

岳冲,牛安福,余怀忠,等,2020. 九寨沟 M_s 7.0 地震前地应变 LURR 异常演化特征. 中国地震,36(2):267~275.

九寨沟 M_s 7.0 地震前 地应变 LURR 异常演化特征

岳冲^{1,2)} 牛安福¹⁾ 余怀忠¹⁾ 吉平¹⁾
姜祥华¹⁾ 马未宇¹⁾ 王亚丽¹⁾

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京 100029

摘要 从岩石应力-应变的本构关系出发,以能够反映岩石应变变化的地应变观测数据作为“响应量”,通过库伦应力触发模型的加卸载响应比计算方法,计算 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_s 7.0 地震前震中及周边 500km 范围内应变观测的加卸载响应比结果。结果显示,基于应变观测的加卸载响应比方法能够较好地提取地震前 LURR 异常,九寨沟地震前,300km 范围内的多个应变观测台站出现 LURR 异常,其中相距 96km 的两水台 EW 分量 Y 值最大达到 3.27;LURR 空间演化特征显示,在震前约 9 个月内震中及周边地区陆续出现异常“集中—增强—减弱”过程,证明该地区在长期应力累积的背景下,应力的不断累积增强导致震中及附近区域的岩石出现不断损伤或弱化,最终位于树正断裂上的应变能积累超过了介质强度而引发了此次地震。

关键词: 地应变观测 LURR 九寨沟地震

[文章编号] 1001-4683(2020)02-0267-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

加卸载响应比(LURR)计算方法是在 20 世纪 80 年代基于岩石应力与应变的非线性响应提出的地震预测新方法(尹祥础,1987;尹祥础等,1994;Yin et al,1995),其基本思路借鉴了系统论的方法,即根据系统与外部的联系,达到了解该系统的目的。地震能量作为较易获得的资料,覆盖的时空域较广,因此,最早加卸载响应比计算多以地震能量 E 作为响应量,尹祥础等(1996)利用加卸载响应比理论对日本关东地区的地震进行检验,取得了较好的效果;宋治平等(1996)结合加卸载响应比的时空演变特征研究了地震前异常的迁移特性;王海涛等(1998)研究了新疆伽师强震群中加卸载响应比值的变化,结果显示,在 $M \geq 5$ 的较大地震前均出现加卸载响应比异常,推动了该理论在地震中、短期预报中的应用。但是,由于地震事件的随机性、空间分布上的不确定性以及目录存在的不完备性,会在一定程度上降低计算

[收稿日期] 2020-02-20; [修定日期] 2020-05-07

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划“基于应变的加卸载响应比计算及异常机理研究”(XH20070Y)资助

[作者简介] 岳冲,男,1989 年生,助理研究员,主要从事地壳形变监测及地球动力学研究工作。

E-mail: dacongylue@126.com

结果的可靠性。Yu 等(2006、2013、2016)尝试将库仑应力触发模型与加卸载响应比进行结合,提高了加卸载响应比方法中对有效剪切应力判断的准确性,在以往震例总结以及年度危险区预测中取得较好的效果,也进一步拓展了加卸载响应比方法在其他观测数据中的应用。

但在以往的研究中,直接从岩石本构关系出发开展岩石应变变化与地震关系的研究相对较少,且对于加载、卸载过程的判定,多采用传统断层面上引潮力产生的剪应力与断层面上的滑移矢量(张昭栋等,1999;任建辉等,2015)计算潮汐有效剪应力的方法,即通过潮汐有效剪应力判断加载及卸载过程。相较于传统计算方法,库仑应力触发模型通过分析构造有效剪应力与潮汐有效剪应力间夹角的大小,利用库仑破裂准则对潮汐有效剪应力在该观测点处引起的加载、卸载过程进行判定,能更敏感地建立岩石破裂与应变变化之间动态联系的物理模型,从而探究加载、卸载过程中岩石的应变响应,进而提高加卸载响应比的临界敏感性,使得计算的加卸载响应比的异常变化更为明显。

