

DOI:10.13203/j.whugis20220117



文章编号:1671-8860(2022)06-0839-10

汶川地震孕育过程中变形场变化特征研究

牛安福¹ 赵 静¹ 菡争一¹ 吉 平¹

1 中国地震台网中心,北京,100045

摘要:揭示与地震孕育过程相关的变形场特征是判别地震孕育阶段及地震危险性的一个重要途径。收集汶川Ms 8.0地震震中区汶川台自2002年10月至汶川地震前的地倾斜观测数据,利用小波分析方法和分段拟合方法,提取了震前地倾斜变化的阶段性特征;利用2001年以来全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)站坐标日解数据,计算了震中附近的泸州GNSS站与周围GNSS站间基线,通过基线变化与区域地震的Benioff蠕变结果的对比,发现了二者的协同性特征。分析结果表明,2004年底汶川台地倾斜速率出现显著下降,西向倾斜速率由230 ms/a减少到130 ms/a;2007年初至地震前减少到60 ms/a;2007年底至地震前未出现指数量级加速变化。广州-泸州GNSS基线在2005年初开始的加速缩短异常与Benioff蠕变亏损异常具有较高的相关性,相关系数为0.89;该基线加速缩短持续时间约2.5 a,对应地震的震级估计为7.9级,与汶川地震震级相当,反映了其与汶川地震的应变积累具有一定的相关性。2004年苏门答腊Ms 8.9地震的发生对川滇地区应力应变场影响较为显著,对汶川地震的孕育发生起到了加速作用。研究结果对于认识地壳形变观测的意义及创新地震预测思路具有参考价值。

关键词:汶川地震;地倾斜;GNSS基线;Benioff蠕变;相关性分析

中图分类号:P315

文献标志码:A

大地测量是监测地壳运动与地壳变形,开展地震危险性判定及预测预报研究的重要手段。自1966年邢台地震以来,经过半个多世纪的努力,中国业已建立了具有一定监测能力的地形变观测网络^[1-3],并在认识地壳运动及研究同震形变等方面取得了较重要的科研成果^[4-10],但在震前变形与地震关系研究方面,主要以震例研究为主,在研究思路和研究方法上未有明显突破。

2008年5月12日汶川Ms 8.0地震发生在青藏高原东部巴颜喀拉地块与华南地块交界的NE向龙门山断裂带上,该断裂带包括前山断裂(frontrange fault, FF)、中央断裂(central fault, CF)和后山断裂(backrange fault, BF)(图1)。地表破裂带分别沿中央断裂中、北段和前山断裂中段展布,震源破裂起始于映秀镇以西,朝东北呈单侧破裂扩展至青川附近,共形成了约240 km的地表断裂带。断层破裂运动以逆冲和右旋走滑分量为主,同震垂直位移为4~6 m,右旋水平位移为3~5 m^[11-12]。沿该断裂带附近有

多个地倾斜观测点和跨断层水准观测场地,临震前没有观测到显著的前兆信息^[13],因此,在汶川地震后的多次研讨会上,不少专家对大地测量观测技术及观测意义提出质疑。

依据弹性回跳理论和构造形变特点,在20世纪60年代国际上首次提出利用监测断层预滑移进行地震预报的思路,并成为各国地壳形变观测网络规划及地震预测的重要依据。许多学者认为,大地震前在发震断层附近应该能监测到预滑移或显著变形异常,如指数量级加速变化。然而,自21世纪以来,国际上一些震例研究发现,即使在发震断层附近布设相对密集的形变观测网,进行倾斜、应变和跨断层水准测量等,临震前仍可能难以观测到显著的变形异常^[14-18]。

形变前兆和地震之间的关系看似不同寻常,但它有自身的规律和原因^[19]。本文以震中区和外围场地形变观测数据为基础,重点研究汶川地震前不同构造部位、不同时间尺度地壳变形过程特征,通过相关分析探究震前变形与大区域地震活动之间的联系。

收稿日期:2022-03-08

项目资助:国家重点研发计划(2018YFC1503606);国家自然科学基金(41330314)。

第一作者:牛安福,博士,研究员,主要从事地壳变形分析与机理研究。niuanfu01@sina.com

通讯作者:赵静,博士,副研究员。zhaozhengjiajia1@126.com

1 汶川地震孕育发生背景

汶川地震是2001年昆仑山Ms 8.1地震后中国大陆7级地震平静6年之久，在2008年新疆于田Ms 7.3地震打破平静后发生的一次灾难性地震。这次地震夺去了69 227人的生命，使17 927人下落不明，受灾人口4 625万，直接经济损失8 451亿元，是新中国成立以来发生在中国境内受灾面积最大、损失最重的一次地震。

汶川地震发生的构造及动力背景已有许多学者进行了研究^[20-21]，图1为汶川地震孕育发生的主要动力背景。由图1可以看出，由于印度板块对欧亚板块的强烈推挤以及青藏高原的强烈隆升作用，使得青藏地块产生E向和SE向的水平挤出运动。巴颜喀拉地块属于青藏地块的次级块体之一，它在E向和SE向的水平挤出运动中，受到华南地块的阻挡而产生纵向变形，使得该块体的前端地壳增厚。同时，该块体20~25 km深度上存在的低速带可成为上地壳与中-下地壳相对运动的“解耦”带，该低速带沿SE向延伸，终止于龙门山断裂带之下，使得低速带终止端附近上地壳的SE向水平运动被迫转换为龙门山断裂带的逆冲运动，从而促进汶川地震的发生。

中国大陆受到欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块的联合作用，与地震活动相关的应力场往往具有较广泛的区域。已有研究发现，中国东南沿海的大地震以圆形地震构造为特征，圆形地震段与中国大陆的大地震互补^[22]，与汶

川地震相关的动力因素可扩展到环太平洋地震带^[23]。2001年昆仑山地震后，Ms 5.5及以上地震主要分布在青藏高原东部、华东南地区和台湾地区，并形成一个近于SE向的地震活动空区，如图2所示。

