第33卷 第4期(549~562)	中 国 地 震	Vol. 33 No. 4
2017年12月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Dec. 2017

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。

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

徐东卓¹⁾ 尹海权¹⁾ 朱传宝²⁾ 孙非非²⁾

1)中国地震局第一监测中心,天津市河东区耐火路7号 300180
 2)青海省第三地质矿产勘查院,西宁 810029

摘要 基于九寨沟 7.0 级地震前后,震中区周缘和巴颜喀拉地块周缘的跨断层观测、大面积 水准测量、地震活动性等资料,利用断层三维活动量参数和水准平差计算方法,综合分析了地震 前后区域地壳形变以及巴颜喀拉地块整体性运动与地震间的关系。结论如下:①九寨沟地震前 后,远场的西秦岭构造区、六盘山断裂带、龙门山断裂带和鲜水河断裂带上的跨断层流动场地出 现不同程度的异常变化,震中区域的形变并不显著;②由巴颜喀拉地块周缘的断层异常活动和 地震活动性分析可知,巴颜喀拉地块整体性的 SE 向顺时针加速运动,造成了九寨沟地震震中区 域的应力积累,同时,包括芦山地震在内的几次强震对九寨沟地震有一定促震作用;③九寨沟地 震后,区域应力积累得到一定程度的释放,应力可能会在"三岔口"区域加速积累。

关键词: 九寨沟 7.0 级地震 跨断层观测 水准测量 地壳形变分析 [文章编号] 1001-4683(2017)04-0549-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2017年8月8日,四川省阿坝州九寨沟县发生7.0级地震,震中33.20°N、103.82°E,震源深度约为20km。九寨沟地震是继南北地震带中南段和巴颜喀拉地块周缘多次强震后发生的又一次显著地震。此次地震震中位于巴颜喀拉地块的东北部、东昆仑断裂带东段塔藏断裂附近,根据余震精定位发现,余震条带表现为纺锤形,长轴走向约为340°~350°,与全新世的塔藏断裂小角度相交,发震断层可能是东昆仑断裂东端的一条次级活动断层。巴颜喀拉地块是青藏高原内部受印度板块俯冲推挤亚欧板块而形变强烈的活动块体(陈长云等,2013;徐东卓等,2017),其北边界是以左旋走滑为主的东昆仑断裂带,该断裂带曾发生过2001年昆仑山口西8.1级地震、1997年玛尼7.5级地震以及此次九寨沟7.0级地震等强震;东边界是以挤压特征为主的龙门山断裂带,由3条近乎平行的主断裂组成,近年曾发生过

[[]收稿日期] 2017-10-30; [修定日期] 2017-11-21

[[]项目类别]中国地震局"三结合"项目(CEA-JC/3JH-163704)、中国地震局监测预报司专项(17A37ZX228)和科技部基础 性工作专项(2015FY210400)共同资助

[[]作者简介] 徐东卓,男,1985 年生,工程师,主要从事地壳形变监测分析、区域大地构造与地震构造研究。 E-mail:donglicf@163.com

2008 年汶川 8.0 级、2013 年芦山 7.0 级等强震;南边界是以左旋走滑为主的玉树-鲜水河断裂带,曾发生过 1981 年道孚 6.9 级、2010 年玉树 7.1 级等中强震;西边界是左旋走滑的阿尔金 断裂带,历史强震活动较其他边界带偏弱,但也发生过包括 2008 年于田 7.3 级地震在内的多 次显著地震。据震例统计结果,我国大陆全部 8 级地震、80%以上的 7 级地震都发生在块体 边界区(张国民等,2000),巴颜喀拉地块更是如此。

有研究认为,汶川地震后,库仑应力在龙门山断裂带南段加速积累,深部孕震环境形成, 进而导致了芦山地震的发生;1997年以来的巴颜喀拉地块周缘强震的粘弹性触发研究表明, 东昆仑的玛尼 7.5 级地震与昆仑山口西 8.1 级地震、昆仑山口西 8.1 级地震与玉树 7.1 级地 震以及昆仑山口西 8.1 级地震与汶川 8.0 级地震之间存在不同程度的触发关系(沈正康等, 2003;万永革等,2007;汪建军等,2009;程佳等,2011),万永革等(2007)分析了 1920 年海原 8.5级地震以来青藏高原东北部7级以上地震的库仑应力积累过程及其对后续地震的影响, 认为 85%的后续地震受到了之前地震的触发作用,并对青藏高原东北部强震之间的触发关 系进行了论述。关于昆仑山口西 8.1级地震与汶川 8.0级地震之间的联系,有研究认为,巴 颜喀拉地块作为青藏高原向东挤出的主要地区,具有整体向东运动的趋势,2次大地震之间 存在一定的应力转换作用(Burchfiel et al,2008;Zhang et al,2009;Luo et al,2010)。那么,巴 颜喀拉地块边界断裂带上近年来的强震与九寨沟 7.0 级地震之间是否存在某种联系?九寨 沟地震发生前,该区域诸多的形变资料表现出了异常特征,这种异常表现与地震孕育之间的 深层次关系如何?都是值得探究的问题。本文利用震中区周缘、巴颜喀拉地块周缘的跨断 层观测、大面积水准测量等资料,联合已有的 GNSS 分析结果,借助多种处理分析方法,分析 九寨沟地震前后的区域地壳形变演化特征,探讨深部孕震构造环境的变化机理,并对未来地 震危险区域给出一定推测。