因此,本文从岩石应力-应变的本构关系出发,以能够反映岩石应变变化的地应变观测数据作为主要“响应量”,通过库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法,计算 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前震中及周边 500km 范围内应变观测台站的加卸载响应比结果,并分析地震前的空间演化特征。

1 地应变观测及 LURR 计算方法

1.1 地应变观测

地应变观测的仪器主要包括长基线伸缩仪(如洞体应变仪)、钻孔体应变仪、分量应变仪器三类(牛安福,2017)。其中,洞体应变仪主要用于精密测量地壳岩体两点间水平距离的相对变化,可观测地壳应变以及固体潮水平分量的连续变化,主要包括 NS 向和 EW 向的应变观测;钻孔体应变仪主要通过监测安装在钻孔中腔体的体积变化,进而反映岩体体积的相对变化;钻孔分量应变仪通过布设于应变仪内部不同方位的应变探头,实现对不同方向应变的观测,主要包括 NS 向、EW 向、NE 向和 NW 向的应变观测。上述三类应变仪器的观测方式虽不尽相同,但均观测的是由岩石应力改变导致的岩石应变变化。应变作为应力变化导致的岩石由弹性变形至损伤、再至失稳破坏过程中最直接的物理量,在震前更易观测到岩石的异常变化。

1.2 LURR 方法

加卸载响应比(LURR)是一种用来度量地壳介质损伤程度的物理量(尹祥础,1987;尹祥础等,1994)。地震孕育的物理实质为震源区内介质的变形、损伤并导致最终失稳,LURR 方法是在断裂力学、损伤力学、非线性科学等研究成果基础上提出的地震预测新方法。

岩石的应力-应变曲线(图 1)显示,当岩石处于弹性阶段时,岩石对加载时和卸载时的响应率(变形模量)是一致的,但随着应力的不断增加,岩石处于损伤阶段,此时岩石在加载时的响应率大于卸载时的响应率,进而造成岩石损伤或强度降低,直至最终发生破坏。LURR 方法基于岩石应力与应变的非线性响应,通过计算岩石在弹性阶段和损伤阶段对加载和卸载不同的响应量,进而准确把握岩石损伤阶段。加卸载响应比 Y 定义为: $Y = \frac{X_+}{X_-}$,其中, X_+ 代表加载时的响应率, X_- 代表卸载时的响应率。

