

张小涛、宋治平、李纲, 2018, 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的前兆异常时空演化特征及其分析, 中国地震, 34(4), 772~780.

九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的前兆异常时空演化特征及其分析

张小涛 宋治平 李纲

中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街5号 100045

摘要 以2017年8月8日九寨沟 $M_s 7.0$ 地震震中为中心, 对震前不同震中距前兆异常的时空演化过程进行分析。研究表明, 震中距100km范围内无前兆异常, 前兆异常主要分布在震中距100~500km范围内。震前2年新增前兆异常开始逐渐增多; 不同震中距范围内的新增异常测项所占比例在震前1.5年左右达到最大, 在震前又降低。在震中距300km范围内的异常测项所占比例相对较高。前兆异常时空演化过程存在3个不同的变化阶段, 即 α 阶段(前兆异常的早期阶段, 包括 α_1 和 α_2 , 震前1000天以上)的异常主要分布在震中东北方向和西南方向, 异常具有向外扩展的特征; β 阶段(前兆异常的中期阶段, 震前500~1000天)的异常表现为大范围出现异常; γ 阶段(前兆异常的短期阶段, 包括 γ_1 和 γ_2 , 震前500天内)的异常分布在震中的东北方向, 表现为远源区的异常向震中收缩过程(γ_1)和近源区的异常向外扩展的过程(γ_2)。通过与其他震例对比分析发现, 前兆异常的3个阶段现象可能是大震前的共性特征, 大震前前兆异常的显著增加对发震时间的预测具有一定的指示意义。

关键词: 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震 前兆异常 时空演化 3阶段特征

[文章编号] 1001-4683(2018)04-0772-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2017年8月8日21时19分(北京时间)四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s 7.0$ 地震。房立华等(2018)利用四川地震台网和流动地震台站的观测数据, 对九寨沟地震的主震、余震序列进行了重新定位, 确定九寨沟 $M_s 7.0$ 地震主震震中为 33.201°N 、 103.806°E , 震源深度为20.4km。余震呈 NWW-SEE 向条带状分布, 走向约 150° , 长度约42km。此次地震发生在青藏高原东缘巴颜喀拉块体的北边界东昆仑断裂带东端与东边界岷山构造带交汇区域(易桂喜等, 2017)。震后, 一些学者从不同学科的角度对九寨沟地震进行了研究(何畅等, 2017; 高曙德等, 2017; 杨博等, 2017; 徐东卓等, 2017; 姚鑫等, 2017; 刘芳等, 2017)。何畅等(2017)利用成都台 GM4 磁通门磁力仪秒采样资料, 分析了九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前该台地磁谐波振幅比异常变化特征。高曙德等(2017)对九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前平凉地电阻率的异常变化进行了研

[收稿日期] 2018-06-30; [修定日期] 2018-08-22

[项目类别] 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2018010505)、中国地震局监测预报能力建设重点专项“震后趋势判定技术系统建设”(2018010205-02)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH17045)共同资助

[作者简介] 张小涛, 男, 1982年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事地震预测方法研究。E-mail: 124583238@qq.com

究。杨博等(2017)利用 1999~2015 年流动 GNSS 观测资料及处理结果,分析了九寨沟 $M_s7.0$ 地震前区域水平形变场及其变化。虽然前人对此地震进行了不同程度的研究,但绝大多数是从单一手段对此地震进行分析的。

本文尝试综合考虑震中附近较大范围内的形变、电磁、流体 3 大学科的前兆异常,分析其时空演化特征,进一步了解地震的孕育过程,以期有助于加深对九寨沟地震前异常时空演化特征及力学机理的认识。由于九寨沟 $M_s7.0$ 地震的余震展布长度仅约 42km(房立华等, 2018),破裂尺度较短,因此本文采取以主震震中 (33.201°N , 103.806°E) 为中心的圆形震中距来研究九寨沟地震前的前兆异常演化特征。由《中国震例》(张肇诚等, 1990;陈棋福等, 2002)可知, 7 级地震的孕震范围约在距震中 500km 以内,因此,本文以九寨沟地震震中为圆心,对震中距小于 500km 的前兆异常进行统计分析。