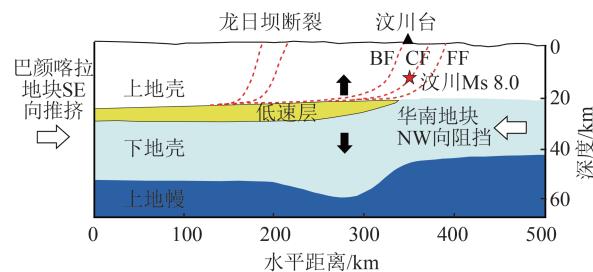


图1 汶川地震孕育的动力背景(改自文献[21])

Fig.1 Dynamic Background of the Wenchuan Earthquake
(Modified from Reference [21])

地震空区主要指地震活动的间隙区，可分为两类：一类是地震带上大地震震源区分布的空段，另一类是缺少中小地震的区域^[24]。汶川地震发生在龙门山断裂一百多年来7级地震活动的空段上和2000年以来4级地震活动的空区内^[25]。由于不同区域地震活动背景不同，空区的划分没有明确的界定^[26]，本文给出的地震空区指Ms 5.5地震活动的内边界。

汶川地震发生前，中国地壳运动观测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 中全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 个别站点的观测结果，也为揭示汶川地震的孕育发生过程提供了重要信息，本文选取的相关站点分布如图2所示。

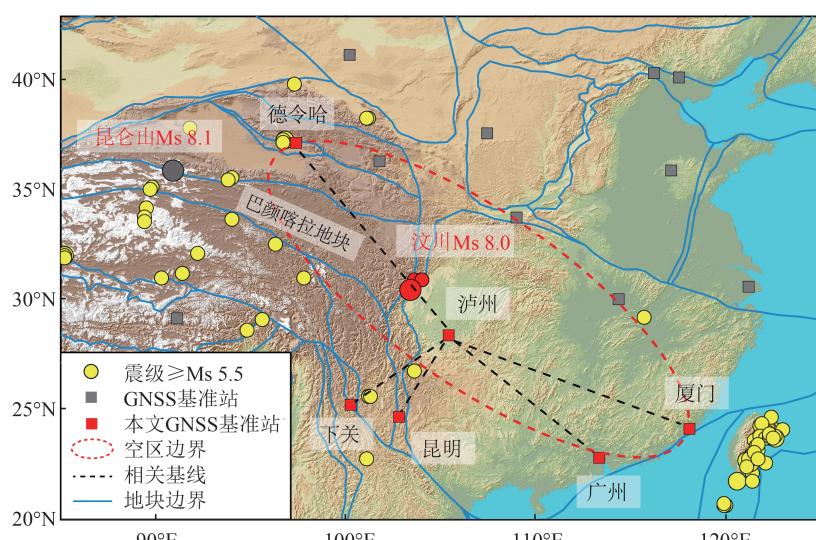


图2 汶川地震前Ms 5.5及以上地震分布与GNSS站点分布

Fig.2 Distribution of GNSS Stations and Earthquakes with $Ms \geq 5.5$ Before the Wenchuan Earthquake

2 数据和基本分析方法

2.1 地倾斜数据

获取并研究震中区的变形特征是认识地震孕育发生过程的一个重要途径。因此,在一些地震多发区域都曾建有地形变观测场地或台站,以期捕捉到震前发震断层的预滑移信息^[1-3]。为监测龙门山断裂带断层活动,在20世纪70年代沿该断裂带开始流动跨断层水准观测,2002年在汶川等地又开展了地倾斜观测。

汶川台是距震中最近的形变观测台站,位于龙门山断裂带的后山断裂上,台站位置见图1。本文收集整理了汶川台自2002年10月开始正常观测至汶川地震前的地倾斜数据,时间跨度约6年。该台采用石英摆倾斜仪,在洞深25 m、覆盖层40 m、年温差低于0.3°的山洞内进行观测,2个独立的钵体分别进行EW向和NS向观测,钵体固定在同一大理石墩上,光杆距均为5.0 m,采取光照相记录,人工读取整点值。对观测以来EW向与NS向倾斜进行潮汐分析,发现潮汐因子变化较为稳定,其中NS向和EW向潮汐因子误差分别为0.019和0.094。

2.2 GNSS 站间基线

自1999年以来,CMONOC有24个GNSS站开始连续观测并记录数据,在地震空区周围有少量GNSS站,包括泸州、广州、厦门、德令哈、下关和昆明等站点。广州-泸州基线和厦门-泸州基线靠近椭圆长轴方向,德令哈-泸州基线连接昆仑山Ms 8.1和汶川Ms 8.0地震的震中区,下关-泸州和昆明-泸州基线靠近椭圆短轴方向。

应用GNSS站坐标每天解算结果,计算距震中较近的泸州站至周边GNSS站间的大地线长度作为基线长度。将第一天的基线长度置为零,得到基线相对变化量。为滤除基线中高频信息的影响,本文采取了6阶DB小波进行拟合,给出了相对稳定的趋势变化。

2.3 Benioff 蠕变

应用Kanamori能量-震级经验公式^[27],以1个月为窗长逐月滑动,计算研究区域任意时段Ms 5.5及以上地震释放的Benioff蠕变,它能够反映区域地震能释放水平^[28-29]。本文计算使用中国地震台网中心地震目录(见<https://data.earthquake.cn/czdzml/index.html>),该目录对于Ms 5.5及以上地震较为完备^[25]。

2.4 相关分析方法

选择最初变化趋势较好的时间段作为基准,对Benioff蠕变数据和GNSS基线数据分别建立线性模型并进行滤波,得到两个近于平稳、但包括异常的残差序列。选择最简单的相关模型,以GNSS基线残差为因变量,Benioff蠕变残差为自变量,建立回归模型,获取两个残差序列之间的回归系数及拟合误差。如模型拟合残差位于2倍均方差内的点占比高于95%,即认为符合正态分布,模型检验有效。

