

2013 年肃南—门源交界 $M_s5.1$ 地震重新定位、震源机制及发震构造研究^①

姚家骏^{1,2}

(1.中国地震局地球物理勘探中心,河南 郑州 450000; 2.青海省地震局,青海 西宁 810001)

摘要:针对 2013 年 9 月 20 日甘肃肃南—青海门源交界发生的 $M_s5.1$ 地震,采用 Hypo2000 定位方法对地震序列中 $M_L \geq 1.0$ 的事件进行重新定位。重定位后震源位置的水平和垂直方向平均误差分别为 1.87 km 和 3.64 km,走时残差为 0.51 s,余震沿冷龙岭断裂的走向分布,长约 20 km,宽约 2.5 km;横向剖面显示震源深度集中在 3~10 km,纵向剖面显示出一个约 30°倾角的破裂面。采用 CAP 方法得到了 $M_s5.1$ 主震的震源机制解,节面 I 走向 360°,倾角 68°,滑动角 117°;节面 II 走向 126°,倾角为 34°,滑动角 42°,矩震级 $M_w5.05$,最佳震源矩心深度 10 km。

关键词: 肃南—门源交界地震; Hypo 2000; CAP 方法; 冷龙岭断裂

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1077-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1077

Relocation of 2013 Sunan—Menyuan $M_s5.1$ Earthquake and Analysis of Focal Mechanisms and Seismogenic Structure

YAO Jia-jun^{1,2}

(1.The Geophysical Exploration Center of CEA,Zhengzhou 450000,Henan,China;

2.Earthquake Administration of Qinghai Province,Xining 810000,Qinghai,China)

Abstract: On September 20, 2013, an earthquake of $M_s5.1$ occurred in the Sunan—Menyuan boundary region. Using the data recorded by Gansu and Qinghai Digital Seismic Networks, we relocated the $M_L \geq 1.0$ events in the earthquake sequence using the Hypo2000 location algorithm. After relocation, the vertical and horizontal average errors were found to be 1.87 km and 3.64 km, respectively, and the root mean square residual error of travel time is 0.51 s. The results show that the mainshock occurred at the northern foot of Gangshiga, the main peak of Lenglongling, and the aftershocks are primarily distributed along the Lenglongling fault zone, with a length and width of approximately 20 km and 2.5 km, respectively. The transverse section exhibits its focal depth focus in 3~10 km, and longitudinal section shows a fracture plane that dips toward the northeast and the dip angle is approximately 30°. The focal mechanism solution of the mainshock is also determined using the cut and paste (CAP) method. The results show that the best double couple solutions of the event and the other nodal plane are 360°, 68°, and 117° and 126°, 34°, and 42°, respectively, for strike, dip, and rake angles. Further, the moment magnitude is $M_w5.05$, and the best centroid depth is 10 km.

Key words: Sunan—Menyuan earthquake; Hypo2000; CAP method; Lenglongling fault zone

① 收稿日期:2014-11-21

基金项目:地震科技星火计划(XH14050Y);2015 年震情跟踪定向工作任务(2015010119)

作者简介:姚家骏(1981—),男,助理研究员,河南泌阳人,现主要从事地震资料处理工作。E-mail:qhyaojiajun@163.com。

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2013 年 9 月 20 日 5 时 37 分在甘肃省张掖市肃南裕固族自治县和青海省海北藏族自治州门源回族自治县交界(37.7° N,101.5° E)发生 $M_s5.1$ 地震。截止 2014 年 2 月 28 日震源区共发生 $M_L1.0$ 以上余震 42 次,其中 $M_L1.0\sim1.9$ 32 次, $M_L2.0\sim2.9$ 8 次, $M_L3.0\sim3.9$ 2 次,无 $M_L4.0$ 以上的余震。

