

汤兰荣, 曾新福, 吕坚, 等. 湖北巴东 5.1 级地震前的地震条带异常及视应力特征分析[J]. 华南地震, 2018, 38 (1):54-60. [TANG Lanrong, ZENG Xinfu, LYU Jian, et al. Analysis on Seismic Belt Anomaly and Apparent Stress Characteristics Before Badong M_s 5.1 Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1):54-60.]

湖北巴东 5.1 级地震前的地震条带异常及 视应力特征分析

汤兰荣, 曾新福, 吕坚, 郭雨帆
(江西省地震局, 南昌 330039)

摘要: 2013年12月16日湖北巴东发生5.1级地震。对震前的地震条带和视应力进行了分析, 结果表明: 震前有两条 $M_L \geq 3.0$ 级地震条带交汇于震中附近, 条带上和条带外的地震地方平太阳时角度都较分散, 条带上地震受到的调制作用不明显。震中周围 $M_L \geq 3.0$ 级地震的视应力时间变化显示震前出现高值异常, 空间分布显示视应力分布具有分区特征, 东北部地区视应力明显高于西南部, 震中位于高低值分界线附近。

关键词: 巴东 5.1 级地震; 地震条带; 视应力; 地方平太阳时

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0054-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.007

Analysis on Seismic Belt Anomaly and Apparent Stress Characteristics Before Badong M_s 5.1 Earthquake

TANG Lanrong, ZENG Xinfu, LYU Jian, GUO Yufan
(*Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330039, China*)

Abstract: The Badong M_s 5.1 earthquake occurred on December 16th, 2013. This paper analyzes the seismic strip and apparent stress before the earthquake. The results show that there are two $M_L \geq 3.0$ seismic strip intersection near the epicenter before the earthquake; the local mean lunar times of earthquakes on the strip and out of the strip are more scattered, and the modulation effect of earthquakes inside the strip is not obvious. Apparent stress of $M_L \geq 3.0$ earthquakes increased before the impending earthquake, and characterized by distinct regional features, the apparent stress in the northeast region was higher than that in the Southwest, the epicenter was located near the division between high value and low value.

Keywords: Badong M_s 5.1 earthquake; Seismic strip; Apparent stress; Local meanlunar times

收稿日期: 2017-07-02

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH16023)和江西省地震局青年基金科研课题(JXDZ-KY-201703)资助

作者简介: 汤兰荣(1983-), 女, 工程师, 主要从事地震分析预报工作。

E-mail: 156878629@qq.com.

0 引言

地震活动性方法是我国当前最重要的一类地震预测方法,其中地震条带是这类方法中应用较多、效果较好的方法^[1-2]。随着数字地震观测技术的发展,数字地震学方法在地震预测研究中的研究越来越深入,视应力就是其中应用较为广泛的方法之一。前人已经对视应力开展了大量的研究工作,研究内容主要包括区域视应力的水平、强震前后视应力的时空变化特征、视应力与震级和深度的关系以及视应力与地震类型的关系等。近年来,在中强地震前后的视应力变化研究方面,易桂喜等^[3]、程万正等^[4]、李艳娥等^[5]对汶川 8.0 级地震前的视应力时空分布特征进行了研究,宫悦等^[6]针对芦山 7.0 级地震、李赫等^[7]和岳晓媛等^[8-9]针对首都圈中强地震、蔡杏辉^[10]针对福建仙游 5.0 地震以及陈丽娟等^[11]针对 2013 年 7 月 22 日岷县 M_s 6.6 地震前后的视应力进行了研究,获得了不少有意义的成果。

2013 年 12 月 16 日 13 时 04 分在湖北巴东发生 5.1 级地震,对于该地震的发震构造和成因机制前人已经进行了大量研究^[12-16],目前获得的主要观点为,该地震属于构造型水库地震,发震断层为近东西向的构造。对于该地震前的地震活动性异常,研究成果较少,本文将结合发震构造和成因机制等已有研究成果,对震前的地震条带异常进行分析。另外,采用国家数字测震台网数据备份中心提供的地震波形数据,测定 2012 年 5 月至巴东 5.1 级地震前 41 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力,分析巴东 5.1 级地震前视应力的时空变化特征。

