得的重力场时空变化结果, 研究发现重力场在活动断裂附近变化较大。这些观测记录表明重力变化能较好地反映地下深部物质运移与地壳密度变化等构造活动信息^[11]。

长宁 6.0 级地震发生前, 笔者正在云南省盐津县普洱镇进行重力静态观测, 成功记录到长宁 6.0 级地震发生前后的重力静态观测数据、重力仪实时观测标准差 (S. D.) 以及舍弃数量 (REJ) 数据。截止 2019 年 7 月 23 日, 在盐津县普洱镇和珙县上罗镇重力仪成功记录到地震活动 21 次, 说明长宁地震具有主震突出、余震丰富的特点。笔者在对长宁 6.0 级地震前后重力仪观测标准差数据和舍弃数量值分析的基础上, 认为标准差值包括了重力仪自身噪声和环境震动等重力高频干扰信号, 可以用来衡量信号噪声的大小, 同时舍弃数量 (REJ) 的突变也

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 中国地质调查局成都地质调查中心项目“四川会理—盐源及邻区 1:25 万区域重力调查”(DD20190033)

作者简介: 陈挺 (1984-), 男, 四川绵阳人, 高级工程师, 研究方向为重磁正反演。Email: 48009735@qq.com

指示了高频强震动干扰的存在。通过对比地震发生时重力仪在不同时刻记录的标准差值,认为标准差结合舍弃数量值可用于地震活动不确定性测量,对长宁地区发震识别与记录等具有科学与实际意义。

1 长宁震区地质背景

根据 1:20 万区域地质资料,长宁地区主要出露中、古生界地层(见图 1),将区内地层系统列于表 1。岩浆岩主要出露晚二叠系玄武岩。玄武岩主要由致密状、斑状、杏仁状玄武岩、凝灰角砾岩、凝灰岩组成,矿物成分主要为拉长石、单斜辉石,主要分布

于测区西部巡场镇—坝底村一带。长宁 6.0 级地震震中主要出露寒武系地层向奥陶系地层过渡的白云岩和灰岩,珙县 5.1 级地震震中主要出露志留系罗惹坪组灰岩。

长宁地区主要地质构造为长宁背斜,该背斜东起叙永县,西至珙县天星桥一带,呈不对称的复式大背斜,背斜轴宽阔平缓,地表上在双河乡一带。长宁背斜是一个多断裂构造的背斜,断裂多发育在由古生界地层组成的背斜核部或两翼,以小断裂为主,呈高角度压性逆冲断层,震中附近断层倾角最高达 85°(图 1)。断裂与褶皱紧密相伴,主要断裂往往伴随褶皱而发育,构造的延伸方向与褶皱线形迹一致^[12-13]。

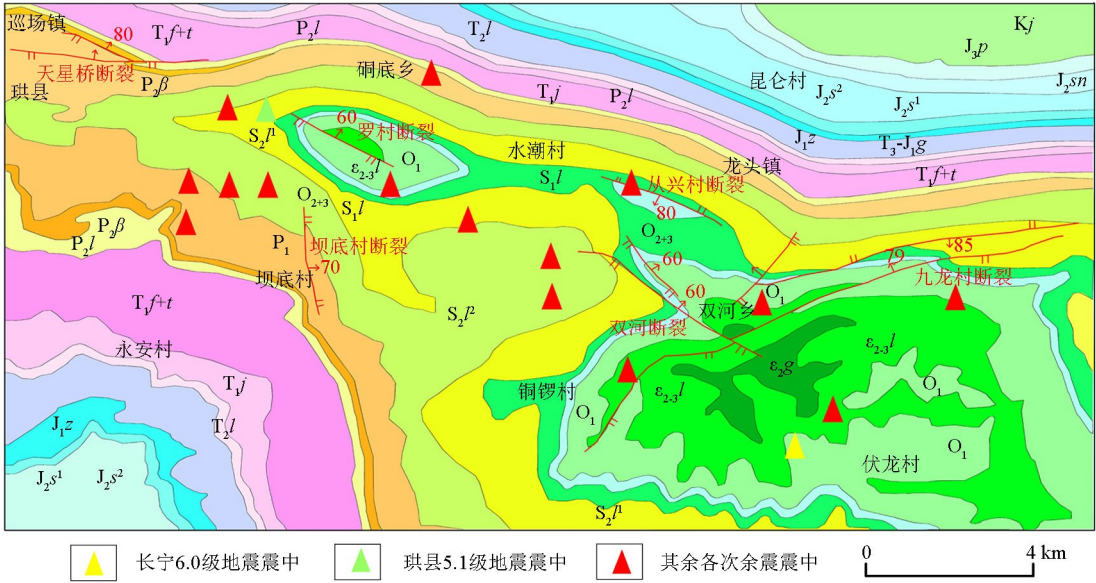


图 1 长宁地区区域地质图(地质底图来源于 91 卫图助手)

Fig. 1 Regional geological map of Changning area(the geological base map is derived from the assistant of 91 satellite map)