1 资料

为了研究青藏高原东北缘及巴颜喀拉地块整体地壳形变与九寨沟 7.0 级地震间的相关 性,本文选取了以上区域重要断裂带和块体边界断裂上的跨断层流动场地,其主要位于西秦 岭构造区、六盘山断裂带、龙门山断裂带和鲜水河断裂带,其中,距震中最近的为西秦岭构造 区,场地也多在距震中 100km 以外。西秦岭构造区和六盘山断裂带的场地始建于 20 世纪 70、80 年代,其中,西秦岭构造区共有 20 余处,六盘山断裂带有 10 余处,均积累了至少 30 年 的观测数据,资料完整而连续,监测手段主要为短水准观测。短水准测量周期每年 3~5 次, 震情紧迫的情况下,还会进行加密观测。龙门山、鲜水河断裂带的跨断层场地共有 16 处。 其中,侏倭、格篓坝子、虚墟、沟普、龙灯坝、老乾宁和折多塘等 7 处为基线和水准综合观测场 地,其余均为水准观测。它们多始建于 20 世纪 80 年代,近年也存在新增建场地,观测频次 基本为每月 1 期,震情紧迫时会加密至每半个月 1 期,个别年份每 2 个月观测 1 期,数据连 续且完整。监测仪器运行正常,各项技术指标符合规范要求,观测结果精度优良。

本文使用的大面积区域水准资料线路西起四川阿坝,东至重庆,北起甘肃临潭,南到四 川西昌,覆盖了包括九寨沟 7.0 级地震震中区在内的四川中西部地区(图1)。水准资料主要 利用2期一等复测资料,第1期施测时间为1991~1998年,第2期为2012~2013年。使用的 光学水准仪、电子水准仪以及配套的铟瓦水准标尺和尺台检验项目齐全,各项限差均符合规



图 1 研究区跨断层场地及水准路线分布

范要求,施测过程严格按照《国家一、二等水准测量规范》(中国国家标准化管理委员会, 2006)执行。

2 资料处理及分析

2.1 跨断层数据

本文将收集到的跨断层形变观测数据进行了预处理。首先,消除因干扰引起的观测异 常突跳变化,对观测资料进行连续性检验,剔除重复的数据。然后,对日常观测中因各种原 因不能施测而造成的数据缺失采用线性插值法修补,得到统一观测周期的可靠的观测数据。 对于投入观测不久的新场地,由于数据量较少,场地稳定性有待检验,暂时不作分析。

对先期处理好的数据运用 MATLAB 进行编程,将其原始曲线绘出。通过对曲线进行分 析发现,九寨沟地震前后,西秦岭、六盘山、龙门山和鲜水河等断裂带上的跨断层流动场地出 现了明显异常变化。其中,西秦岭构造区上表现出异常的场地有殿沟、盘古川、柳家沟、毛羽 沟、巴沙沟、武都东、黄家坝和硖口驿等;六盘山断裂带上有三关口、安国镇、甘沟窑、和尚铺 和六盘山等;龙门山断裂带上有宝兴和雁门等;鲜水河断裂带上有虚墟、老乾宁、格楼坝子、 折多塘、恰叫和榆林等(图2、3)。