震中位于青藏高原东北缘祁连山东中段的托莱山断裂与冷龙岭断裂交汇处。祁连山东中段作为青藏高原东北缘的边界带,是我国构造活动和地震活动最强烈的地区之一,存在一系列全新世活动断裂,如海原断裂、古浪断裂、老虎山断裂、毛毛山—金强河活动断裂、冷龙岭断裂、托莱山断裂等,曾发生 1927 年古浪 8.0 级、1986 年门源 6.4 级、1990 年景泰—天祝 6.2 级等地震^[1]。2008 年汶川 8.0 级地震以来,中国大陆西部发生多次强烈地震,祁连山东中段的地震危险性受到高度重视^[2-4]。2013 年 7 月 20 日甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震打破了青藏高原东北缘自 2003 年甘肃民乐—山丹 6.1 级地震以来 6 级地震的平静状态,有可能预示着青藏高原东北缘进

入新一轮的地震活跃时期^[5]。在此背景下,岷县漳县地震发生约两个月后,祁连山东中段即发生了本次 $M_s5.1$ 地震,引起了不少关注(据 2014 年度甘肃省地震趋势会商会)。因此有必要深入研究本次地震的余震分布、震源机制及构造背景等特征,全面认识该地震特征。

本文利用甘青两省数字地震台网的观测数据,采用 Hypo2000 定位方法对本次地震部分余震进行重新定位;采用 CAP 方法反演 2013 年 9 月 20 日肃南、门源交界 $M_s5.1$ 主震的震源机制解,在此基础上,对本次地震的发震构造及其与 1986 年门源 6.4 级地震的关系进行讨论。

1 地震序列的重新定位

1.1 台站分布及观测数据

本次地震震中 200 km 范围内有 21 个地震台站,对震区形成了良好的方位覆盖(图 1)。为了检查震相数据的可靠性,绘制了 Pg 和 Sg 的震相走时曲线(图 2)。图中清晰地区分出了 Pg、Sg 震相走时曲线,震相走时离散度较小,可认为原始震相观测报告的可靠性较高。利用震相观测数据,本研究选择 $M_s5.1$ 地震序列 $M_L\geq1.0$ 的事件进行重定位。

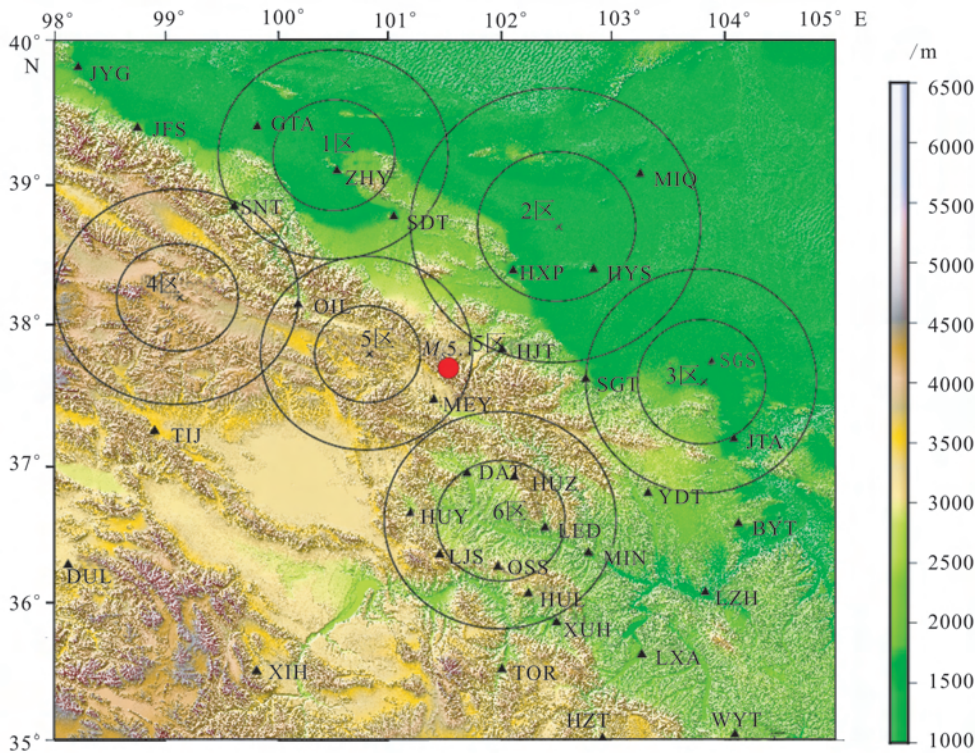


图 1 震中附近台站及地壳模型分区示意图
Fig.1 Distribution of stations near the epicenter and Division plot for crustal models

