

从多地震活动参数角度定量分析芦山地震的背景活动性*

王静静, 张 怀[†], 庞亚瑾, 石耀霖

(中国科学院大学地球科学学院 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049)

(2014 年 4 月 14 日收稿; 2014 年 5 月 4 日收修改稿)

Wang J J, Zhang H, Pang Y J, et al. Quantitative analysis of Lushan earthquake background activity with earthquake multi-parameters[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(2): 235-242.

摘 要 2013 年 4 月 20 日龙门山断裂带南段发生 $M_s 7.0$ 级芦山地震, 通过计算多个地震活动参数, 定量分析芦山地震发生的背景地震活动性及与汶川地震的关联性. 结果表明: 1) 历史记载龙门山断裂南段仅有 3 次 6.0 级以上强震, 存在地震空区的历史地震背景; 2) 通过 a 值分析可知, 芦山地震发生前 30 年背景地震活动性较高; 3) 分析汶川地震前后 b 值的空间分布差异, 发现龙门山断裂南段在汶川地震后仅部分区域 b 值下降, 应力增强, 芦山地震发生在 b 值明显下降区.

关键词 芦山地震; 地震活动性; a 值; b 值

中图分类号: P315.08 **文献标志码:** A **doi:** 10.7523/j.issn.2095-6134.2015.02.013

Quantitative analysis of Lushan earthquake background activity with earthquake multi-parameters

WANG Jingjing, ZHANG Huai, PANG Yajin, SHI Yaolin

(Key Laboratory of Computational Geodynamics, College of Earth Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract The $M_s 7.0$ Lushan earthquake occurred in the southern part of Longmenshan fault on 20 April 2013. We calculate several kinds of seismic activity parameters to analyze the background activity of Lushan earthquake and relate them with Wenchuan earthquake. The results show that 1) there were only three great earthquakes above $M 6.0$ occurring in the southern part of Longmenshan fault, which indicates existence of earthquake gap in historic earthquake background; 2) based on the values of a , the background earthquake activity was high during the 30 years before Lushan earthquake; and 3) the spatial difference in b -value before and after Wenchuan earthquake shows decrease of b -value and increase of stress only in part of southern Longmenshan fault zone while Lushan earthquake occurred in the region where b -value decreased apparently.

Key words Lushan earthquake; earthquake activity; a -value; b -value

2013 年 4 月 20 日 8 点 2 分 46 秒, 在中国四川省芦山县发生了强烈地震, 据中国台网中心

* 国家重点基础研究发展计划(2014CB845906)和国家自然科学基金(41274103)资助

[†] 通信作者, E-mail: hzhang@ucas.ac.cn

(CENC)测定,震中位于北纬 30.3° ,东经 103.0° ,震级为 $M_s 7.0$ 级,震源深度 13 km,地震使得震区发生大面积的滑坡和建筑物损坏.地震定位和震源机制结果显示,该地震是发生在龙门山断裂带南段的一次逆冲型地震,距汶川 8.0 级地震发生时间间隔近 5 年,但汶川地震发生时这一地段没有发生破裂滑动.

芦山地震的发生,引起国内外学者广泛关注,一些学者关于芦山地震是否是汶川地震的余震进行了探讨,陈运泰等^[1]认为,芦山地震是汶川地震的最强余震;而刘杰等^[2]、杜方等^[3]认为二地震的余震区存在约 45 km 的间隔,芦山地震不是汶川地震的余震.一些学者通过库仑破裂准则计算了汶川地震发生后周边断层的同震库仑应力变化,提出龙门山断裂南部的断层库仑破裂应力上升^[4-9].Chen 等^[10]指出,2013 年发生芦山 $M_s 7.0$ 级地震的区域位于同震波速下降很小的区域,说明该区在汶川地震中应力没有得到释放.马瑾等^[11]通过地震活动时空演化,讨论龙门山断裂带地震孕育的过程,以及芦山地震没有直接发生在汶川地震后而是发生在多年后的可能原因.易桂喜等^[12]通过计算地震活动参数 b 值,结合地震的视应力分析汶川地震后龙门山断裂南段的强震危险性,指出天全—芦山一带应力增加.各研究成果普遍观点是,芦山地震的发生与汶川地震有一定的相关性,那么为什么会发生芦山地震?芦山地震发生的地震背景如何?及与汶川地震有怎样的相关性?等都是亟待解决的问题.这些都需要对芦山地震所在区域的地震活动性作出更准确的定量分析.

