

薛艳, 张小涛, 晏锐, 等, 2022. 2022 年四川泸定  $M_s 6.8$  地震前地震活动与地球物理观测异常回顾与讨论. 中国地震, 38(4): 601~612.

# 2022 年四川泸定 $M_s 6.8$ 地震前地震活动 与地球物理观测异常回顾与讨论

薛艳 张小涛 晏锐 刘杰 苑争一 吴永加 田雷 宋治平

中国地震台网中心, 北京 100045

**摘要** 2022 年 9 月 5 日四川泸定  $M_s 6.8$  地震发生在 2022 年度全国地震重点危险区内, 且震前作了较好的短期预测。本文回顾了中期(年度)和短期阶段地震活动和地球物理观测异常。①2022 年度危险区确定的核心依据有川滇藏交界 4 级地震空区、危险区附近  $M_L \geq 3.5$  地震空区、跨断层形变趋势异常和重力场异常等, 其中, 川滇藏交界 4 级地震空区被 2022 年 1 月 2 日云南宁蒗  $M_s 5.5$  地震打破具有中短期预测意义。②短期阶段, 川滇藏交界 4 级地震空区经历了“打破—增强—平静”的演化过程, 与 1973 年四川炉霍  $M_s 7.6$  地震前高度相似, 这可能与其发震构造相同、震源机制解一致和深部孕震环境相似有关。此外, 还存在川滇地区震群和多个余震区准同步活动、巴塘显著震群等异常。地球物理观测方面, 在 2022 年 6 月 1 日芦山  $M_s 6.1$  和 6 月 10 日马尔康  $M_s 6.0$  地震后, 四川前兆异常无明显减少, 而在 7—8 月显著增多, 这可以作为强震后短期仍有可能再次发生强震的判定依据。新增异常主要分布在以三岔口(鲜水河断裂带、安宁河断裂带和龙门山断裂带交汇区, 呈“Y”字形分布)为中心的 300km 范围内, 这是震前短期地点预测的主要依据之一。③6.8 级地震前形变中短期大幅度异常突出, 且异常点均位于远场(距离 6.8 级地震震中 130~300km 范围内)。除礼州测距外, 其余异常点均位于  $M_L 3.5$  地震空区外围。形变异常出现的时间与  $M_L 3.5$  地震空区打破后空区内部及边缘地震活动显著增强大体一致。④泸定 6.8 级地震发生在三岔口地区, 该区及附近 2015—2021 年连续多年被确定为全国地震重点危险区, 但均未发生预测地震, 由此表明当前有效的强震年度(中期)时间预测依据少。

**关键词:** 2022 年泸定 6.8 级地震 4 级地震空区 形变大幅度异常 短期前兆异常

[文章编号] 1001-4683(2022)04-0601-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

据中国地震台网中心测定, 2022 年 9 月 5 日四川泸定发生  $M_s 6.8$  地震( $29.59^\circ N$ ,  $102.08^\circ E$ ), 震源深度 16km。本次地震发生在 2022 年度全国地震重点危险区内<sup>①</sup>, 且震前作了较好的短期预测。本文将回顾 6.8 级地震前中期(年度)和短期阶段地震活动和地球物理

[收稿日期] 2022-09-27 [修定日期] 2022-12-10

[项目类别] 国家重点研发计划(2021YFC3000705-06)、震情跟踪项目(2022020502)共同资助

[作者简介] 薛艳, 女, 1969 年生, 正高级工程师, 主要从事地震预测研究。E-mail: xueyan5619@seis.ac.cn

① 全国地震趋势和重点危险区汇总组, 2021 年, 2022 年度全国地震趋势和重点危险区预测研究报告。

观测异常,总结经验教训,为地震预测积累震例。

本文主要使用中国历史地震目录(闵子群等,1995;汪素云等,1999)、中国地震台网速报目录(震级标度为 $M_s$ )与中国地震台网中心整编的统一正式目录(震级标度为 $M_L$ )。

## 1 构造背景与历史地震

泸定 $M_s$ 6.8地震发生在NW走向的鲜水河断裂带南端,震源机制解反演结果为走滑型(Yang et al,2022),即本次地震是鲜水河断裂带摩西段左旋走滑错动的结果。鲜水河断裂带为川滇活动地块东北边界带,其沿 $N45^\circ W$ 走向的水平滑动速率约 $13\text{mm/a}$ (张培震等,2003),由于运动强烈,历史地震活动频繁,有记录以来共发生 $6\frac{3}{4}$ 级以上地震15次,1725年以来共出现4个活跃时段和4个平静时段,本次泸定 $M_s$ 6.8地震的发生打破了自1981年四川道孚6.9级地震后长达41.6年的平静,开始了一个新的活跃时段(图1)。

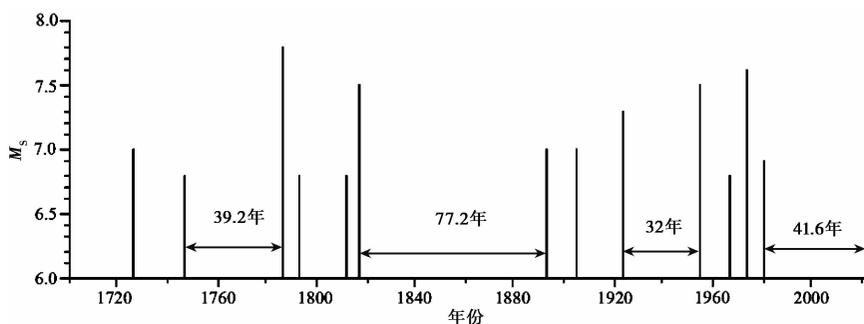


图1 鲜水河断裂带 $M_s \geq 6\frac{3}{4}$ 地震活动 $M-t$ 图

从历史地震震源区分布可见,本次泸定地震发生在1786年康定南 $7\frac{3}{4}$ 级地震破裂区内部,由于是单侧破裂(Yang et al,2022),本次地震仅破裂了1786年地震破裂区的中南段,其北段以及1904年道孚7.0级与2014年康定6.3级地震之间仍是未来强震发生的潜在危险区(图2)。

