

邹文轩,冯建刚.汶川 8.0 级地震前邻区远程动态触发小震活动异常特征研究[J].地震工程学报,2023,45(1):228-234.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220716002

ZOU Wenxuan,FENG Jian'gang.Anomalous characteristics of remotely and dynamically triggered small earthquake activity in adjacent areas before the Wenchuan M_s 8.0 earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2023,45(1):228-234.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220716002

汶川 8.0 级地震前邻区远程动态触发小震 活动异常特征研究

邹文轩¹, 冯建刚^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于龙门山断裂带及邻区 2000—2008 年的小震目录资料,采用全球 7 级以上地震活动影响“叠加”的思路,系统分析震前邻区小震受远程动态触发的异常活动特征。结果表明:汶川 8.0 级地震前,龙门山断裂带及邻区的小震活动明显受全球 7 级地震活动的影响,震前 1 年左右龙门山断裂带及邻区小震活动受远震动态触发活动的异常特征显著。并采用随机检验方法和改变统计参数对计算结果的可靠性进行验证。该方法能够有效地突出震前发震断层上远程动态触发小震的异常活动特征,对区域强震危险性评估具有一定的参考意义。

关键词: 远程动态触发; 龙门山断裂带; 汶川地震

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)01-0228-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220716002

Anomalous characteristics of remotely and dynamically triggered small earthquake activity in adjacent areas before the Wenchuan M_s 8.0 earthquake

ZOU Wenxuan¹, FENG Jian'gang^{1,2}

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2.Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on small earthquake catalog data from 2000 to 2008 in the Longmenshan fault zone and its neighboring areas, we apply the idea of impact “superposition” of global earthquake activity ($M>7$) in systematically analyzing the anomalous activity characteristics of remotely and dynamically triggered small earthquakes in the neighboring areas before a major earthquake. Results show that before the Wenchuan M_s 8.0 earthquake, the small earthquake activity in the Longmenshan fault zone and adjacent areas was influenced by global earthquake activity ($M>7$).

收稿日期:2022-07-16

基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH23042A);甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA823);甘肃省地震局科研创新团队(2019TD-02-01)

第一作者简介:邹文轩(1998—),男,湖南岳阳人,在读硕士,主要参与地震触发活动研究。E-mail:zwx1252585548@163.com。

通信作者:冯建刚(1977—),男,山西屯留人,硕士,高级工程师,主要从事地震活动性和数字地震波应用等研究。

E-mail:fjgspring@163.com。

About one year before the M_s 8.0 earthquake, there were significant abnormal characteristics of small earthquake activity triggered by remote earthquakes. The reliability of calculation results was verified by using the random test method and changing the statistical parameters. The method can effectively highlight the anomalous activity characteristics of small earthquakes that are remotely and dynamically triggered on the seismogenic fault before a major earthquake, thus having some reference significance for regional strong earthquake risk assessment.

Keywords: remote dynamic triggering; Longmenshan fault zone; Wenchuan M_s 8.0 earthquake

0 引言

地震触发问题是地震界比较关注的重点问题之一,很多研究表明地震触发是断层间应力重新分布的结果,如果该地区的断层处于应力变化区同时又在自身地震发生周期内,地震极有可能因此被触发。强震破裂产生并激发出的地震波在距离较远某一背景地震活动区域时产生的应力变化对后续地震的触发作用被称为远程动态触发。一次大范围地震的远距离触发,可由动态地震波的传播路径较好地解释。在 1992 年兰德斯地震发生后,通过分析美国西部 12 个地区随时间变化的地震累积数量的曲线,发现该地震发生后立即导致了远场地震活动的突然增加。Hill 等^[1]对兰德斯地震远程触发不同地区继发性地震的研究是掌握大地震远程触发小地震一个强有力的证据。Tibi 等^[2]对 2002 年汤加深源地震及其触发第二次主震序列的分析,得出其第二次主震破裂不是由第一次主震的静态库仑应力改变而触发的,而是由深源地震产生的体波所携带的动态应变远程触发。汤加深震触发的序列分布在其西南方向的一个无震区,破裂在这些地方可能较难自主发生^[3],但其主震产生的应力变化使其突破了临界破裂点,导致地震的发生,分析得出断层处于临界破裂状态时才更容易触发地震^[4]。也有学者从主震对余震的动态应力触发作用、对后续远场地震活动的动态应力触发作用、不同破裂类型的地震动态应力触发作用等多个方面研究动态应力触发^[5],目前尚未全面了解和掌握远程动态应力触发机制。国内专家在其机制探索研究方面开展了大量的研究工作^[6-8]。解朝娣等^[9]通过实际地震记录资料的计算结合理论计算的方式,较完善地分析了强远震在云南不同构造区域所产生的远场动态应力触发作用及其影响,并讨论了其动态库仑破裂应力作用特征的差别及其物理机制。