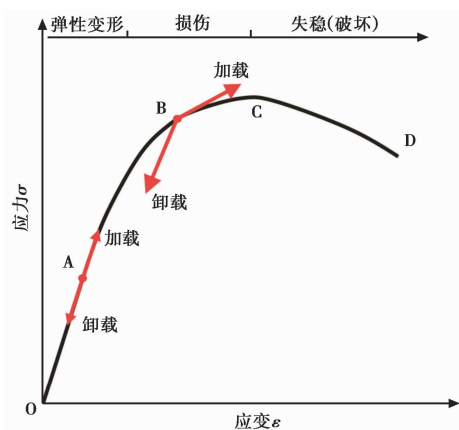


图 1 岩石应力-应变曲线

2 九寨沟 $M_s7.0$ 地震及应变观测资料

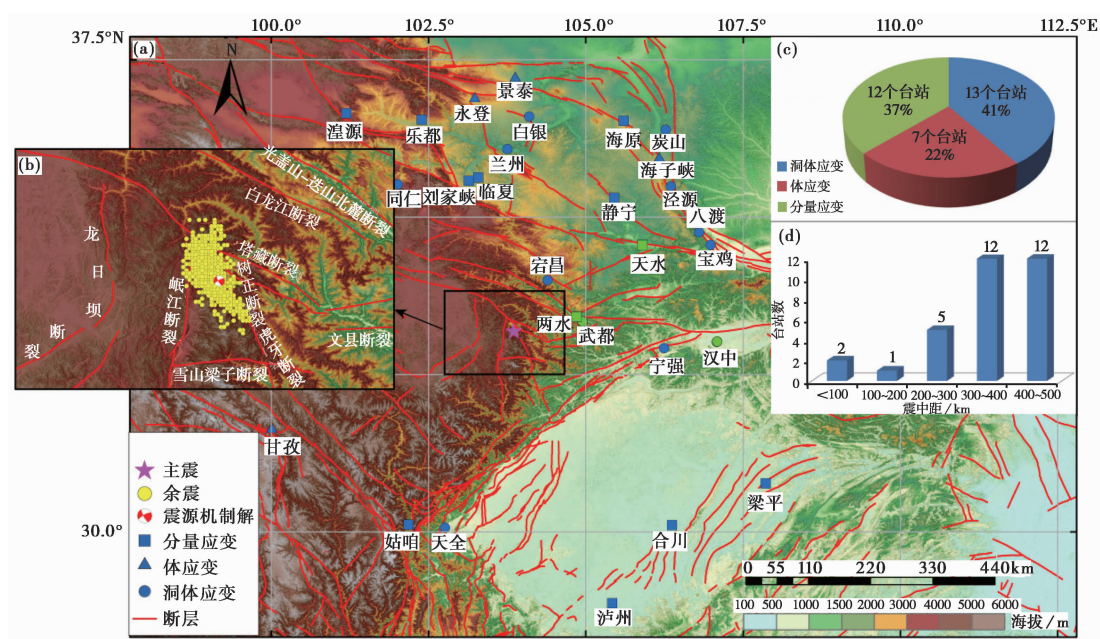
2.1 九寨沟 $M_s7.0$ 地震

据中国地震台网中心(CENC)测定,北京时间 2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,在四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s7.0$ 地震,震中位于 33.20°N 、 103.82°E 。本文统计了九寨沟地震后 3 个月内的余震分布,地震序列沿 NW—SE 向呈条带状分布,如图 2(b)所示。USGS^①的震源机制解结果显示此次地震为走滑型地震,节面 I 的走向、倾角、滑动角分别为 246° 、 57° 和 -173° ,节面 II 的走向、倾角、滑动角分别为 153° 、 84° 和 -33° 。李君等(2019)计算的九寨沟地震序列震源区的应力场结果显示,地震主压应力、主张应力倾角接近水平,主压应力方向近 EW 向,主张应力近 SN 向,应力场方向与南北地震带中段区域结果一致(许忠淮等,1989;王晓山等,2015),证明此次地震是在整个巴颜喀拉块体 SE 向推挤过程中受到华南地块阻挡、东昆仑断裂带东端发生构造转换(任俊杰等,2017)的背景下,水平挤压作用导致断层闭锁应力超过岩石强度而引发的。此次地震周边发育一系列全新世活动断层,如岷江断裂、塔藏断裂、雪山梁子断裂、白龙江断裂、龙日坝断裂、文县断裂等(图 2(b)),而此次九寨沟 $M_s7.0$ 地震发生在虎牙断裂北侧的隐伏断裂上,震后地质考察的结果显示震中及附近区域并未出现地表破裂带,该隐伏断裂在震后被命名为树正断裂,前人的震后地质考察、震源机制解计算等结果(季灵运等,2017;易桂喜等,2017;李君等,2019)显示,该断裂与北部塔藏断裂、南部虎牙断裂的断层几何产状及运动性质较为一致,说明该发震断裂作为东昆仑断裂带左旋走滑运动向东扩展的结果,其与周边断裂带具有较为密切的联系。

2.2 地应变台站分布

针对九寨沟 $M_s7.0$ 地震,重点收集距震中 500km 范围内的地应变观测台站的观测数据,最终收集 32 个定点观测台站的数据,台站分布如图 2(a)所示,其中洞体应变观测台站 13 个,体应变观测台站 7 个,分量应变观测台站 12 个,台站类型如图 2(c)所示。受布设场地

^① <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1/moment-tensor>

图 2 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震周边地应变台站类型及分布

(a) 地应变台站分布; (b) 余震分布; (c) 台站类型; (d) 台站震中距分布

条件的限制,台站分布较为分散,主要集中于九寨沟地震震中以北的祁连山东段、海原-六盘山地区以及鄂尔多斯块体南缘,震中以南的台站较少,主要位于四川盆地内、龙门山断裂带南段、鲜水河断裂带,震中以西的区域无应变台站。台站震中距的统计结果如图 2(d) 所示,台站多分布在震中距 300~500km 范围内,共 24 个站点;震中距 300km 范围内仅有 8 个站点;而震中距 100km 范围内仅有两水、宕昌 2 个站点,且均位于震中以北的区域。