1 地震条带异常分析

1.1 条带判定准则

条带的判定准则是^[17]:在考虑区域监测能力的前提下,自起始震级 M_L 2.0 开始扫描,逐级上调震级,直到没有条带现象,时间上从震前数月数年,依次扫描以保证不遗漏任意一种震级下限和时间尺度的条带图像。组成条带的地震个数 $N \geq 6$ 次,条带的长度应在 100 km 以上,条带的长宽比 ≥ 4 ;条带上最大空段小于条带长度的 1/3,且分布较均匀;条带内外地震活动形成鲜明的对比,即内部活跃外部稀疏,理想的异常条带上的地震次数 N 条与条带外围的地震次数 N 外满足 N 条/ $(N$ 条+ N 外) ≥ 0.75 。

1.2 地震条带分布特征

依据地震条带的判定准则,利用中国地震台网中心提供的 $M_L \geq 2.0$ 级地震目录对巴东 5.1 级地震前的条带图像进行扫描。扫描结果发现,震前震中周围出现 2 条相互交汇的 $M_L \geq 3.0$ 地震条带,北西向条带长 900 km,宽 120 km,组成条带的地震次数为 22 次,震级范围为 M_L 3.0~3.6,条带上地震的起始时间为 2012 年 5 月,条带上最后一次地震距主震发生的时间间隔为 40 d。近东西向条带长 720 km,宽 80 km,组成条带的地震次数为 11 次,震级范围为 M_L 3.0~3.6,条带地震的起始时间为 2012 年 6 月,条带上最后一次地震距主震发生的时间间隔为 63 d。主震位于条带交汇区附近,如图 1。图中地震目录选取的时间范围为 2012 年 5 月 1 日至 2013 年 12 月 15 日。

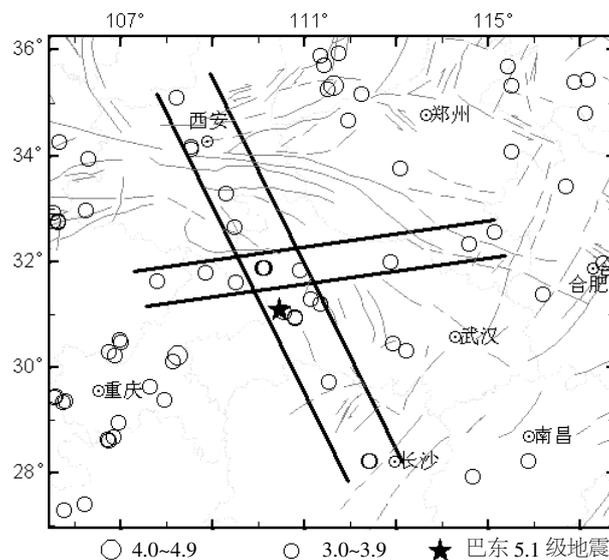


图1 巴东 5.1 级地震前的条带图像

Fig.1 Belt images before the Badong M_s 5.1 earthquake

1.3 地震条带内外频度比曲线

对两条条带分别做地震条带带内与带外频度比 $N/N+1$ 曲线, 其中 N 为条带内的频次, N' 为条带两侧向外各扩展 $1/2$ 带宽范围内的小震活动频

次。可以看出, 2 条地震条带的条带内外频度比曲线都在巴东 5.1 级地震前出现了持续时间超过 1 年的高值异常, 条带起始时间与频度比异常开始时间相对应, 说明条带异常较可靠。