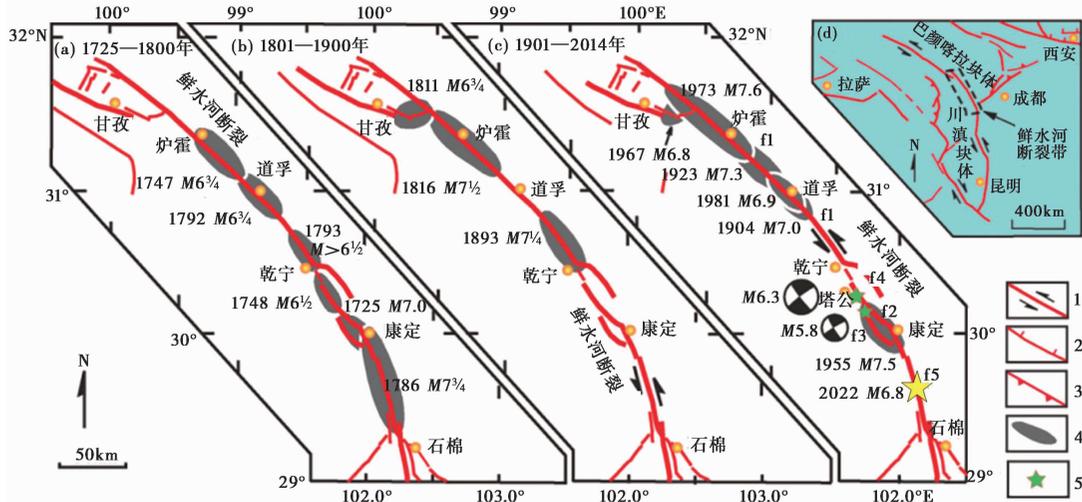
## 2 年度危险区核心判定依据

### 2.1 地震活动性异常

2019年2月以来川滇藏交界附近形成4级地震空区,至2021年11月已经达到1970年以来最长平静时间。据统计,超过500天的平静共出现6次,其中前5次中虚报1次,其余4次均在空区内部及边缘发生了 $M_s \geq 6.7$ 地震。其中,1996年云南丽江7.0级地震为直接打破平静的地震,1973年四川炉霍7.6级、1989年四川巴塘6.7级和2010年青海玉树7.1级地震分别发生在空区打破后的10个月、15个月和4个月(图3)。

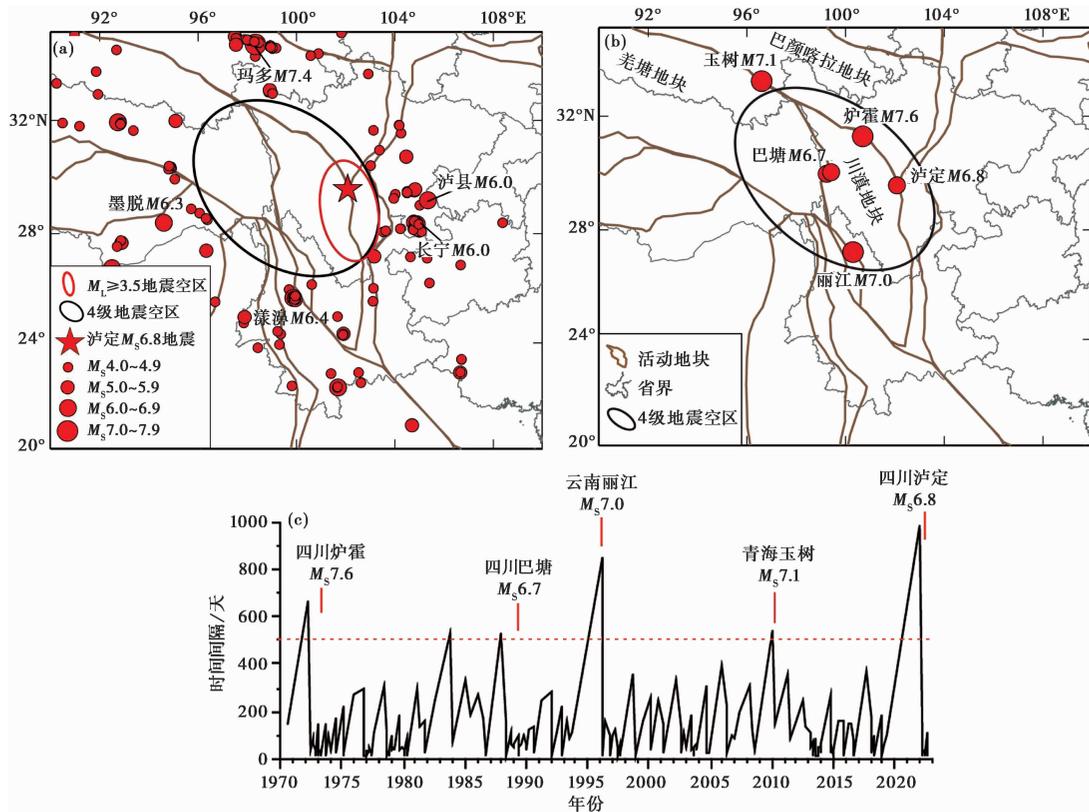
在空区持续期间,空区边缘发生了多次 $M_s \geq 6.0$ 地震,分别为2019年西藏墨脱6.3级、四川长宁6.0级、2021年西藏比如6.1级、云南漾濞6.4级、青海玛多7.4级和四川泸县6.0级地震(图3(a)),表现出显著的外部活跃、内部平静的特点,这与1976年四川炉霍7.6级和1996年云南丽江7.0级地震前类似。