3 数据分析与计算结果

3.1 汶川台地倾斜特征分析

汶川台NS向倾斜变化具有较平稳的年变特点,年变化幅度约为260 ms,未有显著的异常特征。图3为汶川台EW向地倾斜变化,其中A、B为速率变化转折点。由图3可以看出,EW向倾斜序列具有明显的非线性,可分为3个线性段,分别为2002-10—2004-12(A点)、2005-01—2007-01(B点)及2007-02—2008-05(汶川地震前)。每个阶段地倾斜变化都具有相对平行的上、下包络线,取上、下包络线的中间为阶段趋势线,趋势线的斜率表示倾斜变化速率,3个阶段的变化速率分别约为-230 ms/a、-130 ms/a和-60 ms/a。对各个阶段进行线性滤波得到相应的残差,获得整个序列的期望值为0.0 ms,均方根误差为75.2 ms,残差序列中97.5%的点分布在2倍均方根误差内,满足正态分布检验条件。地倾斜序列的3个阶段的划分与同处龙门山断裂带后山断裂上映秀场地重力阶段性变化特点接近^[30]。

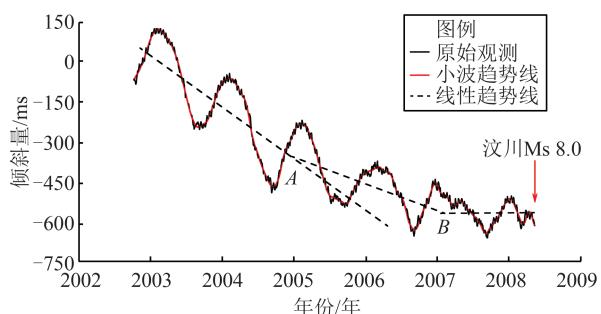


图3 汶川台地倾斜EW向变化

Fig.3 EW Tilt at Wenchuan Deformation Station

3.2 GNSS 基线分析

按照GNSS站点分布及地震活动区域特点,本文选取靠近汶川地震震中区的泸州站与周边站点间的5条基线,基线长度变化曲线如图4所示,其中C、D为速率变化转折点。

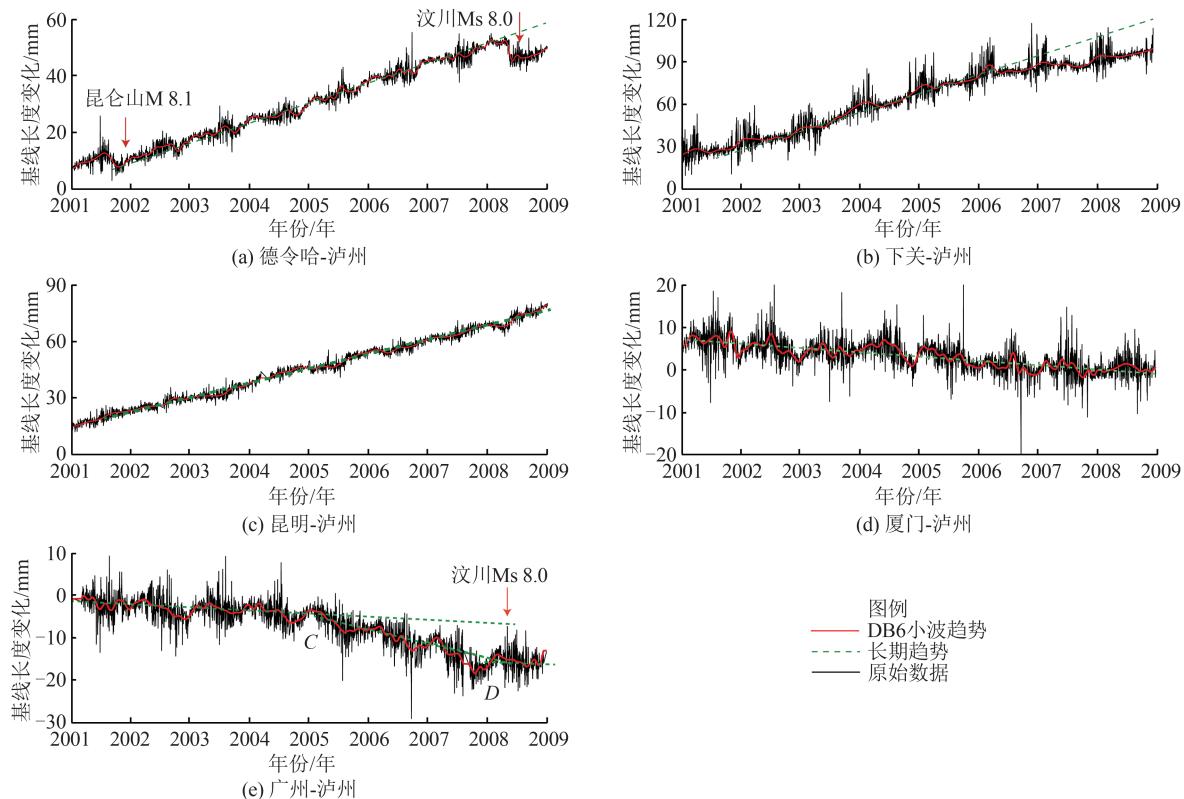


图4 泸州GNSS站至周边站间基线变化

Fig.4 Change of Baselines Between Luzhou Station and the Surrounding GNSS Stations