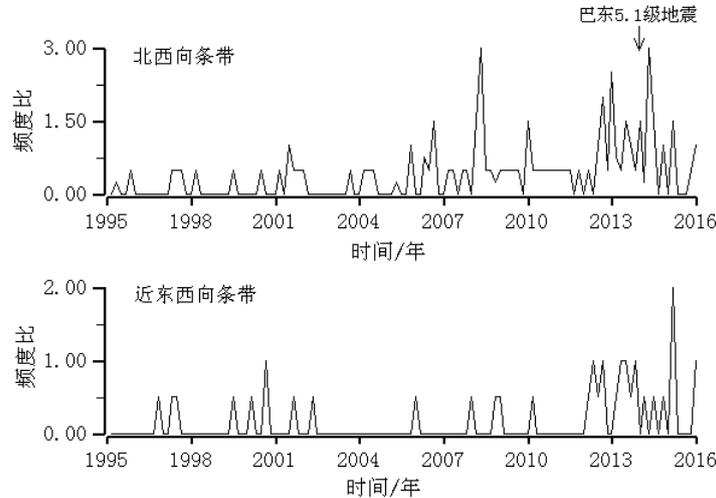


图 2 地震条带的内外频度比曲线

Fig.2 Internal and external frequency ratio curves of seismic belt

1.4 条带地震受调制情况分析

固体潮对地震的触发作用对地震成因和地震预报有重要的实际意义, 地震学家研究了地震与月亮在一天中的位置, 即与地震地方平太阴时的关系, 研究表明地震的发生和地方平太阴时有关^[18-19], 因此利用地震震中的地方平太阴时分布特征可以对未来中强以上地震的预测提供帮助, 不少人利用强震前的中等地震地方平太阴时角度差来预报地震, 对强震预报取得了较好的预报效果^[18-20], 刘泽民等人提出了利用地震地方平太阴时集中程度的空间扫描方法和时间扫描方法, 分别在安徽固镇地区和长南地震带进行了应用研究^[21-22]。本文选取 $M_L \geq 2.0$ 级地震对条带上和条带外的地震分别进行地方平太阴时计算, 分析地震地方平太阴时的集中程度, 条带上地震的地方平太阴时计算选取的时间范围是条带形成的起止时间, 即北西向条带的时间范围为 2012 年 5 月 1 日至 2013 年 12 月 15 日, 近东西向条带的时间范围是 2012 年 6 月 1 日至 2013 年 12 月 15 日。条带外地震的时间范围选取与北西向条带相同, 空间范围为两条条带围成的矩形区域 ($27.75^\circ \sim 35.77^\circ \text{N}$, $107.23^\circ \sim 115.34^\circ \text{E}$)。由于调制作用主要是受半日潮的影响, 因此将平太阴时角度值归算到 $0^\circ \sim 180^\circ$ 后进行每 10° 间隔归一频数分布图绘制, 得到归一频数分图 (图 3), 若图中平太阴时在某角度值附近较为集中, 则可认

为地震与月亮在一天中为该位置时更容易发生地震。从图 3 可以看出地震条带上和条带外的地震平太阴时都较为分散, 表明条带上和条带外的地震发生与地球和月亮在一天中的位置关系不大, 受固体潮的触发作用可能不明显。

1.5 地震条带走向与节面走向的关系

对于地震条带的特征, 刘蒲雄等人^[23]认为条带特征与震源机制和地震类型有一定关系, 条带走向一般接近于未来主破裂面的走向, 条带可能反映与未来主破裂直接有关的断裂带(发震断裂带)的活动。对于本次地震的震源机制和发震构造, 赵凌云等^[22]反演的最佳双力偶震源机制解为节面 I: 走向 166° , 倾角 82° , 滑动角 41° ; 节面 II: 走向 69° , 倾角 49° , 滑动角 169° ; 分析认为此次地震的发震断层为带有逆冲成分的走滑性质断层, 主压应力 P 轴近 EW 向, 主张应力轴近 NS 向, 余震序列主要呈 EW 分布, 少部分呈 NS 方向分布, 判断近 EW 向节面为发震断层。高红亮等人^[16]综合区域地质构造、震源机制解、地震序列空间分布等分析得到相似的结果。现将赵凌云等人^[22]的震源机制解两个节面与两条条带的走向进行对比分析, 发现两个角度差都在 10° 左右, 说明近 EW 向条带与节面 II 对应的发震断层面接近, 也与余震序列的主要分布方向一致, 北西向条带则与节面 I 走向接近。如图 4。

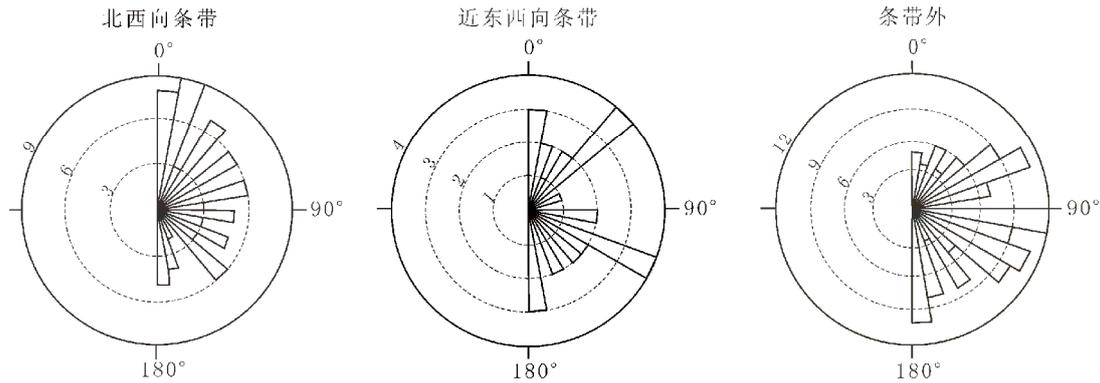


图 3 条带上和条带外的地震平太阳时归一频数分布图

Fig.3 Normalization frequency distribution of local mean lunar time on the belt and out of the belt

