

2014年云南3次强震前后震源机制 一致性时空演化特征^{*}

刘自凤¹, 付虹¹, 彭关灵¹, 赵小艳¹, 李孝宾², 茶文剑²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局滇西地震预报实验场办公室, 云南 大理 671000)

摘要: 利用2008—2019年云南及其邻区3 121次 $M \geq 2.5$ 地震的震源机制解资料, 采用叠加应力场反演方法反演了不同时段云南地区应力张量方差空间变化和2014年3次强震震区的时间变化, 分析了强震前后震源机制一致性参数的时空演化特征。结果表明: 3次强震震中位于应力张量方差低值区域或其边缘, 各震源区震前空间演化存在明显的区域差异性, 地震发生后应力张量方差快速回升, 同时在滇西和滇南—滇西南地区形成2个低值区域; 3次强震前3~5年震源区应力张量方差变化过程总体呈正“V”字型, 下降过程持续2年左右后开始转折并趋势回升, 在正“V”字型形成过程的趋势回升阶段发生地震, 回升至发震的时间间隔为1~3年。初步分析认为, 3次强震前震源区的震源机制趋于一致是孕震过程中应力增强的一种表现, 随着时间推移应力张量方差趋势下降后发生转折, 表明发生强震的危险性增强。

关键词: 强震; 震源机制一致性; 应力张量方差; 时空演化

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0348-07

0 引言

陈颙(1978)在研究几次强震震例的前震、余震和震群时, 发现其各自表现出不同的特点, 前震震源机制相对一致, 进而提出了震源机制一致性的概念, 并提出可用震源机制一致性来判定地震危险性。表征震源机制一致性的参数统称为震源机制一致性参数, 该参数是衡量震源释放应力场与区域应力场一致性程度的定量指标, 常被作为判断地震危险性的重要判据之一。多年来, 国内外众多研究者利用中小地震震源机制解的不同参量研究震源机制一致性参数的时空变化特征, 如小震综合断层面解的时空分布以及综合断层面解矛盾比的时空变化(刁桂苓, 于新昌, 1980, 1982)、小震P波初动的时空分布(阎明, 赵仲和, 1989)、震源机制解主压应力P轴的时空变化(许忠淮等, 1979, 1983; 阚荣举等, 1983)、各个震源机制解的P, T, B轴和构造应力场的3个应力主轴在三维空间的夹角之和(刁桂苓等, 2004; 赵英萍等, 2004)、Misfit角和应力张量方

差(Michael, 1984, 1987)、空间最小旋转角(万永革, 2008)、体波谱振幅相关系数(Lund *et al*, 2002)等。大量研究表明, 对中小地震震源机制解进行综合分析有可能捕捉到与强震发生有关的应力场变化信息。

云南强震频发, 1900年1月1日—2019年10月31日共发生93次 $M \geq 6.0$ 地震, 其中88%的地震的发震时间间隔为3年。因此, 在云南震情跟踪工作中, 常以 $M \geq 6.0$ 地震平静超过3年作为强震预测指标。2014年云南先后发生了2014年5月30日盈江 $M_s 6.1$, 8月3日鲁甸 $M_s 6.5$ 和10月7日景谷 $M_s 6.6$ 地震, 强震呈连发态势。在此次地震连发前, 云南 $M \geq 6.0$ 地震已出现4.9年的超长时间平静期。2014年地震连发后又进入平静状态, 目前平静时间已超过5年。为了寻找长期平静背景下与3次强震有关的应力场时空演化信息, 本文基于2008年1月1日—2019年10月31日云南地区中小地震震源机制解, 采用Michael等(1984, 1987, 1990)提出的叠加应力场反演方法, 反演2014年云南3次 $M \geq 6.0$ 强震前后不同时段震源机制一致性参数的空间演化特征和震源区的时间

^{*} 收稿日期: 2019-01-10.