表 1 长宁地区地层系统

Table 1 Stratigraphic system table of Changning area

界	系	统	地层名称	符号	厚度/m	主要岩性
中生界	白垩系	下统	嘉定群	K _{1j}	200~587.5	长石石英砂岩
		上统	蓬莱镇组	J _{3p}	0~452.7	砂岩、钙质泥岩
	侏罗系	中统	遂宁组	J _{2sn}	192~1050	钙质泥岩夹长石石英砂岩
			下沙溪庙组	J _{2s¹}	380~915	砂岩、暗紫色泥岩
		上统	香溪群	T _{3~J_{1x}}	330.8~680	粉砂岩、石英砂岩
	三叠系	中统	雷口坡组	T _{2l}	0~336.5	泥质白云岩夹粉砂岩
		下统	嘉陵江组	T _{1j}	108.6~375.4	白云岩、灰岩
			飞仙关、铜街子组	T _{1f+t}	16~713	凝灰质页岩、含铜砂岩
古生界	二叠系	上统	乐平组	P _{2l}	0~338	砂岩、泥质页岩
		下统	峨眉山玄武岩	P _{2β}	0~1374	玄武岩、凝灰角砾岩、凝灰岩
	志留系	中统	未分组	P ₁	0~129	粉砂岩、灰岩
			罗惹坪组	S _{2l}	379.6~847.3	灰岩
		下统	龙马溪组	S _{1l}	20~388	砂质灰岩、页岩
	奥陶系	中、上统	未分组	O ₂₊₃	0~439	砂质页岩、灰岩
		下统	未分组	O ₁	21~386	页岩、灰岩
	寒武系	中统	娄山关群	ε _{2-3l}	316.5~364	白云质灰岩、白云岩
			高台组	ε _{2g}	>104	钙质粉砂岩

2 观测 S. D. 值数据可靠性分析

标准差在重力仪读数记录里用“S. D. ”表示,重力仪进行静态观测时,S. D. 值每秒钟更新一次。S. D. 值的计算是根据已采集到的观测重力值求取标准差,假设重力仪单点观测持续时间设置为 60 s,则重力仪记录的 S. D. 值为 60 s 内所有瞬时重力值读数记录的标准差。

为了保证重力仪读数的准确性和可重复性,当打开“Auto Rejection”选项时,大于 4~6 倍标准差的高频噪声将被自动拒绝。因此当激活震动滤波功能时,得到的重力观测值是滤波处理后的结果。在外业观测时,S. D. 指标主要用来衡量单点观测质量,当 S. D. 较小时,表示环境震动噪声处于较低水平,设置观测时间内的数值较接近平均值,观测质量合格;当 S. D. 较大时,表示环境震动噪声处于较高水平,观测时间内出现很多高频重力信号,数据质量不合格,需要重新观测。正是由于 S. D. 值包括了重力仪自身噪声和环境震动等重力高频干扰信号,它可以用来衡量信号噪声的大小。通过对比地震发生时重力仪在不同时刻记录的 S. D. 值,认为 S. D. 值可用于地震活动不确定性测量。

为了说明观测 S. D. 值数据可靠性,在珙县使用

两台 CG-5 重力仪在同一地点进行两次观测,重力仪 编号分别是40242#、41036#。两台CG-5重力仪在使用前均进行了格值标定及各项性能试验,重力仪的一致性试验精度为 $0.022\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,试验精度结果满足规范要求。

2019 年 7 月 22 日 16 时 26 分在四川宜宾市长宁县发生 4.1 级地震,震源深度 9 km,震中位于北纬 28.35°,东经 104.91°。两台 CG-5 重力仪布置在距离震中 25.5 km 的珙县进行静态数据采集,表 2 是发震时两台重力仪记录的不同时刻静态观测重力值数据和实时观测重力值数据的标准差值(S. D.),以及高频噪声舍弃数量(REJ)统计。

重力仪观测持续时间 DUR 值均为 60 s,为了对观测 S. D. 值数据可靠性进行分析,根据 Excel 软件中的 CORREL 函数计算两台重力仪观测 S. D. 值数据的相关系数为 0.999 949,说明两台重力仪的观测 S. D. 值数据具有较大的相关性。另外两台重力仪观测开始时间仅相差 1 s,从观测 S. D. 值的数值大小变化来分析,40242#重力仪相对 41036#重力仪在 16:26:53、16:28:13、16:29:33 三个不同时刻的相对变化率分别为 4.34%、1.51%、10.34%。说明利用 S. D. 值来分析地震活动性是可靠的。

2019 年 7 月 23 日 22 时 25 分在四川宜宾市长宁县发生3.0级地震,震源深度6km,震中位于北

表 2 长宁 4.1 级地震重力仪观测数据统计
Table 2 Statistical table of observation data of the gravimeter of M_s 4.1 earthquake in Changning

序号	观测日期	观测开始 时间	观测持续时间 DUR 值 /s	经固体潮和零漂改正 后的重力值 /($10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)	仪器记录S. D. /($10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)	舍弃数量 REJ 值/%	仪器号
1	2019/7/22	16:24:14	60	4845.002	0.02	9	41036#
2	2019/7/22	16:25:34	60	4845.001	0.019	19	
3	2019/7/22	16:26:54	60	4844.994	1.404	4	
4	2019/7/22	16:28:14	60	4844.999	0.199	1	
5	2019/7/22	16:29:34	60	4845.000	0.058	1	
6	2019/7/22	16:30:54	60	4845.002	0.035	9	
7	2019/7/22	16:32:14	60	4845.005	0.023	0	
8	2019/7/22	16:33:34	60	4845.003	0.016	4	
9	2019/7/22	16:34:54	60	4845.009	0.011	1	
10	2019/7/22	16:36:14	60	4845.007	0.01	3	
11	2019/7/22	16:24:13	60	4815.736	0.012	0	40242#
12	2019/7/22	16:25:33	60	4815.737	0.018	1	
13	2019/7/22	16:26:53	60	4815.728	1.343	1	
14	2019/7/22	16:28:13	60	4815.736	0.196	0	
15	2019/7/22	16:29:33	60	4815.736	0.052	1	
16	2019/7/22	16:30:53	60	4815.736	0.023	0	
17	2019/7/22	16:32:13	60	4815.738	0.019	0	
18	2019/7/22	16:33:33	60	4815.738	0.011	0	
19	2019/7/22	16:34:53	60	4815.739	0.01	0	
20	2019/7/22	16:36:13	60	4815.740	0.008	0	

