

“形变速率累加”法在川滇跨断层 水准资料中的应用*

唐红涛, 张希, 贾鹏, 薛富平

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 运用“形变速率累加”法对川滇地区选取的5个算例进行了解算。结果表明: 通过对较连续的异常“孤立点”进行积分后的形变速率累加图, 在异常的识别与表达上更具有实用性和直观性, 该方法适用于川滇地区跨断层水准资料, 可作为地震的中期预报指标。

关键词: “形变速率累加”法; 跨断层水准; 川滇地区; 异常点残差; 速率积分

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)04-0467-05

0 引言

在构造力的作用下, 地应力的集中及演化直接产生地壳运动效应, 而地形变化变化是地应力变化最直观的反映, 地形变观测最能直观反映地壳形变的变化(王永安等, 2011)。针对地壳形变的定时监测, 大地水准网的观测周期相对较长, 而跨断层水准观测则是一种观测周期短、精度高的监测手段。川滇地区是我国地震的高发区, 且跨断层水准场地较密集的分布于鲜水河、龙门山、安宁河、红河、小江等大断裂之上, 如此密集的场地分布对整个川滇地区的断裂形变有一定的区域控制作用。但在对观测资料的处理、研究, 对“异常”信息的确定上, 大家的认识并不统一, 事实上, 对观测数据排除观测误差、同震变形与外界干扰等之后的“与正常状态不同的变化”均可称为异常。一个可靠的、且符合孕震理论的异常出现之后, 若在一定的时间尺度和空间范围内发生了一定震级的地震, 就可以把这个异常称之为该地震的前兆(张希等, 2001, 2004, 江在森等, 1998, 2001; 王双绪等, 2001)。刘冠中等(2007)针对新疆地区台站跨断层观测资料, 提出一种“形变速率累加”方法, 扣除正常变化数据, 对超出一定限值的“可能异常”进行积分运算, 可有效排除短暂、连续性差的所谓“异常”变化, 使

得在某一时间尺度内相对频繁出现的异常更为直观和突出, 映震效果较好。唐红涛等(2012)用该方法对青藏块体东北缘资料进行了分析, 达到了良好的结果, 但其观测周期间隔较长。因此, 本文运用“形变速率累加”法对观测间隔较短的川、滇地区跨断层水准资料进行了解算, 并通过5个算例进行原始观测曲线与形变速率累加图的对比分析。

1 短水准观测资料

川、滇跨断层水准从20世纪80年代初开始观测, 至今已保存有30多年的观测资料。如图1所示, 四川境内有21处场地, 云南现有观测场地11处(洱源场地已于2010年6月停测)。32处场地较均匀的分布于我国西南地区活动频繁的各大断裂之上, 包括“Y”型的鲜水河、龙门山、安宁河断裂。全长约600 km的红河断裂带, 呈NNW向贯穿云南省中部, 与纵贯云南省东部的小江断裂带交汇于该省的最南部, 形成一楔形活动块体。在楔形块体及块体周边, 由丽江—宁蒗、洱源—鹤庆、永胜—程海、楚雄—建水、曲江、石屏—建水等多条活动断裂带构成了一个复杂的断层网络系统(施顺英等, 2007; 贾鹏等, 2012)。各观测场均布设有跨断层水准、基线观测墩, 四川省内以2个月, 云南省以1个月为复测周期进行跟踪监测。

* 收稿日期: 2013-02-28.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAK19B01-07)资助。