研究远程强震后区域小震频度的异常活动特征不仅对完善动态应力触发理论,甚至对于震源物理的发展都有着极其重要的意义,这有利于更清晰地

了解震源破裂过程中地震波所携带应力传递的方式,对地震现有认识有更高层次的突破。有关地震远程动态应力触发的研究结果表明,远程动态应力触发地震活动在全球广泛存在,动态应力触发地震的研究得到了迅速和广泛地应用^[10]。虽然其触发机制尚未完全搞清楚,但这种远程动态触发的现象确实客观存在,并且已被诸多震例研究成果所证实。最早发现远程触发地震方法是通过统计触发小地震频度的方法,远震发生后区域小震在远震发生后几小时或数天、甚至数月小震频度明显增强活动,这种统计方法在实际的震例统计中会存在如下问题:一是触发地震活动统计存在遗漏,尤其是在触发小震活动不特别明显时,无法有效区分正常背景下的小震触发活动;二是远震发生时间和区域小震活动增强恰好一致,在实际的频度统计中也无法有效排除这种时间上“巧合”现象。上述两方面的问题可能是导致远程动态触发小震异常活动在对未来强震预测中应用较少的主要原因。本文将采用多次远震影响区域小震活动“叠加”的思路,有效突出区域小震活动受远震活动影响的异常活动特征,统计汶川 8.0 级地震的发震断裂龙门山断裂带 2000 年 1 月至 2008 年 5 月 10 日期间区域小震记录资料,分析震前龙门山断裂带小震活动受远程动态触发的异常活动特征,通过对各时间尺度和小震震级下限进行逐步分析计算,经过对比分析,筛选出最适宜的地震活动性参数。

1 研究区域与背景

汶川 8.0 级地震发生在南北地震带的龙门山断裂带上,致使龙门山断裂带成为了近年来重点关注的区域之一。本文选取龙门山断裂带及邻区($29^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)作为研究区域。龙门山断裂带地处青藏高原东部边缘与四川盆地西部的交汇地带,属逆冲推覆构造带,是由强烈的地壳运动所形成的陆内造山带,迄今仍处于活动状态^[11]。龙门山断裂带总体上呈 NE—SW 向分布,长约 500 km,宽约

30~50 km,其形成与发展主要经历了印支期华南地块与华北地块拼合,以及喜马拉雅期印度板块与欧亚大陆板块碰撞的地质事件^[12]。龙门山断裂带强震活动频繁,先后发生了 1327 年天全 6 级、1657 年汶川 6.5 级、1941 年宝兴 6 级、1958 年北川 6.2 级、1970 年大邑 6.3 级和 2008 年汶川 8.0 级地震。已有研究结果显示,相关研究按照已经发生的地震与“被触发”地震之间的关系,大致上可分为以下三类:地震触发余震研究^[13-15];大地震触发另一次大地