1 前兆异常概况

本文用到的前兆异常来自中国地震局下属各省、市、自治区地震局报送的《宏微观异常零报告表》。图 1 给出了震中距 500km 范围内的背景前兆测项空间分布。由图 1 可见,背景前兆测项主要分布在震中的东北方向和西南方向;在震中的西北、东南方向也有前兆观测,但数量较少。图 2 给出九寨沟 $M_s7.0$ 地震前形变、电磁、流体 3 大学科存在异常的前兆空间分布。从行政区看,前兆异常主要分布于四川、甘肃、宁夏、陕西和重庆境内。从构造块体看,前兆异常主要位于块体的边界,如青藏一级块体的东北缘、华北和华南一级块体的交界部位及川滇菱形二级块体的东北边界,另外,在华南块体的内部也存在一些异常。从异常出现时间来看,为九寨沟地震前 1 年内,异常主要分布于甘东南地区。图 3 给出了震中距小于

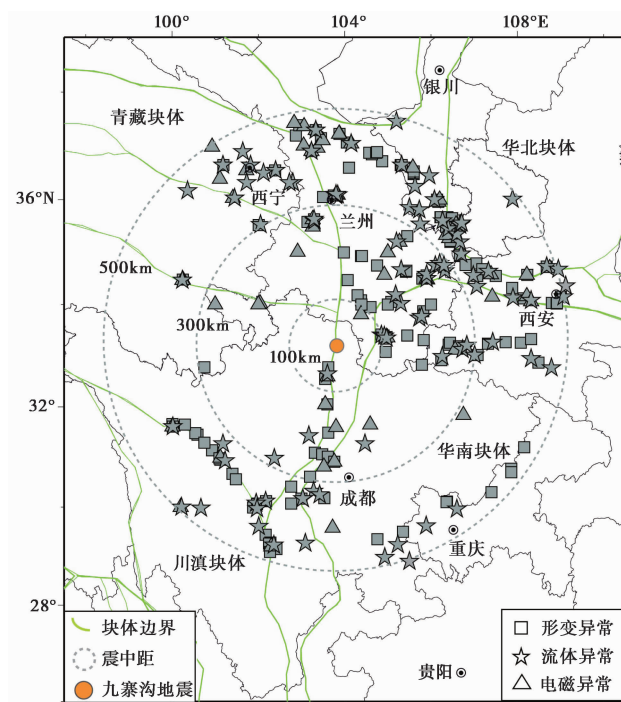


图 1 距九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中 500km 范围内的背景前兆测项

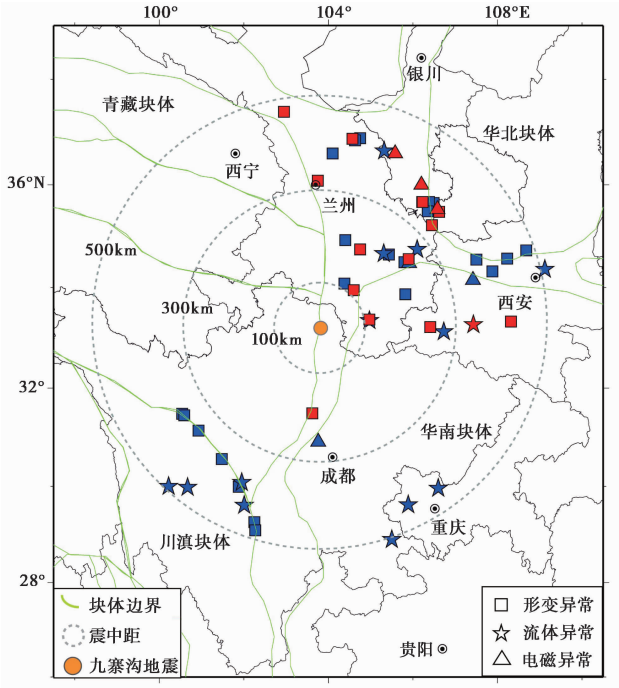


图 2 距九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中 500km 范围内的前兆异常空间分布
2016 年 7 月后的异常(震前 1 年)为红色;2016 年 7 月前的异常为蓝色