强震通常发生于活动断裂带上具有高应力积累的凹凸体^[13]或闭锁断裂段^[14-15],凹凸体的空间分布可以通过小地震的震级—频度分布或小地震的尺度关系来确定.前人研究应力大小与震级—频度关系($G-R$ 关系): $\lg N = a - bM$ ^[16]中的 b 值有关,表明高应力对应于 b 值小于 1.0;低应力对应于 b 值大于 1.0^[17-19].孔隙压力实验及对矿震分析结果均显示,断层区域高应力对应 b 值的范围为 0.5~1.0^[17-18].断层蠕变区域内低应力对应于 b 值的范围为 1.0~1.5^[14].总之, b 值作为估计断裂带相对应力水平的主要地震活动参数之一,已广泛应用于地震危险性评估中^[12,14-15,20-23].除 b 值外,震级—频度关系($G-R$ 关系): $\lg N = a - bM$ ^[16]

中的 a 值,在一般情况下代表零级地震的频度,可以用来衡量某区域地震活动水平,定量地了解区域活动度的分布,也广泛应用于活动断裂带的地震危险性分析中^[14-15,20,24].针对地震数据较少,活动性较弱的断裂带的地震活动性,还可以综合多个地震活动参数的值,研究区域地震活动性和危险性,如 b 值、地震的应变能释放值 \sqrt{E} 、频次值 N ,以及单次事件平均震级 \bar{M} 等参数^[25].

本文在前人研究基础上,利用历史及现今地震目录数据资料,通过计算多个地震活动参数对地震活动性进行定量分析,对芦山地震发生的地震背景及它与汶川地震的关系做一讨论.

1 芦山地震的历史地震活动背景与龙门山断裂带的地震活动性

芦山地震发生于青藏高原东缘的龙门山断裂带的西南段,距汶川 $M_s 8.0$ 级地震发生时隔近 5 年,两次地震震中相距 90 km.龙门山断裂带是一条长约 500 km、宽约 30~50 km,沿 NE-SW 方向展布的巨大断裂体系,其断层滑动以逆冲为主,兼具右旋走滑分量^[26-27].龙门山断裂南段断裂带宽度增大、次级断裂条纹数增加,单条断裂错断地表活动强度明显减弱,从构造类比角度而言,龙门山断裂南段的发震能力要弱于发生汶川地震的中段^[28].

沿龙门山构造带南段,历史上记载有 1327 年天全 ≥ 6 级,1941 年泸定—天全一带 6 级和 1970 年大邑 6.2 级 3 次 6 级以上地震^[28].沿龙门山中北段至松潘一带曾发生过 1713 年和 1933 年茂县北 7 级地震和 7.5 级地震^[29],1938 年松潘南 6.0 级地震,1958 年茂汶、北川一带 6.2 级地震,1973 年松潘 6.5 级地震,1976 年 3 次 6.7 级以上的松潘地震群^[30]和 2008 年汶川 8.0 级地震.其中 2008 年汶川 8.0 级大地震是有历史记载以来龙门山断裂带上发生的最大一次地震,且触发了多个 6.0 级以上强余震.

图 1 是龙门山断裂带历史 6.0 级以上地震震中分布及震级—时间图,图 1(a)给出 2008 年汶川地震前后发生的 6.0 级以上地震震中位置.可见,龙门山地区在 2008 年以前,大地震多分布在岷江—松潘一带,龙门山 3 大断裂带仅有少数几个 6.0 级以上地震,无 7.0 级以上地震发生.闻学

泽等^[29]研究表明,2008 年汶川地震之前,龙门山断裂带中段和中北段至少已有 1 700 余年、南段至少已有 1 100 余年未发生过 $M \geq 7.0$ 地震。而 2008 年汶川 8.0 级大地震发生在龙门山断裂中北段,是有震记载以来龙门山断裂带发生的最大一次强震,打破了龙门山断裂带的平静状态,随后 5 年内在龙门山断裂南段又发生 7.0 级芦山地震。