具体分析如下：

1) 泸州GNSS站是距离汶川地震震中最近的一个基准站,距震中约200 km。德令哈-泸州基线靠近空区椭圆长轴方向,且连接了昆仑山Ms 8.1和汶川Ms 8.0地震的震中区。由图4(a)可以看出,由于受印度板块和欧亚板块的共同作用,巴颜喀拉地块受到NE向挤压,川滇地区呈现东向逃逸,德令哈-泸州基线变化以拉张为主。2008年3月中旬开始,该基线出现快速反向变化,直到汶川地震发生,持续时间近2个月,最大异常幅度约8 mm。类似的现象也出现在昆仑山地震前,2001年7月底出现显著反向加速变化,持续时间3个月,最大异常幅度约5 mm,地震发生在加速停滞、回复过程中,地震后回复原有趋势。下关-泸州和昆明-泸州基线是靠近空区椭圆短轴方向的两条基线。由图4(b)可以看出,自2006年初开始,下关-泸州基线拉伸速率减缓,呈现持续的负异常,直到汶川地震前,异常幅度达30 mm。由图4(c)可以看出,昆明-泸州基线在汶川地震前出现小幅度扰动,无显著趋势变化异常。

2) 厦门GNSS站位于中国东南沿海地区,距离中国台湾岛较近。台湾岛位于菲律宾和琉球两条俯冲构造带的交接部位,在台湾岛的南、北两端以NW向转换断层与之相接,由于菲律宾海

板块与欧亚大陆板块和太平洋板块的相互碰撞聚合作用,在台湾岛形成了以中央山脉为主要代表的挤压逆冲构造形变带,发育着大量NE或近NS走向的叠瓦状逆冲或逆掩断层,构造变形和地震活动都非常强烈,碰撞挤压作用还影响到台湾海峡和东南沿海等地^[31-32]。厦门-泸州基线近似分布在空区椭圆的长轴方向,由图4(d)可以看出,由于受菲律宾板块NW向挤压及地震活动影响,其主要表现压性变化。台湾地区地震活动分布呈现从集性,研究时间段内,Ms 5.5及以上地震集中分布在2002年中、2003年底至2005年中,2006年底至2007年中,每个时间段都有Ms 7.0以上地震发生。在地震从集发生间隙,厦门-泸州基线呈现较快的压缩变化,表明该基线所受挤压作用增强。由于台湾周边地震活动较有节律,汶川地震前该基线并没有显著的挤压变化异常。

3) 由图4(e)可以看出,广州-泸州基线在汶川地震前变化较为显著。2001年初至2004年底(C点),该基线以约0.8 mm/a的缩短速率变化,具有较好的年变化形态;2005年初至2007年中(D点),该基线以约8 mm/a的速率快速缩短,最大累积压缩幅度约20 mm,这在华南地区较为少见;2007年中之后,该基线开始回复,直到汶川地震发生。

3.3 区域地震的 Benioff 蠕变分析

图 5 为 2001—2008 年中国大陆 Ms 5.5 及以上地震震级-时间图和相应的 Benioff 蠕变释放曲线,其中 E、F 为转折点。由图 5 可以看出,昆仑山 Ms 8.1 地震后 1~3 年,地震能量释放速率较为稳定;2004 年 9 月开始(E 点),释放速率显著减小,直到 2007 年 6 月(F 点),地震应变释放一直处于亏损状态;2007 年 6 月至汶川地震前,蠕变继续亏损。汶川地震后,蠕变速率基本回复到 E 点之前的水平。

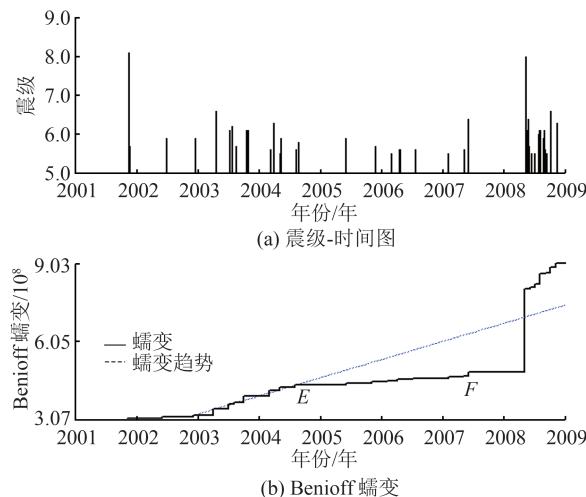


图 5 2001—2008 年 Ms 5.5 及以上地震的震级-时间图
和 Benioff 蠕变

Fig.5 M-t Map and Benioff Creep of Earthquakes with $Ms \geq 5.5$ from 2001 to 2008

大地震前 Benioff 蠕变亏损现象在以往也出现过。2001 年昆仑山 Ms 8.1 地震前,中国大陆最近发生的一个大地震是 1951 年西藏当雄 Ms 8.0 地震,距其 600 km。在西藏当雄地震后的最初几年,Benioff 蠕变释放较有规律,后变得较为平静,在其后的每次 Ms 7.0 地震前都可监测到不同时间尺度的蠕变释放亏损现象。

4 讨论

4.1 震中区变形特征

对汶川台地倾斜速率变化阶段性特征研究表明,2008 年汶川震前 3 年倾斜持续减速,且临震前 0.5 年未检测到显著的指数加速变化,这一特点与通常对地震前兆的理解有很大不同。其主要原因在于,震前变形与震间变形、同震形变和震后变形不同,在地震未发生前,并没有或不存在一个实质上的位错源。随着应变的不断积累,发震断层还可能出现高度闭锁现象,使得临震前

震中附近变形速率越来越小,异常越来越少。这是地震预测面临的一个问题,也为地震预测研究提供了新的思路。

从中长期预测来看,地震前 3~5 年震中区可能观测到变形速率减小现象,反映了区域应变快速积累的开始。因此,可将其作为中长期大地震危险区判定及阶段性判别的一个主要的依据^[33]。

临震前发震断层附近观测不到显著变形加速异常,可能反映了临震前震中附近变形的一个常态特征,因此,变形速率最小的地区或断层有可能是未来发震区域或发震断层。在孕震区,如有较密集的形变观测台网,有可能观测到一些加速变形异常,根据其异常特征可给出相应的震级范围、震中距离范围或震中方位估计,利用异常所在断层寻找与其斜交的断层作为未来发震断层^[34-35],这对于地震短期预测是很有意义的。本文笔者及其团队开展了一些预测实验,对 2021 年漾濞 Ms 6.4 地震、2021 年泸县 Ms 6.0 地震和 2022 年德令哈 Ms 6.0 地震进行了一定程度的短期预测。