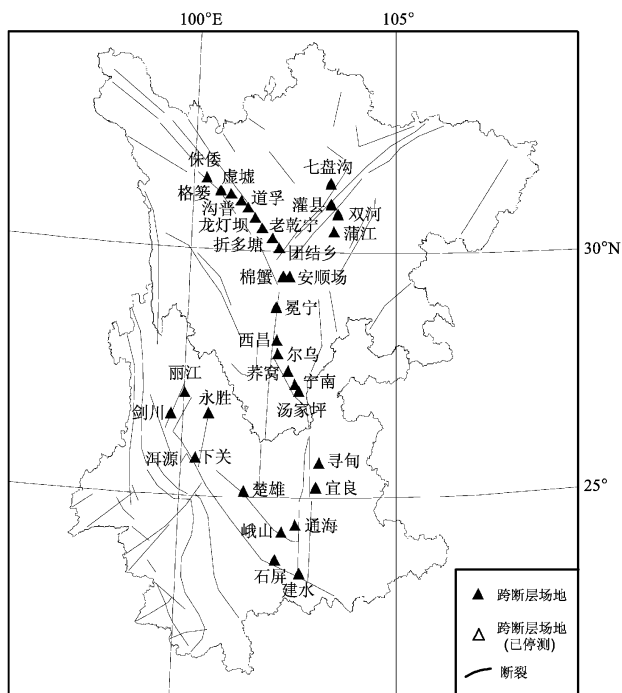


图 1 跨断层场地分布图

Fig. 1 Distribution of across-fault site

2 计算模型

在数据处理中所用到的每期观测数据是某一测段（即两水准点之间）的高差，相邻两期观测时间间隔为 1 个月，对于四川省跨断层 2 个月的复测周期数据，采用线性内插的方法进行空缺值内插。再对原始数据做一阶差分处理，消去曲线的趋势变化成分：

$$V = |h_i - h_{i-1}| \quad (1 \leq i \leq n), \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n(n-1)}} \quad (1 \leq i \leq n), \quad (2)$$

$$T = \begin{cases} V - 2\sigma, & V \geq 2\sigma \\ 0, & V < 2\sigma \end{cases}, \quad (3)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (4)$$

式中： h 为原始观测数据的各期观测值； $(h_i - h_{i-1})$ 为相隔 1 个周期的一阶差分，在此过程中消除了原始观测资料的趋势变化； n 为原始观测总期数； σ 为形变速率 V 的标准差； T 为积分对象，即将 $V \geq 2\sigma$ 的形变速率保留，将 $V < 2\sigma$ 的形变速率设为

0； Z 为最后的累加形变速率，即对 T 求累加计算。刘冠中等（2007）直接对 V 进行积分，本文将积分对象改进为 $V - 2\sigma$ ，通过解算最终可得到一阶差分与 2 倍标准差的残差累积值，运用速率累加图表达异常分布的效果更为明显和直观。式（2）和式（3）给出了异常点的判定方法，取 2 倍标准差作为判断依据，若 V 在 2 倍标准差以内，说明在此阶段断层活动无显著变化；反之，说明原始曲线存在异常。

3 算例分析

3.1 解算结果

运用“形变速率累加”法，编制了算法计算程序，分别对川滇地区的宁南场地 4←5 测段、安顺场场地 C←A 测段、通海场地 1←2 测段、丽江场地 1—4SC 测段及永胜场地 3←2 测段 5 个算例进行解算，并选取了川滇地区 6.0 级以上地震作为研究震例。在原始曲线与形变速率累加图（图中的黑色阴影部分即为连续异常点累加部分）的对比中，可以看出经过对连续异常“孤立”点积分后的形变速率累加图的效果更加明显与直观。

算例一：宁南场地位于则木河断裂的中段，从原始曲线（图 2a）看，丽江、宁蒗、永胜、汶川及会理地震前，曲线异常不突出，在形变速率累加图（图 2c）中，震前的一些较为连续的异常“孤立”点被识别、累加了，异常效果明显、直观。

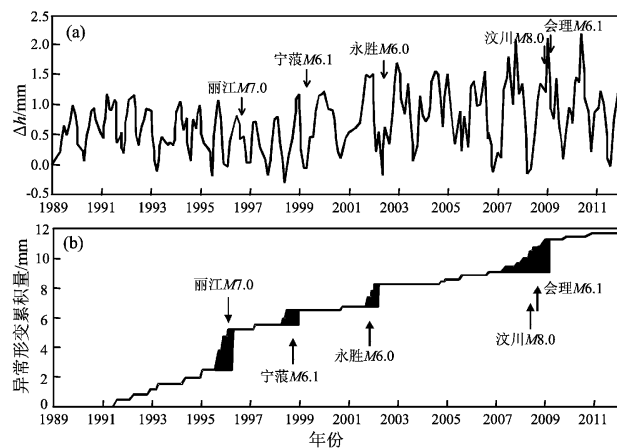


图 2 宁南场地 4←5 水准测段原始曲线 (a) 与形变速率累加曲线 (b) 对比图

Fig. 2 Comparison between original (a) and deformation rate accumulation (b) curves of the 4←5 leveling section at Ningnan Site