2.1.1 西秦岭构造区

殿沟 5-2 水准数据积累的时间较短,但是九寨沟地震震后的最新数据显示其大幅下降,

4 期

震



图 2 西秦岭、六盘山构造区跨断层场地异常曲线

552

CMYK



图 3 龙门山、鲜水河断裂带跨断层场地异常曲线

СМҮК

4 期

СМҮК

变化量为 0.41mm,该场地距九寨沟地震震中相对较近,震前异常不明显,震后出现了明显异常,应为地震导致场地所跨断层发生活化调整所致。盘古川 12-10 水准是新增测段,资料积累时间尚短,震前水准出现大幅上升,幅度达到 1.89mm,震后曲线转折向下,最新数据显示异常持续,应为受同震作用的影响,短期内断层活动发生转折。柳家沟 5-7 水准对包括汶川地震在内的几次中强震有不同程度的反应,2015 年 11 月至今已累计大幅下降 2.57mm,断层震前表现为强烈挤压运动,震后依然下降,这类似于永登 5.8 级地震后的趋势,即 5 年后再次发生了景泰 5.9 级地震,这值得持续关注。毛羽沟 3-2 水准曲线显示,2008 年以后断层活动以逆断活动为主,2013 年岷县漳县 6.6 级地震前 3~4 个月断层挤压运动加速异常,震后出现趋势性转折,转为拉张上升;九寨沟地震震前,由之前的持续振荡上升转变为快速下降,下降幅度 0.92mm,震后曲线小幅恢复上升。巴沙沟 3-2 水准 2014 年以来改变以往趋势性转折上升,2015 年底至今在高位波动。武都东 2-3 水准 2016 年 11 月由之前的平稳波动,转而大幅下降,变化量为 1.15mm,并在 2017 年 3 月转折上升 0.49mm,震后数据暂无明显变化。黄家坝 2-3 水准在 2003 年岷县 5.2 级、2004 年岷县 5.0 级地震前表现出一定的突跳变化,且九寨沟地震前亦出现波动异常。硖口驿 1-7 水准在九寨沟地震前表现出明显的快速拉升变化。

距九寨沟地震震中区最近的西秦岭构造区多表现出震前中短期压性运动和异常波动、 震后快速恢复的活动特点,与地震震源机制解给出的挤压特征相符,震后随着区域应力的释 放,断层活动得到迅速恢复。个别场地的另类异常活动表现,也印证了西秦岭地区构造体系 和地壳形变的复杂性。西秦岭构造区因青藏高原东北缘物质向东挤出运动,遇到鄂尔多斯 地块和华南地块的阻碍,在三方互相作用下而表现出构造活动的复杂性,在中强震前,该区 域的跨断层场地多表现出群体性压性和异常波动的特点。

2.1.2 六盘山断裂带

三关口 1-3 水准在 2000 年景泰 5.9 级地震后、2008 年汶川 8.0 级地震前、2013 年岷县漳 县 6.6 级地震前后均出现转折突跳、尖点突跳等异常变化,2015 年底出现快速下降异常,到 九寨沟地震前已累计下降 7.66mm,震后继续下降。安国 2-4、1-4 水准在汶川 8.0 级、岷县漳 县 6.6 级地震前近似同步地出现过显著异常变化,九寨沟 7.0 级地震前也表现出大幅振荡上 升,多次地震前断层均表现为压性转为张性的变化特点。甘沟窑 7-5 水准在 2000 年景泰 5.9 级、2003 年民乐-山丹 6.1 级地震前出现破趋势的尖点突跳异常,2016 年开始以高于以往的 速率快速拉升,加速突跳,持续至今。和尚铺 26-118 水准较好地回应了几次中强震,主要表 现为尖点突跳异常,整体表现为缓慢抬升的长趋势性异常,断层活动表现为拉张特征。六盘 山 1-4 水准在几次 5 级以上地震时均出现尖点突跳异常,2010 年以来打破以往运动趋势,表 现出类似周期性的异常特征,断层活动波动强烈。

六盘山断裂带受到青藏高原和鄂尔多斯地块的共同作用,地质背景上表现为压性运动 特征,在九寨沟地震前,长趋势上整体表现出以压性转张性为主的运动方式。造成该异常变 化的原因应是以巴颜喀拉地块的整体性运动为代表的青藏高原东北缘应力场发生变化,造 成了其与鄂尔多斯地块共同作用的六盘山断裂带发生应力调整。三关口场地所处的六盘山 次级断裂,九寨沟地震后依然表现出强烈的压性特征,应与该次级断裂的特殊性有关。六盘 山断裂带上的多数场地九寨沟地震后异常仍然未明显恢复,显示该区域的应力积累进一步 增强,九寨沟地震的发生并未缓解该断裂带的压力,应持续关注区域地震危险性。震前的异

33 卷

常变化特征包含了九寨沟地震的前兆异常,震后却未恢复,从长期来看,也可能是下一次地 震构造事件的前兆。

2.1.3 龙门山断裂带

自观测以来,宝兴 X1-B1 水准曲线表现为下降趋势,断层活动整体表现为持续挤压逆冲 特征,九寨沟地震前出现小幅加速下降,随后转折上升。2017 年以来雁门 D-E 水准打破以 往的周期性振荡下降变化,表现为波动幅度加大和突跳,这应该与九寨沟地震有关。