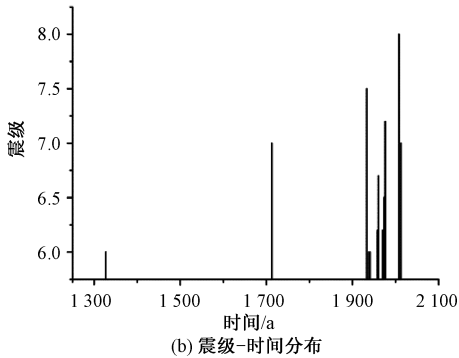
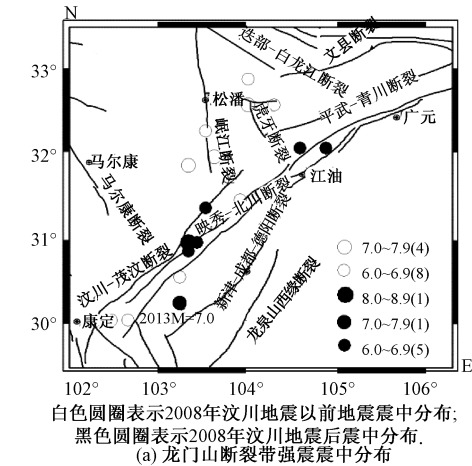


图 1 龙门山断裂带强震分布及震级-时间分布
Fig.1 Major earthquake distribution and magnitude-time distribution in Longmenshan fault zone

如果认为地震在较长时间内(至少一个复发周期内)能量的累积和释放相当,就可以采用 Benioff 应变^[31]研究某一特定断裂带地震的总能量释放和总应变能释放,从能量释放的角度给出断裂带的地震活动水平^[32]。据黄玮琼等^[33]的研究表明,龙门山断裂带 5 级以上地震自 1931 年以来较完整。我们收集了 1930 年以来龙门山断裂带 5.0 级以上地震资料,期间共发生 70 余次 5.0 级以上大地震。图 2 为 5.0 级以上地震震级-时间图及累积 Benioff 应变能释放-时间曲线。若同年发生多个 5.0 级地震,为清晰可见,只取其中最大的一个地震标注在震级-时间图中。可见,1930 年

以来龙门山断裂带 5.0 级地震有明显的活跃期和宁静期现象,在我们研究的时间段内有 4 个活跃期(见图中灰色矩形框所在区间)。在活跃期内,断裂带有多多个 5.0 级以上强震发生,释放大量的能量,而在宁静期内无 5.0 级地震或只有少数几个 5.0 级地震发生。龙门山断裂带 4 个活跃期的时间间隔逐渐增长,第 3 与第 4 个活跃期时间间隔最长,达 32 年之久。2008 年汶川 8.0 级地震拉开了第 4 活跃期的序幕,2013 年发生的芦山 7.0 级地震也处在龙门山断裂带的第 4 活跃期内。2 次地震的发生与长时间应变的积累有很大关系,且目前仍看不出龙门山断裂带第 4 活跃期结束与否。从累积应变能释放曲线可见,大地震的发生使得 Benioff 应变水平瞬时抬升,汶川 8.0 级地震释放的应变能几乎与以往多个 5.0 级地震释放的总的应变能相当。1930—2013 年龙门山断裂带累积释放总的应变能为 $6.6 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,平均每年应变能释放速率为 $8.0 \times 10^6 \text{ J}^{1/2} \cdot \text{a}^{-1}$,相当于断裂带上每年发生一个约 5.7 级地震。

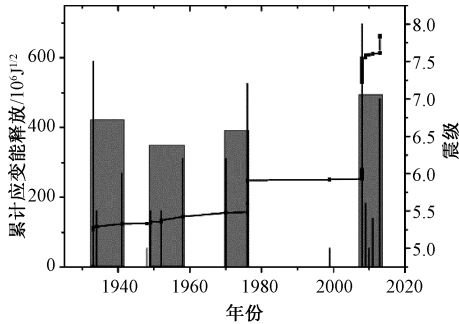


图 2 龙门山断裂带 5.0 级以上地震震级-时间图及累积 Benioff 应变能释放-时间曲线
Fig.2 Earthquake magnitude(≥ 5.0)-time distribution and accumulative Benioff strain energy release-time curve

以上对龙门山断裂带的历史强震分析可知,龙门山断裂南段至今无 7.0 级以上地震的记录,可能早已构成地震空区。龙门山断裂带自 1976 年在松潘一带发生 3 个 6.7 级地震群之后,开始进入地震平静期,经过长达 32 年的地震平静期后,再一次进入了活跃期。2008 年汶川 8.0 级地震及 2013 年芦山地震均处在最近的活跃期之内。