3 震前 LURR 演化特征

3.1 震前应变变化及 LURR 结果

收集九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前 32 个台站的应变观测数据,原始观测数据均截至 2017 年 7 月 31 日。首先,针对原始观测数据进行数据去突跳、插值等预处理,保证原始数据连续性、可靠性以及稳定性;其次,筛选出观测时段大于 3 年的数据,共计 81 个测项。通过库伦应力触发模型的加卸载响应比计算方法,计算得到不同测项的加卸载响应比值,其中计算时间窗长为 1 个月,滑动步长为 1 个月,计算库伦破裂应力采用的内摩擦系数为 0.4 (Yu et al, 2006, 2013, 2016)。最终根据计算结果,筛选震中距分别约为 100km、200km、300km 范围内变化最为突出的两水、武都、天水、汉中 4 个台站(图 2(a) 中绿色站点)的加卸载响应比 Y 值结果,如图 3 所示。

图 3(a)、3(c)、3(e)、3(g) 依次为两水、武都、天水、汉中 4 个台站在九寨沟地震前原始数据的预处理结果,从图中可以看出,武都台和天水台在地震前出现了较以往变化幅度更突出的“转折—加速”变化,而两水台和汉中台的原始数据变化并不突出。因此,单从原始数据

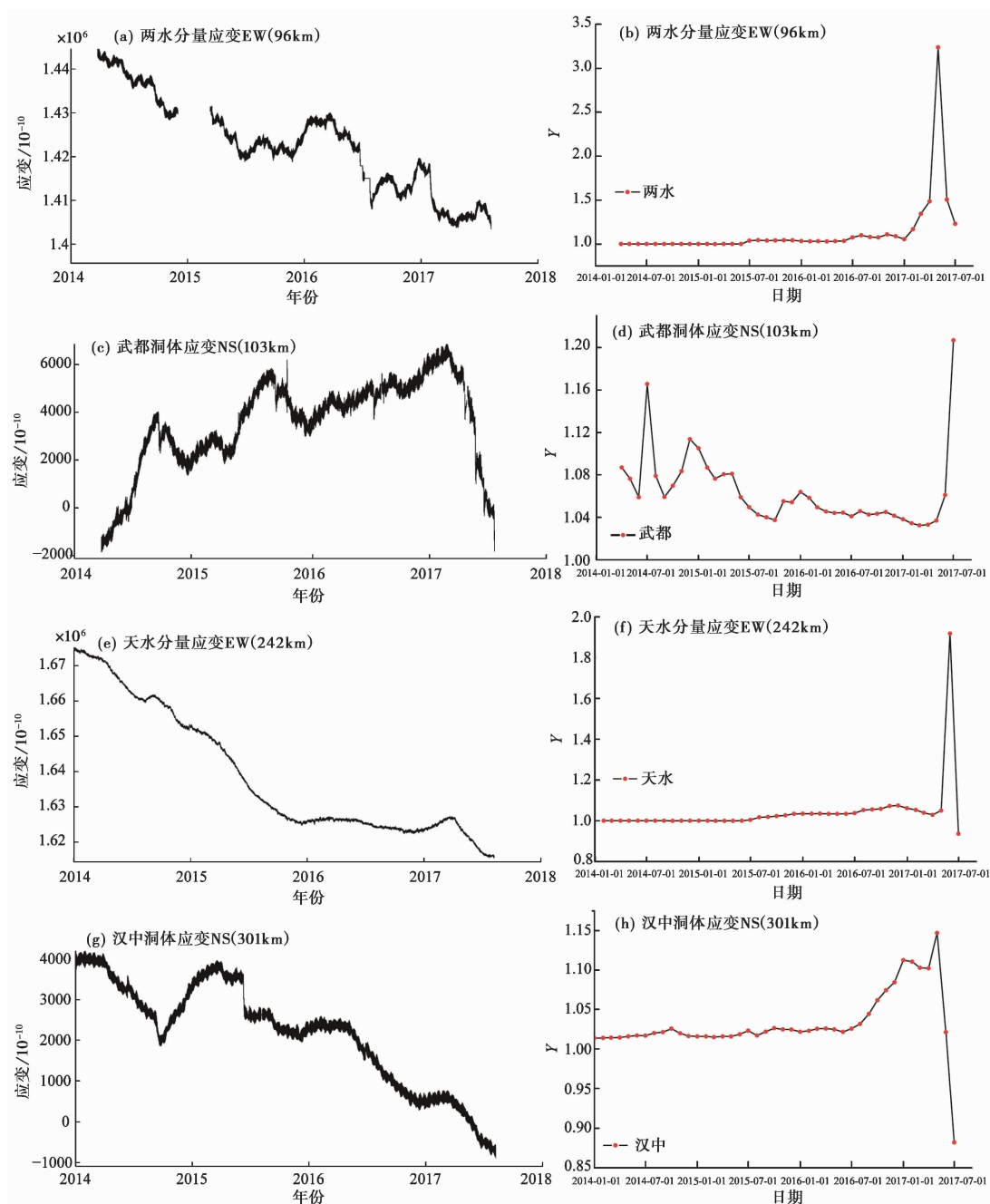


图3 应变观测数据(a)、(c)、(e)、(g)及其LURR时间序列(b)、(d)、(f)、(h)

的变化形态很难对地震的发生做出准确的判断。而LURR计算主要从潮汐频段提取地震前异常信息,从计算的4个站点相应测项的 Y 值结果(图3(b)、3(d)、3(f)、3(h))可以看出,自2014年1月以来,两水分量应变EW测项 Y 值一致稳定在1附近,2017年1月后 Y 值逐步增大,于5月达到最大值3.27后逐步减小;武都洞体应变NS测项 Y 值于2014~2015年初

出现小幅波动后,稳定在 1.04 附近变化,于 2017 年 6 月出现显著增强,7 月达到最大值 1.2;距震中 242km 的天水分量应变 EW 测项结果显示,自 2014 年 1 月以来 Y 值一直稳定在 1 附近,于 2017 年 6 月出现快速增大,7 月 Y 值结果恢复到 1 附近;而距离震中 301km 的汉中洞体应变 NS 测项 Y 值结果增大的时间点较早,2014 年 1 月~2016 年 7 月 Y 值稳定在 1.02 附近,自 2016 年 8 月 Y 值出现逐步增大,并于 2017 年 5 月达到最大的 1.15 后逐渐减小。

