第 40 巻	ŝ	第	6	期
2018	年	12	月	

罗国富,刘忠旺,丁凤和,等.2017年四川九寨沟7.0级地震前地震应变场分析[J].地震工程学报,2018,40(6):1322-1330.doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1322

LUO Guofu, LIU Zhongwang, DING Fenghe, et al. Research on the Seismic Strain Field prior to the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan M_{s} 7.0 Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1322-1320. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1322

2017年四川九寨沟 7.0级地震前地震应变场分析

罗国富,刘忠旺,丁凤和,马禾青,杨明芝

(宁夏回族自治区地震局,宁夏银川 750001)

摘要:以地震应变场作为地震活动的变量,通过自然正交函数展开方法,计算 2017 年 8 月 8 日四川 九寨沟 7.0 级地震前的地震应变场,提取出震前时间因子的异常变化。计算结果发现应变场前 4 个时间因子在震前 1~3 年的中短期异常并不显著,只有第 2 个和第 4 个时间因子震前有小幅度的 异常变化,分析其原因,时间因子可能受到 2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年岷县漳县 6.6 级地震 前大幅度异常的影响。与时间因子对应的空间等值线形成局部应变高值异常危险区,可能是 2013 年岷县漳县 6.6 级地震和 2017 年九寨沟 7.0 级地震空间异常的中短期特征。再对比九寨沟 7.0 级 地震前后与松潘—平武 7.2 级双震的空间异常随时间演变,分析异常发展变化模式的差异,最后应 用地震资料的累积频次从物理角度解释异常形成的机制。

关键词:地震应变场;时空异常;危险区;自然正交函数展开方法;九寨沟 7.0 级地震
 中图分类号:P315
 文献标志码:A
 文章编号:1000-0844(2018)06-1322-09
 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1322

Research on the Seismic Strain Field prior to the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan M_s 7.0 Earthquake

LUO Guofu, LIU Zhongwang, DING Fenghe, MA Heqing, YANG Mingzhi

(Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: In this study, we used the seismic strain field as a variable indicating seismic activity. Using natural orthogonal function expansion, we calculated the seismic strain field prior to the Jiuzhaigou, Sichuan $M_s7.0$ earthquake on August 8, 2017, and extracted anomalous variations in the time factor prior to the earthquake. The calculation results show no obvious mediumor short-term anomalies in the first four time factors of the strain field in the period 1-3 years before the earthquake, with abnormal changes of small amplitude occurring only in the second and fourth time factors before the earthquake. The time factors may be affected by the large amplitude anomalies occurring prior to the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and the 2013 Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake. The spatial contours that correspond with the time factors indicate a dangerous area in the local strain's high value anomaly, which may be medium- and short-term characteristics of the spatial anomalies of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ and Jiuzhaigou $M_s7.0$

收稿日期:2018-03-12

基金项目:地震科技星火计划项目(XH18052); 宁夏自然科学基金项目(NZ17222)

第一作者简介:罗国富(1978-),男,山西沁源人,高级工程师,主要从事地震预测与预报工作。E-mail:luoguofu_05@163.com.。

earthquakes. Next, we compare the evolution of the spatial anomalies with time before and after the Jiuzhaigou $M_{\rm S}7.0$ and two Songpan-Pingwu $M_{\rm S}7.2$ earthquakes, and analyze the differences in their abnormal development patterns. Lastly, we describe the mechanism of anomaly formation from the physical perspective by applying the cumulated frequencies of the seismic data.

Keywords: seismic strain field; spatio-temporal anomaly; dangerous area; natural orthogonal function expansion method; Jiuzhaigou M_s7.0 earthquake

0 引言

2017年8月8日四川省阿坝州九寨沟县发生 M_s7.0 地震(以下简称 7.0),震中位于 33.20°N、 103.82°E,震源深度 20 km。地震造成约 30 人死 亡、500人受伤以及巨大的财产损失。该地震为走 滑型地震,历史上震中周围曾发生过的最大地震为 1976年松潘一平武 7.2级双震。发震区域地质构造 复杂,有近 SN 走向的岷江断裂和虎牙断裂,也有 NW 走向的东昆仑断裂的东段,这些断裂带分别为 巴颜喀拉块体的东边界^[1]。近年来巴颜喀拉块体东 边界周围强震持续活跃,如2008年四川汶川8.0级 特大地震,2013年四川芦山7.0级地震,甘肃岷县漳 县 6.6 级地震以及 2017 年四川九寨沟 7.0 级地震, 这些地震均发生在南北地震带中北段的巴颜喀拉块 体周围。2008年以来南北地震带中北段周围一直 是全国强震重点危险区之一,深受许多地震学者的 高度关注,并在该区域开展了地震科学台阵和地震 预警等多个科学项目的研究。