基金项目: 云南省地震科技专项(2020ZX02)、2020年中国地震局监测预报司地震大形势项目子课题《云南地区地震精确定位》、云南省地震局科技专项(2018ZX02)和中国地震局星火计划(XH18042Y)联合资助。

演化特征, 以期为平静背景下的强震形势研判提供动力学依据。

1 资料选取及可靠性分析

1.1 资料选取及预处理

本文震源机制解数据主要由3部分构成: 2008年震源机制解采用徐彦(2013)利用全波形反演方法得出的 $M_L \geq 3.0$ 中小地震的计算结果; 2009—2012年 $M_L \geq 2.5$ 地震震源机制解以基于P波初动和振幅比的HASH方法计算结果为主, 用徐彦(2013)的计算结果补缺; 2013年1月1日—2019年10月31日 $M_L \geq 3.5$ 地震震源机制解为CAP反演结果, $2.5 \leq M_L < 3.5$ 地震则采用HASH方法的计算结果。

2.9地震1660次, $M_{3.0} \sim 3.9$ 地震1175次, $M_{4.0} \sim 4.9$ 地震238次, $M_{5.0} \sim 5.9$ 地震41次, $M_{6.0} \sim 6.9$ 地震7次, 震中分布如图1所示。从图中可见, 除中甸西部地区外, 所选地震在云南省内其他区域均分布较广, 这为开展云南地区震源机制一致性参数空间分布特征的研究工作提供了条件。

1.2 资料可靠性分析

全波形模拟法(Xu *et al.*, 2010; Herrmann *et al.*, 2011)模拟的是高频的速度值而不是低频的位移值, 能更好地降低低频的台站和仪器噪音的干扰; CAP方法反演时完整地使用了波形记录, 能够反映较全面的震源信息, 且该方法允许各时间窗理论波形和观测波形的相对滑动拟合, 大大减少了对速度模型和地壳横向不均匀性的依赖(Zhu *et al.*, 1997; 郑勇等, 2009; 吕坚等, 2013; 罗钧等, 2015; 王光明等, 2018; 潘睿等, 2019), 最终运用网格搜索方法搜索出理论波形与观测波形差异最小时的震源机制解为最佳解; HASH方法的优点在于量化估计定位、深度和速度结构偏差引起的震源机制计算的不确定度, 不存在多解性, 此方法还从断层不确定度、台站分布等参数出发, 科学、合理、全面地对结果进行了评价(郭祥云, 2014)。可见, 本研究选取由上述3种方法获得的震源机制解结果进行震源机制一致性分析是相对可靠的。

2 计算方法

本文采用Zmap软件包(Wiemer, Malone, 2001)集成的叠加应力场反演方法(Superposition Stress Inversion, 简称SSI)反演震源机制机制一致性参数, 该方法是通过在均匀应力场上叠加扰动来模拟非均匀应力场的分布, 并获得3个主应力轴 S_1 , S_2 , S_3 (分别代表压应力轴、中等应力轴和张应力轴)的空间分布及相对大小 $\varphi = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3)$ 以及反演方差(variance)。反演方差被定义为 misfit 角度(单个地震的滑动矢量与在假设应力张量作用下产生的理论滑动矢量之间的夹角)与其平均数之差的平方和的平均数, 是衡量地震震源释放应力场与区域构造应力场一致性程度的定量指标(Michael *et al.*, 1987, 1990)。当方差 < 0.1 时, 可以用1个统一的应力张量解释观测到的震源机制解, 也可以理解为该区域的应力场是均匀

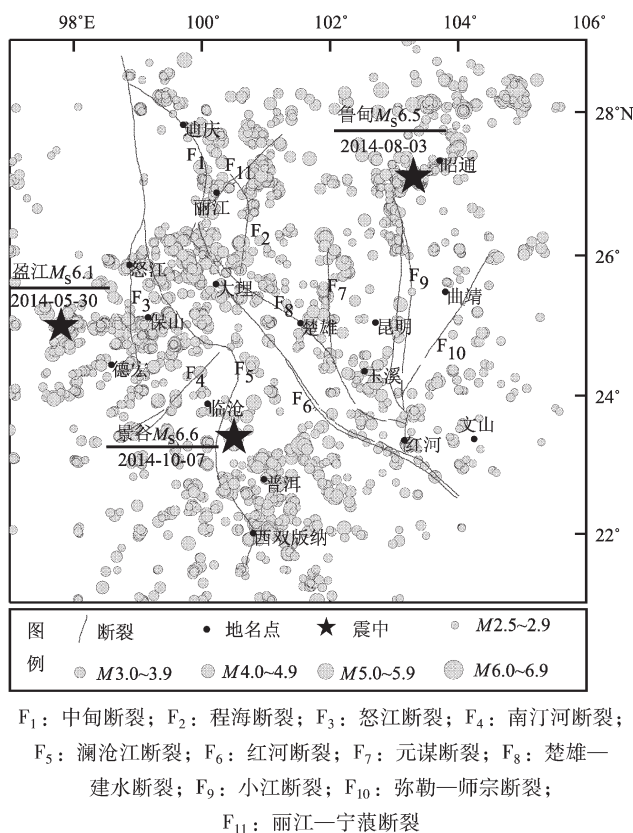


图1 云南地区3121次地震震中分布图
Fig. 1 A map of the epicenters of the 3121 earthquakes in Yunnan province