根据以往震例研究结果(尹祥础等,1994、1996、2017;Yin et al,1995), Y 值结果多稳定在 1 附近,将 Y 值大于 1 作为异常。可以看出 4 个台站在地震发生前均出现较为显著的 LURR 高值异常,但受台站分布、台站所处断裂、震中距、观测仪器类型等因素影响,异常出现的时间、异常持续过程、异常结束时间以及无异常时 LURR 稳定值仍存在一定差异。此外,武都洞体应变 NS 测项在 2014~2015 年初出现了单台 LURR 高值波动变化,之后台站周边并未发生显著地震事件,周边站点也并未同步出现 LURR 高值异常。因此,在实际计算过程中,针对单个站点出现的 LURR 异常变化,需结合周边台站的群体性特征对异常可信度作进一步判定。

3.2 LURR 空间演化特征

利用收集的 32 个应变观测台站资料,筛选出 32 个台站中原始观测数据质量较好、LURR 计算结果稳定且变化最为显著的测项作为该台站的 LURR 计算结果。对 32 个台站的间距进行统计,得到相距最近的台站为两水台、武都台,距离最近约为 13km,因此采用 surface 数据网格化方法,获得了九寨沟地震前整个区域的 LURR 空间分布(LURR 计算参数设置同上),如图 4 所示,其中网格最小间距设置为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。以 2017 年 7 月数据为例,计算得到平均误差为 -0.0045、均方根误差为 0.083。图 4 展示了 2015 年 1 月~2017 年 7 月间的部分时段结果,其中蓝色三角形表示站点位置,震源机制解位置为地震震中位置。此外,为排除因部分观测数据受人为干扰或仪器故障等因素影响导致的 LURR 计算结果出现短期波动以及部分台站 LURR 稳定值差异对结果带来的影响,更好地突出九寨沟地震前周边地应变台站 LURR 异常空间演化过程,将绘图色度条最小阈值设置为 1.03(即低于 1.03 显示为白色)。