2 芦山地震发生前 30 年地震活动背景

受印度板块与欧亚板块碰撞导致龙门山断层带及邻近区域内不同走向和规模的断裂纵横交

错,包括南侧的鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂,东南侧的龙泉山断裂、马边—昭通断裂,西北侧的岷江—虎牙断裂及东昆仑山断裂等。我们试图利用现今丰富的地震资料,通过计算震级—频度关系($G-R$ 关系) $\lg N = a - bM$ [16] 中的 a 值定量分析区域地震活动程度,并比较龙门山断裂南段与周边其他断裂带的地震活动水平,了解芦山地震发生的现今地震活动背景。

选择川滇地区($27^{\circ} \sim 35^{\circ}N$, $99^{\circ} \sim 106^{\circ}E$) 为研究区域,利用 1983—04—19—2013—04—19 时间段内全国台网中心(CENC)测定的微震数据。为计算 a 值的空间扫描图,把川滇地区以 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 间距进行网格化,挑选出以每个网格节点为圆心,半径为 r 的圆形统计单元内的地震数据。首先确定统计单元内满足整个研究时段的最小完整性震级 M_c ; 然后利用最大似然法由各单元震级 $M \geq M_c$ 的地震资料按照 $\log N = a - bM$ 计算出其中的参数 a 值,将其作为相应单元中心点的计算值,进而获得 a 值的空间分布。为保证拟合结果的可靠性,同时兼顾台网的检测能力,统计单元的半径值 r 取为 40 km,地震数不少于 50 个。对于地震数少于 50 个的区域放弃计算,以空白填充。

图 3 为芦山地震发生前 30 年川滇地区的 a 值空间扫描图,五角星表示期间发生的 6.0 级以上强震。1987 年东昆仑山断裂发生过一次 6.2 级强震,1989 年抚边河断裂发生 6.8 级强震,2001 年理塘断裂附近发生 6.3 级强震,2008 年龙门山

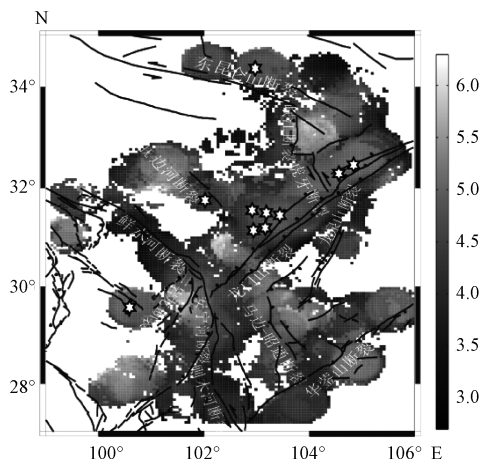
断裂中北段发生汶川 8.0 级大地震。汶川地震为其中最强一次地震,且在龙门山断裂中北段触发了多个 6.0 级以上强余震。 a 值作为衡量地震活动度的指标, a 值越大,地震活动水平越强; a 值越小,地震活动水平越弱。

从川滇地区 a 值的空间分布图可见,各断裂带 a 值有一定的差异性。 a 值较高的区域有鲜水河北段、岷江—松潘断裂、龙门山断裂南段雅安一带。鲜水河北段 a 值在 5~5.5 左右,该区域受汶川 8.0 级地震触发,库仑应力有所增加 [4,7],是值得关注的区域,其地震的危险性有待于进一步分析。岷江—松潘断裂 a 值在 5.5 左右,相对较高,从上面对龙门山断裂带历史强震的分析中可知,该区域历史上曾发生多次 7.0 级以上强震,但很多学者通过库仑破裂应力计算,该区域受汶川 8.0 级地震的抑制作用库仑应力降低 [4,7]。龙门山断裂南段雅安一带 a 值在 5~5.5 之间,该区域受汶川 8.0 级地震影响库仑应力增加 [4,5,7],2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级大地震发生在龙门山断裂南段高的 a 值区内。鲜水河断裂中段 a 值相对较低,为 3~3.5 之间,东昆仑山断裂、龙泉山断裂、安宁河—则木河断裂、抚边河断裂 a 值相当,在 4~4.5 之间。 a 值的空间变化结果,说明龙门山断裂南段在芦山地震发生的前 30 年内具有较高的背景地震活动水平。

