

牛安福,张凌空,章静,等,2021. 汶川地震前远场形变异常及其与地震相关性研究. 中国地震,37(1):15~21.

汶川地震前远场形变异常 及其与地震相关性研究

牛安福 张凌空 章静 闫伟
赵静 岳冲 苑争一

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 判定震前出现的形变显著异常是否与地震相关,是认识地震孕育过程及开展地震预测研究最为重要的基础问题。本文分析了汶川地震前一些显著形变异常特征,发现震前在震中区附近异常较少,而外围则较多。针对其中一些距离震中较远的异常,借助前兆异常与地震震中距、震级间物理统计模型,提出了远距离形变异常与地震关联的判别准则,给出了红柳峡跨断层水准短期异常等与汶川地震之间的联系。最后,结合构造特点讨论了远距离前兆存在的意义。

关键词: 汶川地震 形变前兆 远场相关 判别准则

[文章编号] 1001-4683(2021)01-0015-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地形变前兆观测的初衷在于发现地震破裂前几天可能出现的预滑动,进而进行地震预测。而诸多观测事实表明,震中区附近临震前可能很难记录到显著的形变异常变化,一些学者因此提出了最小前兆距离的概念(Takemoto, 1991; 牛安福, 2017)。震前在哪些区域可记录到显著的异常变化? 最远距离能有多远? 如何建立震前远场前兆异常与地震之间的联系? 这些均是认识地震过程及进行地震预测研究过程中面临的最为重要的问题,这些问题以往多局限于“经验”而鲜有人开展相关研究。

各种震前异常与地震之间总存在一定的时间差,因而,前兆与地震之间的联系总有一定的不确定性。正因如此,自开展前兆观测以来,国际上关于前兆问题的争论一直未曾中断(Mortensen et al, 1976; Takemoto, 1991; Linde et al, 1992; Bakun et al, 2005; Bilham, 2005; Amoruso et al, 2010; 孙文科, 2012)。面对不断持续的争论,牛安福(2005)提出了地震短期、短临预测面临的“最后一分钟”问题,并希望通过建立震前形变异常特征与地震三要素之间的关联,实现前兆与地震之间的“无缝连接”。牛安福(2007)借助中国大陆连续形变观测结果,对典型的突变形异常进行分类,发现持续时间在 1~4 天的加速异常是一类重要的短

[收稿日期] 2020-03-05 [修定日期] 2020-07-24

[项目类别] 国家自然科学基金重点项目(41330314)资助

[作者简介] 牛安福,男,1964年生,研究员,主要从事大地测量与地震预测研究。E-mail: niuanfu01@sina.com

临前兆。在四川省攀枝花基准台观测到地倾斜、地应力发生 1~4 天突变异常后,本地区没有较强的地震活动,而 10 天内在千千米之外的甘肃、青海地区常发生 6 级左右地震,且对应率达 12/13。这种现象看似很离谱,但其中包含了深刻的科学意义。首先,地形变短期变化不只是反映了本地变形的状态,还可能是一种可以在地壳深部进行长距离传递的构造力,即地应力波(牛安福,2017);其次,尽管攀枝花基准台距离地震震中普遍较远,但震中距分布较为规律,发震时间也较为集中,因此,研究这些现象对于地震短临预测可能是很有意义的。

本文结合汶川地震前记录到的一些显著形变异常,借助构建形变异常特征与地震发生时间、震中距及震级间的统计模型,探讨震前异常与汶川地震之间的潜在联系。

1 地形变前兆分布的广泛性

Mogi(1993)在对前兆进行分类时,提出了时空分布图的模式,该模式将发震断层及周边介质对地震孕育过程的作用进行了刻画。按区域将前兆分为 3 种:①震中区附近短临地震前兆,主要反映地震断层未破裂前,在应力作用下的加速过程;②远离震源区的短期前兆,主要由地震断层的形变引起,反映震源区与远场区能量交换间的动力学联系;③与形变、应变积累有关的长期前兆,如膨胀、非震断层的延续性滑动、震源区地震断层的长期粘滑、应力集中区的局部破裂及断层滑动等,这些异常主要分布在较大的区域内。