九寨沟地震前后,龙门山断裂带整体上异常表现相对其他构造带少,表现为继承性的逆 冲挤压运动特征。

2.1.4 鲜水河断裂带

虚墟 A-B 基线在芦山地震时出现大幅变化,2014 年以来继续振荡上升,2016 年下半年 到九寨沟地震前一直在高位异常波动。虚墟 A-B 水准整体表现出持续下降的长趋势异常, 九寨沟地震前出现 1.08mm 的上升波动,震后略有恢复。虚墟段断层活动表现为强烈的左旋 走滑特征。格篓坝子 A1-C 基线 2015 年 8 月快速拉升,断层左旋运动加快,到 2016 年初累 计上升幅度达 4.27mm,之后直到九寨沟地震前持续高值波动,震后略有恢复。格篓坝子 A-C 水准震前表现为振荡缓慢上升的长趋势异常。断层整体活动以左旋运动为主兼有拉张特 征。恰叫 1-2 基线 2008 年至今曲线周期性持续上升,周期幅度明显加大,2017 年有转折下 降迹象。老乾宁 5-3、1-3 基线在汶川地震后同步改变,趋势转为上升,芦山地震时发生大幅 异常变化,之后持续振荡上升,九寨沟地震时发生快速下降到上升的异常变化。老乾宁 5-3、 1-3 水准同步表现出持续下降的长趋势变化。断层活动整体表现为右旋压性特征。折多塘 B-D 基线持续振荡上升,九寨沟地震前快速拉升 1mm,震后又快速转折下降 1.25mm。榆林 B-C 水准 2017 年初到九寨沟地震前出现大幅上升,震后表现略有恢复,震前断层活动表现 为拉张运动。龙灯坝 A-C 基线在 2013 年芦山地震时发生大幅异常变化,之后周期性振荡上 升,抬升速率加快,持续至今。侏倭 A-B 基线表现为持续上升趋势,左旋运动明显。侏倭 A-B水准同样表现为长趋势上升变化。断层活动表现为左旋运动兼具拉张特点。

由于川滇地块与巴颜喀拉地块的差异性运动,鲜水河断裂带全新世以来以左旋走滑运 动为主,兼具挤压性质。九寨沟地震前,鲜水河断裂带表现为左旋运动加速,同时表现为拉 张特点。王敏等(2008)、刘冠中等(2013)通过对鲜水河断裂带断层活动进行地表形变监测 发现,鲜水河断裂带以北的炉霍段、道孚段的走滑量较大,表现为张性的左行走滑,与本文的 分析结果一致,而以南的康定段、石棉段走滑量小,运动形态复杂,这可能与地表的形变和深 部物质的流动相关(张培震,2008)。震后个别场地未明显恢复,与场地所处断裂带的不同段 落和次级断层的特性有关,也可能代表大区域上的构造应力在继续起作用,这种应力可能未 因九寨沟地震而立即发生转变。

对于鲜水河断裂上数据连续完整、同时有2条同桩基线和水准的场地,采用以下3个公式计算断层现今的三维活动量,即水平走滑量、水平张压量和垂直升降量

$$\Delta S = \frac{\Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \tag{1}$$

$$\Delta R = \frac{\Delta L_1 - \Delta S \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \tag{2}$$

4 期

中国地震

$$\Delta H = \frac{1}{2} (\Delta H_1 + \Delta H_2) \tag{3}$$

其中, ΔH 为水准垂直变化量(以上盘相对于下盘的下降为正); ΔL 为基线伸缩量(以伸长为 正); ΔS 为断层活动水平走滑量(两盘做顺扭运动为正); ΔR 为断层活动水平张压量; α_1 和 α_2 分别为由断层线方向逆时针转动至与2条测线方向重合或者平行时的角度。当 ΔS 为正 值时,表示右旋活动; ΔR 为正值时,表示张性活动;若两者均为负值,则表示断层活动性质相 反(薄万举等,1998)。

根据计算所得的鲜水河断裂带不同段落的三维运动参数,绘制出三维活动参数时间序列(图4)。由图4可见,水平走滑量的计算结果显示断层在观测期内为左旋活动,且累积活动量随时间呈线性增加,2013年7.0级芦山地震时发生了大幅异常变化。垂直升降量结果显示,虚墟场地线性特征明显,表现出以稳定斜率缓慢下降、断层表现出持续稳定的活动特点;老乾宁场地的垂直升降量整体变化幅度不大,断层活动表现出弱张性。水平张压量时序曲线显示,虚墟和老乾宁场地均表现出近期大幅持续拉升的态势,其中,虚墟场地在昆仑山口西8.1级地震后出现破趋势的异常,之后开始由下降转为上升,上升期间分别对2008年汶川8.0级地震和2013年芦山7.0级地震作出映震反应,芦山地震后开始大幅上升,断层活动表现为强烈拉张运动。老乾宁场地在汶川地震后出现破趋势的上升变化,在芦山地震时大幅下降之后转折大幅拉升,持续至今。跨断层场地的三维活动参数时序结果显示,鲜水河断裂在九寨沟地震前,表现出强烈的左旋走滑兼具拉张的运动特征。基于以上,小结如下。