纬 28. 38°,东经 104. 94°。两台 CG-5 重力仪布置在距离震中 30. 2 公里的珙县进行静态数据采集,表 3 是发震时两台重力仪记录的不同时刻静态观测重力值数据和实时观测重力值数据的标准差值以及高频噪声舍弃数量值统计表。重力仪观测持续时间 DUR 值均为 60 s,对两台重力仪的观测 S. D. 值数据进行了相关分析,相关系数为 0. 997 503,说明两台重力仪的观测 S. D. 值数据具有较大的相关性。表 3 观测 S. D. 值数据的相关系数小于表 2,这主要是由于表 3 两台重力仪的观测开始时间相差 20 s,即在各自的 60 s 观测时段内仅同步观测 40 s 所致。

表 2 的 S. D. 值变化幅值较表 3 大,最大达 $1. 404\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,两台重力仪发震时刻经固体潮和零漂改正后的相对重力值较发震前的变化量分别为 $-0. 007\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $-0. 009\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明观测时误差较大的高频重力数据已经被重力仪自带的滤波器过滤掉。表 3 的 S. D. 值变化幅值较小,发震时刻

经固体潮和零漂改正后的相对重力值较发震前的变化量分别为 $0. 020\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $0. 023\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明部分由小震动引起的小于 4 倍标准差的重力观测数据未被过滤掉。据表 2 和表 3 的舍弃数量(REJ) 值统计结果知,发震时刻大致与 REJ 极大值相对应,说明发震时的高频震动干扰最强。41036#仪器在同一时刻的 REJ 值均大于或等于 40242#仪器,且表 2 和表 3 中 41036#仪器 REJ 值在地震发生前有明显变化,而 40242#仪器 REJ 值在地震发生前无明显变化,说明 REJ 值与重力仪的弹簧弹性系数相关,从 REJ 值的统计结果知,41036#仪器对高频干扰噪声更敏感,弹簧灵敏度明显高于 40242#仪器,因此用于地震监测的重力仪应选择弹簧灵敏度较高的仪器。由于 REJ 值与重力仪自身的弹簧弹性系数相关,如需使用 REJ 值来预测地震,需针对单台重力仪的大量试验数据来选择合适的 REJ 值判断指标。

表 3 长宁 3. 0 级地震重力仪观测数据统计

Table 3 Statistical table of observation data of the gravimeter of M_s 3. 0 earthquake in Changning

序号	观测日期	观测开始 时间	观测持续时间 DUR 值 /s	经固体潮和零漂改正 后的重力值 /($10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	仪器记录S. D. /($10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	舍弃数量 REJ 值/%	仪器号
1	2019/7/23	22:19:42	60	4844. 925	0. 02	26	41036#
2	2019/7/23	22:21:02	60	4844. 931	0. 02	17	
3	2019/7/23	22:22:22	60	4844. 93	0. 014	14	
4	2019/7/23	22:23:42	60	4844. 932	0. 023	9	
5	2019/7/23	22:25:02	60	4844. 952	0. 384	29	
6	2019/7/23	22:26:22	60	4844. 934	0. 066	0	
7	2019/7/23	22:27:42	60	4844. 933	0. 017	0	
8	2019/7/23	22:29:02	60	4844. 933	0. 009	0	
9	2019/7/23	22:30:22	60	4844. 932	0. 014	8	
10	2019/7/23	22:31:42	60	4844. 935	0. 008	14	
11	2019/7/23	22:20:02	60	4815. 737	0. 013	0	40242#
12	2019/7/23	22:21:22	60	4815. 737	0. 01	2	
13	2019/7/23	22:22:42	60	4815. 736	0. 007	0	
14	2019/7/23	22:24:02	60	4815. 739	0. 01	2	
15	2019/7/23	22:25:22	60	4815. 762	0. 499	26	
16	2019/7/23	22:26:42	60	4815. 74	0. 048	0	
17	2019/7/23	22:28:02	60	4815. 738	0. 011	0	
18	2019/7/23	22:29:22	60	4815. 737	0. 008	0	
19	2019/7/23	22:30:42	60	4815. 738	0. 01	1	
20	2019/7/23	22:32:02	60	4815. 737	0. 011	4	

3 观测 S. D. 值与地震震级相关性研究

截止 2019 年 7 月 23 日,41036#重力仪共记录到 21 次地震,见图 2 和表 4。

表 4 是发震时重力仪记录静态观测数据统计表。在盐津县观测的 15 次记录中,当时震中距介于

60. 1~73. 2 km 时,为了研究地震震级与重力仪记录 S. D 值的关系,根据 Excel 软件中的 CORREL 函数计算了地震震级与对应 S. D 值的相关系数,计算得出相关系数为 0. 90,由于相关系数是研究变量之间线性相关程度的量,相关系数值越大,说明地震震级与 S. D 值之间线性相关程度越高。