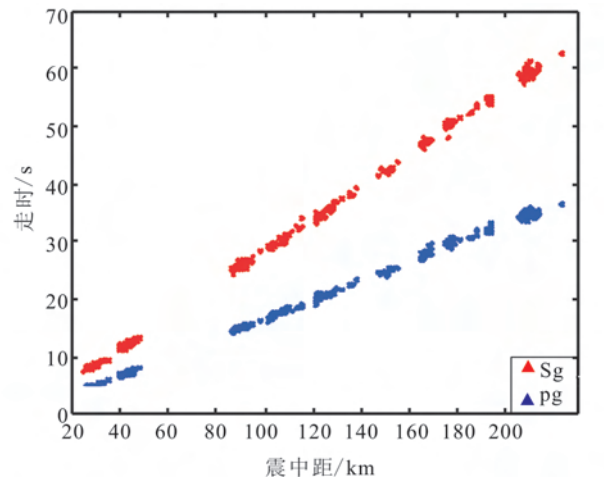


图 2 Pg 和 Sg 的震相走时曲线
Fig.1 The travel time curves of Pg and Sg

1.2 定位方法及地壳模型

震源区位于青藏高原与黄土高原的过渡地带，地壳结构横向差异较大。基于此，本文采用 Hypo2000 定位方法对本次地震的主震及余震进行重新定位。该方法是 F W Klein 在 Geiger 法的思想上发展起来的一种单事件绝对定位方法^[6]，其最大优点是考虑到地下结构比较复杂的状况，可以采用多速度模型，更符合地壳结构横向不均匀的地区^[7-9]。

表 1 Hypo2000 定位使用的速度分区表
Table 1 Velocity partition used by Hypo2000

序号	区带中心/(°)	主区半径/km	过渡区半径/km	地壳模型
1	100.50, 39.20	45	45	mode 1
2	102.50, 38.70	60	50	mode 2
3	103.80, 37.60	50	40	mode 3
4	099.10, 38.20	45	45	mode 4
5	100.80, 37.80	40	40	mode 5
6	102.00, 36.60	50	40	mode 6

Crust 1.0 是一个常用的地壳模型。模型中的地形数据来自美国国家海洋和大气的管理局(NO-AA)的 etopo1 数据，在全球尺度上提供了 $1^{\circ}\times1^{\circ}$ 分辨率的地壳速度结构，其分辨精度与结果比较可靠。考虑到目前青海北部地壳结构的相关研究比较薄弱，本研究选用 Crust 1.0 模型进行地震重新定位及震源机制解反演。根据震源区两侧河西走廊以及青藏高原内部地壳结构的差异，在震中附近设置 6 个区域结构模型(图 1)，每个区域采用 Crust1.0 模型提供的地壳速度模型。表 1 是图 1 中每个分区节点号所对应的参数，Mode 1~Mode 6 是利用 Crust1.0 模型提供的地壳速度模型，由于篇幅限制，不在文中

一一列出。

1.3 定位结果

依据上述的速度模型，采用 Hypo2000 地震定位法，得到 39 个 $M_{\text{L}}1.0$ 以上地震的重新定位结果。重定位后，震源位置的水平和垂直方向平均误差分别为 1.87 km 和 3.64 km，走时残差为 0.51 s。根据定位后震中空间分布特征(图 3)，本次地震序列主要分布在门源盆地北边冷龙岭断裂西端硫磺沟大拐弯处^①，余震沿冷龙岭断裂走向分布，长度约 20 km，宽约 3 km；主震在冷龙岭主峰岗什尕北麓， $M_{\text{L}}\geq2.0$ 余震主要集中主震附近及其西北侧，东南侧主要是 $M_{\text{L}}<2.0$ 小震。