算例二：安顺场场地位于鲜水河、龙门山、安宁河断裂交汇处，位于“Y”型断裂的交汇处，其中上部鲜水河、龙门山断裂具有剪切性质，下部安宁河断裂呈拉张特性，共同构成“剪切—拉张”的断裂组合。原始曲线表现相对平缓，异常信息不明显，而形变速率累加法对1989年小金6.6级与2008年汶川8.0级地震前呈现出了很好的异常累加效果（图3）。

算例三：选取了位于小江断裂南段的通海观测场地，形变速率累加图给出了1995年孟连7.3级地震与1998年宁蒗6.1级地震前异常的累加效果。由于2000~2001年初出现的大阶跃只是

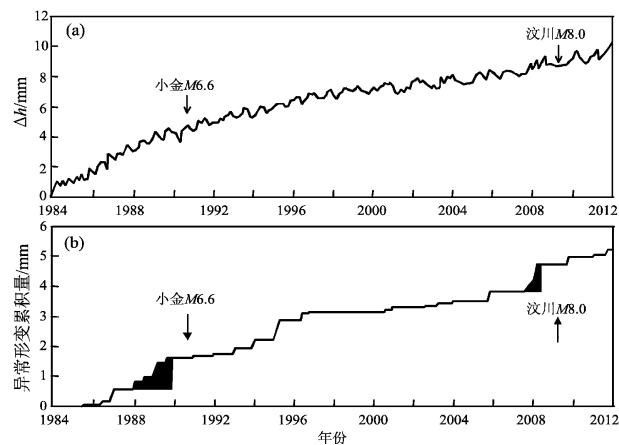


图3 安顺场场地 C←A 水准测段原始曲线 (a) 与形变速率累加曲线 (b) 对比图

Fig. 3 Comparison between original (a) and deformation rate accumulation (b) curves of the C←A leveling section at Anshunchang Site

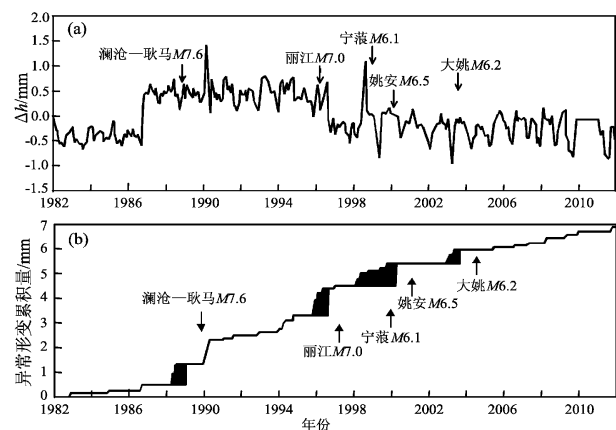


图5 丽江场地 1—4SC 水准测段原始曲线 (a) 与形变速率累加曲线 (b) 对比图

Fig. 5 Comparison between original (a) and deformation rate accumulation (b) curves of the 1—4SC leveling section at Lijiang Site

一次跳跃，并非连续的异常“孤立”点，因此，该方法对非连续的突跳并不能给出异常速率积分（图4）。

算例四：丽江场地位于鹤庆—洱源断裂北段，原始曲线个别突跳虽明显，但图5a经过异常速率累加后，效果直观，更容易识别与判断异常，可与原始曲线作对比与印证分析（图5）。

算例五：永胜场地位于程海断裂的北段，在1995年以前，原始曲线表现平稳，丽江7.0级地震前一年出现大幅“突跳—转折”，至2000年基本结束，异常速率累加图效果明显，与原始曲线对应一致（图6）。