在珙县观测的6次记录中,当震中距介于25. 5

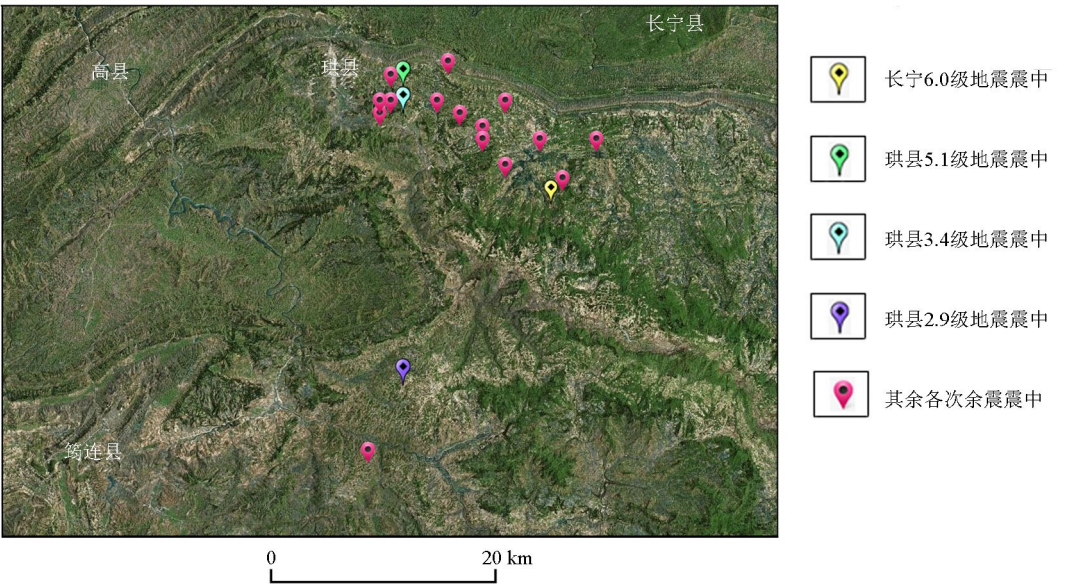


图 2 长宁地震震中分布位置与地形叠合

Fig. 2 The overlap map of topography and epicenter distribution of Changning earthquake

表 4 发震时刻重力仪记录观测数据统计

Table 4 Statistical table of observation data recorded by gravimeter at seismic moment

序号	震中经纬度	地震级数	震源深度 /km	仪器布设 地点	震中距 /km	重力仪记录时间	观测持续时间 DUR 值 /s	仪器记录 S. D. /(10 ⁻⁵ m · s ⁻²)	舍弃数量 REJ 值/%	震级与S. D. 的 相关系数
1	北纬 28.34°东经 104.90°	6	16	盐津县	72.9	06 月 17 日 22 时 55 分	60	23.066	10	0.90
2	北纬 28.43°东经 104.77°	5.1	16	盐津县	62.7	06 月 17 日 23 时 36 分	60	11.708	19	
3	北纬 28.41°东经 104.80°	2.9	9	盐津县	65.1	06 月 18 日 01 时 16 分	60	0.034	1	
4	北纬 28.36°东经 104.86°	4.4	12	盐津县	69.5	06 月 18 日 05 时 06 分	60	0.119	0	
5	北纬 28.40°东经 104.82°	3	10	盐津县	66.7	06 月 19 日 03 时 00 分	60	0.057	3	
6	北纬 28.38°东经 104.89°	3	8	盐津县	73.2	06 月 19 日 04 时 40 分	60	0.031	0	
7	北纬 28.41°东经 104.77°	3.4	8	盐津县	62.6	06 月 20 日 01 时 48 分	60	0.056	0	
8	北纬 28.39°东经 104.84°	3.1	7	盐津县	68.3	06 月 20 日 10 时 58 分	60	0.041	0	
9	北纬 28.41°东经 104.76°	3.2	5	盐津县	61.3	06 月 20 日 13 时 18 分	60	0.032	2	
10	北纬 28.41°东经 104.76°	3.1	14	盐津县	61.3	06 月 20 日 14 时 28 分	60	0.208	24	
11	北纬 28.40°东经 104.75°	3.4	15	盐津县	60.1	06 月 20 日 21 时 00 分	60	0.039	1	
12	北纬 28.41°东经 104.75°	3.7	9	盐津县	60.5	06 月 20 日 22 时 00 分	60	0.09	33	
13	北纬 28.44°东经 104.81°	3.2	10	盐津县	66.9	06 月 24 日 04 时 47 分	60	0.188	17	
14	北纬 28.43°东经 104.76°	3.4	8	盐津县	61.9	06 月 29 日 22 时 08 分	60	0.161	16	
15	北纬 28.44°东经 104.81°	3.1	8	盐津县	66.9	06 月 30 日 21 时 33 分	60	0.075	0	
16	北纬 28.41°东经 104.86°	3.2	4	珙县	30.8	07 月 08 日 00 时 38 分	60	0.141	5	0.94
17	北纬 28.38°东经 104.84°	3	8	珙县	27.1	07 月 22 日 16 时 18 分	60	0.298	25	
18	北纬 28.35°东经 104.91°	4.1	9	珙县	25.5	07 月 22 日 16 时 26 分	60	1.404	4	
19	北纬 28.38°东经 104.94°	3	6	珙县	30.2	07 月 23 日 22 时 25 分	60	0.384	29	
20	北纬 28.20°东经 104.77°	2.9	8	珙县	7.8	07 月 15 日 16 时 48 分	60	0.935	47	1
21	北纬 28.14°东经 104.74°	3.2	11	珙县	6.2	07 月 19 日 01 时 21 分	60	11.006	22	

