



云南地区形变观测资料短临异常指标提取

邵德盛¹ 洪 敏¹ 张 勇¹ 王伶俐¹ 钱晓东¹

1 云南省地震局,云南 昆明, 650225

摘要:提出了面应变综合预测指标法,目的是将全球卫星定位系统(global position system, GPS)观测结果应用于地震短临预测。基于云南省 GPS 连续观测资料,利用 GPS 高精度数据处理软件(GAMIT/GLOBK)处理后获得位移场。对位移场进行网格化插值获得均匀分布于 56 个网格的位移场,基于每个网格位移场时间序列求取其面应变时间序列,并对每个网格面应变时间序列的映震能力进行评价、综合,提取出适合于云南地区的地震短临异常识别指标。实践表明,综合预测指标对云南地区 2011 年以来发生的 20 次 5 级以上地震进行 3 个月短临预测,其中准确预测次数为 19 次,漏报数为 1 次,虚报 5 次,认为该指标对地震发震时间、震中均具有较好的指示意义,可用于云南地区未来的地震短临预测实践。

关键词:GPS 数据异常分析; 短临预测; 应变信息综合; 异常指标

中图法分类号:P227; P315 文献标志码:A

地震预测工作作为一项世界性的科学难题,国内外许多学者一直以来都在为地震预测做着大量的尝试,所采用的方法涉及到诸多学科,例如电磁学^[1]、地震学^[2,3]、形变^[4]、地下流体^[5,6]等。在“中国大陆构造环境监测网络工程”项目完成以前, GPS 连续观测站点由于空间分布稀少,在地震短临预测方面所担负的作用相对较弱,主要用于获取板块间的相对运动来解释区域地球动力学背景。不少学者在 GPS 用于短临预测方面做过很多尝试,并取得了一些进展。张燕等^[7]利用小波变化对 GPS 时间序列进行分析,捕获了大震前 1~2 年各站点运动趋势的改变,并认为该变化可能是震前的一种地震前兆信号。虽然地震前兆的产生与地震之间的关系目前仍然无法弄清楚,但王庆良等^[8]通过分析认为,源于脆韧转换层上部或弹脆层薄弱部分慢地震过程所辐射出的低频前驱波(慢地震波),是目前已发现的可重复出现的短临前兆信号。因此, GPS 观测应当具有捕获地震前短临异常前兆的能力。如何识别形变方面的短临异常也有学者做了相应的探索^[9]。本文针对 GPS 在短临预测方面应用相对薄弱的问题,提出了 GPS 连续观测资料异常提取,综合分析提取震

前异常的方法;利用 GPS 连续观测站资料,通过求取区域应变场时间序列并进行进一步的异常分析与提取,获得了适合于云南地区的 5 级以上地震短临异常指标,将通过实践,检验其地震预测能力及可靠性。

1 云南省区域中强地震事件

本文主要的分析资料为云南省目前已有的 28 个 GPS 连续跟踪站点 30 s 采样率的数据,并通过 GPS 高精度数据处理软件(GAMIT/GLOBK)处理后获取位移场的结果,数据成果时间为 2011 年 1 月~2016 年 4 月。本文的震例研究,选取了该观测时间段内云南周边发生的 5 级以上地震事件为研究对象,研究范围为北纬 21°~29°,东经 97°~106°,地震时间列表见表 1,震中分布图见图 1。

2011 年 3 月 24 日发生的缅甸 7.2 级地震由于距离研究区较近,且对云南地区影响深远,因此,把该地震也纳入到了震例分析中。2011 年 1 月~2016 年 4 月间,云南地区及较近的范围内,共发生了 20 次 5 级以上地震。

收稿日期:2016-04-22

项目资助:中国地震局地震科技星火计划项目(XH15037SX);云南省地震局“云南强震临震预警技术专项”(2014020102);李建成院士工作站(2015IC015)。