为了排除余震序列对震源机制一致性参数的影响, 本文对其进行剔除, 最终获得2008年1月1日—2019年10月31日云南及邻区共计3121次 $M_{2.5} \sim 6.9$ 地震的震源机制节面解, 其中 $M_{2.5} \sim$

的,震源机制趋于一致;当方差 >0.2 时,表明该区域的应力场在时间和空间上具有非均匀性,或者说该区域的震源机制比较紊乱 (Lu *et al.*, 1997)。

3 震源机制一致性参数时空演化特征

3.1 强震前空间演化特征

为了分析强震前震源机制一致性参数空间演化特征,将地震集中区域按照 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 进行网格化,选取每个网格节点及其周围至少 30 个地震的震源机制解,反演了 2008—2013 年不同时间段每个节点的应力张量方差,反演结果如图 2 所示。由图可知,鲁甸 $M_s6.5$ 和景谷 $M_s6.6$ 地震发生在应力张量方差的低值区域内,盈江 $M_s6.1$ 地震发生在低值区域边缘。使用 2008—2010 年 559 次地震震源机制解反演得到的应力张量方差显示滇东

北鲁甸—西昌地区、小滇西腾冲—潞西一带和滇西南的勐海—澜沧—景谷地区相对偏低 (图 2a)。2008—2011 年,759 次地震的震源机制解反演结果显示,怒江—腾冲—潞西—盈江地区应力张量方差下降最为显著,鲁甸震区的低值现象更为显著,且有同时向主震震中迁移的趋势,景谷震区变化不大 (图 2b)。2008—2012 年反演了 974 次地震震源机制解,反演结果显示滇西地区的应力张量方差低值区域出现从小滇西向滇西北地区扩展的趋势,滇西南低值区域在景谷和勐海地区展布,而澜沧地区的应力张量方差出现回升,鲁甸震区变化不大 (图 2c)。2008—2013 年,共获得云南及邻区 1 157 次中小地震震源机制解,图 2d 显示在云南地区形成 3 个应力张量方差的低值主体区域,分别为滇西地区的盈江—腾冲—保山—大理—丽江一带、滇东北的鲁甸—西昌一带和滇西南的