杨明芝等[2]首次把气象的随机场理论[3-4]应用 在地震上,这在国内尚属首次,且在国外地震研究领 域中也未见到相关方法的论文著作。杨明芝等[5-6] 和罗国富等[7]分别采用自然正交展开方法研究发现 2008年汶川 8.0级地震前区域地震活动能量场出现 中短期时间和空间异常特征,与汶川震中具有很好 的对应关系。罗国富等[8-9]分别研究了甘肃岷县漳 县 6.6 级地震和芦山 7.0 级地震震前震中区域的地 震活动能量场时空异常。杨明之等[10]研究中国大 陆6级以上地震应变场,取得了地震能量场在提取 时间异常中的独特优越性。郭增建和郭安宁等[11-13] 应用多种方法对九寨沟 7.0 级地震进行预测和回 顾。本文在以往研究的基础上,应用自然正交函数 展开方法,试图研究 2017 年四川九寨沟 7.0 级地震 前地震活动应变场的变化,并对比 2013 年岷县漳县 6.6级地震前和 2008 年汶川 8.0级地震前的应变场 异常特征,分析 2017 年九寨沟 7.0 级地震前的震兆 异常信息,为强震预测提供中短临异常依据和震例 经验。

1 研究方法

气象观测中的气温、气压变量物理场是时空位 置的函数,与地震发生的时空函数有相似特点。 2004年杨明芝等^[2]提出用网格化的方法构造函数 场:设某个研究区域*S*,根据区域地震活动水平和研 究目的,选取一个时间间隔 Δt ,将观测时间划分为 *m*个时段, $t_i = \Delta t \times i(i = 1, 2, \dots, m)$,将区域划分为 *n*个相等的面积元 $\Delta S = \Delta x \times \Delta y$,其中心坐标为 (x_j, y_j)($j = 1, 2, \dots, n$)。分别统计各个时段内每 一个面积元内的观测值 S_{ij} ,并将其作为代表时空坐 标(x_i, y_i, t_j)($i, j = 1, 2, \dots, n$)的场函数值。

本文以 *E* 表示地震能量释放, \sqrt{E} 为地震能量 的平方根, 与地震应变成正比, 即 $\sqrt{E} = c\varepsilon(c)$ 为研究 区域内地震的震源相关参数, ε 为地震应变), 这两 个参数一定程度上反映了震源区应变场的变化情 况。将区域网格化后, 以 $S = \sum_{i} \sqrt{E_{i}}$ 建立应变场函 数(这与以往地震能量场方法间有差异), 并表示为 矩阵形式

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix}$$
(1)

2017 年九寨沟 7.0 级地震震中区域属于相似的 地震块体,地震震源相关参数假设为一个常数,因此 从研究大震本质的意义上说,场函数 $S = \sum_{i} \sqrt{E_i}$ 又 可称为地震应变场,其中 S_{ij} (i = 1, 2, ..., m, j = 1, 2,...n) 是第 j 网格、第 i 个时段的观测值。其中能 量按公式 logE = 4.8 + 1.5M(E 为能量,单位取 J,M 为震级) 计算。将 S 进行自然正交函数展开,求得 时间因子和空间异常,分析时空异常变化特征及与 强震的关系。

所谓自然正交函数展开,就是把矩阵S分解成 正交的空间函数x与正交的时间函数T乘积之和:

$$S_{ij} = \sum_{p=1}^{n} T_{ip} X_{pj} \begin{cases} i = 1, 2, \cdots, m \\ j = 1, 2, \cdots, n \end{cases}$$
(2)

并满足正交和归一化条件,即

$$\sum_{j=1}^{n} x_{kj} x_{lj} = \begin{cases} 0, & k \neq l \\ 1, & k = l \end{cases}$$
(3)

$$\sum_{i=1}^{m} T_{ik} T_{il} = \begin{cases} 0, & k \neq l \\ \lambda_{k}, & k = l \end{cases}$$

$$\tag{4}$$

通过求解相应协方差矩阵 R = S'S 的特征方程,即

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix}$$
(5)