通过对点源或静力位错源引起的形变场进行计算,得出地倾斜、应变等随震中距的立方成反比衰减,在距震中约 10 倍震源体半径的地方,地倾斜、应变衰减到 10^{-9} 以下。依据地倾斜、应变观测精度及地震破裂尺度,5 级地震前兆的发生距离认定为 100km,6 级地震为 200km,7 级地震为 350km。目前,这种关联方法应用较为广泛,但长期应用结果表现出的前兆与地震关系的复杂性也限制了地震预测能力的提升。这种方法采用的是距离约束、而时间不受约束的思路,即静力学思路。

事实上,由于仪器观测频响等特征及地壳变形的动力学特性,依据距离约束、而时间不受约束的思路来认识与地震相关的变形过程是受局限的。地形变短期变化不同于构造变形,它是一种波动,可以是断层速度依赖摩擦滑动引起的稳态或无震滑动(缪阿丽等,2012),也可以是成核过程中断层滑动导致的非稳态脆性破裂(Das et al, 1981;朱守彪等,2009),即地震。两种情况均离不开地壳深部物质流动引起的应力场扰动,该扰动包括了断层预滑动的信息,且为驱动断层预滑动的动力。

现代地形变观测实际上是各种周期波通过倾斜仪、应变仪、重力仪和断层仪等增益后的累积,在采样率及精度较高的情况下可记录到地球潮汐、同震地震波及地壳深部应力扰动。可将其信息分解为 4 个部分:①与构造活动变形可能有关的信息或一些长期变化,用 S_s 表示;②与地震孕育成核过程可能相关的短临前兆信息,用 S_n 表示,最小地震前兆距离范围内可能观测不到该信息;③地壳内存在的应力波,用 S_w 表示;④观测仪器、场地环境及气象环境等变化引起的干扰,用 S_d 表示。故 S 可表示为

$$S = S_s + S_n + S_w + S_d \quad (1)$$

式中, $S_s + S_n$ 表示观测场地附近发生的长期和短期变化的信息,由于仪器频响限制,该部分可能较弱; S_d 表示形变观测场地、观测仪器响应、观测环境及气象环境变化等因素的影响; S_w 则表示地壳内部存在的多种周期地应力波的作用。

基于地壳内软流层物质流动引起的应力应变变化,20 世纪 70 年代国际上出现了长周期地形变波或地应力波的概念,并引起了广泛的关注。许多学者就地形变波的存在、检测及发生机理进行了研究(Bott et al, 1973; Anderson, 1975; Scholz, 1977; 笠原太一, 1984; Meyer et al, 1988; 冯德益等, 1993; 牛安福等, 1995; 牛安福, 2017; 王绳祖等, 2000; Takahashi et al, 2005)。自 Molnar 等(1975、1978)和 Tapponnier 等(1976)提出板块内部滑移线和岩石圈下层流动传力的概念后,关于地壳和壳内软流层的流动性已被学者接受,并用于构建大陆地壳运动的塑性流动网络,该网络给出了地壳内部应力波传递的路径,其直接影响着中国大陆的地壳变形与地震活动(罗灼礼等, 1995; 王绳祖等, 2000)。

因此,地形变观测到的各种异常在排除干扰后,均可以归结为地应力波。地应力波存在的意义在于时效性,即某个观测点记录到地应力波后,通常会在一定时间段内触发相应震级的地震,地震发生后,地应力波的作用即消除。在此基础上建立起来前兆异常与地震间的关系,即满足时间约束,而距离不受条件约束。尽管距离可能较远,但仍可能找到距离及震级分布的规律,从而有利于地震三要素的预测。

2 汶川地震前显著形变异常与地震的相关性讨论

为研究形变前兆异常与地震之间的相关性,依据时间约束、距离不受约束的思路,提出地震发生的最小等待时间准则。异常 A 结束后,某一时间段 T_0 内、震级大于某一水平 M_0 的首发地震作为一组相关地震,可描述为

$$E_c = \{E_1; E, T \leq T_0 \& M \geq M_0 | A\} \quad (2)$$

式中, A 表示形变异常事件。对于短期应力波震前变化,取 $T_0 = 90$ 天, $M_0 = 6.0$ 。

对于形变异常与相关地震,可建立异常统计特征与地震震级、震中距之间的关系(牛安福, 2003)。利用给出的关系,可进一步修正相应的模型,其中一个关系模型即为

$$M = 1.36 \lg T + 0.543 \lg(D/D_0) + 4.161 + \varepsilon_1 \quad (3)$$

式中,误差项 ε_1 服从正态分布,其均方差 $\sigma(\varepsilon_1) = 0.28$; D_0 表示地壳内部地应力波传播中的半波长,约为 290km。