震的研究^[16];潮汐触发地震的研究^[17-19]等。另一方面,经过系统研究汶川地震前邻区小震活动特征,在震前龙门山断裂带及邻区的小震活动并未发现明显的增强或平静特征(图 1,图 2)。因此,本文拟从远震动态触发角度,分析研究龙门山断裂带及邻区汶川 8.0 级地震前小震活动规律,重点研究汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带及邻区受远程动态触发小震的异常活动特征,讨论远程地震触发小震异常活动与主震之间的可能关系。

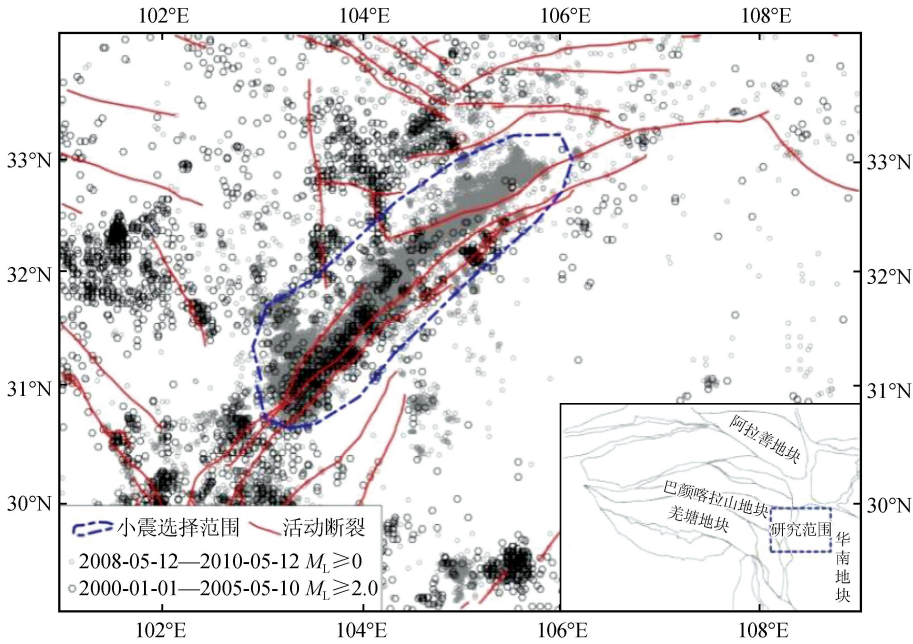


图 1 龙门山断裂带及邻区小震分布图

Fig.1 Distribution map of small earthquakes in Longmenshan fault zone and adjacent areas