~ 30.8km, 相关系数为0.94; 当震中距介于6.2~7.8 km, 相关系数为 1。需要指出的是, 相关系数有一个明显的缺点, 即当震中距介于 6.2~7.8 km, 仅有 7 月 15 日和 7 月 19 日两组统计样本数据, 相关系数的绝对值为 1, 因此在观测记录较少时, 仅凭相关系数较大就判定震级与重力仪记录 S. D 值之间

有密切的线性关系是不妥当的。通过以上相关分析认为, 当震中距介于 60.1~73.2 km、25.5~30.8 km 时, 地震震级与重力仪记录 S. D 值呈明显的正相关关系, 即在震中距相近的情况下, S. D 值越大, 地震震级越高。当震中距介于 6.2~7.8 km 时, 由于统计样本数据不足, 未能准确判定地震震级与重力仪

记录 S. D 值的相关关系。

表 4 的舍弃数量 (REJ) 值与震级和重力仪记录 S. D 值无明显的相关关系,这可能是由于当观测持续时间选择 60 s 时,REJ 值为 60 s 内的统计值,无法对瞬时高频干扰进行更精细的反映。REJ 值的突变显示了高频干扰的存在,在今后工作中,可以将观测持续时间选择为 30 s,来进一步统计分析 REJ 值与震级和重力仪记录 S. D 值的相关关系。

4 利用 S. D. 值进行地震预测可行性分析

2019 年 6 月 17 日 22 时 55 分在四川宜宾市长宁县发生 6.0 级地震,06 月 17 日 23 时 36 分在四川宜宾市珙县发生 5.1 级地震。从表 5 知,22 时 55 分重力仪记录 S. D. 值高达 $23.066 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,REJ 值为 10%。需注意的是,发震前十分钟即 22 时 45 分,S. D. 值仅为 $0.021 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,但 REJ 值却高达 19%,REJ 值的突变能否作为地震发生前兆的判断依据还需更多的试验记录来支撑。23 时 36 分珙县 5.1 级地震继长宁 6.0 级地震后爆发,S. D. 值突变为 $11.708 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,直到 06 月 18 日 00 时 06 分,S. D. 值降为 $0.013 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,表明该次地震活动已经平息。另外从观测重力值来分析,长宁县 6.0 级地震和珙县 5.1 级地震突然爆发引起的强烈震动,导致重力仪自带的地震滤波功能失效,观测重力值与地震爆发前观测值的差值分别为 $4.466 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $-0.055 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。23 时 46 分 S. D. 值为 $0.104 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,近似为平静场中观测值的 5 倍,但观测重力值与地震爆发前的观测值相差仅为 $-0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,可见重力仪自带的地震滤波功能已经滤掉了重力高频干扰信号。剔除发震时刻的畸变重力

数据,在云南省盐津县观测到的长宁县 6.0 级地震、珙县 5.1 级地震并未引起观测重力观测值的明显变化。直至 06 月 18 日 00 时 06 分 S. D. 值变为 $0.013 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明两次地震震动叠加在一起的持续活动时间约为 71 分钟。

在记录到的 21 次地震中,有 2 次在发震前重力仪记录 S. D. 值有明显突变。第 1 次是 2019 年 6 月 20 日 01 时 44 分在四川宜宾市珙县发生的 3.4 级地震(见图 3),在地震发生前的 01 时 38 分,S. D. 值变为 $0.043 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,该时刻经固体潮和零点位移改正后的静态观测重力值为 $4757.394 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。从表 5 知,S. D. 值与上一记录时刻相差 $0.024 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,重力值与上一记录时刻相差 $-0.002 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,重力值无明显变化,REJ 值也无变化。由于静态观测时设置的读数时间间隔是 10 min,未能记录到 01 时 27 分到 01 时 37 分之间的 S. D. 值,因此 S. D. 值可能在发震 6 min 之前就已发生突变。直至 02 时 18 分 S. D. 值变为 $0.015 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明此次地震活动从发震到停止用时约 34 min。

第 2 次是 2019 年 7 月 15 日 16 时 48 分在四川宜宾市珙县发生的 2.9 级地震。为了更详细地研究重力场和 S. D. 值随时间的变化规律,重力仪的读数时间间隔在盐津县观测时设置为 10 min,在珙县观测时间设置为 1 min。从图 4 知,在发震时刻 S. D. 值变为 $0.935 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,由于发震时刻 S. D. 值幅值变化太大,在图 4 中很难观测到发震前后 S. D. 值的微小变化。

图 5 中剔除了 16 时 48 分的 S. D. 值后,可以明显观测到,在地震发生前的 16 时 30 分和 16 时 32 分,S. D. 值发生了明显改变,其值分别为 $0.048 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $0.040 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,经固体潮和零点位移