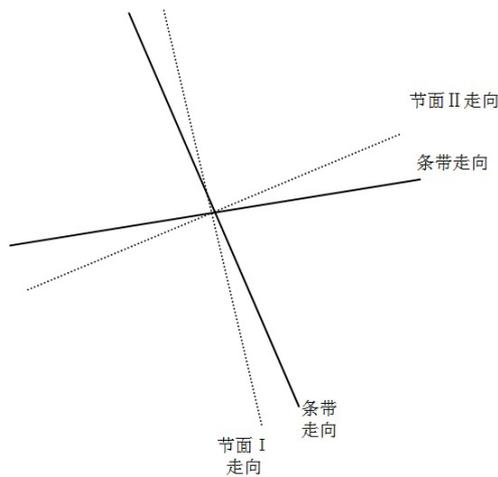


图 4 地震条带走向和节面走向的关系图

Fig.4 The relationship between the strike of seismic belt and the strike of nodal plane

2 视应力时空分布特征

收集巴东 5.1 级地震前震中周围 $M_L \geq 3.0$ 级地震波形资料, 进行视应力计算, 分析视应力的时空变化特征。

2.1 研究资料和计算方法

地震视应力为^[24]

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式(1)中, μ 为剪切模量, E_s 和 M_0 分别为地震辐射能量和标量地震距。在频率域, 对台站记录的地震波资料进行场地响应、仪器响应、几何扩散、路径衰减、震源辐射方向性因子校正之后, 采用 Brune(1970)模型, 获得低频波谱振幅极限、拐角频率等固有参数, 进而根据一定的理论公式

可计算视应力, 具体计算原理见文献^[25-26], 在此不再赘述。

本文计算使用的地震波形资料由国家数字测震台网数据备份中心提供^[27], 选取震中周围 41 次信噪比较高的 $M_L \geq 3.0$ 级地震进行视应力计算。在近震源条件下, 根据各台站记录的波形情况, 选取信噪比较高、记录清晰的波形数据, 取震中距 200 km 以内的台站波形数据计算, 所选地震与台站分布见图 5、图 6。

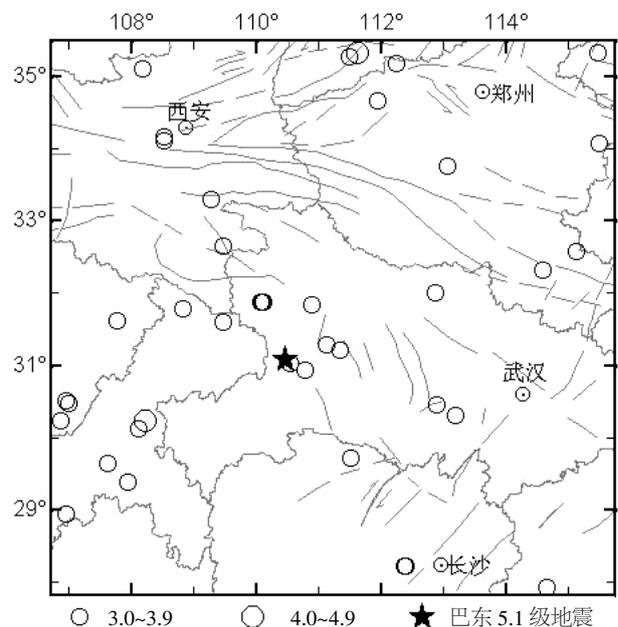


图 5 研究的 $M_L \geq 3.0$ 地震分布图

Fig.5 The distribution map of earthquakes with $M_L \geq 3.0$

2.2 视应力与震级的关系

从地震条带形成开始对条带及周边的 $M_L \geq 3.0$ 级地震进行视应力计算, 选取的地震对应时间段

为2012年5月19日至2013年12月15日,对同一地点的余震进行剔除,选取的41个地震大部分震级在 M_L 3.0~3.9之间, M_L 4.0级以上地震仅2次,对视应力值与震级的关系进行拟合,发现视应力与震级的线性关系不明显。如图7。