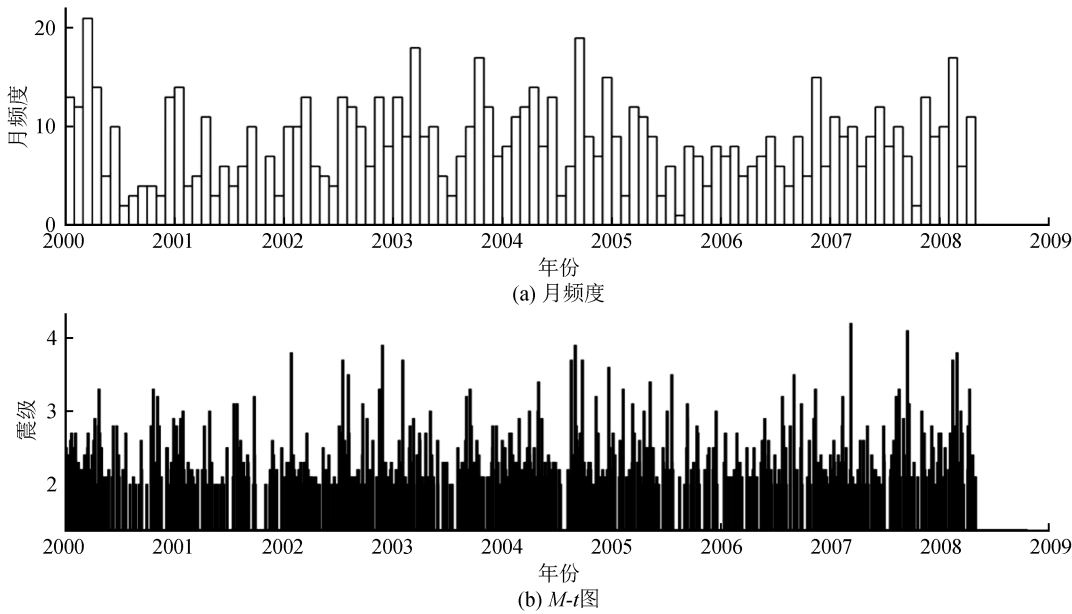


图 2 龙门山断裂及邻区 $M_L 2.0$ 以上小震频度图及 $M-t$ 图

Fig.2 Frequency diagram and $M-t$ diagram of earthquakes above $M_L 2.0$ in Longmenshan fault and adjacent areas

2 观测资料及研究方法

本文采用的小地震目录资料全部来源于全国地震速报编目网“统一正式目录”(http://10.5.160.18/console/index.action),选择龙门山断裂带及邻区(29°~34°N,100°~110°E)的小震地震目录资料。从汶川 8.0 级地震发震构造龙门山断裂带小震活动的月频度来看,其震前并未表现出显著的增强或平静异常(图 2)。同时,也未发现远震(7 级以上地震)后地震活动明显增强的特征。本文采取远震影响(全球 7 级以上)“叠加”的思路,研究龙门山断裂带及邻区小震活动受远震动态触发的异常特征,选取汶川 8.0 级地震前(2007 年 1 月 1 日—2008 年 5 月 10 日)全球 31 次 7 级以上地震,挑选出龙门山断裂带在每次 7 级以上地震发生前后各

1 天内的 $M_L2.0$ 以上地震目录,将全球 7 级以上地震的发震时间归零,将选择出的龙门山断裂及邻区小震目录叠加(图 3)。发现全球 7 级以上地震发生后 1 天龙门山断裂带的小震活动频度明显高于震前 1 天,震后频度为 9 次,震前仅 3 次,震后频度为震前的 3 倍。如果在一定区域随机选择两天的地震目录进行对比,小震频度比值应该接近于 1,但实际选择结果明显震后频度高于震前,这表明龙门山断裂带的小震活动受远震影响较大。另外,龙门山断裂带上被触发的小震频度与远震的空间距离、震级大小、地震类型并无直接关系,本文重点研究全球 7 级以上地震前后龙门山断裂带小震频度的比值,通过多次全球 7 级以上地震影响叠加,突出汶川地震前龙门山断裂带上的小震受远程动态触发的异常活动特征。