Niu 等(2020)应用式(3)作为判别形变异常与地震关联的准则。对于每一项异常,在获取异常持续时间信息后,应用异常点与目标地震间的距离,即可给出相应的震级估值,若震级估值与目标地震的震级差小于 2 倍震级拟合均方差,即认为异常与地震 95% 信度相关。

汶川地震前,在远离震中近千千米的红柳峡断层水准场地观测到显著异常(图 1),该场地位于祁连山地震带上,与汶川地震无直接关联。在异常发生后一段时间内,断层场地周边并没有相应震级的地震活动,因此,关于红柳峡断层场地水准异常变化的意义一直没有得到很好的解释。

红柳峡场地水准观测始于 1979 年,观测周期不固定,最初 10 年为 1 次/年,1989—2003 年为 3 次/年,2004—2008 年为 6 次/年,2009 年以后改为 3 次/年。该观测场地有 4 个测量端点,其中 E 端点和 S 端点近于垂直断层。与其他测段水准变化相比,该测段异常特征较为显著,易于识别。汶川地震前,在相对较平稳的背景上,2007 年 5 月—2008 年 1 月间该测段异常持续 9 个月,幅度达 2.2mm。类似的异常在 2017 年九寨沟 7.0 级地震前也出现过,在 2016 年 7 月—2016 年 11 月间,观测值突破原来逐渐下降的趋势,快速转向上升,持续时间 4

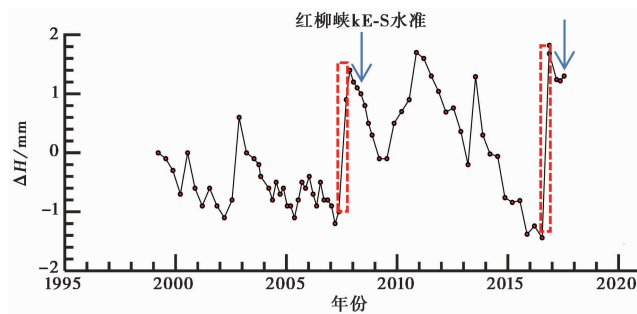


图1 汶川地震、九寨沟地震前红柳峡水准异常
虚框表示异常时段;箭头表示地震发生时刻

个月,幅度达到3.2mm。在2016年11月发现显著的异常变化时进行了复测,变化量值仍然在3.2mm左右,之后每2个月加测一次,直到2017年8月8日九寨沟7.0级地震前。

该断层场地距离汶川地震与九寨沟地震分别为1150km和950km,作为前兆已超出了传统意义上的理解。这样的变化意味着什么?很少有学者去探讨分析其发生的机理与汶川地震、九寨沟地震之间的联系。

依据红柳峡水准异常特征及震中距,应用式(2)分别给出了汶川地震震级估值为7.79、九寨沟地震震级估值为7.27,与实际地震震级误差均在2倍拟合均方差内。由此可判断,红柳峡水准2次显著异常与汶川地震和九寨沟地震具有一定相关性。

3 远场形变前兆变化的动力学意义

板块构造说认为地幔对流是板块运动的主要驱动机制。地幔由高温的热物质组成,由于地幔内部存在密度和温度的差异,导致固态物质也可以发生流动。地幔对流是一个复杂的系统,它既是一种热传导方式,又是一种物质流的运动。地幔对流可以从核幔边界上升至岩石圈底部,形成全地幔对流环;也可以分层对流,即上、下地幔分别形成对流环。

受地幔对流影响,地壳在长期应力作用下可以发生塑性流动,由于造山运动与火山活动而增高,在重力作用下发生侧向滑动,并向海洋侵入。Tapponnier等(1976、1977)采用滑移线场模拟了亚洲大陆构造,以印度作为冲压地块,许多巨大的走向滑移断层均可由滑移线拟合。结合6级以上地震震中分布、强震地表破裂带和震源机制解以及活动构造资料等,罗灼礼等(1995)勾画了中国大陆及邻区现代构造滑移线,其作为最大剪切应力和剪切应变集中释放的区带,控制了地震活动和构造运动的空间分布格架。王绳祖等(2000)同样也给出了中国大陆塑性流动网络,块体边界基本上均为重要的滑移线,滑移线场分布展示了地壳深部物质流动或应力波传播的主要通道。