得到特征向量 x_k 和特征值 λ_k ($k = 1, 2, \dots, n$)。其 时间因子(即权重系数序列)表示为

$$\boldsymbol{T}_{k} = \mathbf{S}\boldsymbol{x}_{k}, \ k = 1, 2, \cdots, n \tag{6}$$

特征向量 x_k (应变场)代表了组成场不同场的 地震应变空间分布,而时间因子 T_k 则代表了应变场 x_k 的时间变化,反映了不同时间应变场的动态 特征。

由于协方差矩阵 R 为实对称矩阵,n 个特征值 λ_{k} 均为正实数。将特征值按大小排列,前几个特征 值所对应的特征向量称为主要应变场。由于自然正 交函数展开收敛很快,只需用少数几个特征向量(应 变场)叠加就能以满意的精度拟合总场。而几个主 要应变场的变化就代表了研究区域应变场的时空特 征。设全部 n 个特征值的和为 b_0 ,用前 l 个典型场 拟合总场的精度 r_l 为

$$r_l = \sum_{p=1}^l \lambda_p / b_0 \tag{7}$$

式中: λ_p 表示第p个特征根。

自然正交展开各分量之和为地震应变场函数, 但这 n 个线性组合并不是同等重要的,其中特征值 大的应变场在总场(研究区应变场之和)中占有较大 的比重,并具有较大变率(方差)。因此只需研究其 中几个较大的特征值相对应的组合,来描述应变场 的主要变化特征。这样就相当于把原始应变场的主 要信息浓缩在前几个主要应变场上,从而找出有异 常变化的主要应变场,排除无变化或与大地震关联 程度小的应变场。集中研究这几个主要应变场的时 空异常变化,可以了解地震应变释放的主要变化特 征,使问题更加简化。

2 数据处理和分析

本文选择研究区域(102.5°~105.0°E、32°~ 34.5°N)的原则是,该区域处在巴颜喀拉块体、陇南 块体以及四川盆地的交界,发育一系列网络状断裂, 如岷江断裂、虎牙断裂、雪山断裂和文县断裂;也有 NW倾向近似平行的断裂,如迭部一白龙江断裂、光 盖山一迭山断裂以及临潭一宕昌断裂瑞,另外还有 很多次级断裂。2013年岷县漳县6.6级地震的发震 构造为临潭一宕昌断断裂,2017年九寨沟7.0级地 震的发震构造为岷江断裂与塔藏断裂间的树正断 裂。该区域内6级左右地震频发可能显示主干边界 活动断裂破裂滑动可能引发强震甚至大震。

本文使用的地震资料为中国地震台网中心提供 的正式地震目录。对九寨沟震中周围选取研究区和 时间段的地震资料进行 b 值检验,取地震最小完整震 级下限为 $M_L 2.7$ 进行计算;考虑到强震发生概率很 小,其能量对背景场的影响很大,且这些地震已经不 属于区域正常活动状态,故震级上限取 $M_L 5.4$ (换算 成 M震级为 5.0 级),并用 K-K 法删除 5.0 级以上地 震的余震。研究区域按照 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 进行区域网格 化,时间段为 2000 年 1 月—2017 年 7 月,采用时间滑 动算法,时间间隔取 12 个月,滑动步长取 1 个月,对 资料进行离散化处理。根据上述研究方法[式(1)], 构建地震应变释放矩阵 S,然后进行自然正交函数 展开分析。求解协方差矩阵 R,得到场的特征值和 特征值对应的主要应变场,并求得特征值对应主要 场的时间因子以及不同研究区域的空间等值线。

2.1 九寨沟 7.0 级地震前应变场时间因子

表1给出式(6)中地震应变场展开的前4个特 征向量的特征值,展开拟合精度 γ_4 为 79.78%。其 中第一个应变场的特征值为 661.889 8,占总场的 39.57%,是场的主要部分,异常幅度最大的时间段 为 2006 年 4-6 月, 是受到 2006 年 6 月 21 日甘肃 文县 5.0 级地震的影响。第二个应变场异常最大幅 度的时间段为 2008 年 3-5 月,分析其原因是受到 2008年5月12日四川汶川8.0级地震的影响,2008 年5月25日甘肃文县发生4.9级地震。同样在第 三个应变场的最大幅度异常,也可能是汶川8.0级地 震前的中短期异常。第四个应变场中最大异常幅度 的时间段为 2013 年 5-11 月,分析其原因是受到 2013年7月22日甘肃岷县漳县6.6级地震的影响, 该区域发生甘肃文县 4.4 级地震。而 4 个应变场中 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震前的中短期 异常并不明显,分析其原因,一方面主要是受到汶川 8.0级地震和岷县漳县6.6级地震较大幅度应变场 异常的影响;另一方面是九寨沟 7.0 级地震前研究 区域内地震活动相对平静,确实无明显的地震异常。