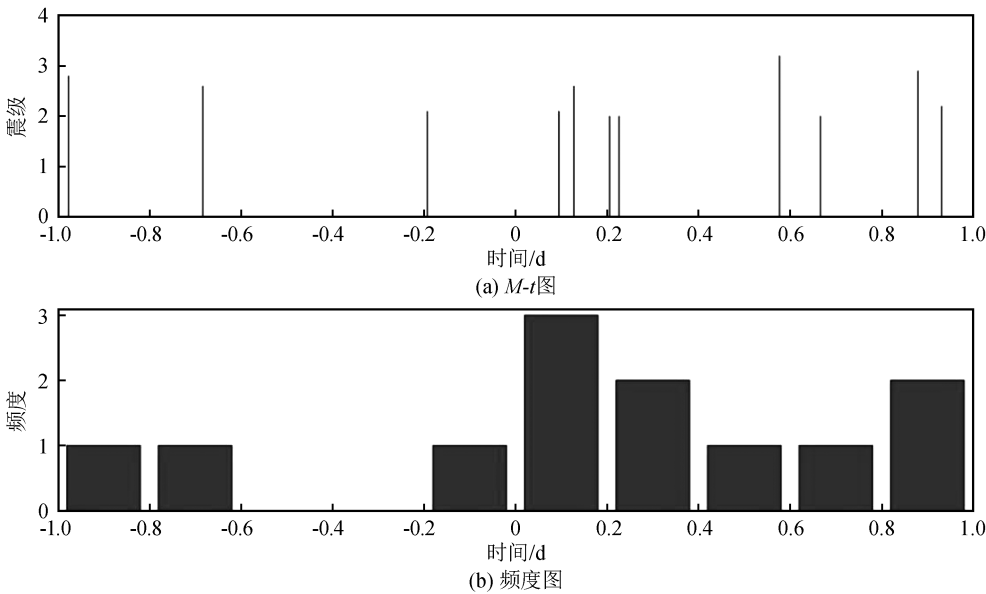


图 3 全球 7 级以上地震发生前后 1 天龙门山断裂带及邻区小震 $M-t$ 图与频度统计图

Fig.3 $M-t$ plots and frequency statistics of earthquakes in the Longmenshan fault zone and adjacent areas 1 day before and after global earthquakes with magnitude above 7

3 结果分析

采用远程动态触发影响“叠加”的思路,计算龙门山断裂带及邻区小震受远程动态触发的时间序列和空间扫描结果,并给出随机检验及不同参数的计算结果。

3.1 时间序列计算结果分析

为分析龙门山断裂带小震活动受远震动态触发特征,选择 2000 年以来龙门山断裂带的小震目录(图 1)(时间窗长为 2 年、时间步长为 1 个月),计算

获得汶川 8.0 级地震前全球强震前后 1 天的龙门山断裂带小震($M_L2.0$ 以上)频度比值的时间序列。发现 2000—2007 年小震频度比值虽有波动,但其变化幅度不大,比值接近于 1,但在震前约 1 年其比值呈大幅度上升趋势,在 2007 年 10 月比值达到 2000 年以来的最高值,超过了 15 倍,表明汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带小震活动受远震动态触发的特征明显(图 4)。

为检验计算结果的可靠性,假定全球每年 7 级以上地震发震时间是随机的。随机检验结果显示,其小震频度比值的变化幅度不大,比值接近于 1,表

明在汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带上的小震活动受到远震动态触发活动的特征明显,该异常信度较高,并非随机“巧合”对应结果。

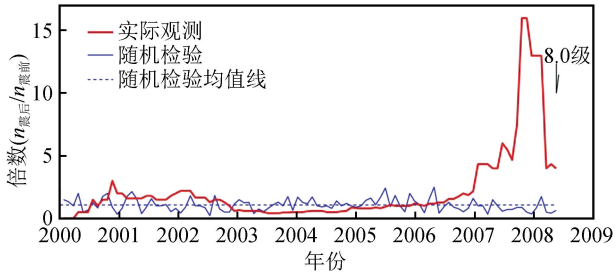


图 4 全球 7 级以上地震前后 1 天龙门山断裂带小震频度之比(窗长 2 年,步长 1 月)

Fig.4 Frequency ratio of small earthquakes in the Longmenshan fault zone 1 day before and after global earthquakes with magnitude above 7 (Window length:2 years, time step:1 month)

地震活动性参数类计算结果往往受参数选择的影响较大,如龙门山断裂带小震的震级下限、远震影响时间等参数对计算结果的影响可能较大。为讨论不同参数对计算结果的影响,分别对不同震级下限和不同影响时间进行计算。首先,分析震后影响时间选择对结果的影响,对研究区全球 7 级以上地震前后不同时间尺度进行划分,以 0.1 天为步长,分别计算 0.5~2.0 天的时间序列结果(图 5)。发现不同时间尺度的震前异常幅度不同,选择时间为 1 天时,震前的异常幅度最显著,远程动态触发区域小震活动的优势时间可能为 1 天左右。其次,分析龙门山断裂带小震不同震级对时间序列计算结果的影响,分别计算给出不同震级下限($M_L1.8\sim2.5$)的时间