腾吉文等(2008)针对汶川地震发生前未见可能的确切征兆或浅表层异常活动,即浅层过程与地震发生的深层过程并不匹配现象,对这次强烈地震孕育、发生和发展的深层过程进行了分析和探讨,初步研究表明在印度洋板块与欧亚板块陆陆碰撞、挤压作用下,喜马拉雅造山带东构造结向NNE方向顶挤、楔入青藏高原东北缘,迫使高原深部物质向东流展,同时由于中、下地壳和地幔盖层物质以地壳低速层、低阻层(深20~25km)为第一滑移面,以上地幔软流层顶面为第二滑移面,在四川盆地深部“刚性”物质阻隔下,地壳深部物质以高角度在

龙门山断裂相遇,触发地震。

物质流动对汶川地震的影响可借助流体的运动模型进行模拟,在底部边界上翘或通道变窄的情况下,或产生较显著的变形,或触发强震的发生(Niu et al,2020)。这与岩石破裂实验及理论结果一致(Das et al,1981;朱守彪等,2009;缪阿丽等,2012)。

从构造上看,汶川地震、九寨沟地震与红柳峡水准观测点不在同一个块体上,但从重力分布(申重阳等,2009)及滑移线分布(王绳祖等,2000)来看,其均位于地壳深部物质易于流动的通道上,这个通道应是应力传递最重要、最快捷的途径。

4 结论与讨论

前兆与地震的相关性判别问题是地震研究的基础问题,长期以来对该问题的处理主要依赖专家经验。在对形变观测原理、观测影响因素及震例进行研究的基础上,我们发现自然环境下的变形特点不同于有限尺度岩体的变形,前兆也不是我们想象中的前兆。

传统意义上对地形变观测前兆的理解通常将其与断层的稳态滑动、非稳态滑动及破裂成核过程联系起来(Dieterich,1979;Das et al,1981;朱守彪等,2009;缪阿丽等,2012)。而日积月累的观测事实表明,断层稳态滑动或无震滑动不是过程的结束,而是地应力波传递路径中的一个信息窗口。在断层出现无震滑动时,尽管所在断层通常不会发生预期地震,但很有可能短时间内在另一相关断层上发生大地震,一些实验结果证实了这一点(马瑾等,2002)。

由于地壳应力场变化的波动性,一些显著的应力应变异常点通常远离震中。对于近距离(如200km尺度)异常与地震间的相关性通常容易被接受,但距离地震较远的异常,其与地震之间的相关性则必须依据一定的相关性判别准则进行判断。本文对红柳峡断层水准异常与汶川地震、九寨沟地震的相关性进行了探讨,尽管其中还有不少问题需要论证,但至少给出了前兆问题研究的一个拓展方向。

致谢:感谢一审稿人查阅了作者几乎所有相关文章,并提出了一些建设性的修改意见。

参考文献

- 冯德益,聂永安,郭瑞芝,等,1993. 构造波及其在地震预报中的应用. 地壳形变与地震,13(1):1~9.
- 笠原太一,1984. 地震力学. 赵仲和,译. 北京:地震出版社,190~197.
- 罗灼礼,闻学泽,罗伟,1995. 中国大陆原地复发强震的基本特征及其预测. 地震,15(1):1~11.
- 缪阿丽,马胜利,侯林锋,等,2012. 岩盐断层带摩擦滑动的速度依赖性转换及其地震学意义. 地球物理学报,55(10):3307~3317.
- 牛安福,2003. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究. 地震学报,25(4):441~445.
- 牛安福,2005. 地震短期、短临预测面临的“最后一分钟”. 国际地震动态,(2):29~31.
- 牛安福,2007. 地壳形变观测与地震前兆一般性问题的讨论. 国际地震动态,(6):43~48.
- 牛安福,2017. 地应力波与地震预测基础. 北京:地震出版社.
- 牛安福,吴翼麟,陈德福,等,1995. 大同地震及其异常地倾斜场. 地震学报,17(1):499~504.
- 马瑾,马胜利,刘力强,等,2002. 断层相互作用型式的实验研究. 自然科学进展,12(5):503~508.
- 申重阳,李辉,孙少安,等,2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程. 地球物理学报,52(10):2547~2557.
- 孙文科,2012. 地震位错理论. 北京:科学出版社.
- 腾吉文,白登海,杨辉,等,2008. 2008 汶川 $M_s 8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报,51(5):1385~1402.
- 王绳祖,张四昌,田勤俭,等,2000. 大陆动力学:网状塑性流动与多级构造变形. 北京:地震出版社.