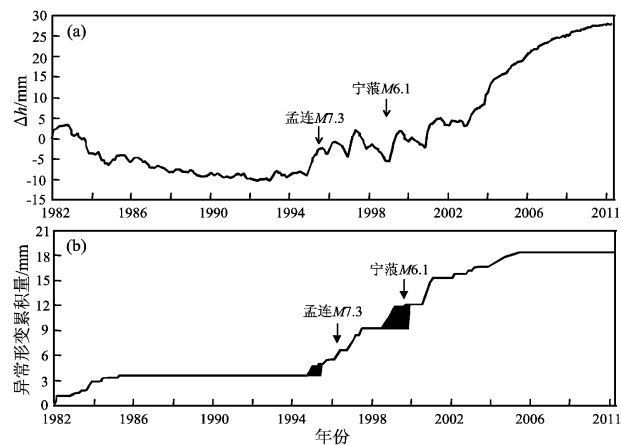


图4 通海场地 2←1 水准测段原始曲线 (a) 与形变速率累加曲线 (b) 对比图

Fig. 4 Comparison between original (a) and deformation rate accumulation (b) curves of the 2←1 leveling section at Tonghai Site

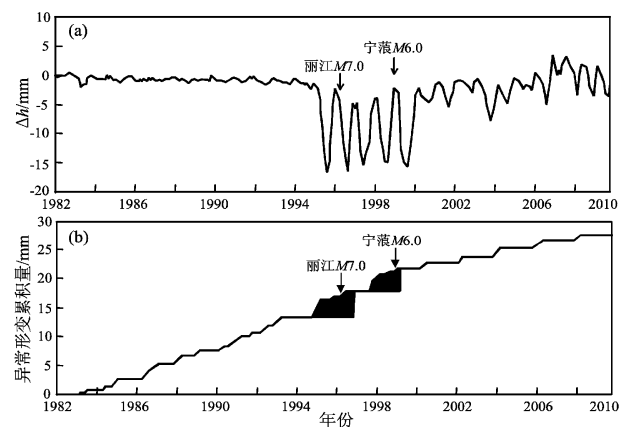


图6 永胜场地 3←2 水准测段原始曲线 (a) 与形变速率累加曲线 (c) 对比图

Fig. 6 Comparison between original (a) and deformation rate accumulation (b) curves of the 3←2 leveling section at Yongsheng Site

3.2 映震特征分析

从所列举的 5 个算例（16 次震例）中可知，异常持续时间从 200 d 到 820 d 不等，平均持续时间为 500 d；从异常出现到地震发生最短时间为 73 d，最长 725 d，平均为 347 d，基本在 2 个月至 1 年内，可作为地震中、短期预报指标；从震例的空间特征上看，

6.0~7.0 级地震的平均震中距约 146 km，映震范围在 200 km 以内，7.0 级以上地震映震范围较大，为 200~400 km，平均震中距约 360 km。从以往震例的时空映震特征上看，该方法巧妙的运用了川滇地区跨断层水准数据，异常“孤立”点积分区域与震例的对应关系较好，效果明显、直观。

表 1 异常特征信息表
Tab. 1 Anomaly characteristics information table

场地	异常开始时间 /年-月-日	异常结束时间 /年-月-日	异常持续 时间/d	对应地震 /年-月-日	震中距 /km	开始至发震 天数/d	结束至发震 天数/d
宁南	1995-05-15	1996-03-14	305	1996-02-03 丽江 7.0 级	230	235	70
	1998-03-15	1998-12-20	275	1998-11-19 宁蒗 6.1 级	180	245	30
	2001-08-14	2002-03-20	216	2001-10-27 永胜 6.0 级	190	73	143
	2007-02-20	2009-02-20	730	2008-05-12 汶川 8.0 级	470	447	283
	2007-02-20	2009-02-20	730	2008-08-30 会理 6.1 级	70	555	175
安顺场	1987-12-30	1989-12-10	710	1989-09-22 小金 6.6 级	190	632	78
	2007-10-20	2008-05-10	200	2008-05-12 汶川 8.0 级	310	202	-2
通海	1994-05-20	1995-07-20	425	1995-07-12 孟连 7.3 级	380	417	8
	1998-06-20	1999-12-20	545	1998-11-19 宁蒗 6.1 级	290	150	395
丽江	1988-03-20	1989-01-20	305	1988-11-06 澜沧—耿马 7.0 级	420	226	79
	1995-10-20	1996-08-20	305	1996-02-03 丽江 7.0 级	0	103	202
	1998-01-20	2000-04-20	820	1998-11-19 宁蒗 6.1 级	80	300	520
	1998-01-20	2000-04-20	820	2000-01-15 姚安 6.5 级	170	725	95
	2002-11-20	2003-09-20	305	2003-07-21 大姚 6.2 级	160	245	60
永胜	1994-09-15	1996-11-15	790	1996-02-03 丽江 7.0 级	60	508	282
	1997-07-15	1999-03-15	605	1998-11-19 宁蒗 6.1 级	70	489	116