此外,2019年11月1日至2021年6月24日危险区附近形成 $M_L \geq 3.5$ 地震空区



注: 1-走滑断层, 2-正断层, 3-逆断层, 4-历史地震破裂区, 5-2014年康定 6.3 级、5.8 级地震震中; f1-鲜水河断裂, f2-色拉哈断裂, f3-折多塘断裂, f4-雅拉河断裂, f5-摩西断裂; 黄色五角星为本次泸定  $M_s 6.8$  地震; 据易桂喜等(2015)改编。

图2 鲜水河断裂带  $M_s \geq 6.5$  地震破裂区分布



注: (a)川滇及附近地区  $M_s \geq 4.0$  地震分布(2019年2月3日—2021年12月31日); (b)4级地震空区与对应的6.7级以上地震分布; (c)空区内部(图3(a)中黑色椭圆形区域)  $M_s \geq 4.0$  地震时间间隔与平静超过500天后对应的空区内部及边缘6.7级以上地震。

图3 川滇藏交界4级地震空区异常



1973年2月6日四川炉霍  $M_s 7.6$  地震前类似(图5)。炉霍地震前4级地震空区被1972年4月8日康定  $M_s 5.2$  地震打破,随后空区东部边缘的鲜水河—安宁河断裂带上先后发生5月7日西昌  $M_s 4.8$  地震、9月27日至9月30日康定  $M_s 5.7$  震群(9月27日  $M_s 5.6$ 、9月30日  $M_s 5.6$  和  $M_s 5.7$  地震,图5(b))。康定震群发生后,四川及周边大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静4个月,直至发生炉霍  $M_s 7.6$  地震。康定  $M_s 5.7$  震群后至炉霍  $M_s 7.6$  地震前,青藏地块内仅发生1次5级以上地震,为1972年12月31日位于羌塘地块的西藏沙里  $M_s 5.2$  地震(图6(a)、6(b))。2022年6月10日马尔康  $M_s 6.0$  震群后,四川及邻区大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静2.8个月发生泸定  $M_s 6.8$  地震,期间于8月14日在羌塘地块的青海杂多发生  $M_s 5.9$  地震(图6(c)、6(d))。泸定  $M_s 6.8$  地震与1973年炉霍  $M_s 7.6$  地震前,地震活动演化过程非常相似,即4级空区打破后出现增强活动,增强后期发生强震群,强震群后四川及周边大范围  $M_L \geq 4.0$  地震平静直至强震发生。

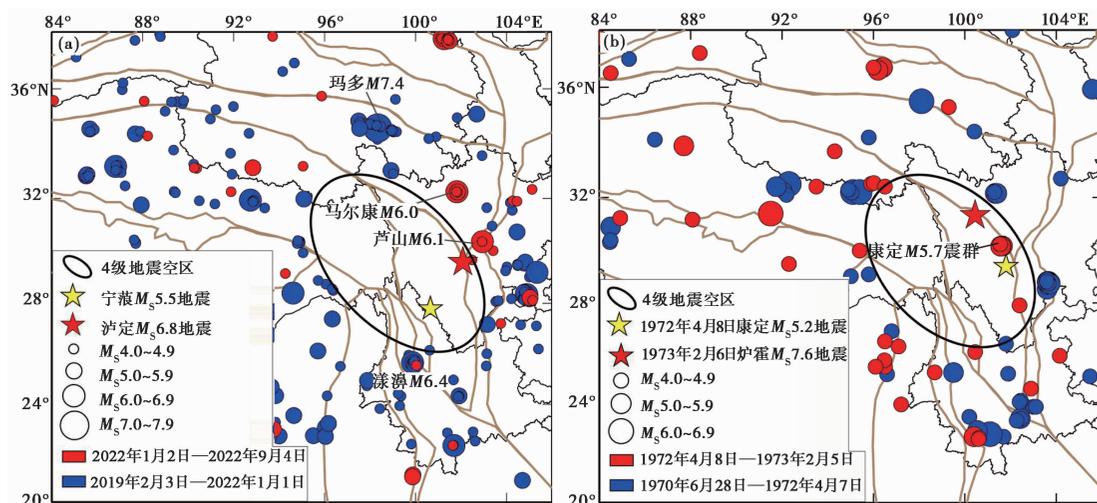
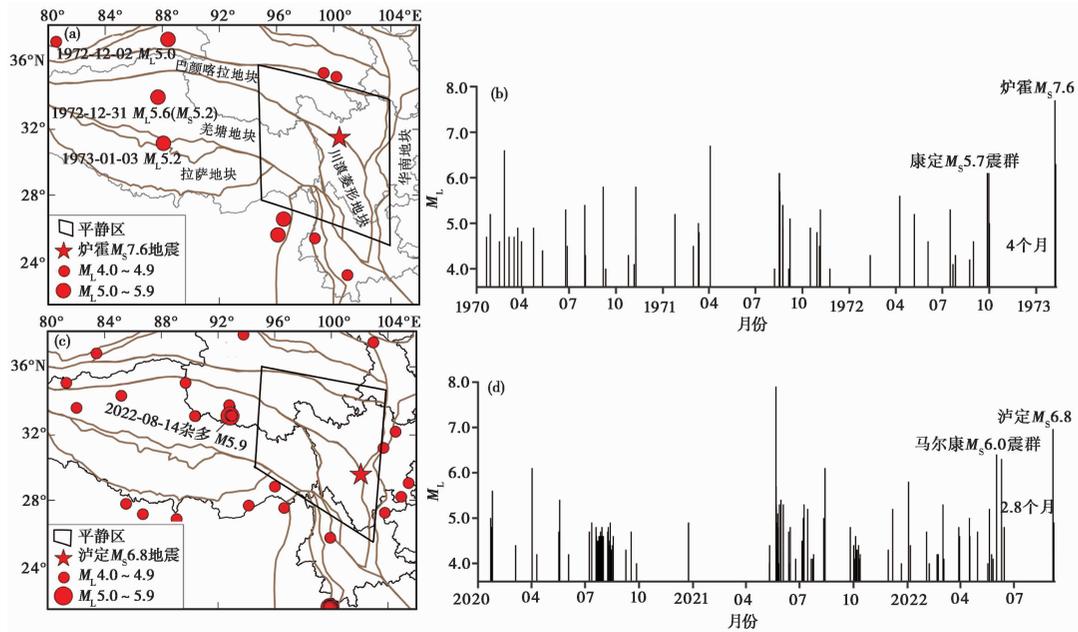