第一作者:邵德盛,教授,主要从事地壳形变监测与地震预测预报研究。yndzcl@sina.com.cn

通讯作者:洪敏,硕士,高级工程师。hmqr@qq.com

表 1 5 级以上地震事件列表(2011-01~2016-04)

Tab. 1 List of Earthquake Events of Magnitude 5 or Greater (January 2011~April 2016)

| 序号 | 发震时间 | 震级 | 地点 | 序号 | 发震时间 | 震级 | 地点 |
|----|------------|------|----|----|------------|-----|----|
| 1 | 2011-03-10 | 5.80 | 盈江 | 8 | 2013-04-17 | 5.0 | 洱源 |
| 2 | 2011-03-24 | 7.20 | 缅甸 | 9 | 2013-08-28 | 5.1 | 德钦 |
| 3 | 2011-06-20 | 5.20 | 腾冲 | 10 | 2013-08-31 | 5.9 | 德钦 |
| 4 | 2011-08-09 | 5.20 | 腾冲 | 11 | 2014-04-05 | 5.3 | 永善 |
| 5 | 2012-06-24 | 5.70 | 宁南 | 12 | 2014-05-24 | 5.6 | 盈江 |
| 6 | 2012-09-07 | 5.70 | 彝良 | 13 | 2014-05-30 | 6.1 | 盈江 |
| 7 | 2013-03-03 | 5.50 | 洱源 | 14 | 2014-08-03 | 6.5 | 鲁甸 |
| 15 | 2014-08-17 | 5.00 | 永善 | 16 | 2014-10-17 | 6.6 | 景谷 |
| 17 | 2014-12-07 | 5.8 | 景谷 | 18 | 2014-12-07 | 5.9 | 景谷 |
| 19 | 2015-03-01 | 5.5 | 沧源 | 20 | 2015-10-30 | 5.1 | 昌宁 |

地震的孕育、发生是一个极其复杂的、缓慢的过程,经历不同的发展阶段^[10]。因此,形变观测研究多注重对区域应变积累长趋势的研究,研究区域应力积累的长趋势变化特征,对短期地壳异常变形关注较少。地震发生虽需能量积累,但能量积累到一定程度后,其触发应是由某些异常变化所引起,地震事件发生前是否有区域应力调整的情况发生,或者说是区域应力场调整诱发了地震事件,是本文所关注的焦点。

2 应变异常分析方法与思路

如果地震发生前存在区域应力场调整的情况,那么可能出现背离长趋势的地壳形变过程,此类形变过程则是地震发生前重要的异常信号。局部形变异常的提取通过应变方式比较有效,因此,本文基于不同区域应变场发生的短期异常变化提取形变异常,综合出地震短临预测指标。

2.1 应变场的计算方法

在获取了各个测点点位移时间序列的基础上,引入克里金插值方法对位移场进行格网化。该方法理论基础严密,是一种线性、无偏、最优的内插估计算法,利用该方法进行应变场的求解,其插值的优越性已经得到了认可^[11-12]。本文以经纬度 $1^\circ \times 1^\circ$ 为单元把云南地区划分成了 56 个格网,把点位移内插到这 56 个格网中,格网编号与 GPS 站点分布见图 1(图 1 中地震事件震中上的地震事件编号)。

通过格网化的位移场按每个格网与相邻格网组网的方式求取应变场,可以获得 56 个格网的应变场参数时间序列,具体解算方法如下。

在二维空间中,假设某个测点 A 与其无限接近的另外一点间的位移变化量为 $\Delta u, \Delta v$,设 A 点的应变状态分量为 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$, d_x, d_y 为两点间距