4.2 广州-泸州 GNSS 基线缩短与 Benioff 蠕变变化亏损相关性

对比图 5(b)和图 4(e)可以发现,两者异常的开始时间(E 点和 C 点)和结束时间(F 点和 D 点)较为接近,震前特征均为负异常,异常幅度均较为显著,相关系数为 0.89。为进一步分析其相关性变化,应用线性模型对两者进行模型分析。

1) 对广州-泸州基线日值数据通过取月均值转化为月采样,即每月 1 个值。2001 年 11 月为第一个月, $i=1$; 汶川地震当月, $i=79$; 2008 年 12 月为最后一个月, $i=86$ 。

2) 以 2004 年 12 月之前的基线及 Benioff 蠕变为基础数据构建线性模型,并进行滤波,分别得到残差,计算式为:

$$dL_i = \Delta L_i - (0.077i - 3.584) \quad (1)$$

$$d\epsilon_i = \epsilon_i - (0.0552i + 2.7478) \quad (2)$$

式中, ΔL_i 、 dL_i 分别表示基线变化相对值和残差值,单位为 mm; ϵ_i 、 $d\epsilon_i$ 分别为标准化的 Benioff 蠕变及线性滤波残差值,量级为 10^8 。

3) 对于 $i=1, 2 \dots 78$, 通过相关分析方法得到:

$$dL_i = 6.0d\epsilon_i + \Delta_i \quad (3)$$

$$\Delta_i = dL_i - 6.0d\epsilon_i \quad (4)$$

式中, Δ_i 表示以 Benioff 蠕变对广州-泸州 GNSS 基线拟合的误差,其均方根误差为 1.70 mm, 以

96.2%的概率服从正态分布。

图6为广州-泸州基线缩短与Benioff蠕变相关分析。由图6可以看出,在汶川地震前,即*i*=1,2…78,GNSS基线缩短与Benioff蠕变之间存在较强的相关性,通过相关分析获得的广州-泸州基线拟合残差为一个平稳过程。

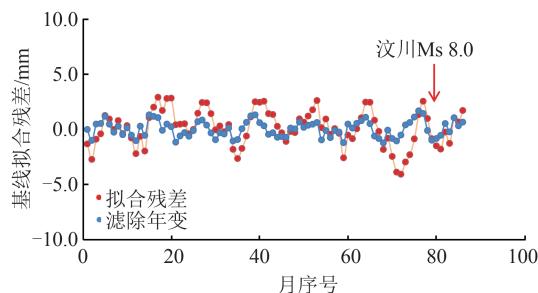


图6 广州-泸州GNSS基线缩短与Benioff蠕变相关分析
Fig.6 Correlation Analysis on Shortening of Guangzhou-Luzhou GNSS Baseline and Benioff Creep Anomaly

对比图5(b)与图4(e)还可以发现,汶川地震前广州-泸州GNSS基线缩短与Benioff蠕变亏损异常正相关,而汶川地震后变为负相关。通过对震后数据相关分析,得到回归系数为-3.0。回归系数由6.0变化到-3.0,可以简单理解为汶川地震释放能量的50%转化为当地的地应变。对于*i*=79,80…86,则有:

$$\Delta_i = dL_i + 3.0d\epsilon_i \quad (5)$$

借助Benioff蠕变对广州-泸州基线异常,分别进行震前、震后相关分析,全部时序过程残差 Δ_i 均值为0.0 mm,拟合均方根误差为1.62 mm,有96.55%点分布在2倍拟合误差范围内,模型检验成立,广州-泸州GNSS基线异常变化与Benioff蠕变相关。由于在最初的计算中未滤除基线中的年周期,所有残差中也存在明显的年周期。图6中也给出了滤除拟合残差年周期后的结果,平均值为0.0 mm,均方根误差为0.72 mm,服从正态分布。

广州-泸州基线与Benioff蠕变具有较高的相关性,主要是与Benioff蠕变表示的意义有关。地震释放的能量E同样可以用断层错动位移来描述^[36]:

$$E = \frac{4}{\pi} \mu L \Delta U_s^2 + \frac{16}{3\pi} \mu L \Delta U_d^2 \quad (6)$$

式中, $\frac{4}{\pi} \mu L \Delta U_s^2$ 和 $\frac{16}{3\pi} \mu L \Delta U_d^2$ 分别表示走滑分量 ΔU_s 和倾滑分量 ΔU_d 释放的能量; μ 表示剪切模量;L为断层长度。式(6)可简化为:

$$E = \frac{4\mu L \beta}{3\pi} \Delta U^2 \quad (7)$$

式中, $\Delta U = \sqrt{\Delta U_s^2 + \Delta U_d^2}$; $3 \leq \beta \leq 4$ 。

由式(7)可知,每次地震的Benioff蠕变正比于地震断层位错量,反映了地震释放能量的平方根。当区域地震活动按照一定的速率释放时,难以积累更大规模的应变能;当地震活动开始出现平静时,区域大规模的应变积累也将开始。由图4(c)中广州-泸州基线加速缩短的开始时刻(C点)和结束时刻(D点)可知,加速缩短异常持续时间约2.5年,按照加速变形时间与地震震级间的关系公式^[37],得到相应地震震级估计为7.9级。与汶川地震的震级较为吻合,表明震前该基线加速缩短过程与汶川地震的应变积累具有一定的相关性。

比较图4中泸州GNSS站至周边站间基线变化特点也可以发现,汶川地震前不同方向基线变化特征是有差别的。沿靠近空区长轴方向的广州-泸州基线在2005年初开始加速缩短,沿靠近短轴方向的下关-泸州基线在2006年初拉张速率开始减缓,而其他方向基线长期异常特征不明显;连接昆仑山地震和汶川地震震中区的德令哈-泸州基线短期特征较明显,在震中附近临震前变形较弱的情况下,该基线短期变化对8级地震具有较好的反映能力。