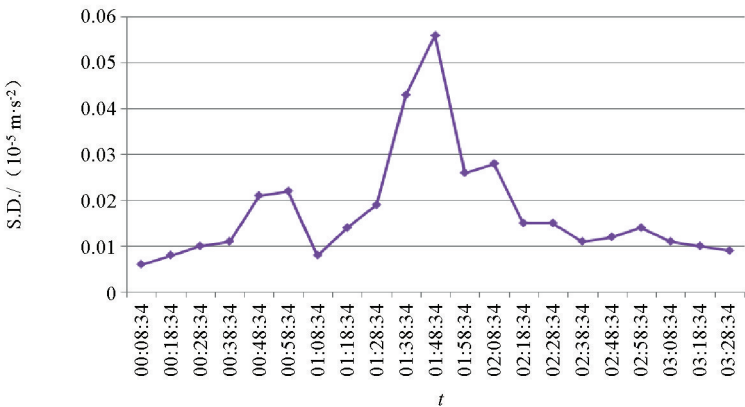


图 3 珙县 3.4 级地震标准差随时间变化

Fig. 3 The change of S. D. value over time in Gongxian M_s 3.4 earthquake

表 5 地震前后重力仪记录静态观测数据统计

Table 5 Statistical table of static observation data recorded by gravimeter before and after earthquake

序号	发震时间	震中经纬度	地震级数	震源深度/km	仪器布设地点	震中距/km	重力仪记录时间	观测持续时间 DUR 值/s	经固体潮和零漂改正后的重力值 $/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	仪器记录S. D. $/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	舍弃数量 REJ 值/%
1	06 月 17 日 22 时 55 分	北纬 28.34° 东经 104.90°	6	16	盐津县普洱镇	72.9	06 月 17 日 22 时 35 分	60	4756.949	0.018	0
							06 月 17 日 22 时 45 分	60	4756.953	0.021	19
							06 月 17 日 22 时 55 分	60	4761.419	23.066	10
							06 月 17 日 23 时 05 分	60	4756.951	0.766	0
							06 月 17 日 23 时 15 分	60	4756.948	0.155	0
							06 月 17 日 23 时 25 分	60	4756.952	0.038	2
2	06 月 17 日 23 时 36 分	北纬 28.43° 东经 104.77°	5.1	16	盐津县普洱镇	62.7	06 月 17 日 23 时 36 分	60	4756.897	11.708	19
							06 月 17 日 23 时 46 分	60	4756.951	0.104	0
							06 月 17 日 23 时 56 分	60	4756.953	0.024	26
							06 月 18 日 00 时 06 分	60	4756.951	0.013	0
3	06 月 20 日 01 时 44 分	北纬 28.41° 东经 104.77°	3.4	8	盐津县普洱镇	62.6	06 月 20 日 01 时 28 分	60	4757.396	0.019	0
							06 月 20 日 01 时 38 分	60	4757.394	0.043	0
							06 月 20 日 01 时 48 分	60	4757.391	0.056	0
							06 月 20 日 01 时 58 分	60	4757.39	0.026	0
							06 月 20 日 02 时 08 分	60	4757.391	0.028	0
							06 月 20 日 02 时 18 分	60	4757.389	0.015	0
4	07 月 15 日 16 时 48 分	北纬 28.20° 东经 104.77°	2.9	8	珙县上罗镇	7.8	07 月 15 日 16 时 29 分	60	4830.031	0.006	0
							07 月 15 日 16 时 30 分	60	4830.031	0.048	0
							07 月 15 日 16 时 32 分	60	4830.043	0.04	0
							07 月 15 日 16 时 33 分	60	4830.03	0.023	0
							07 月 15 日 16 时 34 分	60	4830.03	0.017	0
							07 月 15 日 16 时 36 分	60	4830.031	0.015	0
							07 月 15 日 16 时 37 分	60	4830.03	0.013	1
							07 月 15 日 16 时 38 分	60	4830.029	0.02	1
							07 月 15 日 16 时 40 分	60	4829.996	0.022	42
							07 月 15 日 16 时 41 分	60	4830.029	0.02	0
							07 月 15 日 16 时 42 分	60	4830.031	0.016	0
							07 月 15 日 16 时 44 分	60	4830.03	0.012	0
							07 月 15 日 16 时 45 分	60	4830.031	0.016	1
							07 月 15 日 16 时 46 分	60	4830.033	0.013	0
							07 月 15 日 16 时 48 分	60	4830.034	0.935	47
							07 月 15 日 16 时 49 分	60	4830.032	0.058	1
							07 月 15 日 16 时 50 分	60	4830.028	0.056	2
							07 月 15 日 16 时 52 分	60	4830.03	0.025	0
							07 月 15 日 16 时 53 分	60	4830.029	0.036	0
							07 月 15 日 16 时 54 分	60	4830.03	0.014	0