图5 2022年泸定  $M_s 6.8$  地震前(a)与1973年炉霍  $M_s 7.6$  地震前(b)川滇藏交界4级地震空区演化图像

### 3.1.2 川滇地区震群与多个余震区准同步活动

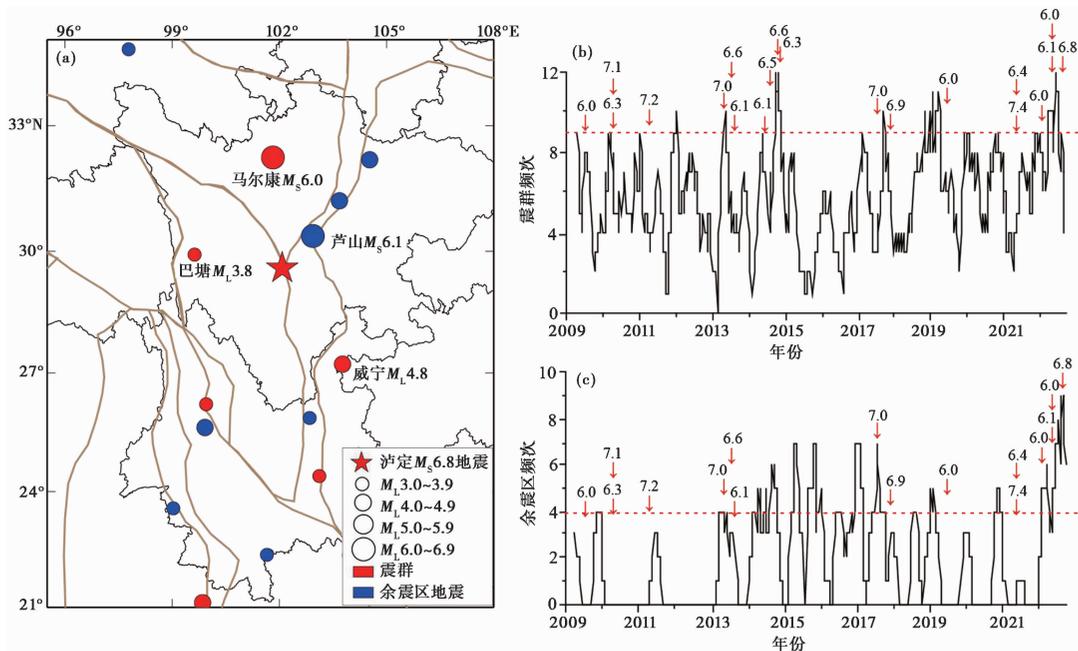
震群和余震区活动是区域应力场增强的表现,对强震的发生具有预测意义(Kanamori, 1972; 张国民等, 1985; Evison et al, 2000; 宋俊高等, 1989; 薛艳等, 1999)。川滇地区( $21^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $97^{\circ}\text{E} \sim 107^{\circ}\text{E}$ )  $M_L \geq 3.0$  震群频次对该区  $M_s \geq 6.0$  地震具有短期预测意义,预测时间3个月,预测效能 $R=0.45$ 、 $R_0=0.24$ (许绍燮, 1989)。

川滇藏交界4级地震空区被2022年1月2日云南宁蒗  $M_s 5.5$  地震打破后,川滇地区多个余震区相继出现显著地震活动,包括1996年云南丽江  $M_s 7.0$ 、2007年云南普洱  $M_s 6.4$ 、2008年四川汶川  $M_s 8.0$ 、2021年云南漾濞  $M_s 6.4$  地震等余震区。余震区活动频次在2022年1月下旬开始出现高值异常(图7(c))。震群频次在2022年4月5日达到异常阈值(图7(b)),在震群和余震区活动频次均处于异常状态背景上发生了2022年6月1日芦山  $M_s 6.1$ 、6月10日马尔康  $M_s 6.0$  震群(图7)。值得注意的是,芦山  $M_s 6.1$  地震发生在2013年4月20日芦山  $M_s 7.0$  地震余震区内。



注: (a) 炉霍地震前(1972年10月1日—1973年2月5日)  $M_L \geq 4.0$  地震分布; (b) 炉霍地震平静区内4级以上地震  $M-t$  图; (c) 泸定地震前(2022年6月15日—2022年9月4日)  $M_L \geq 4.0$  地震分布; (d) 泸定地震前平静区内4级以上地震  $M-t$  图。

图6 1973年炉霍  $M_S 7.6$  和2022年泸定  $M_S 6.8$  地震前  $M_L \geq 4.0$  地震平静异常



注: (a) 2022年6月1日—9月4日泸定地震前; (b)、(c) 窗长90天、滑动窗长7天, 红色箭头标注川滇地区  $M_S \geq 6.0$  地震。