3 汶川地震前后龙门山断裂南段的地震活动性

近些年,川滇及周边地区地震活跃,发生了几次大地震,震后应力调整的计算也十分重要,因为这时的应力变化量仍然可以相当于多年的应力积累 [34]。库仑应力增加会增加地震发生的危险性,但不一定立刻响应发生地震;但假设有些区域初始应力状态较高,处在破裂临界状态,则增加的库仑应力就可能立刻导致地震的发生。若区域已经积累了较高的应力,处于长期的强震空区,增加的库仑应力则有可能触发破坏性大震。2008 年汶川 8.0 级地震是近些年川滇地区发生的最大一次破坏性地震,关于汶川地震对周边断层的库仑应力变化的影响,在国内外已有多篇研究成果,基本的认识是汶川大地震使得龙门山断裂南段库仑应力增加 [4,9]。

图 4 为龙门山断裂南段震级—频度分布图,



白色五角星表示芦山地震发生前 30 年内,川滇地区发生的 6 级以上地震,其中 2008 年汶川 8.0 级地震为期间最大一次地震,在龙门山断裂中北段产生多个 6 级以上强余震。

图 3 川滇地区 a 值空间扫描图

Fig. 3 a -Value spatial scanning in Sichuan-Yunnan area

其中(a)为 1983-04-19—2008-05-19 汶川地震前的数据计算所得;(b)为 1983-04-19—2013-04-19 芦山地震前地震数据计算所得. 龙门山断裂南

段在汶川地震前 b 值的平均值为 1.01,汶川地震后 b 值的平均值为 0.98,水平相当,且均与全球范围的区域平均 b 值($b=1.0$)一致.

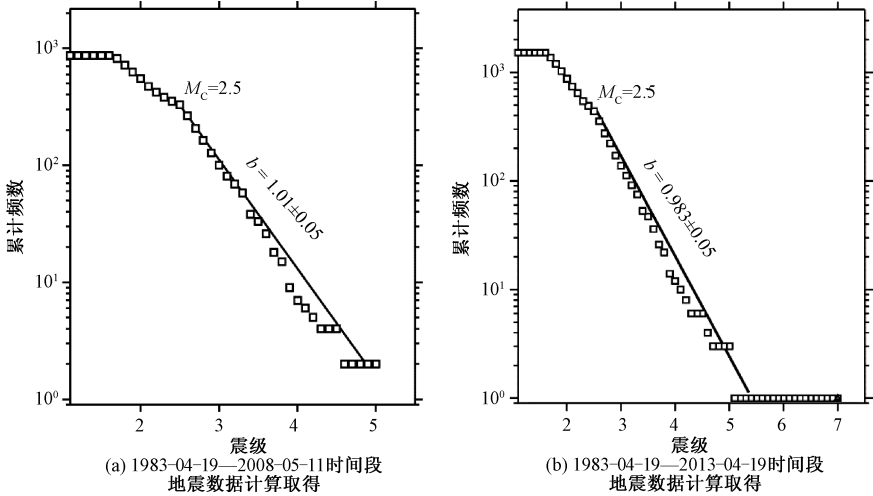


图 4 龙门山断裂南段震级-频度分布图
Fig. 4 Magnitude frequency distribution in the southern segment of Longmenshan fault zone

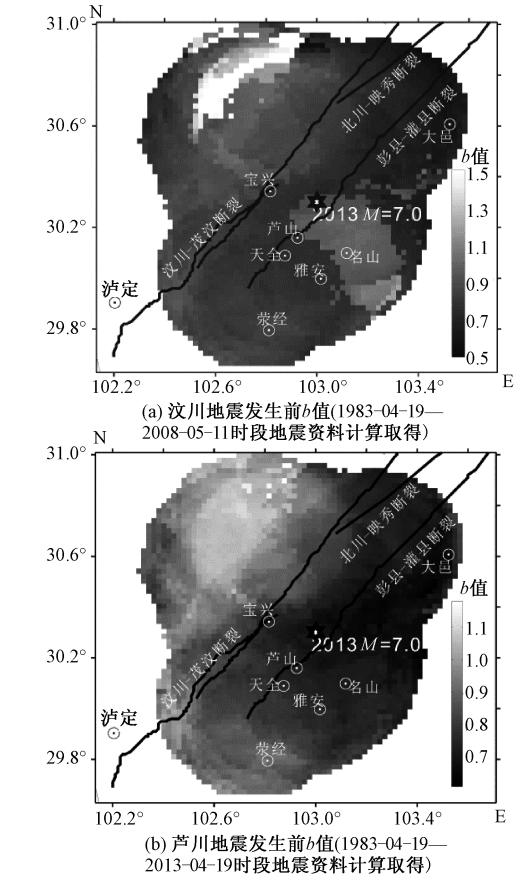
为了解龙门山断裂南段 b 值的空间差异,我们利用 1983 年 4 月 19 日到 2013 年 4 月 19 日的地震目录计算 b 值,精细分析龙门山断裂南段各部分的相对应力水平,及汶川地震对龙门山断裂南段各部分应力的调整程度. 沿断裂带 b 值计算方法是,把龙门山断裂带南段区域分成 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 的网格,挑选出以每个网格点为圆心、半径为 r 的圆形统计单元内的地震,确定统计单元内满足整个研究时段的最小完整性震级 M_c ;然后利用最大似然法由各单元震级 $M \geq M_c$ 的地震资料,按照 $\log N = a - bM$ 计算出其中的 b 值,将其作为相应单元中心点的计算值,进而获得 b 值空间分布. 统计单元的半径 r 取 30 km,每个统计单元内地震样本数不少于 50 个,为保证结果的可靠性,对于地震数少于 50 个的区域放弃计算,以空白填充.