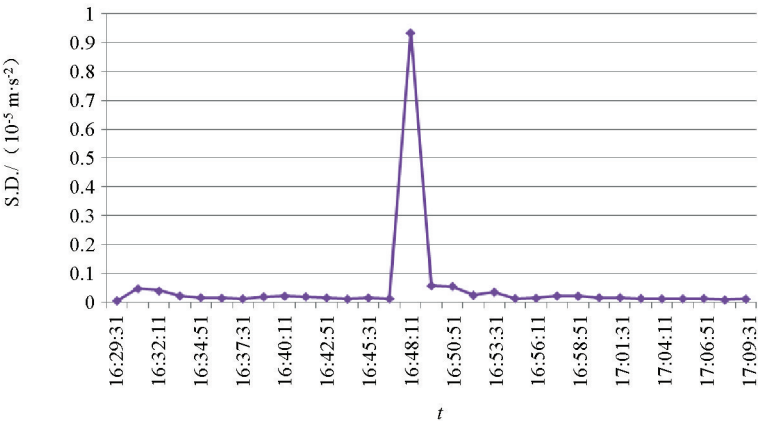


图 4 珙县 2.9 级地震标准差随时间变化

Fig. 4 The change of S. D. value over time in Gongxian M_s 2.9 earthquake

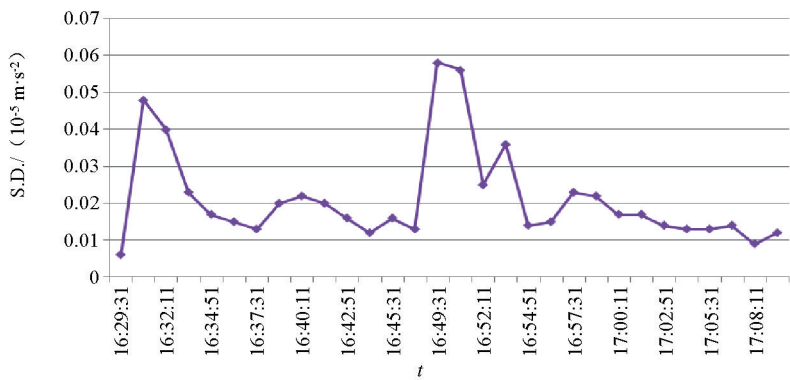


图5 珙县 2.9 级地震标准差随时间变化(剔除发震时刻 S. D. 突变点)
Fig.5 The change of S. D. value over time in Gongxian M_s 2.9 earthquake
(the mutation point of S. D. at the time of shock was removed)

改正后的静态观测重力值分别为 $4830.031 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $4830.043 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,重力值与上一记录时刻相差 $0.012 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明在此时刻由震动产生的部分高频重力异常未被重力仪自带的滤波器滤除掉。在 16 时 30 分,S. D. 值近似为平静场中观测值的 2.5 倍,即在发震前 18 min 重力仪已记录到 S. D. 值的突变。值得注意的是 16 时 40 分,即在发震前 8 min,S. D. 值仅为 $0.022 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,重力值与上一记录时刻相差 $-0.033 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,REJ 值高达 42%,根据重力值和 REJ 值的变化可对地震进行提前预报。在直至 16 时 54 分 S. D. 值变为 $0.014 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明此次地震活动从发震到停止用时约 6 min。

通过以上实际记录 S. D. 值数据分析认为,在某些特定条件下,根据 S. D. 值的突变并结合重力值和 REJ 值的变化来提前预报地震是可行的。

5 结论与建议

通过对地震发生时重力仪在不同时刻记录 S. D. 值和 REJ 值的分析,认为 S. D. 值结合 REJ 值可用于地震活动不确定性测量。首先,对两台重力仪两次实测 S. D. 值数据进行了相关分析,相关系数为 0.99,说明两台重力仪的观测 S. D. 值数据具有较大的相关性,利用 S. D. 值来分析地震活动性是可靠的。然后,通过对地震震级与发震时刻重力仪记录 S. D 值的分析,认为当震中距介于 60.1~73.2 km,25.5~30.8 km 时,地震震级与重力仪记录 S. D 值呈正相关关系。REJ 值与重力仪自身的弹簧弹性系数相关,如需使用 REJ 值来预测地震,需针对单台重力仪的大量试验数据来选择合适的 REJ 值判断指标。最后,在记录到的 21 次地震中,有 2 次在发震前

重力仪记录 S. D 值有明显突变,S. D. 值近似为平静场中观测值的 2 倍;有 1 次在发震前 8 min,观测到 REJ 值的突变。因此在某些特定条件下,根据 S. D. 值的突变并结合重力值和 REJ 值的变化来预报地震和研究单次地震从发震到结束的持续时间是可行的。

本次长宁 6.0 级地震,在地震波到达之前未能观测到有效的重力异常变化信号,地震前后未观测到明显的重力值变化。这可能是由于本次地震未引起地下地质体空间分布形态的较大改变且测站距离震中距离较远所致。在盐津县观测时,重力仪观测时间间隔设置为 10 min,数据采集密度不够,未能在地震发生前记录到 S. D. 值的突变,但在发震前 10 min 记录到 REJ 值的突变。在以后的工作中,重力仪观测时间间隔设置为 30~60 s,可以观测到有效的重力值和 S. D. 值,从而进一步研究地震活动不确定性规律。另外在震区进行小震中距重力静态观测时,地震震级与重力仪记录 S. D. 值是否也呈正相关关系,在进一步分析中是否要加入震源深度作为约束?这需要通过更多的采样数据来证实。

参考文献 (References):

[1] 肖凡,何志堂,张宏伟,等. CG-5 型相对重力仪测量精度分析[J]. 测绘技术装备,2011,13(2):6-8.
Xiao F,He Z T,Zhang H W,et al. Accuracy analysis of cg-5 relative gravimeter[J]. Surveying and Mapping Equipment,2011,13(2):6-8.
[2] 曹金国,李永明,王存军,等. CG-5 重力仪传感器信号应用解析[J]. 北京测绘,2018,32(1):62-65.
Cao J G,Li Y M,Wang C J,et al. The application analysis of CG-5 gravimeter sensor signal[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018,32(1):62-65.
[3] 吴云成,李子涛,石作亭,等. 朝阳 4.9 级地震前后重力变化[J]. 东北地震研究,1995,12(4):48-53.
Wu Y C,Li Z T,Shi Z T,et al. Gravity variation bdfore and after