图7 川滇地区  $M_L \geq 3.0$  震群与余震区  $M_L \geq 3.5$  地震空间分布(a)、震群(b)与余震区(c)频度曲线

芦山  $M_s6.1$  和马尔康  $M_s6.0$  地震后,川滇地区震群和余震区活动仍持续,至泸定  $M_s6.8$  地震前共发生 4 次震群,最大为 6 月 20 日贵州威宁  $M_L4.8$  震群。余震区活动更为突出,7—8 月先后有 6 个余震区发生显著地震,主要有 1976 年四川松潘—平武  $M_s7.2$ 、1985 年云南禄劝  $M_s6.2$ 、2008 年四川汶川  $M_s8.0$ 、2021 年青海玛多  $M_s7.4$  和 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震等余震区(图 7(a))。震群频次在 2022 年 8 月 19 日再次达到异常阈值(图 7(b)),余震区频次达到 2009 年以来的最高值(图 7(c))。

### 3.1.3 川西显著震群

2022 年 7 月 27 日以来理塘出现显著震群活动,至泸定地震前共发生  $M_L \geq 1.0$  地震 275 次,其中 1 级地震 172 次,2 级地震 96 次,3 级地震 7 次,最大为 8 月 28 日  $M_L3.8$  地震(图 7(a)),1 级以上地震日频次最高为 41 次。川西弱震区 2020 年以来共发生 3 次显著震群,分别为 2021 年 5 月 21 日漾濞 6.4 级和 5 月 22 日玛多 7.4 级地震前 1 个月(2021 年 4 月 21 日)的白玉  $M_L3.4$  震群以及 2022 年芦山 6.1 级和马尔康 6.0 级地震前 2.5 个月(2022 年 3 月 15 日)的理塘  $M_L3.3$  震群(2 次理塘震群相距约 50km)。这 3 个震群均具有爆发性(即地震日频次高)和高  $b$  值的特点,表明震群原地应力水平不高,反映了区域应力场增强,对周边区域发生强震有短期指示意义。

## 3.2 地球物理观测异常

2022 年 6 月四川连续发生 2 次 6 级地震后,仅取消了布拖测点  $CO_2$  异常(图 4 中黑色五角星)。7 月四川及附近地区新增异常 7 项,分别为冕宁地电阻率 NS、EW、NW 测道、云南元谋和祥云地电场优势方位角、中江 GNSS、马尔康丹波村  $CO_2$ ; 8 月新增甘孜地电阻率 NE 测道、乡城垂直摆倾斜 EW、NS 向、玉树垂直摆倾斜 NS 向和玉树水温异常。这些新增异常主要分布在甘孜—玉树断裂(玉树测点)、鲜水河断裂(甘孜测点)、安宁河断裂(冕宁测点)及其东西两侧(图 8(a)中的椭圆形区域)。由趋势和短期异常分布(图 8(b))可以看出,泸定地震前短期异常集中分布在震中 350km 范围内(图 8(b)中的圆形区域),主要沿鲜水河断裂带、安宁河断裂带和龙门山断裂带分布。其中地电阻率短期异常突出,包括冕宁、甘孜和江油地电阻率。形变短期异常主要有礼州测距(即基线)、水富垂直摆倾斜、中江 GNSS 和乡城垂直摆倾斜等。另外,8 月 26 日四川省地震局提出川滇活动地块热红外短期异常(张铁宝等,2021)。

## 3.3 宏观异常

四川地区以往宏观异常较少,根据宏观异常报告,2019 年共出现 3 项宏观异常,2020 年出现 2 项,2021 年出现 2 项,而 2022 年 1—8 月共出现 5 项宏观异常。在 2022 年 6 月 1 日芦山  $M_s6.1$  和 6 月 10 日马尔康  $M_s6.0$  地震前共存在 4 项宏观异常,其中 5 月新增泸定川 63 泉水位下降,其余 3 项持续异常分别出现在 2020 年 12 月、2022 年 2 月和 3 月。芦山  $M_s6.1$  和马尔康  $M_s6.0$  地震后,乡城 52 中泉水发浑与巴塘 305K 温泉冒泡因异常消失而取消。2022 年 8 月新增 2 项异常,分别为巴塘 305K 温泉冒泡和乡城川 52 中泉水位下降,同时还存在 2 项持续异常,为 2022 年 5 月出现的泸定川 63 泉和 2022 年 2 月出现的会东小岔河温泉水位下降,其中泸定宏观异常距  $M_s6.8$  地震震中仅约 6km(图 9(b))。即泸定  $M_s6.8$  地震前四川共存在 4 项宏观异常,与 6 月 2 次 6 级地震前存在的异常数量相当。