- 朱守彪,张培震,2009. 2008年汶川 M_s 8.0地震发生过程的动力学机制研究. 地球物理学报, **52**(2):418~427.
- Amoruso A, Crescentini L, 2010. Limits on earthquake nucleation and other pre-seismic phenomena from continuous strain in the near field of the 2009 L'Aquila earthquake. *Geophys Res Lett*, **37**(10):110307.
- Anderson D L, 1975. Accelerated plate tectonics. *Science*, **187**(4181):1077~1079.
- Bakun W H, Aagaard B, Dost B, et al, 2005. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, **437**(7061):969~974.
- Bilham R, 2005. Coseismic strain and the Transition to Surface Afterslip recorded by Creepmeters near the 2004 Parkfield epicenter. *Seismol Res Lett*, **76**(1):49~57.
- Bott M H P, De'An D S, 1973. Stress diffusion from plate boundaries. *Nature*, **243**(5406):339~341.
- Chen Y, Booth D C, 2011. The Wenchuan Earthquake of 2008: Anatomy of a Disaster. Beijing: Science Press and Berlin Heidelberg: Springer, 134.
- Das S, Scholz C H, 1981. Theory of time-dependent rupture in the earth. *J Geophys Res*, **86**(B7):6039~6051.
- Dieterich J H, 1979. Modeling of rock friction: I. Experimental results and constitutive equations. *J Geophys Res*, **84**(B5):2161~2168.
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, 1992. The Loma Prieta earthquake, 1989 and earth strain tidal amplitudes: An unsuccessful search for associated changes. *Geophys Res Lett*, **19**(3):317~320.
- Meyer K, Olsson R, Scherman S, 1988. Stress migration in the North Atlantic and intraplate seismicity in Scandinavia—a proposal. *Tectonophysics*, **156**(1~2):175~178.
- Mogi K, 1993. Mechanism of earthquake precursors. Xu F, trans. *Trans World Geol*, **24**(4):11~16.
- Molnar P, Tapponnier P, 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, **189**(4201):419~426.
- Molnar P, Tapponnier P, 1978. Active tectonics of Tibet. *J Geophys Res*, **83**(B11):5361~5375.
- Mortensen C E, Johnston M J S, 1976. Anomalous tilt preceding the Hollister earthquake of November 28, 1974. *J Geophys Res*, **81**(20):3561~3566.
- Niu A F, Zhao J, Yan W, et al, 2020. Study on the criterion of the correlation between deformation precursors and earthquakes, *Earthquake Research in China*, 2020, **34**(3):394~405.
- Scholz C H, 1977. A physical interpretation of the Haicheng earthquake prediction. *Nature*, **267**(5607):121~124.
- Takahashi K, Seno T, 2005. Diffusion of crustal deformation from disturbances arising at plate boundaries—a case of the detachment beneath the Izu Peninsula, central Honshu, Japan. *Earth Planets Space*, **57**:935~941.
- Takemoto S, 1991. Some problems on detection of earthquake precursors by means of continuous monitoring of crustal strains and tilts. *J Geophys Res*, **96**(B6):10377~10390.
- Tapponnier P, Molnar P, 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, **264**(5584):319~324.
- Tapponnier P, Molnar P, 1977. Active faulting and tectonics in China. *J Geophys Res*, **82**(20):2905~2930.

Far Field Deformation Anomaly and Its Correlation with Earthquake before Wenchuan Earthquake

Niu Anfu Zhang Lingkong Zhang Jing Yan Wei Zhao Jing Yue Chong
Yuan Zhengyi

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract It is very important to understand the process of earthquake preparation and to carry out earthquake prediction research of the significant abnormal changes which are related to the earthquake. However, no many people have carried out such researches in past. In this paper we analyzed the characteristics of some significant deformation anomalies before Wenchuan earthquake, and found that there are few anomalies near the epicenter before the earthquake, whereas some prominent anomalies are found around the periphery. In order to find the correlation between far field anomalies and earthquake, we proposed a correlation criterion based on a modified statistical-physical model between the precursor duration, epicenter distance and magnitude. A case study of relationship between leveling anomalies along Hongliuxia fault and Wenchuan has been carried out. Finally, we discussed the dynamic meanings of far field deformation precursors.

Keywords: Wenchuan earthquake; Deformation precursors; Far field correlation; Correlation criterion