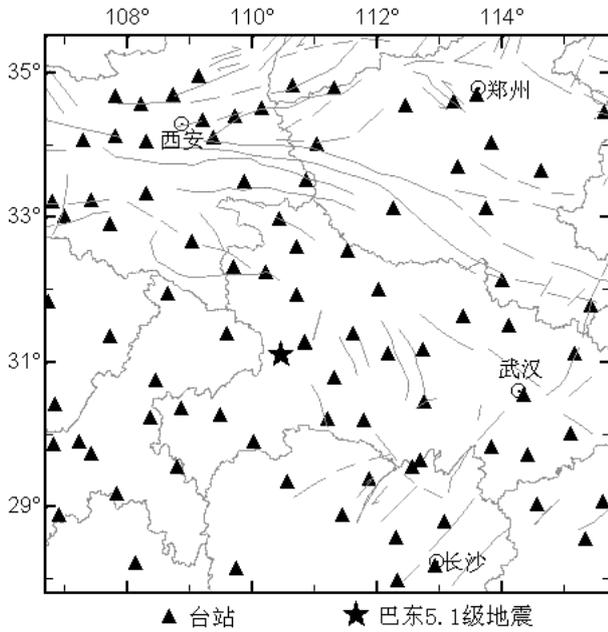


图6 研究区域地震台站分布图

Fig.6 Distribution map of seismic stations in the study area

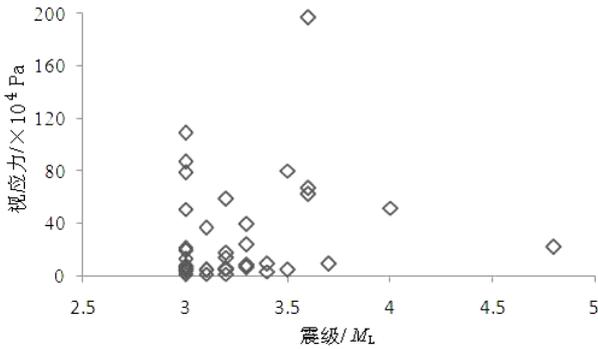


图7 视应力与震级的关系

Fig.7 The relationship between apparent stress and magnitude

2.3 视应力空间分布特征

由图7视应力与震级的关系图分析得出,视应力与震级的线性关系不明显,将41次 $M_L \geq 3.0$ 级地震绘制视应力空间分布图,如图8,可以看出视应力存在明显分区特征,高值区域为震中东北地区,低值区域为震中西南地区,以震中以北60 km处的北西向分界线为界,高值区的地震视应力在0.014~1.97 MPa之间,平均值为0.56 MPa,低

值区的视应力值在0.014~0.22 MPa之间,平均值为0.071 MPa,巴东5.1级地震位于视应力高低值分界线附近。

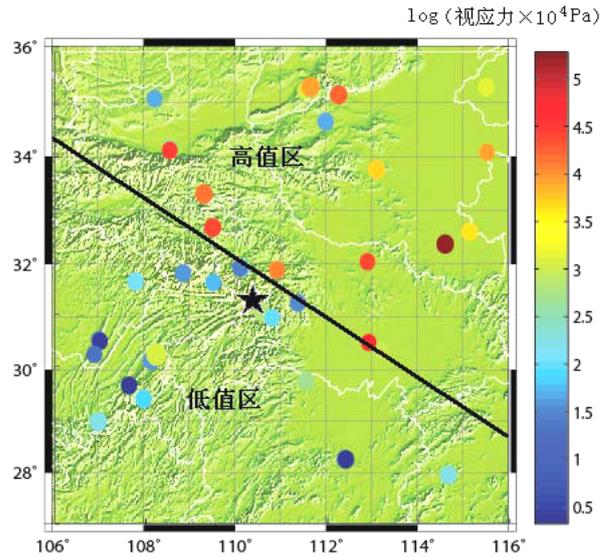


图8 巴东5.1级地震前 $M_L \geq 3.0$ 级地震视应力空间分布

Fig.8 The apparent stress distribution of earthquakes with the $M_L \geq 3.0$ before the Badong M_s 5.1 earthquake

从巴东5.1级地震震中周围历史 $M_s \geq 5.0$ 级地震分布来看(图9),视应力较高的东北地区就是中强地震相对活跃的地区,构造应力水平一直较高,历史上发生了1556年陕西华县8.3级地震。从构造分布来看,东北部高值区域断层分布也更加密集,应力更容易积累,因此应力水平较高。