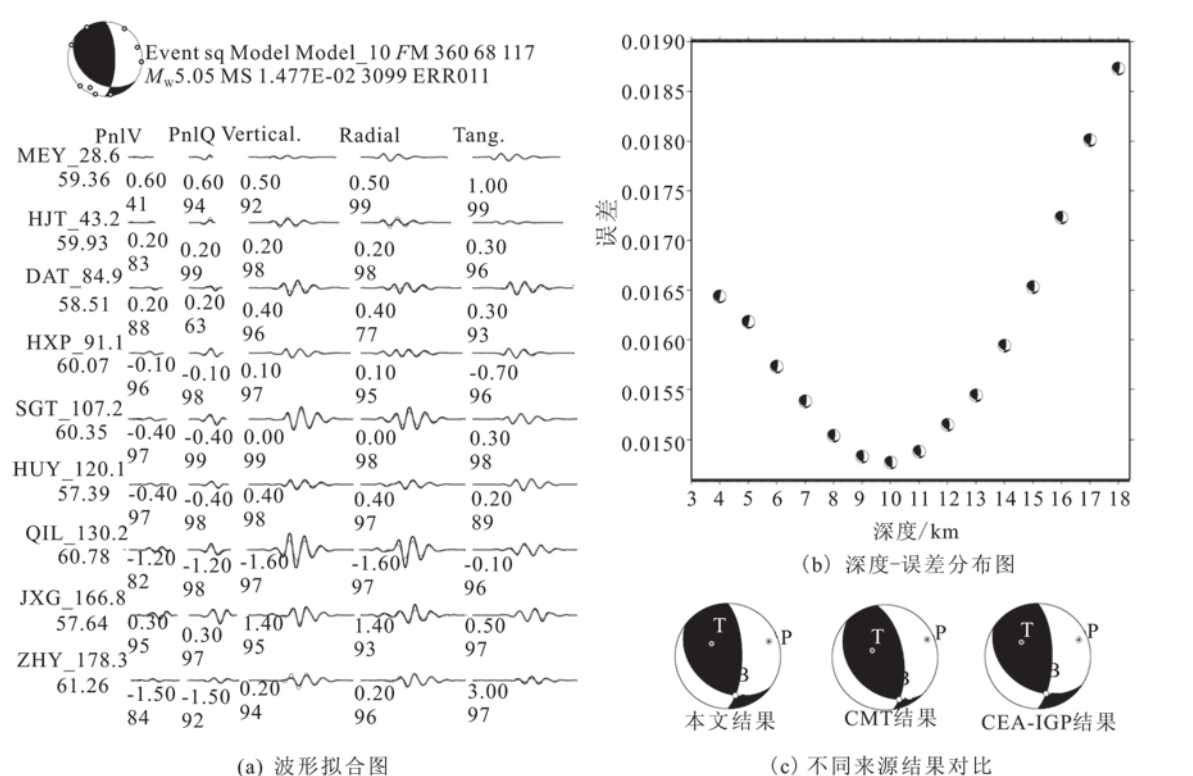
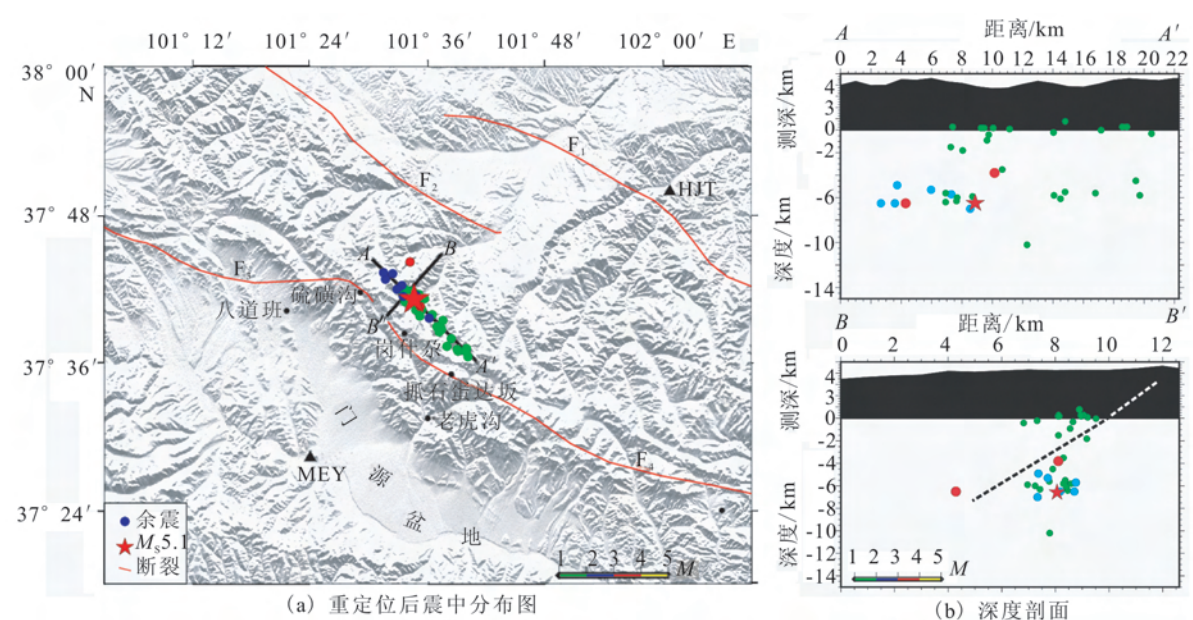
沿空间分布的横向与纵向拉剖面 AA'、BB'，观察震源深度沿剖面的分布情况(图 3)，由于该区海拔较高，本文考虑了地形影响因素。横向剖面 AA' 显示地震在地面以下 3~10 km 处均有分布；根据纵向剖面 BB' 地震深度分布的不同，可勾勒出一个倾角约 30° 的破裂面。