4 结论

川滇地区 32 处跨断层场地分布于鲜水河、龙门山、安宁河、红河等诸多强活动断裂之上，在地域上有很好的网络控制监测能力，本文通过运用“形变速率累加”法对该地区跨断层水准观测资料的计算，得到形变速率累加图，并与以往震例进行了映震分析，可得出如下几点结论：

（1）在时序数据的异常识别上，异常速率积分后的效果较原始观测曲线更加容易辨识异常，且更直观。

（2）在异常信息的舍取上，“形变速率累加”法只对超出控制限的、连续的异常“孤立”点进行计算，对高阶跃、非连续单个异常数据计算后

不显示异常。

（3）从算例映震的时空特征上看，异常开始到地震发生时间平均为 347 d，6.0~7.0 级地震的震中距均在 200 km 以内，7.0 级以上地震在 200~400 km。因此“形变速率累加”法适用于川滇地区跨断层场地的空间分布状况，且它可作为地震中期的预报指标。

参考文献：

贾鹏,张希,张晓亮,等. 2012. 汶川地震前后川滇及其临区 GPS 水平运动演化特征[J]. 西北地震学报,34(3):264-267,273.
江在森,丁平,王双绪,等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京:地震出版社,44-46,87-105.
江在森,祝意青. 1998. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层变形与重力场动态图象特征[J]. 地震学报,20(3):262-271.
刘冠中,蒋靖祥,王建军,等. 2007. 跨断层定点形变观测资料“速率

- 累加分析”及其异常识别初步提取方法[J]. 内陆地震, 21(3): 230 – 237.
- 施顺英, 张燕, 吴云, 等. 2007. 基于跨断层形变异常预测云南地震的试验[J]. 大地测量与地球动力学, 27(5): 82 – 87.
- 唐红涛, 张希, 贾鹏, 等. 2012. 形变速率累加法在青藏块体东北缘跨断层水准资料中的应用[J]. 高原地震, 24(2): 15 – 19.
- 王双绪, 江在森, 陈文胜, 等. 2001. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报, 23(2): 151 – 158.
- 王永安, 李琼, 刘强. 2011. 跨断层形变累积率的变化特征与云南地区强震[J]. 地震研究, 34(2): 136 – 142.
- 张希, 江在森, 王双绪, 等. 2001. 断层形变的应变强度比动态图像与震例综合研究[J]. 地壳形变与地震, 21(2): 37 – 42.
- 张希, 薛富平, 王双绪, 等. 2004. 大姚、民乐—山丹地震前的中短期前兆[J]. 大地测量与地球动力学, 24(4): 57 – 63.

Application of Deformation Rate Accumulation Method on Cross-Fault Leveling Data in Sichuan-Yunnan Region

TANG Hong-tao, ZHANG Xi, JIA Peng, XUE Fu-ping

(The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shannxi, China)

Abstract

Using deformation rate accumulation method, we calculated the selected five examples in Sichuan-Yunnan region. The result showed that it is more practicality and intuitive on abnormal identification and expression on deformation rate accumulation chart after integrating for continuous abnormal outlier. This method applies to cross fault leveling data in Sichuan-Yunnan region, and can be as the medium-term indicator for the medium-term earthquake prediction.

Key words: deformation rate accumulation method; cross-fault leveling; Sichuan-Yunnan region; abnormal points; residual; rate integrating