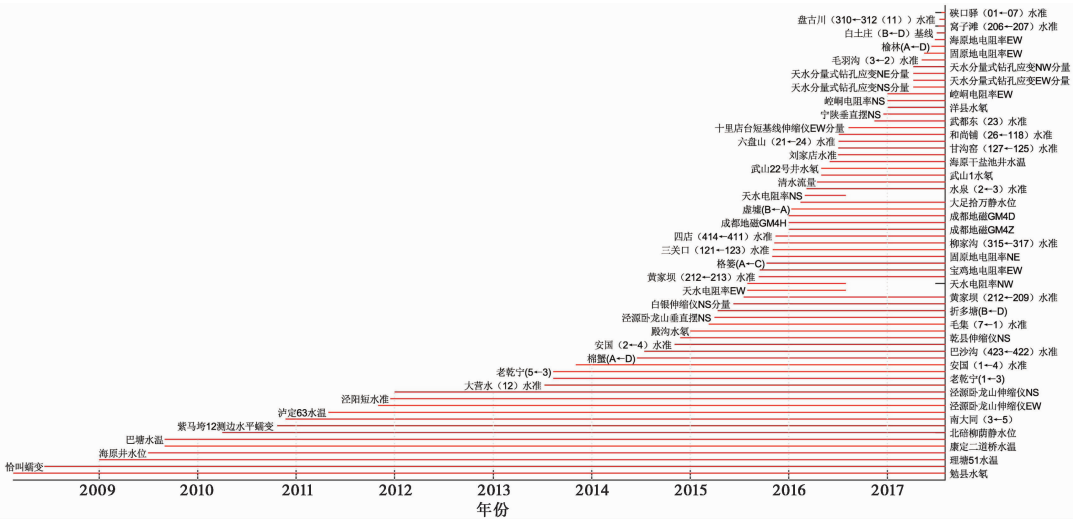


图 3 距九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中 500km 范围内前兆异常的时间进程

500km 的 70 项前兆异常的时间进程,其中,形变异常 38 项,流体异常 20 项,电磁异常 12 项;震前 1 年以上出现的异常 53 项,3 个月~1 年的中期异常 9 项,3 个月内的短临异常 8 项。

2 异常测项比随震中距的变化

由于前兆异常的空间分布不均匀性受前兆观测点的约束,为了刻画前兆异常随震中距

变化的关系,定义前兆的异常测项数与背景测项数之比为异常测项比。表 1、2 给出不同统计方式下前兆的异常测项数、背景测项数及异常测项比。表 1 为逐步增加震中距的异常测项数、背景测项数和异常测项比。由表 1 可见,100km 震中距范围内没有前兆异常,250~300km 震中距范围内异常测项比较高,为 8.6%~9.8%。震中距大于 350km 的区域比例趋于稳定,维持在 7.5%左右。表 2 为每 50km 震中距范围内的异常测项数、背景测项数和异常测项比。由表 2 可见,不同震中距区域内异常测项比波动较大,200~250km 震中距范围内异常测项比最高,达 17.6%;250~500km 范围内比例降低,为 5.0%~8.2%。

表 1 不同震中距范围内的前兆异常测项数、背景测项数及异常测项比

震中距/km	异常测项数	背景测项数	异常测项比/%
≤50	0	1	0
≤100	0	32	0
≤150	4	79	5.1
≤200	9	147	6.1
≤250	21	215	9.8
≤300	26	304	8.6
≤350	33	438	7.5
≤400	52	669	7.8
≤450	64	866	7.4
≤500	70	985	7.1

表 2 不同震中距(每 50km 环形圈内)的前兆异常测项数、背景测项数及异常测项比

震中距/km	异常测项数	背景测项数	异常测项比/%
0~50	0	1	0
>50~100	0	31	0
>100~150	4	47	8.5
>150~200	5	68	7.4
>200~250	12	68	17.6
>250~300	5	89	5.6
>300~350	7	134	5.2
>350~400	19	231	8.2
>400~450	12	197	6.1
>450~500	6	119	5.0

3 新增异常的数量、测项比随时间的变化

以震中距 100、200、300、400、500km 为统计范围,1 年为窗长,半年为步长,分别计算新增前兆异常的数量、测项比随时间的变化(图 4、5)。由图 4 可见,新增异常数量随震中距的增大而逐渐增加;从 2015 年开始新增前兆异常数量逐渐增加,到 2016 年年中达到最大,