2 门源 $M_{\text{s}}5.1$ 震源机制解

地震学家近年来发展了 CAP(Cut and Paste)方法反演震源机制^[10-11]。该方法将宽频带地震记录分成 Pnl 和面波两个部分进行反演，其反演结果对速度模型和地壳横向变化的依赖性相对较小，具有较高的可靠性，同时可减小对台站数量和方位角分布的要求^[12-13]。本文利用震中周边台站的宽频带波形资料反演本次地震的震源机制解。

图 4(a)为门源 $M_{\text{s}}5.1$ 主震震源机制解及波形拟合图，灰色虚线表示理论地震图，黑线表示实际观测地震，其下的数字分别表示理论地震图相对观测地震图的相对移动时间和二者的相关系数，波形左侧的文字分别为震中距、台站名、方位角。图 4(b)为反演误差随深度变化，不同深度下搜索的震源机制解所对应的误差。由图可以看出当深度为 10 km 时误差最小，此深度以及对应的震源机制解即为所求的解。其中，节面 I 走向 360° ，倾角 68° ，滑动角 117° ；节面 II 走向 126° ，倾角为 34° ，滑动角 42° ，矩震级 $M_{\text{w}}5.05$ 。对比中国地震局地球物理研究所(CEA-IGP)、哈佛矩心矩张量解(CMT)等国内外研究机构给出的本次 $M_{\text{s}}5.1$ 主震震源机制解参数[图 4(c)、表 2]，本文所得结果与其都比较接近，反映本

① 地名主要引自陈文彬博士论文《河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析》



文反演结果是比较可靠的。

4 结论

采用 Hypo2000 定位方法对 2013 年 9 月 20 日

甘肃肃南—青海门源交界 $M_S5.1$ 地震序列进行重新定位,得到 39 个 $M_L \geq 1.0$ 地震定位结果。定位后,震中清晰地分布在冷龙岭断裂老虎沟东岔口—硫磺沟段,西起冷龙岭断裂西端硫磺沟大拐弯处,东

表 2 不同研究机构得到的震源机制解参数

Table 2 Focal mechanism solution parameters from different source

结果来源	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		B 轴 / (°)	
	走向	滑动	倾角	走向	滑动	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角
CMT	351	109	61	135	59	34	67	14	299	68	162	17
CEA-IGP	360	120	68	123	39	37	68	18	310	56	168	28
本文	360	117	68	126	42	34	70	19	307	58	169	25