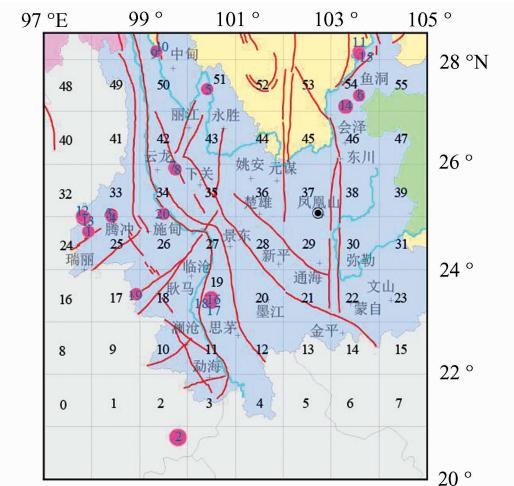


图 1 格网划分与点位分布图

Fig. 1 Distribution Map of Grid Divisions and Point Positions

离分量的变化量, ω 为旋转量,那么有^[13]:

$$\begin{aligned} u' &= u + \epsilon_x d_x + \epsilon_{xy} d_y - \omega d_y \\ v' &= v + \epsilon_{xy} d_x + \epsilon_y d_y + \omega d_x \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (2)$$

式(1)两边同时除两点间距离,可转变为线应变与方位角之间的关系,每个格网点通过联立与其它各个相邻格网点的方程组,便可通过最小二乘法求解得到其应变状态分量 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$,进一步可以计算其它的应变参数,包括最大剪应变、面应变等参数^[14]。

2.2 应变异常识别

在最大剪应变、面应变等参数中,本文选取了面应变参数作为分析地震危险性的主要指标,原因是面应变参数直接反映了各个格网受到的挤压和拉张强弱程度,反映该区域的应变积累状态。

从长趋势运动背景看,不同区域的应变场存在不同的变化速率^[15]。张压特性的长趋势活动对于了解地壳运动的总体特征是有效的信息。但是,在进行短临预测方面,更需要获取在长趋势变化背景下的短期异常波动,因此,必须先对所有格网的面应变时间序列进行去趋势处理。本文采用的是线性去趋势方法,去除应变时间序列中的线性趋势项,并划定二倍标准差线作为单条面应变曲线的异常指标线。

图 2 显示的是 42 号格网的面应变时间序列图,其中图 2(a)显示该格网存在一定的趋势拉张,年拉张速率为 0.85×10^{-8} 。通过去除趋势项,并设定二倍标准差作为异常阈值,可以明显看