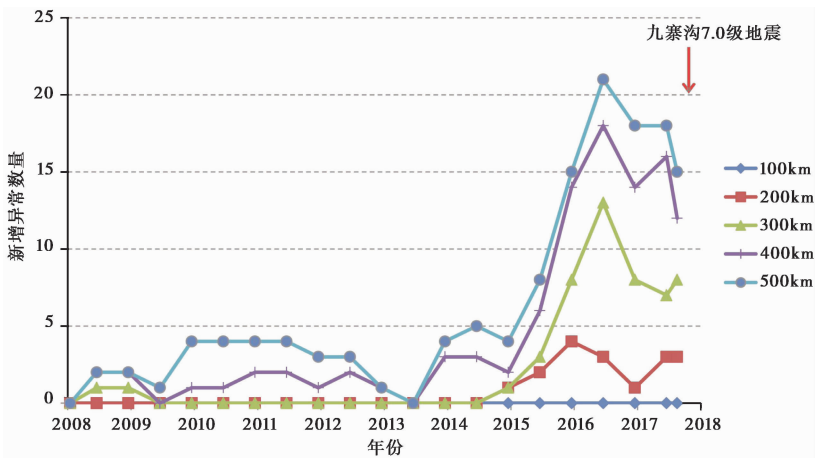


图 4 不同震中距的新增异常数量随时间的变化

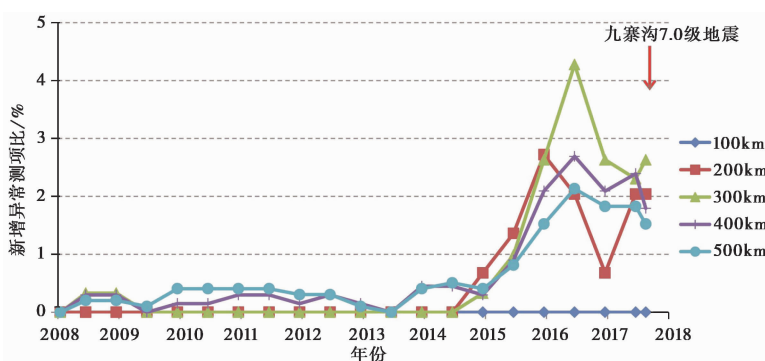


图5 不同震中距新增异常测项比随时间的变化

2016年7月后新增异常数量波动变化,九寨沟 $M_s7.0$ 地震震前半年新增异常数量下降。由图5可见,约从2014年年中开始200~500km不同震中距范围内新增异常测项比逐渐增加,2016年上半年比例达到最大,2016年下半年开始比例降低。另外,震中距300km范围内的新增异常测项比大于其它震中距的比例。

4 异常时空演化过程

图6为九寨沟 $M_s7.0$ 地震前异常开始时间 t 随震中距 d 的变化图。由图6可见,前兆异常的时空演化过程存在3个阶段,即 α 、 β 、 γ 阶段, α 阶段为前兆异常从震中向外围扩展的过程,异常出现时间主要集中在震前1000天以上, α 阶段又可分为 α_1 、 α_2 两个阶段, α_1 阶段的异常比 α_2 阶段的异常距震中更近一些; β 阶段为前兆异常分布在大范围地区,异常主要出现在震前500~1000天,无论震中距大小均出现异常; γ 阶段的异常主要出现在震前500天内,又可分为 γ_1 、 γ_2 两个阶段, γ_1 阶段为前兆异常从震中外围向震中区收缩过程,而 γ_2 阶段为前兆异常从震中区向外围地区扩展的过程,即远源区异常向震中收缩过程为 γ_1 阶段,近源区异常向外扩展过程为 γ_2 阶段。