- Chaoyang M_s 4.9 earthquake [J]. Seismological Research of Northeast China, 1995, 12(4): 48–53.
- [4] 王武星, 马丽, 黄建平. 强地震前后重力观测中异常变化现象的研究[J]. 地震, 2007, 27(4): 53–63.
- Wang W X, Ma L, Huang J P. Analysis of anomaly in gravity observation before and after strong earthquakes[J]. Earthquake, 2007, 27(4): 53–63.
- [5] 车兆宏, 谢觉民, 张晶, 等. 张北 6.2 级地震地形变前兆演化特征[J]. 地震, 1999, 19(4): 315–322.
- Che Z H, Xie J M, Zhang J, et al. Precursory evolution characteristics of ground deformation before Zhangbei M_s 6.2 earthquake[J]. Earthquake, 1999, 19(4): 315–322.
- [6] 祝意青, 梁伟锋, 刘练. 北祁连河西地区流动重力监测与地震预测[J]. 地震地磁观测与研究, 2002, 23(1): 39–44.
- Zhu Y Q, Liang W F, Liu L. The mobile gravity surveillance and earthquake prediction in the northern Qilian-Hexi area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2002, 23(1): 39–44.
- [7] 祝意青, 胡斌, 李辉, 等. 新疆地区重力变化与伽师 6.8 级地震[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 66–69.
- Zhu Y Q, Hu B, Li H, et al. Variation of gravity field of Xinjiang area and Jiashi M_s 6.8 earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 66–69.
- [8] 祝意青, 胡斌, 张永志. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(1): 71–77.
- Zhu Y Q, Hu B, Zhang Y Z. Study of the dynamic pattern characteristics of gravity field around Yongdeng earthquake M_s 5.8[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1999, 19(1): 71–77.
- [9] 祝意青, 陈兵, 张希, 等. 景泰 5.9 级地震前后的重力变化研究[J]. 中国地震, 2001, 17(4): 356–363.
- Zhu Y Q, Chen B, Zhang X, et al. Gravity variation research before and after Jingtai M_s 5.9 earthquake [J]. Earthquake Research in China, 2001, 17(4): 356–363.
- [10] 祝意青, 梁伟锋, 徐云马, 等. 汶川 M_s 8.0 地震前后的重力场动态变化[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 633–640.
- Zhu Y Q, Liang W F, Xu Y M, et al. Dynamic variation of gravity field before and after Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(6): 633–640.
- [11] 梁伟锋, 赵云峰, 徐云马, 等. 河西地区重力变化与 2013 年门源 M_s 5.1 地震研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 1008–1013.
- Liang W F, Zhao Y F, Xu Y M, et al. Study on the gravity variation in Hexi area and the Menyuan M_s 5.1 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 1008–1013.
- [12] 蔡一川, 王宇航. 四川长宁地区宽频带数字近震记录特征[J]. 四川地震, 2015, 154(1): 1–5.
- Cai Y C, Wang Y H. The broadband digitalized recorded characteristic of near earthquakes in Changning area [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2015, 154(1): 1–5.
- [13] 阮祥, 程万正, 张永久, 等. 四川长宁盐矿井注水诱发地震研究[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 226–234.
- Ruan X, Cheng W Z, Zhang Y J, et al. Research of earthquakes induced by water injections in salt mines in Changning, Sichuan [J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(3): 226–234.

A study of seismic activity of Changning M_s 6.0 earthquake based on standard deviation of gravity

CHEN Ting¹, YAN Di¹, YANG Jian², LIAO Guo-Zhong², WU Bin¹, RAN Zhong-Yu¹

(1. Geophysical Prospecting Party of SBGMR, Chengdu 610072, China; 2. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610082, China)

Abstract: Through an analysis of the static observation data of gravity, the standard deviation (S. D.) and the rejection (REJ) of real-time observation data of gravimeter before and after the M_s 6.0 earthquake in Changning, the authors hold that the change of gravity value detected during vibration is usually the mistaken reading of gravimeter caused by the failure of vibration filtering function of gravimeter. In this earthquake of M_s 6.0, no effective signal of gravity anomaly was observed before the arrival of seismic wave, and this is because high-frequency noise greater than 4 to 6 standard deviations is automatically rejected when the gravimeter vibration filtering function is turned on, transient changes in the gravitational field are not reflected in static gravity observations, but can be reflected by the S. D. indicator. Since the value of S. D. includes high frequency interference signals such as gravimeter's own noise and environment vibration, it can be used to measure the size of signal noise. By analyzing the correlation between the S. D. value recorded by gravimeter and the earthquake magnitude in different time spans when the earthquake occurs, it is concluded that the earthquake magnitude and the S. D. value recorded by gravimeter have a significant positive correlation. Among the 21 earthquakes recorded, 2 had significant changes in S. D values recorded by gravimeters prior to the earthquake and a sudden change of REJ value was observed 8 minutes before the earthquake. It can therefore be held that the earthquake can be predicted in advance and the duration of single earthquake activity can be judged according to the sudden change of S. D. value, the change of gravity value and the REJ value.

Key words: Changning earthquake; standard deviation; gravity anomaly; earthquake prediction

(本文编辑:王萌)