图 4 鲜水河断裂带跨断层场地三维活动量

(1)由巴颜喀拉地块周缘以及距震中区域相对较近的跨断层流动场地原始观测曲线可见,西秦岭构造区西段、六盘山断裂带、龙门山断裂带和鲜水河断裂带的跨断层场地均不同 程度地出现了异常表现。西秦岭构造区在九寨沟地震前多表现出中短期压性运动、震后快 速恢复的活动特点,同时,多个场地震前表现出断层活动无序混乱、波动较强的复杂性。六 盘山断裂带受青藏高原和鄂尔多斯地块的共同作用,地质背景上表现为压性运动特征,在九 寨沟地震前,整体表现出以压性转张性为主的运动学方式。由震例分析可知,区域中强震前 西秦岭和六盘山地区距震中 300~400km 内,甚至更远地区,会出现跨断层异常变化。三关 口场地所跨断层在地震前后表现出持续挤压运动,可能与区域内局部应力增强有关。九寨 沟地震前,龙门山断裂带表现为明显的逆冲挤压运动特征。九寨沟地震前,鲜水河断裂带表

现为左旋运动加速,同时表现为拉张特点,尤其在芦山地震后这一特征更为明显,可见2次 7.0级地震之间存在一定相关性。巴颜喀拉地块整体性的异常运动,造成了九寨沟地震,同时也是鲜水河断裂震前震后出现异常变化的原因。

557

(2)由跨断层场地原始观测曲线和三维活动参数时序曲线可见,九寨沟地震前,巴颜喀 拉地块周缘的龙门山断裂带和鲜水河断裂带均出现异常变化,因此,九寨沟地震与巴颜喀拉 地块整体性 SE 向旋转运动相关。通过鲜水河断裂带北西段表现为强烈左旋运动以及阿尔 金断裂带和东昆仑断裂带的左旋运动可知,应力可能随着汶川地震、芦山地震、玉树地震、于 田地震、昆仑山口西地震转移到了块体东北部的东昆仑断裂带东端区域,且受到 NE 向的以 逆冲挤压运动为主的龙门山断裂带的阻挡影响,应力在该区域不断集中积累,孕震环境形 成。同时,应力沿着巴颜喀拉地块边界断裂顺时针运移,鲜水河断裂带南东段表现出了明显 的拉张伸展的运动方式。受包括巴颜喀拉地块在内的高原内部构造应力变化的影响,青藏 高原东北缘也存在应力调整,这直接影响到了西秦岭构造区和六盘山断裂带的运动学方式。

2.2 大面积水准数据

2 期一等水准资料预处理后,对其进行平差数据处理。主要采用分段动态线性速率模型,平差计算得到该时间段内的地壳垂直形变速率,选取稳定的基岩水准测点作为基准,平差结果显示,单位权中误差小于 1.0mm,效果较好。平差后对结果进行预处理,删除个别量级过大或与相邻点差异过大的突变点。采用多面函数法对结果进行格网化,并计算每个格网点的梯度模值,绘制垂直形变速率等值线图与梯度图(孙启凯等,2017)。

由计算得出的研究区域垂直运动速率结果可知,区域内存在2处明显地壳形变表现为 隆升的区域,其中,北部的甘东南地区隆升速率大于西部的巴颜喀拉地块东部地区,四川盆 地整体表现出相对稳定的下沉特征,九寨沟地震震中区域地壳形变不明显(图5)。

(1)巴颜喀拉地块东部地区存在大范围差异性隆升表现。康定附近鲜水河断裂带和龙 门山断裂带交汇周缘的地壳垂直隆升速率为2~4mm/a,与王敏(2009)给出的1.8~3.6mm/a 的结果基本一致;马尔康到红原附近区域隆升速率为2~4mm/a,并分别在这2处区域形成 形变梯度带,而其他地区为1~2mm/a。来自印度板块向北持续强有力的推挤作用,造成青 藏高原部分物质向东运移,遇到 NE 向横亘的龙门山断裂带的阻挡,巴颜喀拉地块东部物质 不断积累,造成了地壳隆升,同时,地块内部构造的差异性和不均衡性,造成了隆升速率的差 异。鲜水河断裂带与龙门山断裂带交汇区周围,高原内部物质遇到相对稳定的四川盆地阻 挡后,随着巴颜喀拉地块 SE 向顺时针旋转流动至该区域集聚,造成隆升。

(2) 青藏高原东北部的甘东南地区表现为隆升特征。在舟曲到宕昌附近存在 2~4mm/a 的地壳垂直隆升,与地质背景一致。高原物质向多个方向流动,其中,NE 向的物质运移至该 区域受到深大断裂和刚硬体的拦阻,导致累积隆升。

(3)四川盆地表现为相对稳定的下沉特征。整体来看,区域沉降速率并不太显著,为 0~-1mm/a,成都附近稍高的沉降速率可能与城市过多抽取地下水有关。总体特征与地质 背景一致,盆地处于扬子板块中表现稳定刚硬的古陆核上,相对于逆冲其上的巴颜喀拉地块 东部,其表现为下沉特点。