不同方向基线变化特点的差异性,可能反映了大震前不同构造部位对汶川地震应变积累具有不同的作用,及不同站间基线对外围大震具有不同的响应。

4.3 远场大地震发生后应力松弛效应对汶川地震孕育过程影响

自1900年以来,青藏高原和巴颜喀拉地块的强震活动表现出多期活动和区域迁移特征。20世纪早期Ms 7.0以上强地震活动的主体地区在青藏高原北部边界构造带,中期转移到高原南部喜马拉雅板块边界构造带和南部地块,最近十多年来则在巴颜喀拉地块及周缘断裂上活动。青藏高原的块体活动和地震活动与澳大利亚-印度板块对亚洲大陆的推挤作用相关,因此,青藏高原和巴颜喀拉地块的强震活动与澳大利亚-印度板块边界的苏门答腊强震活动相对应^[38]。

从地理位置上看,昆仑山地震、苏门答腊地震和汶川地震近似呈直角三角形分布,汶川地震震中位于该三角形的顶点附近(图7)。从大震发

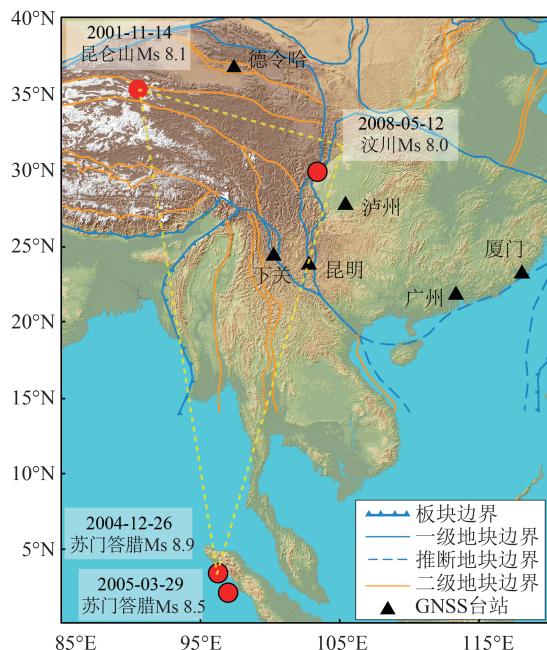


图 7 汶川地震前大震活动分布

Fig.7 Distribution of Large Earthquakes Before the Wenchuan Earthquake

震间隔上看,苏门答腊地震与昆仑山地震间隔 1 138 天,汶川地震与苏门答腊地震间隔 1 233 天,时间间隔较为接近。

2001 年昆仑山 Ms 8.1 地震和 2004 年苏门答腊 Ms 8.9 地震对汶川地震的孕育过程具有不同的作用。由图 5 可知,昆仑山 Ms 8.1 地震后至 2004 年中,中强地震活动较为正常,地震活动蠕变释放较有规律,同期,汶川台 EW 向倾斜(图 3)及各方向基线变化速率较为稳定(图 4)。因此,昆仑山 Ms 8.1 地震对汶川地震的孕育发生过程影响较弱。

2004 年苏门答腊 Ms 8.9 地震对川滇地区的地震活动和变形影响较大。苏门答腊地震破裂长度约 1 200~1 500 km,破裂宽度约 150~200 km,距震中 3 000 km 以外的测站还可观测到 1~2 cm 的同震位移^[39]。苏门答腊地震后,汶川台 EW 向倾斜速率即快速减小(图 3 中 A 点);广州-泸州基线(图 4(e))也开始出现显著的速率增大,至汶川地震前该基线最大异常幅度达 20 mm;下关-泸州基线(图 4(b))速率显著减小出现在震后 1 年,至汶川地震前异常幅度约 30 mm。不难理解,这些变形异常与苏门答腊地震引起的远场应力松弛效应和汶川地震的应变积累有一定关联。苏门答腊地震后,青藏高原地区 Ms 5.5 及以上地震活动出现了持续时间达 3 年之久的平静,也有利于大规模地震应变的积累。

由此可见,苏门答腊 Ms 8.9 地震的发生对川滇地区应力应变场及地震活动具有显著的影响,从而加速了汶川地震的孕育发生过程。

5 结语

通过对汶川地震震中区汶川台地倾斜观测数据和 GNSS 基线变化的分析,及与区域地震的 Benioff 蠕变关系的讨论,可得到以下结论:

1) 震中区汶川台地倾斜仪在 2004 年底可观测到倾斜减速现象,2007 年底至汶川地震发生未检测到显著的指型加速度异常变化,这可能反映了大震前震中区变形的一个常态特征。

2) 广州-泸州 GNSS 基线加速缩短与 Benioff 蠕变亏损异常具有较高的相关性,相关系数为 0.89。自 2005 年初开始,广州-泸州基线开始加速缩短,持续时间达 2.5 年,对应的震级估计为 7.9 级。与汶川地震震级相当,反映了该基线加速缩短与汶川地震的应变积累过程有一定关系。同期,地震活动也出现长期的平静,Benioff 蠕变出现持续亏损异常。两者均反映了汶川地震前的区域应力应变场变化特点。

3) 周边大地震发生对川滇地区的应力应变环境影响有明显差异。大地震除引起发震断层附近出现同震形变及震后余滑外,还会引起大范围的应力松弛效应。通过汶川台地倾斜及广州-泸州等基线变化特征分析可知,昆仑山大地震后,变形速率未有明显变化,Benioff 蠕变释放速率较为稳定;而苏门答腊地震的发生对川滇地区的应力应变场及区域地震活动的影响显著,并加速了汶川地震的孕育发生过程。