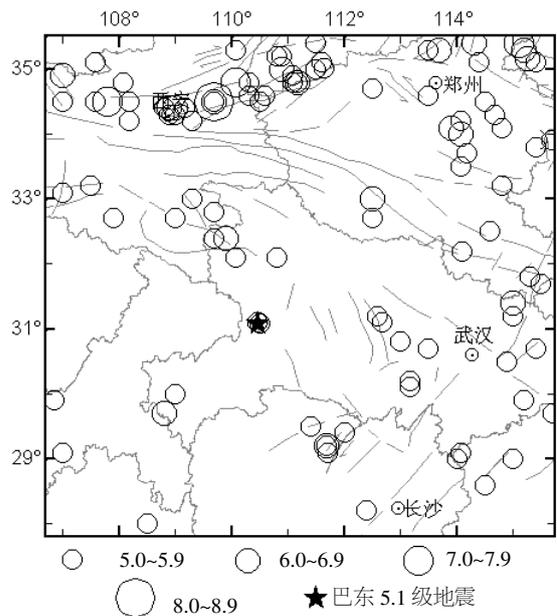


图9 巴东5.1级地震周围历史 $M_s \geq 5.0$ 级地震

Fig.9 Distribution map of historical earthquakes with $M_s \geq 5.0$ around the Badong M_s 5.1 earthquake

2.4 视应力的时间变化特征

选取图 5 中的 $M_L \geq 3.0$ 级地震进行视应力随时间变化分析, 得到视应力值的变化范围为 0.014~1.97 MPa, 平均值为 0.30 MPa, 如图 10, 与中国东部、首都圈东部、鲁东地区和内蒙古西部的视应力平均值相当^[15-18], 该平均值可以反映该地区的

视应力背景水平。从图 10 可以看出, 巴东 5.1 级地震前区域视应力出现了明显的高值异常, 高值异常出现的时段为 2013 年 9 月至 10 月, 2 个月后又发生了巴东 5.1 级地震, 说明此次地震前区域应力场出现明显的增强变化, 地震发生在视应力恢复正常之后。结合空间分布图来看(图 8), 震前应力增强的区域是震中东北地区。

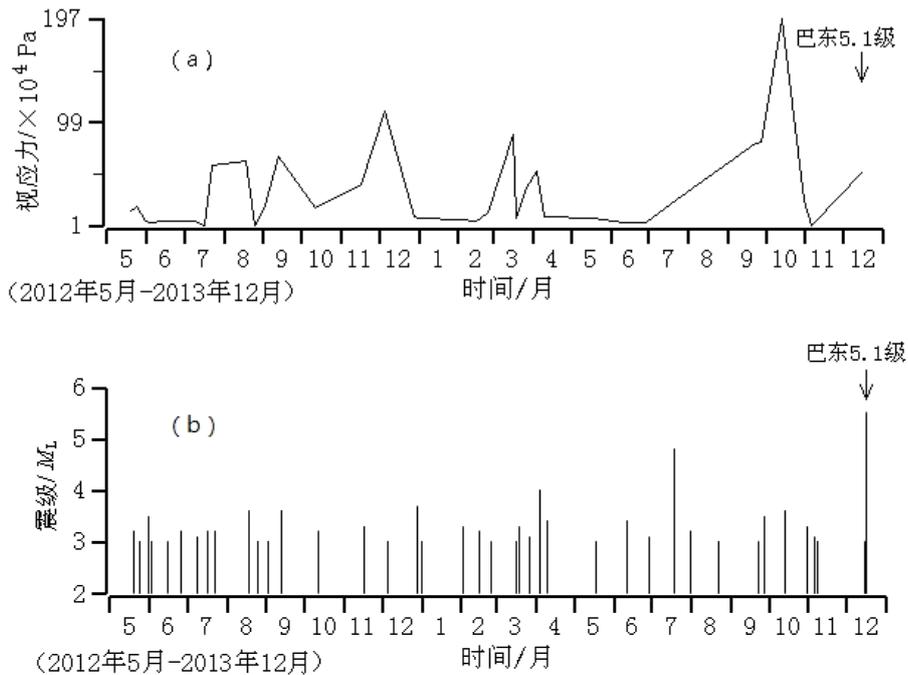


图 10 巴东 5.1 级地震附近震前 $M_L \geq 3.0$ 级地震视应力和震级随时间变化

Fig.10 The apparent stress and magnitude of earthquakes with $M_L \geq 3.0$ changes with time before the Badong M_s 5.1 earthquake