(4)九寨沟地震震中区附近表现为相对稳定的弱应变特征。九寨沟到松潘附近的形变 速率为0~1mm/a,地壳形变积累不显著。GPS结果也显示,该区域附近存在弱地壳形变,九

4 期



图 5 研究区垂直形变速率等值线图与梯度图

寨沟地震前该区域存在一定程度的地壳形变闭锁,可能是地震前的先兆特征。

3 讨论

太平洋板块相对于亚欧板块的 NW 向俯冲与印度板块北向俯冲推挤亚欧板块所形成的 大规模的左旋走滑作用,是区域整体的地球动力学背景。作为活动块体边界的断裂带,由于 其切割地壳深度大,块体相互之间差异运动强烈而非连续性更强,更有利于应力的高强度积 累而孕育大地震,进而导致绝大部分的强震活动都发生在活动块体区,尤其是块体边界带上 (Nur et al,1989;张国民等,2000;张培震等,2003)。通过对巴颜喀拉块体东部及邻区主要 7 级以上强震的发震断裂进行统计发现,这些强震主要集中在区内一些大型块体的边界活动 断裂带上,如东昆仑、龙门山、鲜水河等深大断裂带。

九寨沟地震前,大面积水准和 GNSS 观测资料均显示,巴颜喀拉地块东北部震中区域处 于地壳形变闭锁区,应力和能量在该区域深部持续积累,为地震的孕育发生提供了有利环 境。通过跨断层观测资料可知,鲜水河断裂带整体上表现出左旋运动加速、张性运动明显的 特征,其中,鲜水河断裂带南东段出现的以张性运动为主、剪切活动较弱的特征,是由于阶列 式分段的鲜水河断裂在走滑作用下造成了走滑系的尾端或者阶区的伸展运动所致。龙门山 断裂带表现出以压性为主的运动学特征,加之阿尔金、东昆仑断裂带的左旋运动,可见九寨 沟地震前,巴颜喀拉地块在周缘巨型走滑断裂带的作用下,整体出现了顺时针加速旋转的运

СМҮК

33 卷

动特征。GPS速度场结果和地质学研究表明,巴颜喀拉地块北东地区与高原东部均具有顺时针向SE方向旋转的特征(武艳强等,2013;杨国华等,2015;许志琴等,2016),并伴有运动 增强的特点(熊维等,2015;姚鑫等,2017)。九寨沟地震前震中区地壳形变并不显著,而在距 震中区较远的区域,存在地壳形变异常特征,与汶川地震、芦山地震前的地壳形变特征类似 (徐东卓等,2017)。同时,远场构造带上的场地震后恢复程度不等,这与场地所处的地块属 性、构造体系和断裂带的不同段落特性等有关。震后未恢复,可能代表大区域的构造应力在 继续起作用,这种大区域的大规模应力也可能不会由于此次九寨沟 7.0 级地震立即发生转 变。如芦山地震后,龙门山断裂带南段区域依然存在高应力积累。因不同的动力学环境、构 造体系和微板块属性等,西秦岭、六盘山、龙门山和鲜水河构造带上的场地在九寨沟地震前 后出现了不同的反应,甚至同一构造带上的场地也会由于断裂分段的复杂性而表现出了不 同程度的变化特征。

中强地震前,多数情况下区域地壳会出现形变异常,同时,同一板块周缘的多个强震之 间会存在某种联系。2000年以后,巴颜喀拉地块周缘边界断裂带上少见的强震多发的特点, 揭示着该地块进入了构造活动强烈期以及中强震多发幕期。随着汶川 8.0 级地震等多次中 强震的发生,巴颜喀拉地块东边界龙门山断裂带与北边界东昆仑断裂带交汇的地块东北区 域成为了中强震缺少区,应力可能随着汶川地震、芦山地震、玉树地震、于田地震、昆仑山口 西地震转移到了块体东北部的东昆仑断裂带东端区域,且受到 NE 向的以逆冲挤压运动为 主的龙门山断裂带拦截影响,不断在该区域积累,孕震环境形成。Wen 等(2007)从地震空区 角度分析也认为,作为巴颜喀拉地块北东边界的东昆仑断裂带东段是地震空区之一,地震危 险性较高。从构造地质和岩石圈层理论研究来看,具有粘弹性的下地壳和上地幔弛豫作用 可能会使得相距较远的2次或者多次地震之间建立关联性。中长期时间尺度上,大震会造 成同一板块深部塑性流动的壳幔物质发生调整运移,向应力易集聚区域集中,这会对相距较 远的断裂活动产生作用,包括汶川地震、芦山地震在内的多次强震,对九寨沟地震均产生了 一定的促震作用。由震源破裂特征可见,巴颜喀拉地块南北边界断裂带上的地震多以走滑 运动为主,东边界的汶川地震则表现为强烈的逆冲特征为主,西边界阿尔金断裂带的于田地 震则表现出一定的拉张性质。因此,从动力学环境来看,这些强震均为巴颜喀拉地块整体性 运动的产物,伴随着地块的整体性东向活动,先后产生了一系列强震,并且强震之间存在一 定的关联。区域性大地震的发生,可引起同一动力学机制下相同板块周缘边界断裂带的应 力调整。据以往震例研究,六盘山、西秦岭构造区附近出现大量尖点、突跳型跨断层场地异 常,在青藏高原北缘断裂带,往往具备发生中强震的可能,并且中强震前西秦岭、六盘山地区 距震中 300~400km 内,甚至更远地区,会出现大量跨断层异常变化(王双绪等,2012;张希 等,2014;Xu et al,2016)。