参 考 文 献

- [1] Wu Yilin. The Second Generation of a Network for Continuous Observation of Crustal Deformation in China[J]. *Earthquake Research in China*, 1985, 1(2): 30-35 (吴翼麟. 中国第二代地形变连续观测台网[J]. 中国地震, 1985, 1(2): 30-35)
- [2] Wu Yilin. Observatory Techniques and Data Analyses for Earthquake Prediction by Precursors Observed at Deformation Stations [J]. *Earthquake*, 1990, 10(5): 33-46 (吴翼麟. 定点形变前兆预报地震的观测技术与分析方法[J]. 地震, 1990, 10(5): 33-46)
- [3] Niu Zhijun, Ma Zongjin, Chen Xinlian, et al. Crustal Movement Observation Network of China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(3):

- 88–93(牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88–93)
- [4] Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al. Rupture of Deep Faults in the 2008 Wenchuan Earthquake and Uplift of the Longmen Shan[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 634–640
- [5] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. *Science*, 2001, 294(5542): 574–577
- [6] Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. Oblique, High-Angle, Listric–Reverse Faulting and Associated Development of Strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2010, 38: 353–382
- [7] Xu Caijun, Lin Dunling, Wen Yangmao. Extract and Analysis Surface Deformation Caused by Wenchuan Mw 7.9 Earthquake from InSAR Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1138–1142(许才军, 林敦灵, 温扬茂. 利用InSAR数据的汶川地震形变场提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1138–1142)
- [8] Xu Caijun, Jiang Guoyan, Wang Hao, et al. Analyzing InSAR Results Using GIS and Its Application on the Coseismic Interpretation of Mw 7.9 Wenchuan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 379–383(许才军, 江国焰, 王浩, 等. 基于GIS的InSAR结果分析方法及在汶川Mw 7.9级地震同震解释中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 379–383)
- [9] Gu Guohua, Wang Wuxing, Meng Guojie, et al. Crustal Movements Before and After the Wenchuan Earthquake as Detected by GPS Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1336–1339(顾国华, 王五星, 孟国杰, 等. GPS测得的汶川大地震前后的地壳运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1336–1339)
- [10] Ding Kaihua, Xu Caijun, Wen Yangmao. Postseismic Deformation Associated with the 2008 Wenchuan Earthquake by GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(2): 131–135(丁开华, 许才军, 温扬茂. 汶川地震震后形变的GPS反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(2): 131–135)
- [11] Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. The Ms 8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 597–629(徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川Ms 8.0地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597–629)
- [12] Wen Xueze, Zhang Peizhen, Du Fang, et al. The Background of Historical and Modern Seismic Activities of the Occurrence of the 2008 Ms 8.0 Wenchuan, Sichuan, Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 444–454(闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 444–454)
- [13] Du Fang, Jiang Haikun, Yang Maling. Earthquake Cases in China [M]. Beijing: Seismological Press, 2018(杜方, 蒋海昆, 杨马陵. 中国震例—2008年5月12日四川汶川8.0级地震[M]. 北京: 地震出版社, 2018)
- [14] Takemoto S. Some Problems on Detection of Earthquake Precursors by Means of Continuous Monitoring of Crustal Strains and Tilts[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96 (B6) : 10377–10390
- [15] Bilham R. Coseismic Strain and the Transition to Surface Afterslip Recorded by Creepmeters near the 2004 Parkfield Epicenter [J]. *Seismological Research Letters*, 2005, 76(1): 49–57
- [16] Bakun W H, Aagaard B, Dost B, et al. Implications for Prediction and Hazard Assessment from the 2004 Parkfield Earthquake [J]. *Nature*, 2005, 437(7061): 969–974
- [17] Johnston M J S. Continuous Borehole Strain and Pore Pressure in the near Field of the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California, Earthquake: Implications for Nucleation, Fault Response, Earthquake Prediction, and Tremor [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(4B) : S56–S72
- [18] Amoruso A, Crescentini L. Limits on Earthquake Nucleation and Other Pre-Seismic Phenomena from Continuous Strain in the near Field of the 2009 L'Aquila Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(10): l10307
- [19] Knopoff L. Earthquake Prediction is Difficult but not Impossible[J]. *Nature*, 1999:1–4
- [20] Teng Jiwen, Bai Denghai, Yang Hui, et al. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake of 2008[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51 (5) : 1385–1402(滕吉文, 白登海, 杨辉, 等. 2008汶川Ms 8.0地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1385–1402)