图 5(a)、图 5(b)分别为利用 1983-04-19—2008-05-11 时段及 1983-04-19—2013-04-19 时段的地震资料,计算的龙门山断裂南段 b 值空间分布. 可见,2008 年汶川地震前,龙门山断裂南段 b 值空间差异明显,芦山一名山一带 b 值约为 1.0,与整个断裂带平均水平(1.01)相当;断裂带北段大邑一带 b 值约为 0.7,低于平均水平;断裂带南段荥经一带 b 值约为 0.9,略低于平均水平;断裂带西南部 b 值最高达 1.4,高于平均水平.

2013 年芦山地震前, b 值空间差异变小. 在断裂带西南部表现较高的 b 值分布,约为 1.1,高于平均值(0.98);断裂带南段荥经一带 b 值约为 0.95,与平均值一致;中段芦山一名山一带以及北段大邑一带 b 值约为 0.7,明显低于平均值.

以上分析可见,2 个时间段内 b 值的空间分布特征有一定的相似性,均在垂直于断裂带的方向表现为,在汶川—茂川断裂西侧的 b 值要明显高于东侧;均在沿着断裂带的方向表现为,断裂带南段的 b 值要高于断裂带北段. 即龙门山断裂南段东北部区域 b 值相对较低,具有较高的应力水平.

为分析 2 个时间段 b 值空间分布的差异性,我们计算了 2013 年芦山 7.0 级地震前 b 值(图 5(b))同 2008 年汶川 8.0 级地震前 b 值(图 5(a))的差异 Δb 的图像(见图 6(a)). $\Delta b > 0$ 表示汶川地震后造成区域 b 值上升; $\Delta b < 0$ 表示汶川地震后造成区域 b 值下降. 从图 6(a)可见,2008 年汶川 8.0 级地震后,芦山一名山一带 b 值明显降低,局部 b 值最大下降幅度达 0.3 左右,显示该区域在汶川地震后应力水平有明显上升,2013 年芦山 7.0 级地震恰发生在 b 值降低区域. 相反,靠近汶川地震主破裂区南段的大邑地区,以及龙门山断裂最南段的荥经地区 b 值升高,应力水平下降. 断裂带西侧表现为,西南侧 b 值略有上升(Δb



五角星标注的是 2013 年 4 月 20 日芦山地震发生位置.

图 5 龙门山断裂南段 b 值空间分布
Fig. 5 b -Value spatial distribution in southern part of Longmenshan fault zone

$=0.1$ 左右);西北侧部分区域 b 值下降($\Delta b=0.2 \sim 0.3$). 龙门山断裂南段其他大部分区域 $\Delta b=0$ 左右,无明显变化. 以上分析可以推断,汶川地震的发生对龙门山断裂南段各部分的应力调整有一定的差异性,2013 年芦山 7.0 级地震发生在 b 值明显下降、应力上升的区域内.

图 6(b) 为 2008-05-11—2013-04-19 时间段内龙门山断裂南段地震震中分布图,期间发生了 3 次 4.0 级以上地震,地震最大震级为 4.6 级,位于天全—芦山间. a、e 区对应图 6(a) 中汶川地震后 b 值下降的区域, a 区为芦山—名山一带,从地震震中分布图可以看出,该区域在汶川地震后发震数稀少,尤其在 2013 年芦山地震周围的十几公里范围内,存在小震的空区. 其他学者通过同震波速的研究,指出 2013 年发生芦山 $M_s 7.0$ 级地震的区域位于同震波速下降很小的区域,说明该区在汶川地震中应力没有得到释放^[10],与我们计算

的芦山地震发生的区域 b 值下降及存在小震空区的结果相一致. b、c、d 区域对应图 6(a) 中汶川地震后 b 值上升的区域,其中, b 区为大邑附近,明显看出该区域在汶川地震后发震数较多,小震密集,这可能是造成该区域 b 值上升的主要原因.