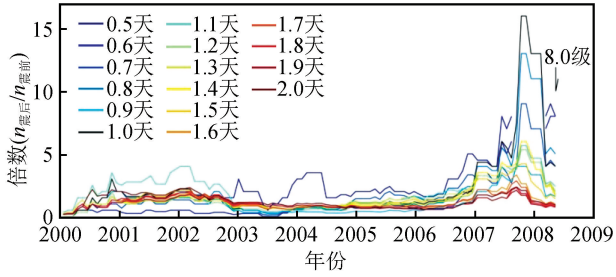


图 5 全球 7 级以上地震前后不同时间长度(0.5~2 天)龙门山断裂带小震频度之比(窗长 2 年,步长 1 月)

Fig.5 Frequency ratio of small earthquakes in the Longmenshan fault zone before and after global earthquakes with magnitude above 7 for different lengths of time (0.5—2 days) (Window length:2 years, time step:1 month)

序列结果(图 6)。结果显示龙门山断裂带小震震级下限为 $M_L2.0$ 时震前的异常特征最明显,其异常幅度远超过了其他震级下限的异常幅度,表明龙门山断裂带 $M_L2.0$ 以上地震受远震动态触发的异常活动特征较显著。由随机检验和不同参数(震级下限和影响时间)的计算结果可以看出,其异常特征受参数的影响不大,其异常特征较显著,不同参数对异常的幅度有影响,选择时间越短或震级越高,其异常幅度越小,这可能与统计样本量较少有关。

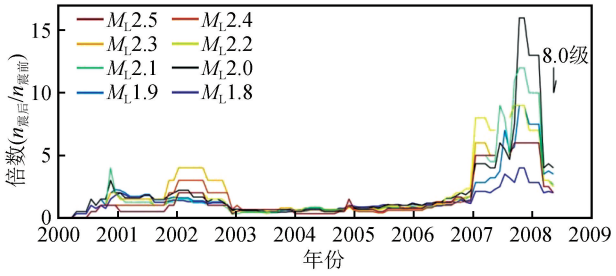


图 6 全球 7 级以上地震前后 1 天龙门山断裂带不同震级下限($M_L1.8\sim2.0$)的小震频度之比(窗长 2 年,步长 1 月)

Fig.6 Frequency ratio of small earthquakes with different lower limits of magnitude ($M_L1.8-2.0$) in the Longmenshan fault zone 1 day before and after global earthquakes with magnitude above 7 (Window length:2 years, time step:1 month)

3.2 空间扫描结果分析

上述时间序列的分析结果均以龙门山断裂带及邻区的小震为研究对象,其范围为汶川余震区的展布范围(图 1 中蓝色虚线选择范围),在研究范围选择上具有一定不确定性。为了讨论选择范围不同对计算结果的影响,采用一定空间窗和步长(空间窗:100 km,步长:0.1°),选择汶川 8.0 级地震前 2 年全球 7 级以上地震,进行空间扫描计算,图中不同颜色代表小震频度比值的大小,从蓝色到红色的渐变代表比值由小变大(图 7)。计算结果显示,2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前在震源区及邻区的异常特征较突出,其比值均超过 4.0,明显高出随机检验的结果,可能与龙门山断裂带应力水平较高有关,且处于临震极不稳定的状态,远震地震波微小的应力扰动,即可引起区域小震活动异常活动,导致远震前后龙门山断裂带小震活动状态存在较明显差异,远震震后 1 天龙门山断裂带的小震频度明显高于震前,比值最高达 10,而距离龙门山断裂带较远的区域绝大多数网格点的比值较小,介于 1~2 之间,与随机检验的结果接近,表明汶川地震前龙门山断裂