LURR 异常空间演化结果显示,青藏高原东北缘作为应力较为集中的区域,自 2015 年以来位于光盖山-迭山北麓断裂的武都、两水场地陆续出现短期 Y 值异常波动变化,证明该区域存在应力增强引起的岩石损伤变化,但该区域的异常并未持续增强,至 2016 年 10 月后, Y 值异常范围开始逐渐扩大,位于西秦岭北缘断裂的天水台、龙门山断裂带东北端的汉中台陆续出现 Y 值增大现象,证明在该段时间内震中附近区域陆续出现应力累积增强导致岩石出现损伤的过程;之后 Y 值异常逐步向震中区集中, Y 值也逐渐增大,于 2017 年 5 月异常达到最大;随后震中区周边 Y 值异常逐渐降低,并出现向外围扩展现象,至 2017 年 7 月底 Y 值异常区再次分布于震中区附近。

受台站分布的影响,震中西侧、南侧均无近距离地应变观测台站,因此,本文计算得到的九寨沟地震前 LURR 异常主要集中于震中的东北侧区域,异常分布区域与陈丽娟等(2017)计算的九寨沟地震前川甘交界地区的舟曲、文县等地呈现出较为集中的视应力高值异常分布结果较为一致;此外,由本文得出的 LURR 异常时空演化特征可以清晰看到,在地震前震中及附近区域出现的 Y 值异常“集中—增强—减弱”的过程,与 Yu 等(2020)利用小震的