3 结语

(1) 巴东 5.1 级地震前震中周围存在北西向和近东西向交汇的 $M_L \geq 3.0$ 级地震条带, 巴东地震发生在条带交汇区附近。两条地震条带的走向与该地震的震源机制解两组节面的走向接近, 其中近东西向条带与余震序列优势分布方向也较一致, 说明条带可能反映与未来主破裂直接有关的断裂带(发震断裂带)的活动^[23]。通过对条带上的地震与条带外地震的地方平太阴时分析, 发现条带上和条带外地震的地方平太阴时角度集中程度都不高, 说明条带上地震受到的调制作用不明显。

(2) 湖北巴东 5.1 地震前的条带异常持续时间为 19 个月, 条带的起始震级为 M_L 3.0, 两条条带的长轴长分别为 900 km 和 720 km。对于中国大陆及华北地区, 吕坚等^[28]、李莹甄等^[29]对 $M \geq 5.0$ 地震前的条带起始震级、持续时间和条带长轴尺度与主震震级的关系进行了研究, 李莹甄等人的研究结果是条带的持续时间和长轴尺度与主震震级

在 < 5.5 时两者没有显著的相关性, 5 级地震条带的起始震级在 M_L 2.0 以上, 平均为 M_L 2.5 左右, 本文得到的条带参数与主震震级的大小关系与其结论是不相违背的。吕坚等人的研究结果则是持续时间、长轴尺度、起始震级均与主震震级存在一定线性正相关关系, 本文得到的条带规模与主震震级的大小符合其研究得到的统计规律。

(3) 本文计算得到巴东地震震中周围的地震视应力平均值为 0.30 MPa, 与中国东部、首都圈东部、鲁东地区和内蒙古西部的视应力平均值相当^[8,30-32], 反映了该地区的视应力背景水平。巴东 5.1 级地震前震中周围视应力出现了明显的高值异常, 反应了区域应力场的增强, 与前人^[10,33-34]研究结果相符。高值回落后发震, 说明当视应力出现高值异常后, 如出现突然转折下降, 可作为逼近发震时间的一个危险信号^[27]。对于视应力的空间分布, 存在明显的分区特征, 震中东北地区的视应力明显高于西南地区, 高值区域断层分布密集, 历史上中强震频发, 因此构造应力水平相对较高,

与阮祥等人^[35]的研究结果一致。巴东 5.1 级地震发生在视应力高低值分界线附近,与曹凤娟等人^[36]对岫岩 M_s 5.4 地震的研究结果相同,说明对于未来中强地震的发震地点来说,高值异常区域及高低值分界附近都是我们需要密切关注的地方。