青藏高原物质持续地向东流动,遇到了刚硬的四川盆地阻挡,随后沿着龙门山断裂带分 别向 NE 和 SW 运移集聚,NE 方向的应力积累导致了九寨沟地震的发生,SW 方向上龙门山 断裂带的南端与鲜水河-安宁河断裂带交汇的"三岔口"区域,并未因汶川地震、芦山地震的 发生而使得区域地壳解锁和能量释放,而是随着包括九寨沟地震在内的强震的发生,该区域 库仑应力可能进一步累积,依然存在中强震危险。在地震预测研究中,利用大面积水准资料 得出的地壳形变梯度带来分析7级以上强震发震地点具有一定准确性(张祖胜等,1996)。

CMYK

4 期

通过震例分析发现,强震基本上都发生在区域形变速率图和梯度图上所显示的形变曲线密 集、形变梯度较高的地区。"三岔口"区域存在地壳垂直形变高梯度带,对未来7级以上地震 有重要指示意义。同时,区域 GPS 速度场结果显示,龙门山断裂带南段并未因汶川地震、芦 山地震的发生而大范围解锁,依然保持远场加载、近场锁定状态(Wu et al, 2013)。

33 卷

结论 4

基于九寨沟 7.0 级地震前后震中区周缘以及巴颜喀拉地块周缘的跨断层观测资料、大面 积水准测量资料、地震活动性资料以及其他研究结果等,综合分析了地震前后的区域地壳形 变以及巴颜喀拉地块整体性运动与地震间的关系。

(1) 九寨沟地震前后, 远场的西秦岭构造区、六盘山断裂带、龙门山断裂带和鲜水河断裂 带上的跨断层流动场地均出现不同程度的异常变化,震中区域地壳形变不显著。西秦岭构 造区在九寨沟地震前多表现出中短期压性运动和异常波动特征,震后异常快速恢复。六盘 山断裂带在九寨沟地震前的一段时期,整体表现出以压性转张性为主的运动学方式。九寨 沟震前,龙门山断裂带表现为继承性的明显逆冲挤压运动特征;鲜水河断裂带表现为左旋运 动加速、同时表现出拉张活动特点。

(2)由巴颜喀拉地块周缘的断层异常活动和地震活动性分析可知,巴颜喀拉地块整体性 的 SE 向顺时针加速运动,加快了地块东北部九寨沟震中区域的应力积累,孕育了此次地震, 同时,包括芦山地震在内的几次强震对九寨沟地震有一定的促震作用。

(3)九寨沟地震后,区域应力积累得到一定程度的释放,具备相同动力学背景的"三岔 口"区域应力可能会加速积累。

致谢: 感谢两位审稿专家和编辑老师的辛苦审阅,薄万举研究员给予了有益的建议,部分图件使用 GMT 软件(Wessel et al, 1995) 绘制, 一并表示感谢。

参考文献

薄万举、谢觉民、郭良迁,1998,八宝山断裂带形变分析与探讨,地震,18(1),63~68。

陈长云、任金卫、孟国杰等,2013,巴颜喀拉块体东部活动活体的划分、形变特征及构造意义,地球物理学报,56(12), $4125 \sim 4141$

程佳、刘杰、甘卫军等,2011,1997年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究,地球物理学报,54(8),1997~ 2010

刘冠中、马瑾、张鸿旭等,2013,二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征,地球物理学报,56(3),878~ 891

沈正康、万永革、甘卫军等,2003,东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究,地球物理学报,46(6),786~795。 孙启凯、池国民、徐东卓,2017,首都圈地区地壳垂直形变特征及剖面分析,大地测量与地球动力学,37(5),497~501。 万永革、沈正康、曾跃华等,2007,青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响,地震学报,29(2),115~129。 汪建军、许才军,2009,玛尼 M7.6 地震和可可西里 M7.8 地震应力迁移研究,大地测量与地球动力学,29(1),11~14。 王敏,2009,GPS观测结果的精化分析与中国大陆现今地壳形变场研究,博士学位论文,北京:中国地震局地质研究所。 王敏、沈正康、甘卫军等,2008,GPS连续监测鲜水河断裂形变场动态演化,中国科学:D辑,38(5),575~581。 王双绪、张希、祝意青等,2012,南北地震带北段强震形变异常特征与预测指标研究,西北地震学报,34(2),105~113。 武艳强、江在森、王敏等,2013,GPS 监测的芦山7.0级地震前应变积累及同震位移场初步结果,科学通报,58(20),1910~ 1916