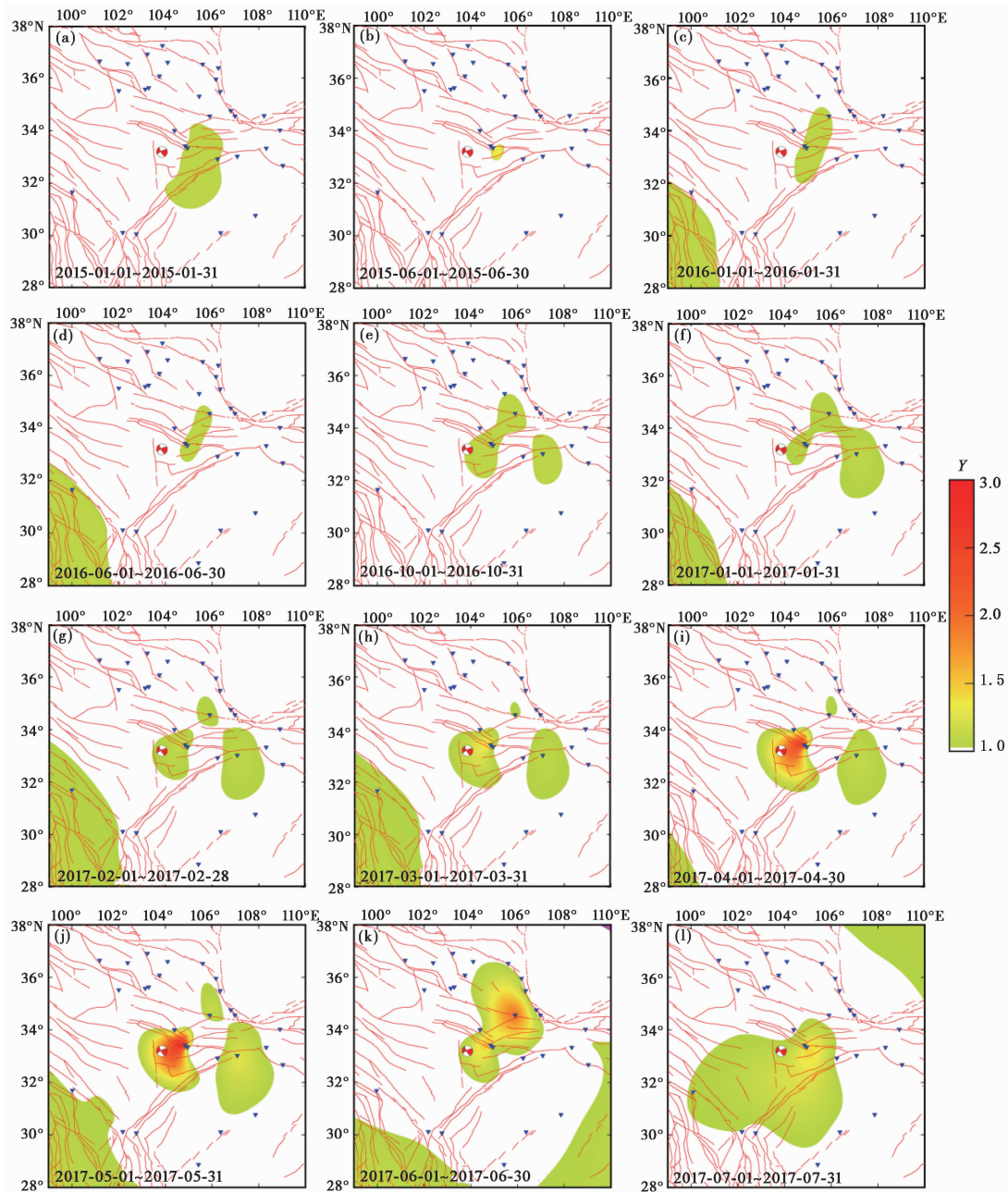


图 4 九寨沟地震前 LURR 演化特征

Benioff应变计算的九寨沟地震前的 LURR 异常在 2016 年集中于虎牙断裂、震前向震中迁移的现象相同,也与震例总结中地震往往发生异常转折或消失后的 3~6 个月内的结果较为符合(尹祥础等,1994、1996、2017;Yin et al,1995)。九寨沟地震前该地区的 LURR 空间演化特征显示,在青藏高原东北缘地区存在长期应力累积的背景,随着应力在该区的不断累积增强,导致震中及附近区域的岩石出现不断损伤或弱化的变化,最终在树正断裂上的应变能的

积累超过了介质强度极限,进而引发了九寨沟地震。

4 结论

本文从岩石应力-应变的本构关系出发,以反映岩石应变变化的地应变观测数据作为主要“响应量”,通过库伦应力触发模型的加卸载响应比计算方法,计算了 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前整个区域内应变观测的 LURR 值,计算结果显示:

(1) 基于应变观测的加卸载响应比方法能够较好地从中潮频段提取地震前异常变化。九寨沟地震前 300km 范围内多个应变观测台站均出现了 LURR 异常过程,其中,相距 96km 的两水台分量应变 EW 测项 Y 值自 2017 年 1 月后逐步增大,于 5 月达到最大值 3.27。但受台站分布、台站所处断裂、震中距、观测仪器类型等因素影响,异常出现的时间、异常持续过程、异常结束时间以及无异常时 LURR 稳定值仍存在一定差异。

(2) LURR 空间演化特征显示,在地震孕育过程中,青藏高原东北缘地区出现 Y 值异常变化,证明该区域存在应力增强引起的岩石损伤过程,在震前约 9 个月震中区周边陆续出现异常“集中—增强—减弱”的过程,证明震中及附近地区随着应力的不断累积增强,岩石持续损伤或强度降低,最终树正断裂上应变能的积累超过了介质强度极限,进而引发了九寨沟地震。