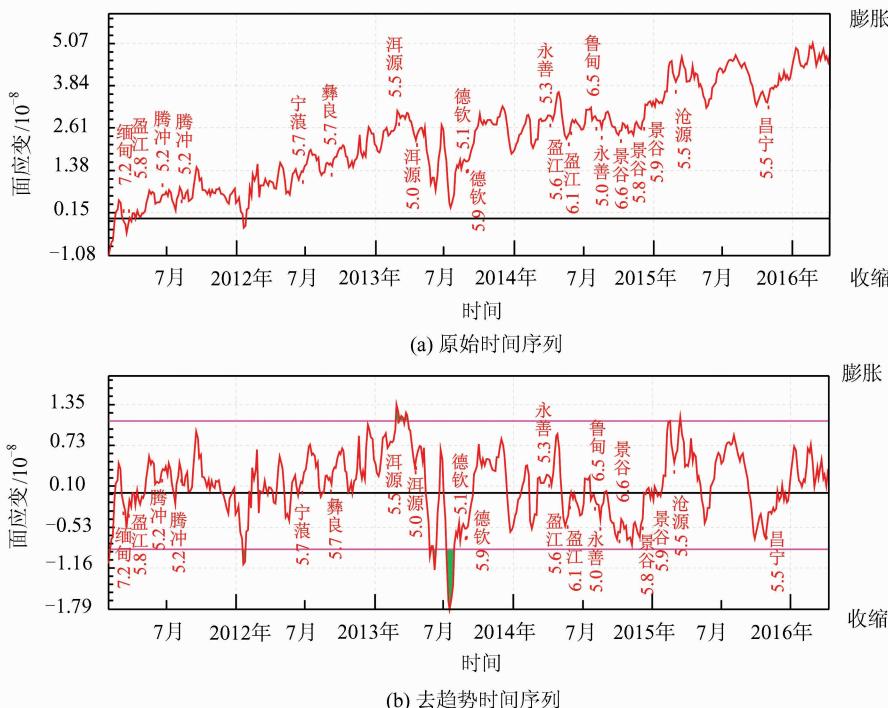


图 2 单格网面应变时间序列图

Fig. 2 Time Series of Surface Strain for Single Grid Cell

到该格网在洱源 5.5、5.0 级地震以及德钦的 5.1 和 5.9 级地震前均有较好的前兆异常出现。

去除了面应变时序曲线的线性趋势项之后，需要对单个格网面应变时间序列的映震能力进行评价。评价方式为，以二倍标准差线作为阈值，超出该指标线的均为异常，并根据异常出现时间与地震事件的对应关系，对面应变曲线的映震能力进行评分。

由于本文需获取短临预测信息,因此地震事件间对应的时间间隔设定为不超过3个月。假设某面应变时序曲线报准次数为 N_i ,漏报次数为 L_i ,虚报次数为 X_i ,那么该曲线的最终评价得分为:

$$S_i = N_i / (N_i + L_i + X_i) \quad (3)$$

经过以上处理,获得了56个格网的预报能力评分 $S_i (i=1, \dots, 56)$,在此基础上对所有格网进行时空扫描,获取任意时刻云南地区的形变异常总评分时间序列。假设某一时刻出现异常的格网序号分别是 j, k, m, n ,那么该时段的异常总评分为:

$$S_{\text{总}} = S_j + S_k + S_m + S_n \quad (4)$$

通过逐个时间点进行异常总体分值评价,可获取云南地区的异常评分时间序列。当该异常评分值超出一定阈值后,认为云南地区存在发生 5 级以上地震的危险性,本文设定的阈值为 2 倍均值线作为异常阈值。获得了应对变异常评分时间

序列,可根据异常分值判断某一时间的地震危险性,并做出预测。

3 异常指标结果及效能评价

图 3 为获得的预测指标,该指标的预报效能需要与地震事件结合进行预报效能评价,预报效能评价的方法较多,其中 R 值评分由许绍燮院士提出,并被许多学者用于检验预测指标的有效性^[13]。通过 R 值评分对该异常指标进行评价,以 3 个月为预测窗长,该指标预测地震次数 24 次,实际发生地震次数 20 次,准确预测次数为 19 次,漏报数为 1,虚报 5 次(指标出现而未发生地震)。也就是说,从目前已有的震例看,当异常出现时,3 个月内发生 5 级以上地震的准确率目前达到了 95%。根据预报效能评分规则,扣除地震发生的自然概率后,预报效能评分 R 为 0.30, R_0 为 0.11, $R > R_0$ 。因此,在 97.5% 置信度下,该预测指标通过了效能评价,虽然 R 值评分并不太高,主要原因是 5 级以上地震在云南地区的自然发生概率较高。从异常指标线上可以看出,该指标与地震事件间存在较好的对应关系。