表 1 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震应变场参数

Table 1	Parameters of the stu	ain field of the 7	/ magnitude	earthquake on	August 8,2017	7, in Jiuzhaigou	ı, Sichuaı
						,	,

前4个应变场时间 用子 T	异常出现的时间段	最大幅度	时间因子	前4个应变场	应变场占
	t _a	ΔI	均力左	行证值 A _i	忌切几
1	2006年4至6月	-14.2357	1.783 9	661.889 8	0.395 7
2	2008年3至5月	-9.3106	1.372 6	391.870 2	0.234 3
3	2005年5月至2006年4月	-5.3099	0.922 2	176.905 4	0.105 8
4	2013 年 5 至 11 月	-5.6082	0.706 7	103.890 7	0.062 1

从图 1 中也可以看出,2000 年 1 月—2017 年 7 月研究区域内前 4 个应变场时间因子曲线都明显出 现大幅度的升降变化。第一个应变场时间因子 T₁ 和第三个应变场时间因子 T₃的异常主要出现在 2008 年 5 月前,而在 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地 震前无明显异常;第二个应变场时间因子 T₂ 和第四 个应变场时间因子 T₄ 在九寨沟 7.0 级地震前出现小 幅度的中短期异常。总的来看,研究区域内前 4 个应 变场主要受到 2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 岷县漳 县6.6级地震较大幅度时间因子异常的影响。



图 1 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震前 4 个应变场时间因子曲线(值:×10⁵) Fig.1 Curves of the first four strain field time factors of the 7 magnitude earthquake in Jiuzhaigou, Sichuan (×10⁵)

2.2 与汶川 8.0 级、岷县漳县 6.6 级地震前应变场时间因子对比

同理上述研究方法,选取 1995 年 1 月—2018 年 3 月为时间段,区域为 30°~33.5°N、101.5°~ 106.0°E 参数研究 2008 年汶川 8.0 级地震前 4 个 应变场时间因子;选取 2000 年 1 月—2013 年 6 月 为时间段,区域为 33.0°~36.5°N、103.0°~106.5°E 参数研究岷县漳县 6.6 级地震前 4 个应变场时间 因子(图 2)。通过对比图 1 与图 2 可以看出,2013 年岷县漳县 6.6 级地震前和 2017 年九寨沟 7.0 级 地震前应变场时间因子的中短期异常不明显,主要 受到 2008 年汶川 8.0 级地震前应变场异常的影 响;而 2008 年汶川 8.0 级地震前的应变场时间因 子出现明显的中短期异常、个别还出现临震异常 [图 2(a)-Ⅲ]。

2.2 与汶川 8.0 级、岷县漳县 6.6 级地震前应变场 空间对比

通过对比 2008 年汶川 8.0 级地震、2013 年岷县 漳县 6.6 级地震和 2017 年九寨沟 7.0 级地震前的应 变场异常空间分布,进一步解释地震应变场时间因子 随时间的变化特征。根据以往震例研究,本文将等值 线(或者绝对值)大于 0.05×10⁵ 的区域定义为异常 区。图 3(a)中 2008 年汶川 8.0 级地震前(2000 年 1 月—2008 年 4 月)应变场等值线在东昆仑断裂东段 至迭部—自龙江断裂带以及光盖山—迭山断裂一带 形成条带形状的异常,而汶川震中区无异常,尤其在区 域(33.0°~34.7°N,103.8°~105.3°E)应变场异常较为突 出,该异常区恰好发生了 2013 年岷县漳县 6.6 级地震 和 2017 年九寨沟 7.0 级地震,说明显著的应变场异常 区早在其强震发生前几年或者前几十年已逐渐形成。