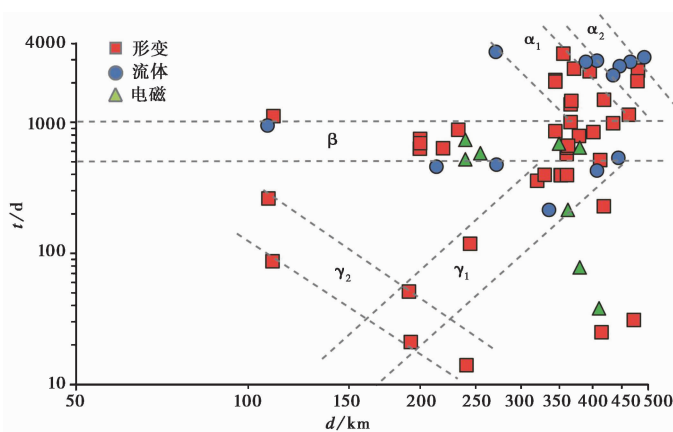


图6 九寨沟 $M_s7.0$ 地震前异常开始时间随震中距变化的3个阶段

从前兆异常 3 个阶段的空间分布来看(图 7), α 阶段异常出现在距震中较远的区域(距震中 300km 以外),主要分布在震中的东北方向和西南方向; β 阶段的异常,距震中 100~500km 范围内均有分布; γ_1 阶段的异常主要集中在震中距 300~500km 范围内, γ_2 阶段的异常均为形变异常,震中距在 300km 以内, γ_1 、 γ_2 阶段的异常主要分布在震中的东北方向。以上异常主要分布在震中的东北方向和西南方向,这与前兆观测点分布不均匀也有一定关系。由图 1 可见,虽然在震中的 4 个方向前兆观测点分布不均,但都有观测点。因此,图 7 所示的