2014年8月3日发生的鲁甸6.5级地震前出现了明显的超指标异常,异常出现时间为2014年7月17日,应该说此次地震事件的发生

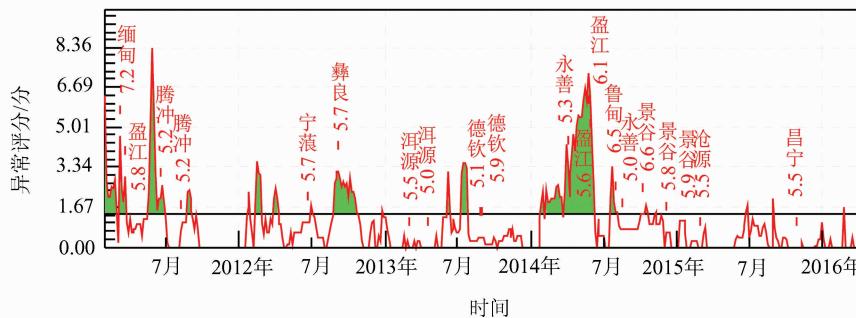


图3 面应变综合预测指标

Fig. 3 Comprehensive Index of Surface Strain

对本指标进行了一次很好的检验。

如果调整预测窗长为2个月,那么预测准确的地震次数为15次,漏报5次,虚报8次,预报效能评分为0.392,此时的 R_0 为0.21,同样 $R>R_0$,预报效能检测同样通过,但漏报次数稍多。

通过R值评分检验,可认为该异常指标出现明显异常时,未来2~3个月发生5级以上地震的概率较高,该指标对地震发生的时间具有较好的预测能力,为了了解在不同异常出现时异常格网的分布与地震震中位置间的关系,本文对各个地震发生前异常出现时对应的异常格网进行了提取,获得了不同地震前异常格网的分布情况。

表2中与震中较近的格网(编号)均加粗表示。从异常格网与震中位置的关系可以看出,除

宁蒗、彝良两次地震外,其他地震发生前,异常格网大部分均集中分布在震中区附近区域,对地震发震地点具有较好的指示意义。宁蒗、彝良地震前,异常的主要集中区为滇南地区,即新平、通海一带,该区域为川滇菱形块体的东触角,该区域大幅异常时,在其东西边界分别发生了5.7级地震,因此,该异常过程与这两次地震间应存在一定的联系。对鲁甸6.5级地震进行分析可以发现,鲁甸6.5级地震前,主要的异常区域也是位于滇南地区。因此,滇南地区可能对滇东北和滇西北地区发生的地震较为敏感。

大部分地震事件前的异常格网均未包含发震格网,是否意味着地震更容易发生在异常变形区域的边缘地区,值得思考。

表2 震中与异常格网对应表

Tab. 2 Earthquake Centers and Anomaly Grid Cells

| 地震事件 | 震中所在格网 | 地震前异常格网编号 | 震中附近格网占比/% |
|--------|--------|---|------------|
| 盈江 5.8 | 24 | 4,5,11,12,26,33,34 | 43 |
| 缅甸 7.2 | 2* | 4,5,11,12,26,33,34 | 57 |
| 腾冲 5.2 | 33 | 5,20,24,25,28,32 | 50 |
| 腾冲 5.2 | 33 | 24,25,32 | 100 |
| 宁蒗 5.7 | 51 | 20,19,27,28 | 0 |
| 彝良 5.7 | 54 | 19,27,28,29,22,30,31,39,23,15,14,37,21 | 0 |
| 洱源 5.5 | 34 | 26,28,32,35,36,40,41,42,43,44,48,49,50,51,52 | 100 |
| 洱源 5.0 | 34 | 32,40,41,42,43,44,48,49,50,51,52,26 | 100 |
| 德钦 5.1 | 50* | 29,27,33,34,39,41,42,45,46,47,48,49,50,52,53,54,55 | 47 |
| 德钦 5.9 | 50* | 29,27,33,34,39,41,42,45,46,47,48,49,50,52,53,54,55 | 47 |
| 永善 5.3 | 54 | 45,46,47,53,54,55,29,43,44,51,38,52 | 83 |
| 盈江 5.6 | 32 | 8,10,12,16,17,18,19,20,22,23,24,25,26,31,34,37 | 50 |
| 盈江 6.1 | 32 | 8,10,12,16,17,18,19,20,22,23,24,25,26,31,34,37 | 50 |
| 鲁甸 6.5 | 54 | 15,22,23,31,37,38 | 33 |
| 永善 5.0 | 54 | 37,38,39,45,46,47 | 100 |
| 景谷 6.6 | 19 | 6,7,15,23,39,45,46 | 14 |
| 景谷 5.8 | 19 | 0,1,6,7 | 75 |
| 景谷 5.9 | 19 | 0,1,6,7 | 75 |
| 沧源 5.5 | 17 | 0,1 | 100 |
| 昌宁 5.1 | 34 | 35,43,44 | 100 |