图 2 汶川 8.0 级地震和岷县漳县 6.6 级地震前 4 个应变场时间因子曲线(值:×10⁵) Fig.2 Curves of the first 4 strain field time factors of the 8 magnitude earthquake in Wenchuan and the 6.6 magnitude earthquake in Minxian—Zhangxian (×10⁵)





Fig.3 Contour map of the strain field of Wenchuan earthquake, Minxian—Zhangxian earthquake, and Jiuzhaigou earthquake ($\times 10^5$)

图 3(b)是 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前(2009 年 1月—2013 年 6月)应变场空间等值线。可以看 出,汶川地震后地震应变场异常分布除了龙门山断 裂带,主要集中在区域(33.8°~35.2°N,103.3°~ 104.7°E)内。这个区域也是 2013 年岷县漳县 6.6 级 地震和 2017 年九寨沟 7.0 级地震的震中区域,在汶 川地震前这个区域就形成异常区,汶川地震后这个 区域的异常明显增大,且位置偏北,进一步说明汶川 8.0 级地震可能对岷县漳县 6.6 级地震和九寨沟 7.0 级地震有一定的影响。

图 3(c)是 2017 年九寨沟 7.0 级地震前(2013 年 7 月—2017 年 7 月)应变场空间等值线。可以看出,这 一段时间内除了 2013 年岷县漳县 6.6 级地震对其震 中区域有一定影响外,地震应变场异常主要集中在 龙门山断裂带的中北段,2017 年九寨沟 7.0 级地震 就发生在这两个异常的中间。从地震应变场异常等 值线分布可以看出汶川 8.0 级地震和岷县漳县 6.6 级地震可能对九寨沟 7.0 级地震有一定的影响。

3 强震前后应变场变化

分析 2017 年九寨沟 7.0 级地震研究区域内不同时段应变场空间等值线异常变化的演变,找出研究区强震发生模式的差异。图 4 为研究区域内 1976 年 8 月松潘一平武发生 7.2 级双震前后应变场 空间等值线变化。与前文同样,将异常值(或者绝对 值)大于 0.05×10⁵ 定义为危险区。可以看出,1975 年 9—12 月研究区出现大面积异常;1976 年 1—4 月原来的异常区域收缩,出现应变场积累和释放两 种异常;1976 年 5—8 月两种异常值增大,在岷江断 裂发生 1976 年松潘一平武 7.2 级双震;1976 年 9— 12 月受松潘一平武 7.2 级双震;1976 年 9— 12 月受松潘一平武 7.2 级现震的影响,在发震区域 形成明显的应变能释放和积累的高梯度异常。





图 5 为 2017 年九寨沟 7.0 级地震前研究区应变 场空间异常随时间演变。可以看出 2016 年 5—8 月 研究区出现异常,2016 年 9—12 月研究区等值线异常 区面积扩大,2017 年 1—4 月在原来异常区域收缩的 基础上出现应变场积累和释放两种异常;2017 年 5— 8 月异常值减小时发生九寨沟 7.0 级地震。

比较图 4 与图 5 可以看出,研究区 1976 年松 潘一平武 7.2 级双震和 2017 年九寨沟 7.0 级地震前 后应变场空间异常演变模式有所差异,相同的是研究区首先出现异常,再出现应变积累和释放异常,且 异常的区域先增大后减小;不同的是1976年松潘一 平武 7.2级双震发生在异常高值区,而2017年九寨 沟 7.0级地震发生在异常值减小区,这也很好地解 释 1976年松潘一平武 7.2级双震前研究区地震活 动异常较显著,而2017年九寨沟 7.0级地震前研究 区地震活动相对平静的现象。



4 物理讨论和结论

地震应变场的物理机制是地震活动引起地壳运 动的随机表现。强震发生前震源区及周围构造应力 应变出现非平衡转变,即力学平衡的打破,在构造应 力的驱动下,非线性动力学或非平衡约束的出现打 乱地震应变状态的平衡,出现与正常地震应变背景 的偏离。这种对空间均匀性偏离由早期的正常涨落 逐渐趋于一种大幅度偏移分布就是异常。地震应变 场的特征主要反映了前4个相互独立的空间分布图 像。在正常活动背景下,系统整体维持如泊松型统 计平衡状态,应变场只出现小的涨落。但当非平衡 约束出现,反映主要约束因子的特征向量将出现大 的偏离异常(图 6)。