经岗什尕、抓石蛋达坂至老虎沟东岔口附近,长度约 20 km;纵向深度剖面显示出一个倾角约 30°、向 NE 向倾斜的破裂面。

采用 CAP 方法反演了 $M_s5.1$ 地震的震源机制解,节面 I 走向 360°,倾角 68°,滑动角 117°;节面 II 走向 126°,倾角为 34°,滑动角 42°,矩震级 $M_w5.05$,为逆冲兼走滑型地震。震前的 GPS 资料显示出青藏高原东北缘托莱山—冷龙岭断裂现今滑动性质为走滑兼挤压,且已存在一定量的应变积累^[14],本次逆冲型地震反映了托莱山—冷龙岭断层现今滑动性质。

由于震源区海拔高,终年积雪,缺乏最新的地质构造研究资料,地震现场工作队的考察报告也不完善,冷龙岭主峰岗什尕附近断裂构造的更详细特征,还需要更多的研究。

致谢:本研究使用了青海省地震局、甘肃省地震局提供的观测数据,写作过程中得到了中国科学院测量与地球物理研究所有关专家的指导,文中图件用 GMT 软件绘制,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References)

[1] 刘百麓,李清河,刘小凤,等.祁连山活动地块东北部活动构造的定量研究与大地震危险性分析[J].西北地震学报,2000,22(2):187-190.
LIU Bai-chi, LI Qing-he, LIU Xiao-feng, et al. Seismic Risk Evaluation and Quantitative Study of Active in Focal Monitoring Area on Mid-east Segment of Qilian Mountains[J].North-western Seismological Journal, 2000,22(2):187-190. (in Chinese)

[2] 张希,王双绪,张晓亮,等.昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响[J].地球学报,2010,31(1):32-42.
ZHANG Xi, WANG Shuang-xu, ZHANG Xiao-liang, et al. The Influence of the Kunlun Mountains and Wenchuan Strong Earthquakes on the Crustal Movement and Strain Accumulation in the Northeastern Margin of Qinghai—Xizang Block[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010,31(1):32-42. (in Chinese)

[3] 邵志刚,张浪平. 南北地震带北段近期强震趋势研究[J].中国地震,2013,29(1):26-36.
SHAO Zhi-gang, ZHANG Lang-ping. Study of Strong Earth-

quake Recent Trends on the Northern Segment of North—South Seismic Belt[J].Earthquake Research in China,2013,29(1):26-36. (in Chinese)

[4] 梅秀苹,邵志刚,张浪平,等.南北地震带北段强震破裂空段的地震危险性研究[J].地震学报,2012,34(4):509-525.
MEI Xiu-ping, SHAO Zhi-gang, ZHANG Lang-ping, et al. Study on Potential Earthquake Risk of Unbroken Active Faults in the Northern Segment of the North—South Seismic Zone [J].Acta Seismologica Sinica, 2012,34(4):509-525. (in Chinese)

[5] 姚家骏,王慧娟,冯建刚,等.青藏高原东北缘 $M_s\geq6.0$ 强震活动特征及未来形势研究[J].地震工程学报,2013,35(4):737-742.
YAO Jia-jun, WANG Hui-juan, FENG Jian-gang, et al. The Activity and Trends of $M_s\geq6.0$ Earthquakes at the Northeastern Margin of the Qinghai—Tibetan Plateau[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):737-742. (in Chinese)

[6] F W Klein. User’s guide to Hypoinverse-2000: A Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes[R]. U S G S, 2007.

[7] 宋美琴,郑勇,葛黎,等.山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J].地球物理学报,2012,55(2):513-525.
SONG Mei-qin, ZHENG Yong, GE Can, et al. Relocation of Small to Moderate Earthquakes in Shanxi Province and Its Relation to the Seismogenic Structures[J].Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(2):513-525. (in Chinese)

[8] 刘巧霞,杨卓欣,莘海亮,等.玉树 $M_s7.1$ 地震部分余震重新定位及发震构造分析[J].地球物理学报,2012,55(1):146-154.
LIU Qiao-xia, YANG Zhuo-xin, XIN Hai-liang, et al. Relocation of Yushu $M_s7.1$ Earthquake Aftershocks and Discussion on Seismogenic Structure[J].Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(1):146-154. (in Chinese)

[9] 冯建刚,蒋长胜,韩立波.1970 年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J].西北地震学报,2012,34(3):289-293.
FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo. Collection and Reestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Network since 1970 and Earthquake Relocation [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012,34(3):289-293. (in Chinese)

[10] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broad-band Regional Seismograms[J].Bull Seis Soc Amer,1994,84(1):91-104.