* 代表地震事件的震中并未落入格网范围,但距离该格网最近,划入该格网。

4 结语

本文通过对点位移的深加工处理,计算应变场参数时间序列,进而提取得到的综合指标,其物理意义明确,具有对 GPS 观测信息高度综合的特点,提高了识别异常的能力,对云南地区 5 级以上地震的发生时间、地点有着较好的指示意义,有几点需要注意。① 在对每个格网异常进行评价的时候,本文选取了 2 倍标准差作为异常的阈值,主要是考虑到提高信噪比。阈值设置过低会带入许多噪声。② 在综合异常指标中,选取了 2 倍均值作为异常阈值,许多地震在超出阈值后较短时间内就发生了地震,因此,数据处理的及时性就显得尤为重要,该阈值可适当动态调整。③ 异常格网分布相对集中的区域可作为未来地震发生地点的参考性指标,同时表明异常区边缘可能更加危险。④ 随着地震事件样本数量的提升,通过一定时间的经验积累后,该指标也可望在发震震级方面也提供一定的指示意义,并在准确性方面进一步的提高。

参考文献

- [1] Yamazaki K, Sakanaka S. Localized Changes in Geomagnetic Total Intensity Values Prior to the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Earthquake[J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 51 (1):37-43
- [2] Wen Xueze, Fan Jun, Yi Guixi, et al. A Seismic Gap on the Anninghe Fault in Western Sichuan, China[J]. *Science in China (Ser D)*, 2008, 38(7): 797-807(闻学泽,范军,易桂喜,等. 川西安宁河断裂上的地震空区[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(7): 797-807)
- [3] Reasenberg P A. Foreshock Occurrence Rates Before Large Earthquakes Worldwide[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1999, 155 (2-4):355-379
- [4] Wang Qi, Zhang Peizhen, Freyrnueler J. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. *Science*, 2001, 294(5 542): 574-577
- [5] Liu Yaowei. Review of the Research Progress on the Seismological Science of Underground Fluid in China During Last 40 Years[J]. *Earthquake Research in China*, 2006, 22(3):222-235(刘耀伟. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾[J]. 中国地震, 2006, 22(3):222-235)
- [6] Qian Xiaodong, Su Youjin, Fu Hong, et al. Short-term and Impending Prediction of the Mar. 10, 2011, Ms5. 8, Yingjiang, Yunnan Earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 2011, 34 (4): 403-413(钱晓东,苏有锦,付虹,等. 2011 年云南盈江 5.8 级地震及震前短临跟踪预测[J]. 地震研究, 2011, 34(4):403-413)
- [7] Zhang Yan, Wu Yun, Shi Shunying, et al. Preliminary Discussion on GPS Time Series Manifesting Earthquake Precursor[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(3):96-99 (张燕,吴云,施顺英,等. GPS 时间序列揭示地震前兆的初步探索[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3):96-99)
- [8] Wang Qingliang, Zhang Xiaodong, Cui Duxin, et al. Understanding the Mechanisms of Premonitory Anomalies and Imminent Precursors[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2005, 317 (5): 131-144 (王庆良,张晓东,崔笃信,等. 理解前兆异常变化机理和地震短临前兆[J]. 国际地震动态, 2005, 317(5):131-144)
- [9] Lu Mingyong, Niu Anfu, Bai Changqing, et al. Preliminary Study on Relation of Short-term and Impending-Earthquake Anomalies Between Groundwater Level and Crustal Deformation and the Identification Method of Anomalies[J]. *Journal of Seismological Research*, 2006, 29(1):13-20 (陆明勇,牛安福,白长清,等. 地壳形变短临异常与地下水位短临异常关系及识别方法的初步研究[J]. 地震研究, 2006, 29(1):13-20)
- [10] Huangfu Gang, Cheng Yong, Qing Jiazheng, et al. The Seismicity in Yunnan [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2010 (皇甫岗,陈颙,秦嘉政等. 云南地震活动性[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2010)
- [11] Zhu Shoubiao, Cai Yongen, Shi Yaolin. Computation of the Present-Day Strain Rate Field of the Qinghai-Tibetan Plateau and Its Geodynamic Implications[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(5):1 053-1 061 (朱守彪,蔡永恩,石耀霖. 青藏高原及邻区现今地应变率场的计算及其结果的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1 053-1 061)
- [12] Chen Xiaobin. Present-Day Horizontal Deformation Status of Continental China and Its Driving Mechanism[J]. *Science in China (D) (in Chinese)*, 2007, 37(8):1 056-1 064 (陈小斌. 中国陆地现今水平形变状况及其驱动机制[J]. 中国科学, 2007, 37(8): 1 056-1 064)
- [13] Lu Yuanzhong, Wu Yun, Wang Wei, et al. Dynamic Image Processing Method of Mid Short-Term Earthquake Prediction [M]. Beijing: Seismological Press, 2001(陆远忠,吴云,王炜,等. 地震中短期预报的动态图像方法[M]. 北京: 地震出版社, 2001)