- [21] Du Fang, Wen Xueze, Zhang Peizhen, et al. Interseismic Deformation Across the Longmenshan Fault Zone Before the 2008 M 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(11): 2729–2738 (杜方, 闻学泽, 张培震, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2729–2738)
- [22] Xu Shaoxie. Correlation and Tectonic Characteristics of Great Earthquake Group in Quanzhou-Qiongshan at Begining of Seventeenth Century [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(1): 1–5 (许绍燮. 17 世纪初泉州-琼山大震组群发生的相关性与构造特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1): 1–5)
- [23] Xu Shaoxie. Based on the Phenomena Before Wenchuan Earthquake, the Characteristic of Large Scale and Deep Layer on Dynamic Force of Earthquake Occurrence has Been Recognized [J]. *Engineering Sciences*, 2009, 11(6): 16–18 (许绍燮. 从汶川地震震前现象认识其发震动力应具有的大尺度与深层次性[J]. 中国工程科学, 2009, 11(6): 16–18)
- [24] Mogi K. Earthquake Prediction [M]. Tokyo: Academic Press, 1979
- [25] Chen Zhangli, Zhao Cuiping, Wang Qincui, et al. A Study on the Occurrence Background and Process of Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 455–463 (陈章立, 赵翠萍, 王勤彩, 等. 汶川 Ms 8.0 级地震发生背景与过程的研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 455–463)
- [26] Qu Yanjun, Wang Haitao, Wu Chengdong, et al. Analysis on Statistic Characteristics of Seismic Gap in Chinese Mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(5): 544–556 (曲延军, 王海涛, 邬成栋, 等. 中国大陆地震空区统计特征分析[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 544–556)
- [27] Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(20): 2981–2987
- [28] Benioff H. Earthquakes and Rock Creep [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1951, 41(1): 31–62
- [29] Song Chunyan, Ma Jin, Wang Haitao, et al. Study on Meta-Instability Stage and Instable Section of the Fault Before Strong Earthquake: Taking Western Section of Southern Tianshan as an Example [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 604–615 (宋春燕, 马瑾, 王海涛, 等. 强震前断裂亚失稳阶段及失稳部位的特征研究: 以新疆南天山西段为例[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 604–615)
- [30] Zhu Yiqing, Xu Yunma, Lü Yipei, et al. Relations Between Gravity Variation of Longmenshan Fault Zone and Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(10): 2538–2546 (祝意青, 徐云马, 吕弋培, 等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2538–2546)
- [31] Peng Funan, Ye Yincan. Seismogenic Fault of the 1999 Chi Chi Earthquake in Taiwan Province and the Features of Earthquake Damages [J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(4): 576–585 (彭阜南, 叶银灿. 台湾 9.21 集集地震考察兼论强震发震断层[J]. 地震地质, 2004, 26(4): 576–585)
- [32] Zhang Zhizhong, Pan Hua, Huang Zhao, et al. Impacts of the Taiwan and Taiwan Strait Earthquakes on China's Mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(3): 319–332 (张志中, 潘华, 黄昭, 等. 台湾及台湾海峡地震活动对大陆地区的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(3): 319–332)
- [33] Wyss M, Slater L, Burford R O. Decrease in Deformation Rate as a Possible Precursor to the next Parkfield Earthquake [J]. *Nature*, 1990, 345 (6274): 428–431
- [34] Ma Jin, Ma Shengli, Liu Liqiang, et al. Experimental Study on Alternate Slip of Intersecting Faults and Block Movement [J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(1): 65–73 (马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 65–73)
- [35] Ma Jin, Ma Shengli, Liu Liqiang, et al. Experimental Study on Interaction Patterns of Faults [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(5): 503–508 (马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 断层相互作用型式的实验研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(5): 503–508)
- [36] Huang Liren, Gu Guohua. Static Dislocation Theory [M]. Beijing: Seismological Press, 1982 (黄立人, 顾国华. 静力位错理论[M]. 北京: 地震出版社, 1982)
- [37] Niu Anfu. Study on the Sudden Changes in Ground Tilt and Earthquakes [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 25(4): 441–445 (牛安福. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究[J]. 地震学报, 2003, 25(4): 441–445)
- [38] Deng Qidong, Gao Xiang, Chen Guihua, et al. Recent Tectonic Activity of Bayankala Fault-Block and the Kunlun-Wenchuan Earthquake Series of the Tibetan Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 163–178 (邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 163–178)

- [39] Qu Wulin, Zhang Bei, Huang Luyuan, et al. Comparisons of Global Coseismic Displacements from Several Fault Slip Models for the 2004 Sumatra Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2843–2858 (瞿武林, 张贝, 黄禄渊, 等. 2004年苏门答腊地震的几个断层滑动模型的全球同震位移对比[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2843–2858)

Pre-Seismic Deformation Related to the Wenchuan Earthquake

NIU Anfu¹ ZHAO Jing¹ YUAN Zhengyi¹ JI Ping¹

¹ China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: **Objectives:** Revealing the characteristics of deformation field related to earthquake preparation process is an important way to distinguish earthquake preparation stage and earthquake risk. In order to reveal the significance of crustal deformation observation, the deformation field related to the Wenchuan Ms 8.0 earthquake preparation and the relationship between the deformation field and the seismic activity are discussed from a large spatial scale. **Methods:** The original data of crustal tilt observed at Wenchuan station in the epicenter area of the Wenchuan earthquake since 2002 are collected, and the phased characteristics of crustal tilt change are extracted by using wavelet analysis method and piecewise fitting method. Based on the daily solution data of global navigation satellite system (GNSS) station coordinates since 2001, the baselines between Luzhou station and the surrounding stations are calculated. By comparing the baseline change with the Benioff creep, the synergistic characteristics between them are found. **Results:** The tilt rate in EW direction at Wenchuan station began to decrease significantly at the end of 2004, from 230 ms/a to 130 ms/a, and it decreased to 60 ms/a until the earthquake occurrence. There was no significant exponential acceleration change from the end of 2007 to the earthquake occurrence. The rapidly shortening anomaly of Guangzhou-Luzhou GNSS baseline in early 2005 has a high correlation with the earthquake creep loss anomaly, and the correlation coefficient is 0.89. The duration of rapidly shortening is about 2.5 years, and the magnitude of the corresponding earthquake is estimated to be 7.9, which is close to the magnitude of the Wenchuan earthquake. The Sumatra Ms 8.9 earthquake in 2004 has a significant impact on the stress-strain field in the eastern Tibet Plateau and accelerates the preparation process of the Wenchuan earthquake. **Conclusions:** The different influence of surrounding earthquakes should be considered in the analysis of crustal deformation and earthquake risk. The research results of this paper have reference value for understanding the significance of crustal deformation measurements and innovating earthquake prediction ideas.

Key words: Wenchuan earthquake; crustal tilt; global navigation satellite system (GNSS) baseline; Benioff creep; correlation analysis

First author: NIU Anfu, PhD, professor, specializes in analysis of crustal deformation and mechanism. E-mail: niuanfu01@sina.com

Corresponding author: ZHAO Jing, PhD, associate professor. E-mail: zhaozhengjiaja1@126.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1503606); the National Natural Science Foundation of China (41330314).

引文格式: NIU Anfu, ZHAO Jing, YUAN Zhengyi, et al. Pre-Seismic Deformation Related to the Wenchuan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6):839–848. DOI:10.13203/j.whugis20220117(牛安福, 赵静, 苑争一, 等. 汶川地震孕育过程中变形场变化特征研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6):839–848. DOI:10.13203/j.whugis20220117)