图 6 为 2000 年 1 月—2017 年 8 月九寨沟 7.0 级地震前研究区域地震累计频次随时间变化的曲 线。从图中可见,在 2004 年以前地震活动近似泊松 型均匀发生,地震累计基本呈现直线性变化曲线,但 在 2004 年 8 月地震累计频次出现偏离正常的平衡 状态,进入了异常状态,表现出 2008 年四川汶川 8.0 级地震的中期异常;此后恢复正常平衡状态,而 2009 年 11 月地震累计频次又出现偏离线性打破正 常的地震活动状态的异常,随着时间的推移这种异 常幅度越来越大,表现出 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震的中短期异常;此后又恢复正常平衡状态,在 2015年12月地震累计频次又出现偏离线性正常状态的地震活动异常,表现出 2017年四川九寨沟 7.0 级地震的中短期异常特征。



图 6 研究区域内 M_L2.7 以上地震累计频次曲线 Fig.6 Accumulated frequency curves of earthquakes above M_L2.7 in the study region

总之,通过研究 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0级地震前研究区域的应变场时空特征,得出如下 结论:

(1) 分析四川九寨沟 7.0 级地震前应变场时间

因子特征发现,区域前4个应变场已经占整个区域的79.78%,第一个应变场时间因子 T_1 和第三个应变场时间因子 T_1 和第三个应变场时间因子 T_2 在九寨沟地震前1~3年无异常,而区域较大幅度的异常出现在2006年4月前,是2008年汶川8.0级地震的中短期异常;第二个应变场时间因子 T_2 和第四个应变场时间因子 T_4 在九寨沟7.0级地震前1~3年出现小幅度的中短期异常,可能受汶川8.0级地震和岷县漳县6.6级地震前较大幅度的异常影响。总的来看,2017年九寨沟7.0级地震前4个应变场均受到2008年汶川8.0级地震和2013岷县漳县6.6级地震前较大幅度异常的影响。

(2) 通过对比 2008 年汶川 8.0 级地震前、2013 年岷县漳县 6.6 级地震前和 2017 年九寨沟 7.0 级 地震前各自研究区的时间因子变化特征,发现 2008 汶川 8.0 级地震前 1~3 年出现明显的中短期异常 和临震异常;而 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前和 2017 年九寨沟 7.0 级地震前 1~3 年异常不明显, 可能受汶川 8.0 级地震前较大幅度异常的影响。

(3) 通过对比 2008 年汶川 8.0 级地震前、2013 年岷县漳县 6.6 级地震前和 2017 年九寨沟 7.0 级 地震前的空间等值线形成的应变场异常危险区(绝 对值大于 0.05×10⁵),发现 2008 年汶川 8.0 级地震 前震中周围(或者龙门山断裂带)无等值线异常,大 面积异常主要集中在岷县漳县 6.6 级地震震中和九 寨沟7.0级地震震中的区域。2013 年岷县漳县 6.6 级地震前震中周围应变场异常较显著,2017 年九寨 沟 7.0 级地震前震中无等值线异常,但震中两侧形 成两个明显的等值线异常区。总的来说,通过三者 的异常等值线空间分布特征,可以看出 2008 年汶川 8.0 级地震应变场和 2013 年岷县漳县 6.6 级地震 应变场可能对 2017 年九寨沟 7.0 级地震异常等值 线有一定的影响。

(4) 通过对比研究区 1976 年前后松潘一平武 7.2级双震和 2017 年九寨沟 7.0级地震前后应变场 空间异常随时间演变特征,发现两者的发震模式有 所差异,相同的是研究区首先出现异常,且异常的区 域先增大后减小,再出现应变积累和释放异常;不同 的是 1976 年松潘一平武 7.2 级双震发生在异常高 值区,而 2017 年九寨沟 7.0 级地震发生在异常值减 小区。

(5) 从地震研究的资料中提取地震累计频次曲

线随时间的泊松型均匀变化,到偏离正常的平衡状态进入了异常状态,表现出异常的物理机制上解释了2008年汶川8.0级地震前、2013年岷县漳县6.6级地震前和2017年九寨沟7.0级地震前的中短期异常变化。

参考文献(References)