致谢: 匿名审稿专家对论文进行了细致的审阅并提出了宝贵建议,文章部分图件采用 GMT 软件进行绘制,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈丽娟,陈继锋,龚丽文,等,2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前甘肃南部地区视应力变化. 中国地震, **33**(4):521~531.
- 季灵运,刘传金,徐晶,等,2017. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析. 地球物理学报, **60**(10):4069~4082.
- 李君,王勤彰,崔子健,等,2019. 2017 年 8 月九寨沟 $M 7.0$ 地震序列断层结构及构造应力场特征. 地震地质, **41**(1):58~71.
- 牛安福,2017. 地应力波与地震预测基础. 北京:地震出版社,42~45.
- 任建辉,李继业,高峰,等,2015. 黑龙江及周边地区中强地震前加卸载响应比特征分析. 地震地磁观测与研究, **36**(1):1~9.
- 任俊杰,徐锡伟,张世民,等,2017. 东昆仑断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震孕震机制. 地球物理学报, **60**(10):4027~4045.
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉,1996. 地震前兆异常迁移速率的非线性变化特征及其力学解释. 地震, **16**(4):372~376.
- 王海涛,彭克银,张永仙,等,1998. 新疆伽师强震群过程中加卸载响应比变化特征. 科学通报, **43**(11):1109~1112.
- 王晓山,吕坚,谢祖军,等,2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征. 地球物理学报, **58**(11):4149~4162.
- 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等,1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场. 地球物理学报, **32**(6):636~647.
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等,2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M 7.0$ 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.
- 尹祥础,1987. 地震预测新途径的探索. 中国地震, **3**(1):3~10.
- 尹祥础,陈学忠,宋治平,等,1994. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法. 地球物理学报, **37**(6):767~775.
- 尹祥础,陈学忠,宋治平,等,1996. 关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义. 中国地震, **12**(3):331~334.
- 尹祥础,刘月,张浪平,等,2017. “泛西南”地区加卸载响应比异常及大震活动预测与追踪. 地震, **37**(4):37~49.
- 张昭栋,王秀芹,董守德,1999. 加卸载响应比在体应变固体潮中的应用. 地震, **19**(3):217~222.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al, 1995. A new approach to earthquake prediction: the Load/Unload Response Ratio (LURR)

- theory. *Pure Appl Geophys*, **145**(3~4):701~715.
- Yu H Z, Cheng J, Zhang X T, et al, 2013. Multi-methods combined analysis of future earthquake potential. *Pure Appl Geophys*, **170**(1~2):173~183.
- Yu H Z, Shen Z K, Wan Y G, et al, 2006. Increasing critical sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern. *Tectonophysics*, **428**(1~4):87~94.
- Yu H Z, Yu C, Ma Z, et al, 2020. Temporal and spatial evolution of load/unload response ratio before the $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake of Aug. 8, 2017 in Sichuan Province. *Pure Appl Geophys*, **177**:321~331.
- Yu H Z, Zhou F R, Zhu Q Y, et al, 2016. Development of a combination approach for seismic hazard evaluation. *Pure Appl Geophys*, **173**:221~233.

Evolutionary Characteristics of Ground Strain LURR Anomaly before Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake

Yue Chong^{1,2)} Niu Anfu¹⁾ Yu Huaizhong¹⁾ Ji Ping¹⁾ Jiang Xianghua¹⁾
Ma Weiyu¹⁾ Wang Yali¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract Based on the stress-strain constitutive relationship of rock, we use the ground strain observation data that can reflect the change of rock strain as the “response amount”, and apply the loading and unloading response ratio (LURR) calculation method include coulomb stress-triggered model to calculate the LURR results of the ground strain observation within 500km of the epicenter before the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake. Our results suggest that the method based on the strain observation is of better extracting the LURR anomaly from the tidal frequency band before the earthquake. We find that the LURR anomaly appeared in several strain observation stations within 300km before the Jiuzhaigou earthquake, and the maximum Y value of Liangshui station EW component at a distance of 96km reached 3.27. The spatial evolution characteristics of LURR indicate that the epicenter and surrounding areas have experienced an abnormal concentration—enhancement—weakening process within about 9 months before the earthquake. It is proved that under the background of long-term stress accumulation in this area, with the continuous accumulation of stress, the rocks are constantly damaged or weakened. Eventually, the accumulation of strain energy on the Shuzheng fault exceeds the strength of the medium and triggers this earthquake.

Keywords: Ground strain observation; LURR; Jiuzhaigou earthquake