带小震活动受远震活动的影响较显著。

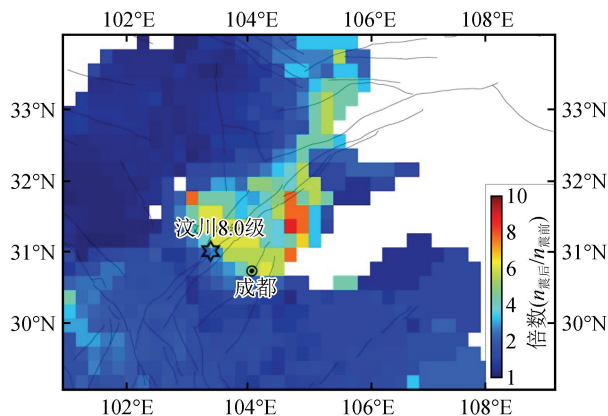


图 7 全球 7 级以上地震前后 1 天龙门山断裂带及邻区小震频度比的空间扫描结果(空间窗: 100 km, 步长: 0.1°, 时间: 2006 年 5 月 10 日—2008 年 5 月 10 日)

Fig.7 Spatial scanning results of the frequency ratio of small earthquakes in the Longmenshan fault zone and adjacent areas 1 day before and after global earthquakes with magnitude above 7 (Space window: 100 km, step size: 0.1°, time: from May 10, 2006 to May 10, 2008)

4 结论及讨论

4.1 结论

通过对汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带受远震动态触发小震异常活动特征的研究,得出如下结论:

(1) 采用远程动态触发影响“叠加”的思路,可能将成为研究远程动态触发小震活动的有效途径和重要技术方法,该方法能有效突出震前震断层面上远程动态触发小震的异常活动特征;

(2) 2008 年汶川 8.0 级地震前,龙门山断裂带上的小震活动受远程动态触发活动的异常特征突出,通过随机检验和不同参数的计算结果,排除异常“巧合”对应地震的可能,进一步验证了汶川 8.0 级地震前邻区远程动态触发小震活动异常的可靠性。

4.2 讨论

(1) 远震动态触发机制非常复杂,这种小震触发活动可能受区域地震背景、孕震断层应力水平及远震类型、远震距离等因素影响,随着对触发地震研究的不断深入,可能会逐步揭开不同区域远程地震之间的相互作用的物理机制,为区域强震危险性评估提供科学依据,还可能通过触发的小震活动实时监测区域应力状态^[20];

(2) 基于远场地震波动态触发所带来的应力扰动响应,以此来预测断裂带未来的强震危险性,理论上可能成为分析强震危险性的有效方法之一,但仍需更多实际震例进一步验证其可行性,这是一个极具研究价值的方向。

参考文献(References)

- [1] SCHWARZSCHILD B. Earthquake yields first real evidence of remote triggering[J]. *Physics Today*, 1993, 46(9): 17-19.
- [2] TIBI R, WIENS D A, INOUE H. Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequences[J]. *Nature*, 2003, 424(6951): 921-925.
- [3] MCGUIRE J J, WIENS D A, SHORE P J, et al. The March 9, 1994 (M_w 7.6), deep Tonga earthquake: Rupture outside the seismically active slab[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B7): 15163-15182.
- [4] DIETERICH J H. Nucleation and triggering of earthquake slip: effect of periodic stresses[J]. *Tectonophysics*, 1987, 144(1/3): 127-139.
- [5] 陈昊, 冀战波, 王琼, 等. 动态应力触发研究进展[J]. *中国地震*, 2020, 36(3): 442-459.
CHEN Hao, JI Zhanbo, WANG Qiong, et al. A review of seismic dynamic stress triggering[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(3): 442-459.
- [6] 韩竹军, 谢富仁, 万永革. 断层间相互作用与地震触发机制的研究进展[J]. *中国地震*, 2003, 19(1): 67-76.
HAN Zhujun, XIE Furen, WAN Yongge. Progress on fault interaction and earthquake triggering mechanism[J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(1): 67-76.
- [7] 郑文衡, 陆明勇. 地震动态触发机制的初步研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 116-123.
ZHENG Wenheng, LU Mingyong. A preliminary study on mechanism of dynamic triggering of earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 116-123.
- [8] 王海涛, 王琼, 赵翠萍. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师 M_s 6.8 地震的应力触发作用研究[J]. *西北地震学报*, 2006, 28(4): 335-340.
WANG Haitao, WANG Qiong, ZHAO Cuiping. Research on stress triggering of Bachu—Jiashi M_s 6.8 earthquake on Feb. 24, 2003, in Xinjiang[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(4): 335-340.
- [9] 解朝娣, 吴小平, 朱元清. 大震地震波对云南地震活动的远场动态应力触发作用[J]. *地震研究*, 2009, 32(4): 357-365.
XIE Chaodi, WU Xiaoping, ZHU Yuanqing. Far-field triggering effect of dynamic stress on seismicity in Yunnan produced by great earthquake's waves[J]. *Journal of Seismological Research*, 2009, 32(4): 357-365.
- [10] 张彬, 杨选辉, 陆远忠. 地震动态应力触发研究进展[J]. *西北地震学报*, 2008, 30(3): 298-303.
ZHANG Bin, YANG Xuanhui, LU Yuanzhong. Development in the research of seismic dynamic stress triggering[J]. *North-*