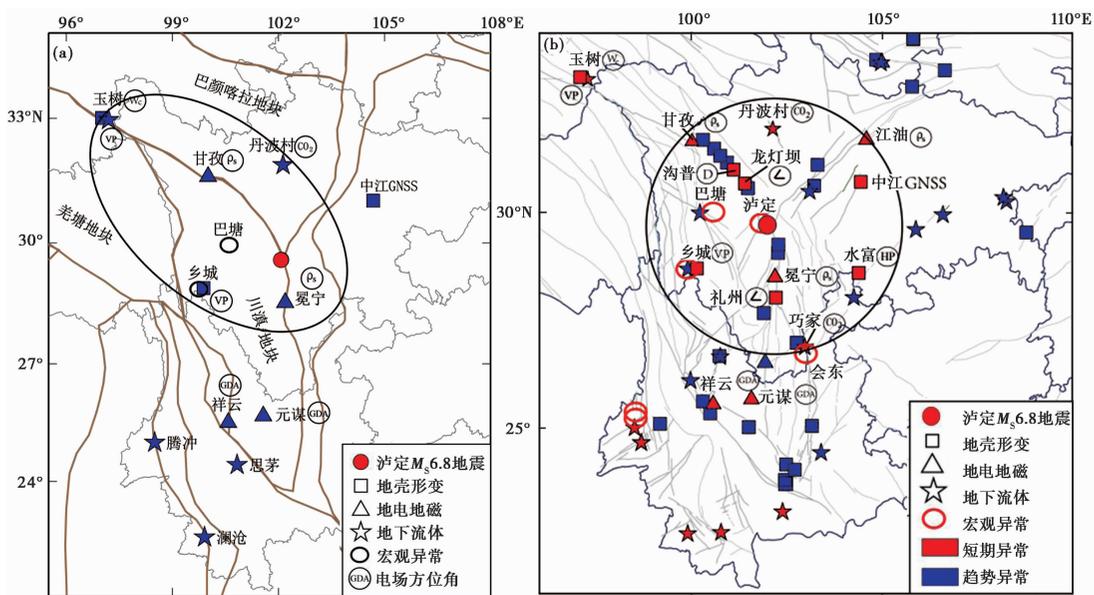
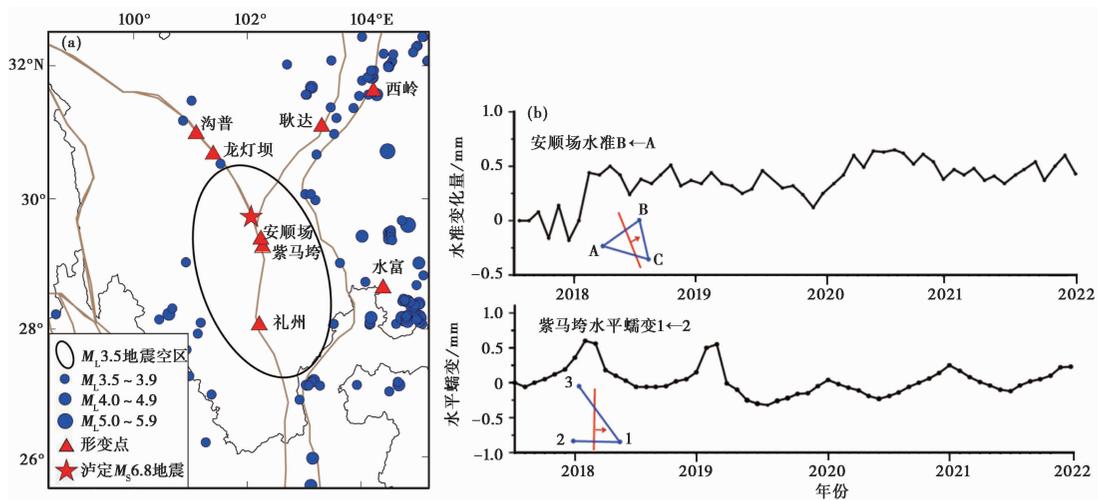


图8 2022年7—8月新增异常(a)与泸定地震前趋势和短期(b)异常空间分布



注:时间为2019年11月1日—2021年6月24日。

图9 四川及附近  $M_L \geq 3.5$  地震与形变异常点分布(a)以及近场跨断层形变曲线(b)

#### 4 地震活动与形变异常综合分析

泸定  $M_s$  6.8 地震前,形变中短期异常突出,且异常幅度大。具体包括鲜水河断裂带上的沟普水平蠕变、龙灯坝测距,安宁河断裂南端的礼州测距,龙门山断裂带耿达和西岭短水准,这些均为跨断层形变异常。此外,在川滇交界东部华盖山断裂北侧的云南水富垂直摆倾斜异常变化幅度也非常大(图9(a)、图10),这些异常出现的时间集中在2021年9—11月和2022年1—2月。从空间分布看,大幅度形变异常台点距离泸定  $M_s$  6.8 地震震中 130~300km

范围内,而距离泸定地震最近的安顺场(39km)和紫马垮测点(约58km)则在2021年以来变化比较平稳(图9),这表明震源区处于闭锁状态,近场变形较弱,而变形突出的点距离震源体较远。值得注意的是,形变异常与地震活动有较好的相关性。2019年11月1日—2021年6月24日三岔口至川滇交界东部形成  $M_L \geq 3.5$  地震空区(图9(a)),2021年6月25日四川昭觉  $M_L3.7$  地震的发生使得空区解体,之后空区内部与外围地震活动显著增强,空区内部  $M_L \geq 3.0$  地震主要集中在泸定  $M_s6.8$  地震震中85km范围内,最大为2022年5月20日四川汉源  $M_s4.8$  地震,空区外围相继发生了1月2日宁蒗  $M_s5.5$  和6月1日芦山  $M_s6.1$  地震。地震增强活动时间与形变大幅度异常开始的时间大体一致(图10)。此外,除礼州测距,其余形变巨幅异常点均位于空区外围(图9(a)),这大致符合固体理论(梅世蓉,1996),即到了强震孕育中短期阶段,孕震空区被打破,空区内部及外围地震活动增强,而由于震源体闭锁,近场地壳变形较弱,而远场地壳变形加剧,震群活动增多。