对于短期出现的干扰信号的排除,有待进一步研究,但至少目前我们可以根据地震同震响应、台风报道和天气情况等加以识别。

4 结 论

(1) 用秒采样重力观测资料研究台风引起的地脉动信号的强度和卓越频率随时间的变化规律时,以 1 小时为时间窗的数据长度满足傅里叶变换频率分辨率要求。

(2) 福建省三个连续重力观测台站都记录到台风由近及远时信号强度由强变弱的过程,且台风登陆时迅速减弱,这与实际情况相符;离台风路径近的台站记录的信号卓越频率高,这可能与信号传播路径和介质性质有关,距离近,则高频衰减少。

(3) 台风卓越周期与台风强度和台风移动速度的关系比较复杂,但较为稳定,在 3.7 s 左右。

(4) 沿海连续重力观测受到干扰可分为长期存在干扰和短期出现干扰两大类,卡尔曼滤波能较好地滤除长期存在的、比较有规律的干扰成分。正常情况下滤波结果几乎是一条直线。

参考文献(References)

[1] 金星,康兰池.利用宽频带速度记录的频域特征研究台风[J].自然灾害学报,2007,16(4):27-35.
JIN Xing, KANG Lan-chi. Research on Typhoon Using Frequency Character of Broadband Velocity Record[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(4): 27-35. (in Chinese)

[2] 钟继茂.福建省连续重力观测资料分析[J].大地测量与地球动力学,2013,33(增刊 I):53-56.
ZHONG Ji-mao. Analysis on Fujian Continuous Gravity Observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(Suppl I): 53-56. (in Chinese)

[3] 郭明瑞,郭昱琴,胡久常,等.琼中地震台重力仪记录同震响应特征分析[J].地震工程学报,2013,35(3):698-701.
GUO Ming-rui, GUO Yu-qin, HU Jiu-chang, et al. Analysis of the Characteristics of the Coseismic Response of the Gravity Instrument at the Qiongzong Seismostation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 698-701. (in Chinese)

[4] 罗军辉,罗勇江,白义臣,等. MATLAB7.0 在数字信号处理中的应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
LUO Jun-hui, LUO Yong-jiang, BAI Yi-chen, et al. Application of MATLAB7.0 to Digital Signal Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

[5] <http://www.weather.com.cn/>

(上接 1081 页)

[11] Zhu L P, Heimberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seis Soc Am, 1996, 86(5): 1634-1641.

[12] 龙锋,张永久,闻学泽,等.2008 年 8 月 30 日攀枝花—会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解[J].地球物理学报, 2010, 53(12): 2852-2860.
LONG Feng, ZHANG Yong-jiu, WEN Xue-ze, et al. Focal Mechanism Solutions of $M_L \geq 4.0$ Events in the $M_S 6.1$ Pan-zhihua—Huili Earthquake Sequence of Aug 30, 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 2852-2860. (in Chinese)

[13] 吕坚,郑勇,马玉虎,等.2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M_S 4.7$ 、

$M_S 7.1$ 、 $M_S 6.3$ 地震震源机制解与发震构造研究[J].地球物理学进展, 2011, 26(5): 1600-1606.
LV Jian, ZHENG Yong, MA Yu-hu, et al. Focal Mechanisms and Seismogenic Structures of the $M_S 4.7$, $M_S 7.1$ and $M_S 6.3$ Yushu Earthquakes of April 14, 2010[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(5): 1600-1606. (in Chinese)

[14] 李强,江在森,武艳强.海原—六盘山断裂带现今构造变形特征[J].大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 18-22.
LI Qiang, JIANG Zai-sen, WU Yan-qiang. Present-day Tectonic Deformation Characteristics of Haiyuan—Liupanshan Fault Zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2): 18-22. (in Chinese)