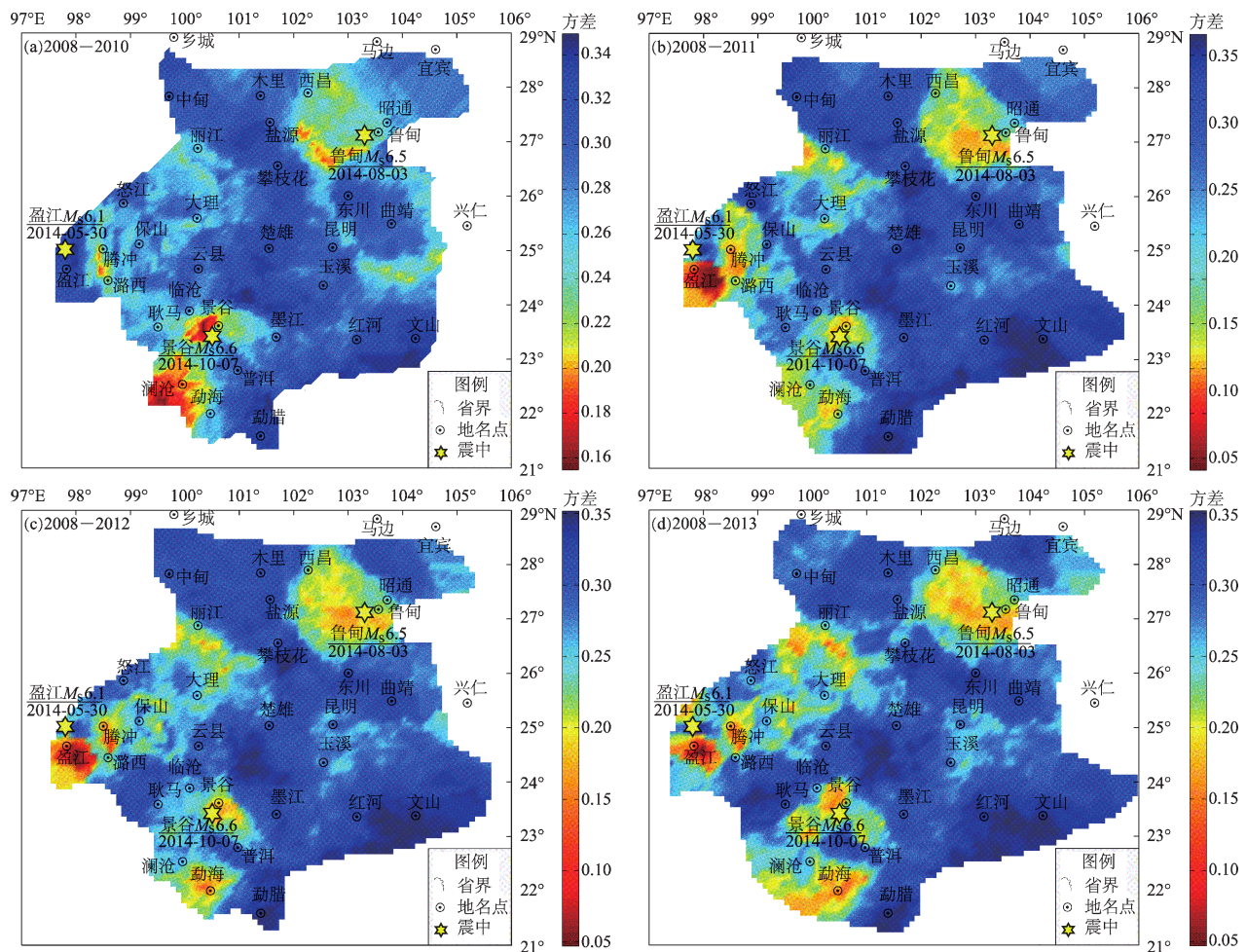


图 2 强震前应力张量方差空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of stress tensor variances in different periods before strong earthquakes

普洱—景谷—勐海地区。对比不同时段应力张量方差低值区域演化特征可以发现，盈江震区低值区域出现时间较晚，鲁甸和景谷震区低值区域出现时间较早，且低值变化较为稳定的状态。

3.2 强震后空间演化特征

为了分析3次强震后云南地区的震源机制一致性参数空间演化特征，将2015年1月—2019年10月云南地区1710次中小地震震源机制解按照 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 进行网格化，选取每个网格节点及其周围至少30个地震的震源机制解反演了不同时间段每个节点的应力张量方差，反演结果如图3所示。2015—2016年，滇东北地区应力张量方差迅速回升为高值；盈江震区应力张量方差低值现象消失，但与其临近的耿马—澜西—腾冲—保山—怒江—大理地区出现大面积低应力张量方差区域；在玉溪—墨江—普洱地区也形成了滇南至滇西南

地区的应力张量低值主体区域。虽然2015—2019年，在2个应力张量方差低值区域或其边缘先后发生了沧源 $M_s5.5$ 、昌宁 $M_s5.1$ 、云龙 $M_s5.0$ 、漾濞 $M_s5.1$ 、通海 $M_s5.0$ 双震和墨江 $M_s5.9$ 地震，但截至2019年10月的反演结果（图3d）显示，滇南—滇西南地区的玉溪—墨江—普洱地区、滇西的保山—大理—怒江地区应力张量方差依然低，可见这些地区应力水平较高，仍然存在发生破坏性地震的危险。

3.3 强震前后震源区时间演化特征分析

应力张量方差的低值区域震源机制趋于一致，常用于预测发震地点，而其时序分布则用来预测发震时间。2014年3次强震前震源区及其邻区均出现了应力张量方差低值现象。为了分析3次强震前后震源区应力张量方差的时间演化特征，分别选取3次强震震源区的震源机制解（盈江、鲁甸、