- [14] Hong Min, Zhang Yong, Shao Desheng, et al. Recent Tectonic Activity Features of Yunnan Region[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(3): 483-488(洪敏, 张勇, 邵德盛, 等. 云南地区近期地壳活动特征[J]. 地震研究, 2014, 37(3): 483-488)
- [15] Li Yanxing, Yang Guohua, Li Zhi, et al. Movement

and Strain Conditions of Active Blocks in the Chinese Mainland[J]. *Science in China (D) (in Chinese)*, 2003, 33(Suppl.): 65-81(李延兴, 杨国华, 李智, 等. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学, 2003, 33(增刊): 65-81)

Extract Short Impending Abnormal Indicator from Deformation Data in Yunnan Province

SHAO Desheng¹ HONG Min¹ ZHANG Yong¹ WANG Lingli¹ QIAN Xiaodong¹

1 Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650225, China

Abstract: This paper presents a comprehensive predictor indicator for surface strain, and aims to achieve short-term and impending earthquake prediction based on GPS (global positioning system) observation data. We obtain the velocity field of the Yunnan area from continuous GPS observation data with the GAMIT/GLOBK(High precision GPS data processing software) software. The Yunnan region was divided into 56 grids by interpolation and created a uniform displacement field. We obtain the surface strain time series of each grid. By evaluating and synthesizing the earthquake response capacity of each grid, a short temporary anomaly identification indicator was extracted. Since 2011, there were 20 earthquakes with Magnitude greater than five, occurring in Yunnan, 19 times of them were accurately predicted, with one omission and five false detections. Tested in practice with GPS observations recorded in Yunnan area, this indicator can not only predict the time but also the epicenter of earthquakes that happened in Yunnan area. It can be used to forecast future earthquakes in Yunnan region.

Key words: abnormal analysis of GPS observation data; the short impending prediction; strain information comprehensive; anomaly indicators

First author: SHAO Desheng, professor, specializes in crustal deformation monitoring and earthquake prediction. E-mail: yndzcl@sina.com.cn

Corresponding author: HONG Min, master, senior engineer. E-mail: hmqr@qq.com

Foundation support: The China Seismological Bureau Spark Plan Project, No. XH15037SX; the Yunnan Special Project of Imminent Earthquake Early Warning Technology, No. 2014020102; Li Jiancheng Academician Workstation, No. 2015IC015.