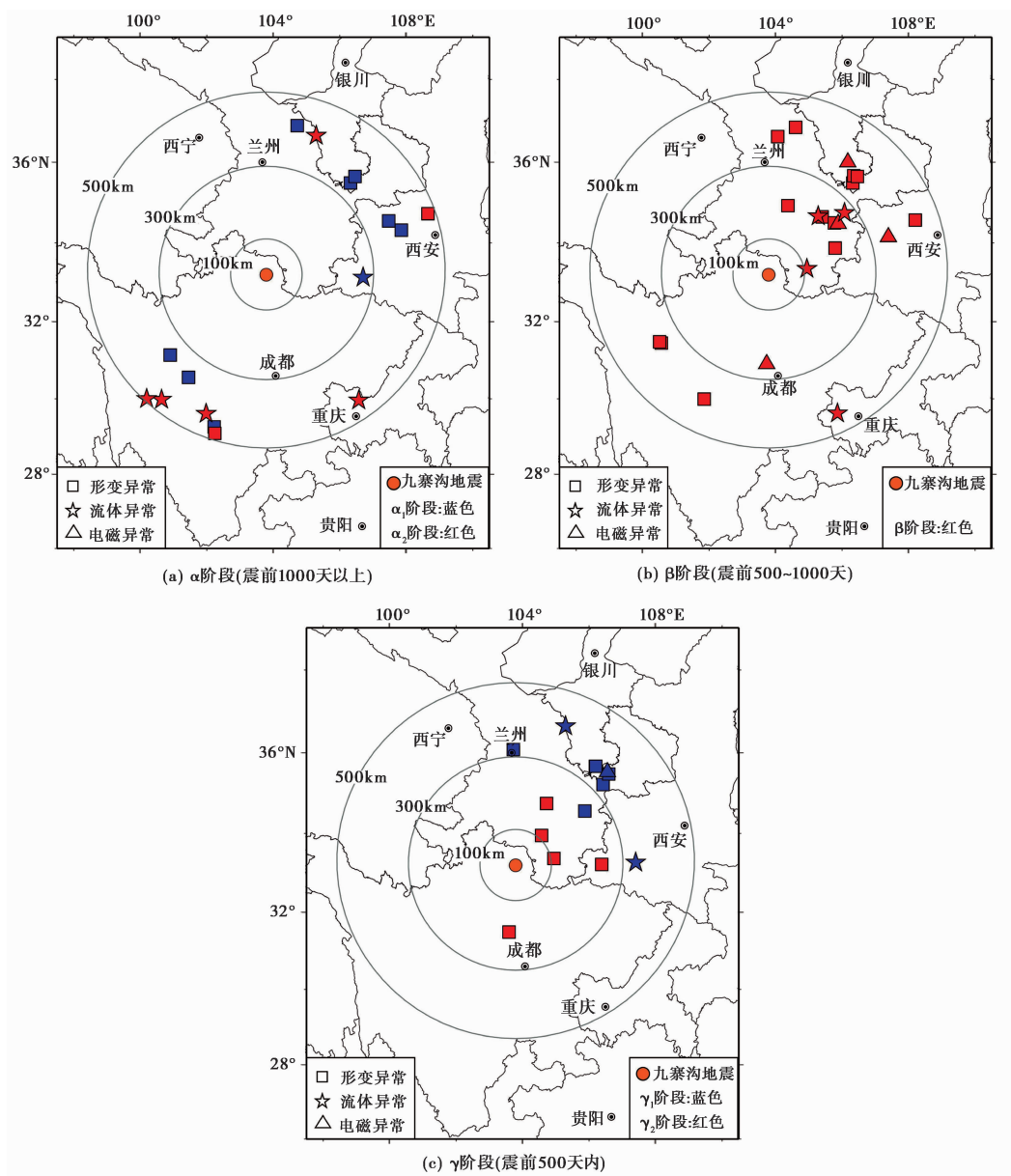


图 7 九寨沟 $M_s7.0$ 地震前 3 个阶段前兆异常空间分布
(a) α 阶段(震前 1000 天以上); (b) β 阶段(震前 500~1000 天); (c) γ 阶段(震前 500 天内)

前兆异常空间分布特征应该是真实的。

5 前兆异常时空演化过程的力学解释

为了解释地震前兆异常 3 个阶段的物理实质,冯德益(1983)提出可将前兆异常发生的 3 个阶段与地震孕育的 3 个阶段相联系。 α 阶段反映微破裂的发生、发展和串通。 β 阶段的前兆成因除了断层预滑外,还有其他因素,如大气压的突然变化,温度突变也可在较大范围内的许多观测点引起突变异常。王新华等(1984)认为前兆异常由震中向外围扩展是由裂纹的亚临界扩展所致。宋治平等(2000)通过对三维流变介质包体模型的理论研究表明,在地表产生的体应变具有 3 个阶段的特征,其中, α 阶段为向外围扩散特征; β 阶段为体应变极值区,即大范围出现前兆异常; γ 阶段包含 2 个过程,即 γ_1 阶段显示远源区的前兆异常向震中区收缩的特征, γ_2 阶段显示近源区的前兆异常向外围扩散的特征。许昭永等(1997)研究了在常应力加载的情况下,三维介质中嵌入硬包体的岩石破裂实验的应变场演变过程认为,地震孕育过程中存在 3 个阶段的变化过程。虽然实验结果与理论结果的条件并不完全相同,但两者确实存在一定的相似性。当区域介质受到加载后,区域应变场存在演变过程,这种演变过程是因有孕震体的存在而出现,但出现的前提是区域受到应力加载。

前人的研究发现,一些显著地震前存在前兆异常的 3 个阶段特征。如 1976 年唐山 7.8 级地震前(冯德益,1983)、1998 年张北 6.2 级地震前(宋治平等,2009)、2008 年汶川 8.0 级地震前(张小涛等,2018)均表现出明显的前兆 α 、 β 、 γ 三阶段特征。本文分析得到的九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前的前兆特征也符合这一规律。由此可见,地震孕育过程中前兆异常的 3 个阶段特征可能是普遍现象。

6 结论与讨论

通过对九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前前兆异常时空演化过程进行分析,发现其具有如下特点:

(1) 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前震中距 100km 范围内无前兆异常出现,但在 100~500km 震中距范围内存在一定数量的形变、电磁、流体异常,且以形变异常为主,异常主要分布在震中的东北、西南方向。

(2) 在九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前 2 年左右(即 2015 年)新增前兆异常逐渐增多,2016 年上半年新增异常数量达到最大。另外,震中距 300km 范围内的新增异常测项比明显高于其它震中距的比例。

(3) 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前前兆异常时空演化存在 3 个阶段的不同变化过程,分析认为, α 阶段(震前 1000 天以上)的异常主要分布在震中东北方向和西南方向; β 阶段(震前 500~1000 天)的异常表现为较大范围出现异常; γ 阶段(包括 γ_1 和 γ_2 ,震前 500 天内)的异常分布在震中的东北方向,表现为远源区的异常向震中收缩过程(γ_1)和近源区的异常向外扩展的过程(γ_2)。通过与其他震例对比分析发现,前兆异常的 3 个阶段特征可能是大震前的共性特征。