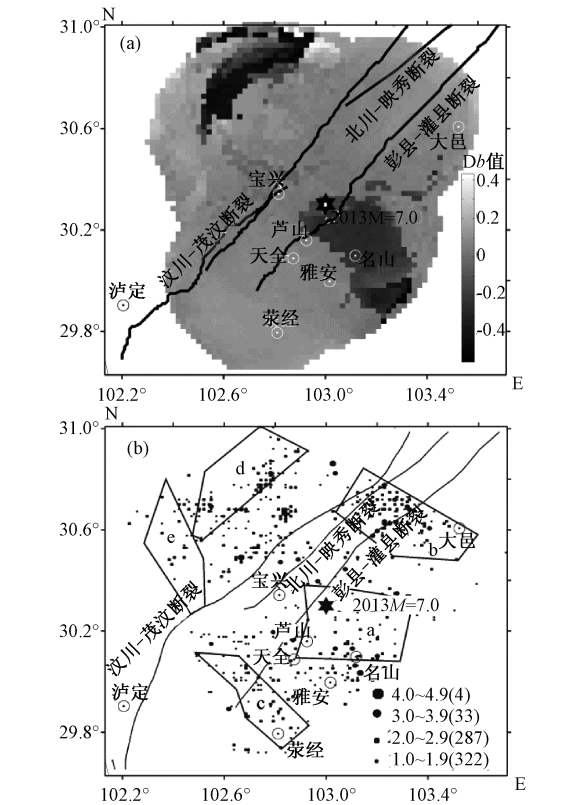


图 6 龙门山断裂南段 Δb 空间分布图
(a) 及地震震中分布图 (b)

Fig. 6 Spatial distribution of Δb (a) and distribution of earthquakes (b) in southern part of Longmenshan fault zone

4 讨论与结论

2008 年汶川地震后,很多学者计算了龙门山断裂带南段的静态库仑破裂应力的变化量^[4-9],但库仑破裂准则计算结果依赖于所用的模型及关键性参数的选取,如破裂类型、同震位移量、断层面几何参数、断层区物性参数等,所以不同学者给出的计算结果也会有一定的差异性. 例如,Parsons 等^[4]计算结果显示,汶川地震加载到龙门山断裂南段的静态库仑破裂应力值达 0.1 MPa; Toda 等^[5]的研究结果显示,汶川地震使龙门山断裂带彭县—灌县断裂南西段的静态库仑破裂应力增加了 0.491 MPa;单斌等^[6]计算结果显示汶川地震使龙门山断裂南段库仑破裂应力增加了 0.005

~0.015 MPa. 基本认为汶川 8.0 级地震加载到龙门山断裂带南段的静态库仑破裂应力值已达到甚至高于静态应力触发阈值 0.01 MPa^[35-36]. 我们通过精细 b 值扫描结果显示汶川地震并非使得整个龙门山断裂南段区域应力水平平均增强,区域各部分应力变化及地震活动性变化存在一定的差异,汶川地震之后,在芦山—名山一带, b 值下降明显,应力水平增强,而在断裂带两端的大邑、荣经附近 b 值上升,应力水平下降. 我们认为,大震发生后,结合区域历史地质背景,综合应用库仑应力变化、区域地震活动参数的变化等多种手段,可以对未来地震危险性作出更准确地判断.

本文综合多个地震活动参数分析了芦山地震发生的地震活动背景,得到以下初步结论:

1) 从历史地震活动性上看,龙门山断裂南段仅记录到 3 次 6 级以上强震,无论从地震强度还是频度上看,龙门山断裂南段均低于龙门山中北段至岷山一带,可能存在地震空区的历史地震背景. 龙门山断裂在长达 32 年的大震平静期之后,自 2008 年汶川 8.0 级地震后有进入大震的活跃期的现象,2013 年芦山地震发生在龙门山断裂带的大震活跃期里.