- [1] 王文才,李佐唐,党红,等.2017年8月8日四川九寨沟7.0级 地震强震记录及特征分析[J].地震工程学报,2017,39(4): 652-656.
 WANG Wencai,LI Zuotang,DANG Hong,et al.Strong Motion Record and Its Characteristics in Jiuzhaigou M_S7.0 Earthquake on August 8,2017[J].China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(4):652-656.
- [2] 杨明芝,赵卫明.宁夏及邻近地区地震活动能量场的统计分析
 [J].地震学报,2004,26(5):516-522.
 YANG Mingzhi,ZHAO Weiming.Statistical Analysis on Energy Field of Seismicity in Ningxia and Its Neighborhood Region
 [J].Acta Seismologica Sinica,2004,26(5):516-522.
- [3] Д.и 卡札凯维奇,随机函数原理及其在水文气象学中的应用
 [M].北京:科学出版社,1971.
 CYRI Ilic Kai Zha Kai Ei Qi.Random Function Theory and Its
 Application in Hydrology and Meteorology[M].Beijing:Science
 Press,1971.
- [4] 马开玉,丁裕国,屠其.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993.
 MA Kaiyu, DING Yuguo, TU Qi. Principles and Methods of Climate Statistics [M]. Bejing: China Meteorological Press, 1993.
- [5] 杨明芝,马禾青.汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带能量场变化.
 中国地震,2011,27(3):260-267.
 YANG Mingzhi, MA Heqing, Variation of Energy Field of

Longmenshan Fault Zone before the Wenchuan $M_{\rm S}$ 8.0 Earthquake[J].Earthquake Research in China, 2011, 27(3): 260-267.

- [6] 杨明芝,马禾青.汶川 8.0 级地震区域地震能量场分析[J].地球 物理学进展,2012,27(3):872-877.
 YANG Mingzhi, MA Heqing. Analysis of Regional Seismic Energy Field before Wenchuan M₈8.0 Earthquake[J].Progress in Geophysics,2012,27(3):872-877.
- [7] 罗国富,杨明芝,马禾青,等.汶川 8.0 级地震前地震活动能量 场中短期异常[J].地震,2011,31(3):135-142.
 LUO Guofu, YANG Mingzhi, MA Heqing, et al. Intermediate and Short-Term Anomalies of Seismic Activity Energy Field Before the Wenchuan M8.0 Earthquake[J].Earthquake,2011, 31(3):135-142.
- [8] 罗国富,曾宪伟,马禾青,等.岷县漳县 6.6 级地震前地震活动 能量场分析[J].地震工程学报,2014,36(2):314-319.
 LUO Guofu,ZENG Xianwei,MA Heqing, et al. Analysis of En-

ergy Field of Seismic Activity Before the Minxian—Zhangxian 6.6 Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014,36(2):314-319.

- [9] 罗国富,马小军,马禾青,等.芦山 7.0 级地震区域地震活动能量场分析[J].防灾减灾学报,2015,31(1):54-57.
 LUO Guofu,MA Xiaojun,MA Heqing, et al. Analysis of Regional Seismic Energy Field before Lushan 7.0 Earthquke[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction,2015,31(1):54-57.
- [10] 杨明芝,马禾青,罗国富,等.中国大陆6级以上强震前的地震 应变场研究[J].地球物理学报,2017,60(10):3804-3814.
 YANG Mingzhi,MA Heqing,LUO Guofu, et al.Research on the Seismic Strain Field before Strong Earthquakes above M6 in Chinese Mainland[J].Chinese Journal of Geophysics,2017, 60(10):3804-3814.
- [11] 郭增建,郭安宁,赵乘程.四种方法对四川九寨沟7级地震的 初步回顾预测[J].地震工程学报,2017,39(增刊);43-45.

GUO Zengjian, GUO Anning, ZHAO Chencheng, Reviewing Prediction for Jiuzhaigou, Sichuan $M_{\rm S}7.0$ Earthquake Using four Methods [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(Supp):43-45.

- [12] 郭增建,郭安宁.由三性法讨论 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7 级地震的中期预测[J].地震工程学报,2017,39(4):797-798.
 GUO Zengjian,GUO Anning.Discussion on the Medium-term Prediction of Jiuzhaigou, Sichuan M₈7.0 Earthquake on August 8, 2017, by Means of Triplet Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(4):797-798.
- [13] 郭安宁,白雪见,任栋,等.四川九寨沟 7.0 级地震中长期预测的回顾认识[J].地震工程学报,2017,39(4):639-644.
 GUO Zengjian,BAI Xuejian,REN Dong,et al.Review of Midlong Term Prediction for Jiuzhaigou M₈7.0 Earthquake in Sichuan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(4):639-644.