(4) 视应力与震级无明显线性关系,与孙业君等人^[37]的研究结果相同,可能和本文选用的地震震级范围较小有关。

致谢: 本文所用程序由浙江省地震局朱新运研究员提供,中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心(SEISDMC, doi:10.11998/SeisDmc/SN)为本研究提供地震波形数据,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 梅世蓉,薛艳,宋治平,等. 华北北部强震前测震学的主要异常及其机理的初步解释[M]//国家地震局预测预防司编. 地震短临预报的理论与方法. 北京:地震出版社, 1997:495-504.
- [2] 陆远忠,吴云,王伟,等. 地震中短期预报的动态图像方法[M]. 北京:地震出版社,2001:273-292.
- [3] 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.
- [4] 程万正,张永久,阮祥,等. 汶川 8.0 级地震前区域应力场动态的研究[J]. 中国地震,2011,27(3):215-225.
- [5] 李艳娥,陈学忠,王恒信,等. 汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力时空变化特征 [J]. 地震,2012,32 (4):114-121.
- [6] 官悦,龙锋,易桂喜,等. 芦山地震前后龙门山断裂带南段视应力研究[J]. 震灾防御技术,2013,8(4):389-396.
- [7] 李赫,刘双庆,刘文兵,等. 唐山 4.8 级地震前后视应力变化研究[J]. 地震工程学报,2014,36(4):1 019-1 025.
- [8] 岳晓媛,武安绪,冯刚,等. 2012 年河北唐山 M_s 4.8 地震前首东部视应力时空变化特征 [J]. 地震,2015,35(2):91-100.
- [9] 岳晓媛,武安绪,冯刚,等. 首都圈中强震前后视应力时空演化过程研究[J]. 地震,2016,36(2):119-131.
- [10] 蔡杏辉. 福建仙游 5.0 地震前后小地震视应力变化研究 [J]. 大地测量与地球动力学,2015,35(6):984-986.
- [11] 陈丽娟,李艳娥,杨立明,等. 2013 年 7 月 22 日岷县 M_s 6.6 地震前后视应力研究[J]. 地震,2015,35(4):30-42.
- [12] 赵凌云,张辉,陈俊华,等. 基于 CAP 方法的 2013 湖北巴东 5.1 级地震震源机制与发震构造研究[J]. 地震工程学报,2014,36(4):1 014-1 018.
- [13] 李献瑞,曾佐勋,周强,等. 三峡库区巴东地震(M_s 5.1)成因机制及次声波信号[J]. 地震工程学报,2014,39(12):1 794-1 806.
- [14] 陈俊华,陈正松,蒋玲霞,等. 巴东 M_s 5.1 地震成因研究 [J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(3):10-14.
- [15] 雷东宁,陈俊华,张丽芬,等. 湖北巴东 M_s 5.1 地震构造背景分析[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(3):6-9.
- [16] 高红亮,姚运生,张丽芬. 2013 年湖北巴东 M_s 5.1 地震成因机制探讨[J]. 防灾科技学院学报,2015,17(3):17-23.
- [17] 曾新福,吕坚. 华东南地区 5.5 级以上地震前的地震活动图像异常研究[J]. 地震,2016,36(3):116-124.
- [18] 陈荣华,丁香. 大地震前震源区附近显著地震地方平太阴时分分布特征及解释[J]. 地球物理学报,1996,39 (增刊):224-230.
- [19] 陈荣华. 显著地震地方平太阴时分分布及其在伽师地震短临预报中的应用[J]. 地震,1998,18(2):134-140.
- [20] 吴立辛,马禾青. 显著地震地方平太阴时分分布与后续中强地震的关系[J]. 高原地震,2001,13(4):41-140.
- [21] 刘泽民,李敏莉,闫素萍,等. 地震地方平太阴时集中程度的空间扫描在地震研究中的应用[J]. 地震地磁观测与研究,2006,27(5):6-11.
- [22] 刘泽民,郑先进,沈小七,等. 地震地方平太阴时集中程度的时间扫描在地震预报中的应用研究[J]. 地震地磁观测与研究,2009,30(2):1-8.
- [23] 国家地震局预测预防司. 地震预报方法实用化研究文集 [M]. 北京:学术书刊出版社,1989.
- [24] Wyss M. Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in renches [J]. Geophys J R astr Soc, 1970,19:479-484.
- [25] 于俊谊,朱新运. 浙江珊溪水库地震震源参数研究[J]. 中国地震,2008,24(4):379-387.
- [26] 朱新运,于俊谊. 基于 MATLAB 的小震震源参数计算软件研制[J]. 西北地震学报,2008,30(4):380-384.
- [27] 郑秀芬,欧阳飏,张东宁,等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报,2009,52(5):1 412-1 417.
- [28] 李莹甄,王海涛,郭成栋,等. 中国大陆地震条带统计特征分析[J]. 地震学报,2011,33(5):568-581.
- [29] 吕坚,宋美琴,周龙泉,等. 基于中国震例的地震空区和地震条带统计特征[J]. 地震,2016,36(4):22-33.
- [30] 张彬,杨选辉. 中国大陆地震视应力空间分布研究[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(5):26-30.
- [31] 王鹏,郑建常. 鲁东地区视应力时空变化特征分析[J]. 地震,2014,34(4):70-77.
- [32] 刘芳,孙豪,张莲荣. 内蒙古中西部地区视应力背景水平研究[J]. 华北地震科学,2009,27(1):7-12.
- [33] 陈丽娟,李艳娥,杨立明,等. 2013 年 7 月 22 日岷县 M_s 6.6 地震前后视应力研究[J]. 地震,2015,35(4):30-42.
- [34] 梁向军,李丽,宋美琴,等. 山西地区视应力时空变化特征分析[J]. 中国地震,2014,30(1):102-110.
- [35] 阮祥,程万正,乔惠珍,等. 马边-大关构造带震源参数及应力状态研究[J]. 地震研究,2010,33(4):294-300.
- [36] 曹凤娟,尹涛,马丽,等. 岫岩 M_s 5.4 地震前后视应力时空变化特征[J]. 东北地震研究,2005,21(1):14-19.
- [37] 孙业君,刘红桂,江昊琳,等. 江苏及邻近地区地震视应力特征研究[J]. 地震研究,2015,38(1):35-41.