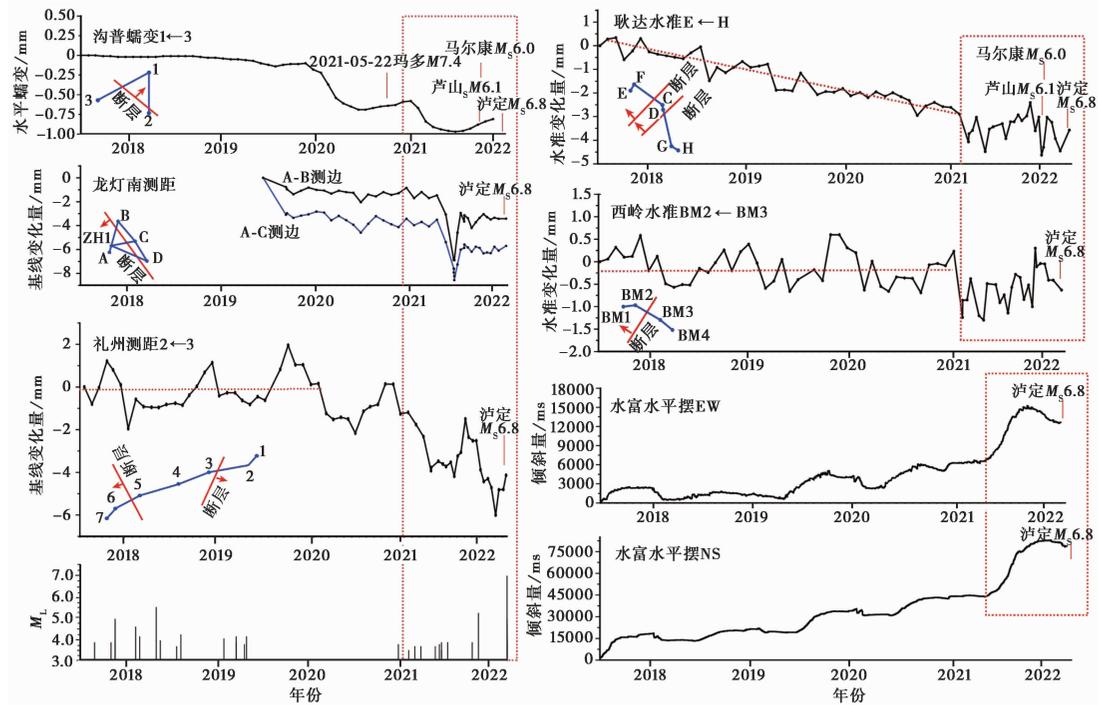


图10 远场形变曲线与  $M_L \geq 3.5$  地震空区内部地震活动  $M-t$  图

## 5 结论与讨论

(1) 泸定  $M_s6.8$  地震发生在2022年度全国地震重点危险区内部,年度预测正确。三岔口(鲜水河、龙门山和安宁河断裂交汇区)至川滇交界东部由于存在多个强震破裂空段(闻学泽等,2008)、断层闭锁段(赵静等,2015;Zhao et al,2020)、5级地震背景空区,反映应力水平和应力变化的地震学参数异常(吴微微等,2017;高原等,2018)和重力场(祝意青等,2015)异常等,一直是大家重点关注的区域(闻学泽等,2008;易桂喜等,2008;邵志刚等,

2022)。2008年汶川  $M_s 8.0$  地震后该区相继发生了2013年芦山  $M_s 7.0$ 、2014年鲁甸  $M_s 6.5$  和康定  $M_s 6.3$  地震,2015—2021年虽然每年被确定为全国地震重点危险区,但均未发生预测地震。由此表明,当前有效的强震中期时间预测依据少。

在对年度危险区判定依据的跟踪过程中,川滇藏交界4级地震空区的动态跟踪和震例类比是比较成功的。该空区在2020年6月提出,至泸定  $M_s 6.8$  地震发生有2年多的时间,为趋势异常,2022年1月2日宁蒗  $M_s 5.5$  地震打破空区具有中短期指示意义。此外,川滇藏交界4级地震空区预测范围较大,不能明确指示到某一较小区域。但是在2022年6月1日芦山  $M_s 6.1$  和马尔康  $M_s 6.0$  震群发生后,通过与1973年炉霍  $M_s 7.6$  地震的类比,预测地点基本锁定在三岔口附近地区。

(2)短期阶段,地震活动性异常比较突出,包括川滇藏交界4级空区“打破—增强—平静”、川滇地区震群和多个余震区准同步活动、川西显著震群等。值得一提的是,通过震例类比,本次泸定  $M_s 6.8$  地震与1973年炉霍  $M_s 7.6$  地震前不同阶段的地震活动演化特征高度相似,这可能与其发震构造相同、震源机制解一致和深部孕震环境相似有关。

地球物理观测方面,2022年6月四川芦山  $M_s 6.1$  和马尔康  $M_s 6.0$  地震后,四川及邻区前兆异常无明显减少,反而在7—8月持续增多,且部分趋势异常出现短期变化,如礼州测距在7月后出现加速下降并在泸定地震前转折,水富垂直摆倾斜曲线在经历了加速NE向倾斜后出现明显的转平迹象等。这些可以作为强震后短期仍有可能发生强震的判定依据。

(3)泸定  $M_s 6.8$  地震发生在鲜水河断裂带南端,位于鲜水河、安宁河和龙门山断裂带的交汇区,震前地球物理观测短期异常主要沿这3条断裂带分布,这也是震前短期阶段地点预测的主要依据之一。

(4)形变观测资料显示,泸定  $M_s 6.8$  地震前近场变形弱,而远场(距泸定地震震中130~300km范围内)多个测点出现大幅度异常变化,异常出现的时间与  $M_L 3.5$  地震空区打破后,空区内部及边缘地震活动增强的时间大体一致。除礼州测距位于  $M_L 3.5$  地震空区内部外,其余大幅度形变异常测点均位于空区外围,这大致符合坚固体理论(梅世蓉,1996)。由于这些形变异常分布范围大,且目前仍未恢复正常,故不能完全对应本次泸定地震,仍需要密切跟踪。

本次泸定  $M_s 6.8$  地震前流体短临异常不突出,没有出现地磁低点位移异常(黄颂等,2021)。震后认为,四川省地震局提出的川滇菱形地块热红外异常有短临预测意义。

## 参考文献

- 高原,石玉涛,陈安国,2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响. 科学通报, **63**(19):1934~1948.
- 黄颂,李军辉,姚丽,等,2021. 基于日变化相关的地磁低点位移异常可靠性分析方法. 中国地震, **37**(4):780~788.
- 梅世蓉,1996. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(二)——强震孕育时应力、应变场的演化与地震活动、地震前兆的关系. 地震学报, **18**(1):1~10.
- 闵子群,吴戈,江在雄,等,1995. 中国历史强震目录(公元前23世纪—1911年). 北京:地震出版社.
- 邵志刚,武艳强,季灵运,等,2022. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定. 地球物理学报, **65**(12):4643~4658.
- 宋俊高,陆远忠,施玉芳,等,1989. 震群用于地震预报的实用程式研究. 见:国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集(地震学专辑). 北京:学术书刊出版社,204~228.