2) 芦山地震发生前 30 年,龙门山断裂南段的 a 值相对较高,与鲜水河断裂北段、岷江断裂相当,高于周边鲜水河断裂中段、安宁河—则木河断裂、东昆仑山断裂等周边断裂带,即芦山地震发生前,所在区域现今地震活动度较强.

3) 通过精细 b 值空间扫描,对比汶川地震前、后 b 值的空间分布差异,分析了龙门山断裂南段各部分的应力状态. 汶川地震后,芦山—名山一带 b 值下降、应力水平明显升高;靠近汶川余震区的大邑附近及断裂带南段荣经附近 b 值上升、应力水平降低. 从地震活动图像可看出,芦山地震发生前周边几十公里的范围内在汶川地震后小震平静,应力释放较少,可能存在小震空区.

本研究计算及成图过程采用了 Max Wyss 等研发的 ZMAP 程序包,在此表示谢意.

参考文献

- [1] 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 1 064-1 072.
- [2] 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M7.0 级地震介绍[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 404-1 407.
- [3] 杜方, 龙锋, 阮祥, 等. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1 772-1 783.
- [4] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. Nature, 2008, 454(7023): 509-510.
- [5] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M = 7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(17): L17305. doi: 10.1029/2008GL034903.
- [6] 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008 年 5 月 12 日 $M_w 7.9$ 汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 52(5): 537-545.
- [7] 万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 128-139.
- [8] 解朝娣, 朱元清, Lei X L, 等. $M_s 8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(6): 688-698.
- [9] 钱琦, 韩竹军. 汶川地震对龙泉山断裂地震发生概率的影响研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 489-497.
- [10] Chen J H, Froment B, Liu Q Y, et al. Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(18)L18302. doi:10.1029/2010GL044582.
- [11] 马瑾, 刘培洵, 刘远征. 地震活动时空演化中看到的龙门山断裂带地震孕育的几个现象[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 461-471.
- [12] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 112-1 120.
- [13] Aki K. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89(B7): 5 867-5 872.
- [14] Wiemer S, Wyss M. Mapping the frequency - magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B7): 15 115-15 128.
- [15] Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto - Elsinore fault zones[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 2000, 105(B4): 7 829-7 844.
- [16] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34(4): 185-188.
- [17] Scholz C H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58

- (1): 399-415.
- [18] Wyss M. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1973, 31(4): 341-359.
- [19] Lahaie F, Grasso J R. Loading rate impact on fracturing pattern; Lessons from hydrocarbon recovery, Lacq gas field, France [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1999, 104(B8): 17 941-17 954.
- [20] Zúñiga F R, Wyss M. Most-and least-likely locations of large to great earthquakes along the Pacific coast of Mexico estimated from local recurrence times based on *b*-values [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(6): 1 717-1 728.
- [21] 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性及其地震危险性 [J]. *地震学报*, 2004, 26(3): 294-303.
- [22] 易桂喜, 闻学泽. 多地震活动性参数在断裂带现今活动习性与地震危险性评价中的应用与问题 [J]. *地震地质*, 2007, 29(2): 254-271.
- [23] Wyss M, Stefansson R. Nucleation points of recent mainshocks in southern Iceland, mapped by *b*-values [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(2): 599-608.
- [24] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(6): 1 490-1 500.
- [25] 闻学泽, 胡先明. 从地震活动参数分析石棉: 巧家断裂带的现今活动性 [J]. *地震研究*, 1984, 7(2): 163-170.
- [26] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J]. *地震地质*, 1994, 16(4): 389-403.
- [27] Xu Z, Ji S, Li H, et al. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake [J]. *Episodes*, 2008, 31(3): 291.
- [28] 陈立春, 冉勇康, 王虎, 等. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性 [J]. *科学通报*, 2013, 58(20): 1 925-1 932.
- [29] 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 444-454.
- [30] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 芦山地震震构造及其与汶川地震关系讨论 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 11-20.
- [31] Benioff H. Earthquakes and rock creep (Part I: creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks) [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1951, 41(1): 31-62.
- [32] 王辉, 刘杰, 石耀霖, 等. 鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2009, 38(7): 808-818.
- [33] 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 中国大陆地震资料完整性研究之二 [J]. *地震学报*, 1994, 16(4): 423-432.
- [34] 石耀霖, 张贝, 张斯奇, 等. 地震数值预报 [J]. *物理*, 2013, 42(4): 237-255.
- [35] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(3): 935-953.
- [36] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 - 2012), 1998, 103(B10): 24 347-24 358.