熊维、谭凯、乔学军等,2015,汶川震后龙门山周边活动地块构造变形及断裂活动,大地测量与地球动力学,35(5),758~763。

561

- 徐东卓、焦守涛、朱传宝等,2017,芦山 M_s7.0 地震前龙门山断裂带西南段区域形变特征分析及发震模型探讨,地质学报, 91(10),2175~2184。
- 许志琴、王勤、李忠海等,2016,印度-亚洲碰撞:从挤压到走滑的构造转换,地质学报,90(1),1~23。
- 杨国华、朱爽、梁洪宝等,2015,芦山 M_s7.0 地震震前及同震地表形变,武汉大学学报(信息科学版),40(1),121~127。
- 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。
- 张国民、张培震,2000,"大陆强震机理与预测"中期学术进展,中国基础科学,(10),4~10。

张培震,2008,青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配及深部动力过程,中国科学:D辑,38(9),1041~1056。 张培震、邓起东、张国民等,2003,中国大陆的强震活动与活动地块,中国科学:D辑,33(增刊),12~20。

张希、李心然、唐洪涛,2014,青藏块体东北缘断层形变综合指标异常与岷县漳县 6.6 级等强震关系,地震研究,37(4), 572~577。

张祖胜、杨国华、薄万举等,1996,地壳垂直形变速率梯度、断层形变速率变化与强震危险区研究,中国地震,12(4),347~ 357。

中国国家标准化管理委员会,2006,国家一、二等水准测量规范,北京:中国标准出版社。

Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al ,2008, A geological and geophysical contex for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China, GSA Today, 18(7), 4~11.

Luo G, Liu M, 2010, Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 Great Wenchuan earthquake, Tectonophysics, **149**, 127~140.

Nur A, Ron H, Scotti O, 1989, Kinematics and mechanics of tectonic block rotations, Geophysical Monograph, 49/IUGG Series 4, 31~46.

Wen X Z, Yi G X, Xu X W, 2007, Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the $M_{\rm s}8.1, 2001$, Kokoxili earthquake, China, Journal of Asian Earth Sciences, **30**, 63 ~ 72.

Wessel P, Smith W H F, 1995, New version of the generic mapping tools, EOS Trans AGU, 76(33), 329.

Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al, 2013, Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan M_S7.0 earthquake, as reflected by GPS surveying, Chin Sci Bull, **58**, 3460~3466.

Xu D Z, Zhu C B, Meng X G, et al, 2016, Analysis of fault activity characteristics in the northern margin of Tibetan Plateau before Qinghai Menyuan $M_{\rm s}6.4$ earthquake, Geodesy and Geodynamics, 7(4), 261 ~ 267.

Zhang X D, Yang G H, Lu X, et a1, 2009, Relation between the characteristics of strong earthquake activities in Chinese mainland and the Wenchuan earthquake, Earthq Sci, 22(5), 505~518.

MYK

Temporal and spatial evolution characteristics of crustal deformation before and after the Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake and discussion on related problems

Xu Dongzhuo¹⁾ Yin Haiquan¹⁾ Zhu Chuanbao²⁾ Sun Feifei²⁾
1) The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China
2) Institute of Geology and Mineral Exploration of Qinghai Province, Xining 810029, China

Abstract Based on cross-fault observation data, large area leveling data and seismic activity data of the periphery of epicenter area and Bayanhar block around the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake, and 3D fault activity parameters and leveling adjustment calculation method, we analysed comprehensively regional crustal deformation before and after earthquake and the relationship between the Bayanhar block integrity movement and earthquake. The conclusions are as follow: (1) Before the Jiuzhaigou earthquake, there were abnormal changes in varying degrees in the west Qinling Mountain fault zone, the Liupan Mountain Fault zone, the Longmen Mountain Fault zone and the Xianshuihe fault zone, and the deformation in the epicentral region was not significant. (2) Through the analysis of the fault activity and seismicity anomalies around the Bayanhar block, the block SE clockwise accelerated motion caused the stress accumulation of epicentral region, and then the earthquake occurred. At the same time, several strong earthquakes including Lushan earthquake has a certain accelerating effect on the Jiuzhaigou earthquake; (3) After the Jiuzhaigou earthquake including Lushan earthquake, the regional stress accumulation has been released to some extent, and the stress may accelerate accumulation in the "three road" area.

Key words: Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake; Cross-fault observation; Large-area leveling; Crustal deformation analysis