western Seismological Journal, 2008, 30(3): 298-303.

[11] 雷建设, 赵大鹏, 徐锡伟, 等. 龙门山断裂带深部结构与 2008 年汶川地震发震机理[J]. 科学通报, 2018, 63(19): 1906-1916. LEI Jianshe, ZHAO Dapeng, XU Xiwei, et al. Deep structure of the Longmenshan fault zone and mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(19): 1906-1916.

[12] 杨宜海, 张雪梅, 花茜, 等. 龙门山断裂带的分段性特征: 来自密集震源机制解的约束[J]. 地球物理学报, 2021, 64(4): 1181-1205. YANG Yihai, ZHANG Xuemei, HUA Qian, et al. Segmentation characteristics of the Longmenshan fault: constrained from dense focal mechanism data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(4): 1181-1205.

[13] 盛书中, 万永革, 黄骥超, 等. 2000 年以来南美板缘强震对 2014 年智利 $M_s8.2$ 地震触发关系的初步研究[J]. 中国地震, 2015, 31(3): 501-509. SHENG Shuzhong, WAN Yongge, HUANG Jichao, et al. Primary research on the 2014 $M_s8.2$ Chile earthquake triggering by large earthquake occurred on the boundary of south American plate since 2000[J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(3): 501-509.

[14] 王苏, 李建有, 徐晓雅, 等. 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震和呼图壁 $M_s6.2$ 地震的余震触发研究[J]. 地震研究, 2018, 41(1): 98-103, 158. WANG Su, LI Jianyou, XU Xiaoya, et al. Study on aftershock triggering of the 2016 Aktao $M_s6.7$ and Hutubi $M_s6.2$ earthquakes in Xinjiang[J]. Journal of Seismological Research, 2018, 41(1): 98-103, 158.

[15] KILB D, GOMBERG J, BODIN P. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses [J]. Nature, 2000, 408(6812): 570-574.

[16] NALBANT S S, HUBERT A, KING G C P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B10): 24469-24486.

[17] LI Q, XU G M. Tidal triggering of earthquakes in Longmen Shan region: the relation to the fold belt and basin structures [J]. Earth, Planets and Space, 2012, 64(9): 771-776.

[18] MICHAEL E, DIMITRIOS N, SPYROUS D. Evidence for tidal triggering for the earthquakes of the Ionian geological zone, Greece[J]. Annals of Geophysics, 2012, 55(1): 4115.

[19] 陈全, 安张辉, 范莹莹. 南北地震带潮汐触发地震的统计学证据[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1714-1720. CHEN Quan, AN Zhanghui, FAN Yingying. Statistical evidence of tidal triggered earthquakes in north and south seismic belt[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 1714-1720.

[20] 杨晶琼, 李月芯, 运乃丹, 等. 云南小江断裂带北段动态触发现象研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3207-3219. YANG Jingqiong, LI Yuexin, YUN Naidan, et al. Dynamic earthquake triggering in the north of Xiaojiang fault zone, Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3207-3219.