(4) 前兆异常的 3 个阶段特征对地震预测研究具有一定指导作用,震前不同震中距前兆异常数量的显著增加对区域是否发生大震和大震发生时间的判断有较好的指示意义。

此外,本文所用到的前兆异常是否都与九寨沟地震有关,还存在一定的争议。本文试图

从震前大范围客观存在的前兆观测异常事实来提取有意义的现象,以期对今后的地震预测研究有一定的借鉴作用。

致谢:笔者在此对审稿人提出的修改建议表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈棋福、郑大林、车时等,2002,中国震例(1995-1996),97~145,北京:地震出版社.
- 房立华、吴建平、苏金蓉等,2018,四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位,科学通报,63(7),649~662.
- 冯德益,1983,地震前兆三阶段发展过程的观测结果与理论,地震研究,6(2),211~226.
- 高曙德、郭安宁、王军燕等,2017,四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震前地电阻率的异常变化,地震工程学报,39(4),645~651.
- 何畅、廖晓峰、祁玉萍等,2017,2017年8月8日九寨沟 $M_s7.0$ 地震前成都台地磁谐波振幅比异常分析,中国地震,33(4),575~581.
- 刘芳、祝意青、赵云峰等,2017,2017年九寨沟地震前重力场异常特征提取,中国地震,33(4),532~539.
- 宋治平、薛艳,2009,华北中强地震前兆特征研究,100~149,上海:上海科学技术出版社.
- 宋治平、尹祥础、梅世蓉,2000,包体流变模型体应变场时空演变的理论分析,地震学报,22(5),491~500.
- 王新华、祁贵仲、赵玉林,1984,断层失稳前的扩展及电阻率前兆,中国科学:B辑,(11),1026~1038.
- 徐东卓、尹海权、朱传宝等,2017,九寨沟 7.0 级地震前后地壳形变时空演化特征及相关问题的讨论,中国地震,33(4),549~562.
- 许昭永、王彬、赵晋明等,1997,含硬包体试样破裂特征的实验研究,地震学报,19(1),79~85.
- 杨博、梁洪宝、赵静畅等,2017,九寨沟 7.0 级地震前地壳水平形变状态与变化,中国地震,33(4),540~548.
- 姚鑫、周振凯、李凌婧等,2017,2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震 InSAR 同震形变场及发震构造探讨,地质力学学报,23(4),507~514.
- 易桂喜、龙锋、梁明剑等,2017,2017年8月8日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析,地球物理学报,60(10),4083~4097.
- 张小涛、刘杰、宋治平等,2018,汶川 $M_s8.0$ 地震的前兆异常时空演化过程及其力学分析,地震,38(2),72~83.
- 张肇诚、罗兰格、李海华等,1990,中国震例(1976-1980),29~132,北京:地震出版社.

Temporal and Spatial Evolution of Precursory Anomalies of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake and its Analysis

Zhang Xiaotao Song Zhiping Li Gang

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In this paper, the epicenter of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake on August 8, 2017 is taken as the center, and the evolution process of the precursory anomalies of different epicentral distances before the earthquake is analyzed. The result shows that there was no precursory anomaly within the range of 100km from the epicenter, and the precursory anomalies were mainly distributed in the epicentral distance from 100 to 500km. The number of new anomalies increased gradually 2 years before the earthquake. The ratio of anomaly items in different epicentral distances reached the maximum around 1.5 years before the earthquake and decreased again before the earthquake, and the ratio of abnormal items in the epicenter distance 300km was relatively high. There were three different stages of spatiotemporal evolution of precursory anomalies: during the α stage (early stage of precursory anomaly, including α_1 and α_2 , more than 1000 days before the main earthquake), the anomalies are mainly distributed in the northeast and southwest of the epicentral area. It is shown that the precursors have the characteristics of outward expansion. During the β stage (Intermediate stage of precursory anomaly, between 500 to 1000 days before the main earthquake), there was a large range of anomalies. During the γ stage (Recent stage of precursory anomaly, including γ_1 and γ_2 , 500 days before the main earthquake), the anomalies were distributed in the northeast of the epicentral area. The anomalies converged to epicenter (γ_1) in the far source region and expanded outwards (γ_2) in the near source region. Compared with other earthquake cases, it is found that the three-stage phenomena of precursory anomalies may be the common characteristics before major earthquakes. The significant increase of precursory anomalies before major earthquakes has some indication significance for time prediction of earthquakes.

Key words: Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; Precursor anomaly; Spatio-temporal evolution; Three-stages feature