- 汪素云, 吴戈, 时振梁, 等, 1999. 中国近代地震目录(公元 1912—1990 年  $M_s \geq 4.7$ ). 北京: 中国科学技术出版社.
- 闻学泽, 范军, 易桂喜, 等, 2008. 川西安宁河断裂上的地震空区. 中国科学(D 辑): 地球科学, **38**(7): 797~807.
- 吴微微, 吴朋, 魏娅玲, 等, 2017. 川滇活动块体中-北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征. 地球物理学报, **60**(5): 1735~1745.
- 许绍燮, 1989. 地震预报能力评分. 见: 地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑. 北京: 地震出版社, 586~589.
- 薛艳, 梅世蓉, 1999. 唐山大地震前后一般震群与前兆震群时空演化特征研究. 地震, **19**(2): 183~189.
- 易桂喜, 龙峰, 闻学泽, 等, 2015. 2014 年 11 月 22 日康定  $M 6.3$  地震序列发震构造分析. 地球物理学报, **58**(4): 1205~1219.
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦, 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究. 地球物理学报, **51**(6): 1719~1725.
- 张国民, 孙士铨, 1985. 华北几次大震余震应变释放特征及“应力窗口”的机制讨论. 地震, (1): 82~87.
- 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.
- 张铁宝, 杨星, 路茜, 等, 2021. 青藏高原东部及周边地区红外背景场特征. 科学技术与工程, **21**(22): 9217~9223.
- 赵静, 江在森, 牛安福, 等, 2015. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动亏损动态特征研究. 地球物理学报, **58**(3): 872~885.
- 祝意青, 刘芳, 李铁明, 等, 2015. 川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义. 地球物理学报, **58**(11): 4187~4196.
- Evison F F, Rhoades D A, 2000. The precursory earthquake swarm in Greece. Ann Geofis, **43**(5): 991~1009.
- Kanamori H, 1972. Relation between tectonic stress, great earthquakes and earthquake swarms. Tectonophysics, **14**(1): 1~12.
- Yang Z G, Dai D Q, Zhang Y, et al, 2022. Rupture process and aftershock mechanisms of the 2022 Luding  $M 6.8$  earthquake in Sichuan, China. Earthq Sci, 35.
- Zhao J, Ren J W, Liu J, et al, 2020. Coupling fraction and relocking process of the Longmenshan Fault Zone following the 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan earthquake. J Geodyn, **137**: 101730.

## Review and Discussion on Seismic Activity and Geophysical Observation Anomalies before the 2022 Luding $M_s$ 6.8 Earthquake in Sichuan, China

Xue Yan, Zhang Xiaotao, Yan Rui, Liu Jie, Yuan Zhengyi, Wu Yongjia, Tian Lei, Song Zhiping

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** The Luding  $M_s$ 6.8 earthquake on September 5, 2022 in Sichuan Province of China is within the potential area of the annual earthquake hazard map provided by the China Earthquake Administration. In this paper, we systematically reviewed the seismicity and geophysical observation anomalies before the shock as follows. ① The medium-term forecasting is mainly based on the anomalies of seismic gap with  $M_s \geq 4.0$  in Sichuan-Yunnan-Tibet border area, the  $M_L \geq 3.5$  earthquake gap near the annual earthquake hazard map, trend anomalies of across-fault deformation and gravity anomaly. The gap of  $M_s \geq 4.0$  earthquake was broken by the January 2, 2022 Ninglang  $M_s$ 5.5 earthquake in Yunnan Province, which is of significance for medium-short term prediction. ② In the short-term stage before the Luding earthquake, the seismic gap with  $M_s \geq 4.0$  earthquake experienced evolution process of broken-strengthening-quiescence, which is highly similar to that of before the 1973 Luhuo  $M_s$ 7.6 earthquake in Sichuan Province. This may be related to the fact that the two earthquakes have the same seismogenic structure, focal mechanism and deep seismogenic environment. In addition, there exist some anomalies, such as the quasi-synchronous activity of the earthquake swarms and the significant seismic activity in aftershock areas in Sichuan-Yunnan region, and the Batang earthquake swarm. After the Lushan  $M_s$ 6.1 earthquake on June 1, 2022 and the Maerkang  $M_s$ 6.0 on June 10, 2022, the precursor anomalies did not decrease significantly in Sichuan Province and its surrounding areas, while the anomalies increased significantly from July to August, which can be considered as a short-term basis for predicting the next earthquake. The new appeared anomalies mainly distributed within 300km of Sanchakou area (the intersection area of the Xianshuihe fault, the Anninghe fault and Longmenshan Fault zone), which is one of the main bases for the short-term location prediction before the Luding earthquake. ③ At the medium-short-term stage before the Luding earthquake, the crustal deformation anomalies with large amplitude are remarkable. These anomalies are in the range of 130~300km around the epicenter of the Luding earthquake except for the Lizhou baseline, the other anomalies are located outside the seismic gap with  $M_L \geq 3.5$ . The occurrence time of the crustal deformation anomalies is roughly consistent with the significant enhancement of seismic activity in the gap and nearby. ④ The Luding shock occurred in the Sanchakou area, which region and its vicinity has been identified as the potential area of the annual earthquake hazard map from 2015 to 2021, but there was no predicted event occurred. This suggests that the time prediction index for medium-term is not sufficient.

**Keywords:** The 2022 Luding  $M_s$ 6.8 earthquake; Seismic gap with  $M_s \geq 4.0$ ; Remarkable crustal deformation; Short-term precursory anomalies