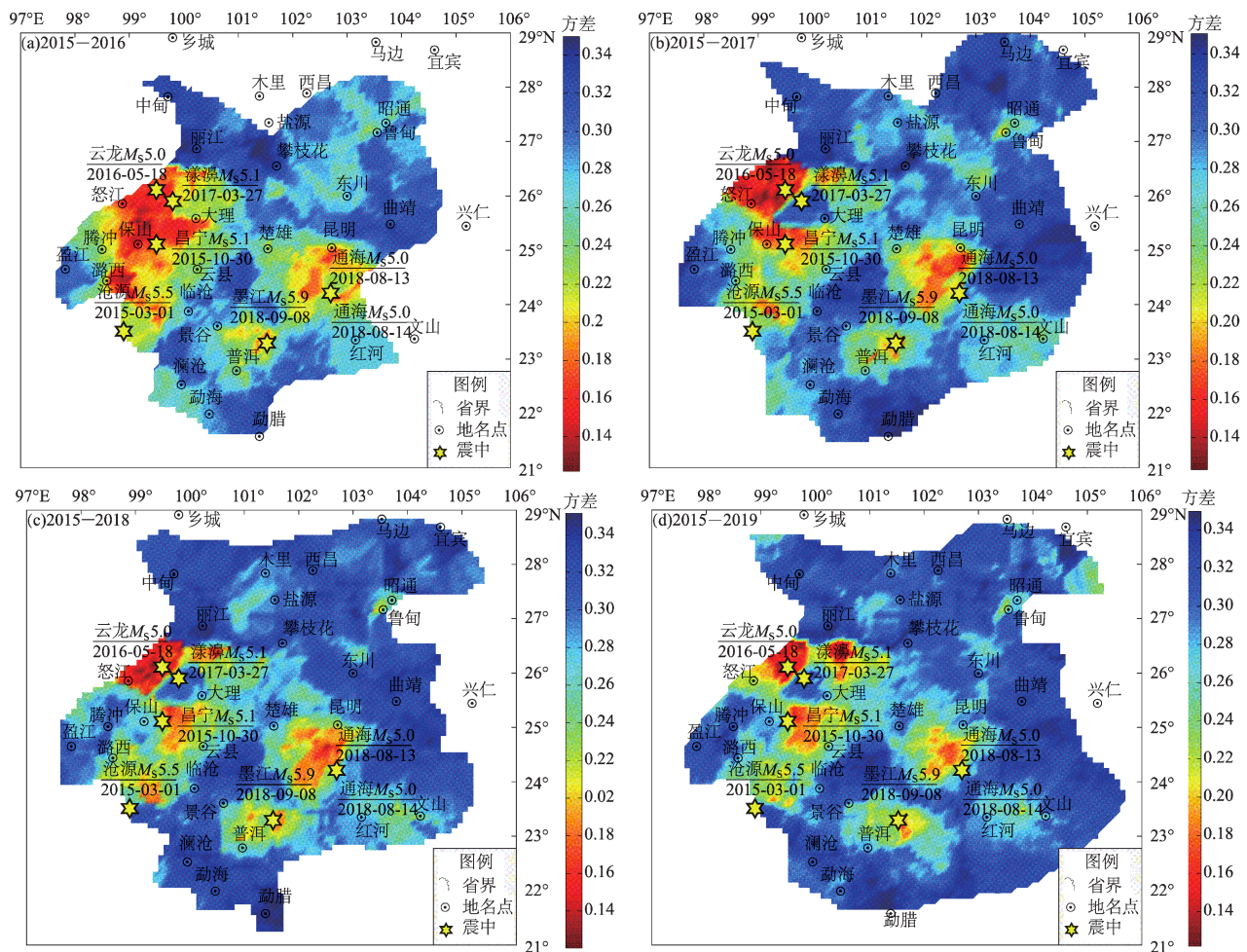


图3 强震后应力张量方差空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of stress tensor variances in different periods after strong earthquakes

景谷震区分别选取 415 次、563 次、329 次地震震源机制解), 取 50 个地震为窗长, 10 个地震为步长, 反演得到 3 个强震震区的应力张量方差的时序变化, 见图 4。图 4a 显示, 盈江 $M_s 6.1$ 地震前, 应力张量方差自 2009 年 7 月开始趋势下降, 下降持续约 2 年, 并于 2011 年 3 月达最低值 (约 0.06) 后发生转折, 并开始趋势上升, 上升后 3 年左右发生盈江 $M_s 6.1$ 地震, 震前应力张量方差最大降幅约 0.27, 而地震发生后应力张量方差变化较为平稳。鲁甸 $M_s 6.5$ 地震前应力张量方差也经历了下降—回升过程, 应力张量方差最大降幅约 0.10。2012 年 7 月左右出现转折, 总体开始呈趋势上升, 上升过程持续 2 年左右发生鲁甸 $M_s 6.5$

强震, 地震发生后应力张量方差仍持续波动上升, 目前处于高值水平 (图 4b)。2011 年 7 月—2013 年 7 月景谷震区应力张量方差显示趋势下降, 最大降幅约 0.06, 于 2013 年 7 月发生转折回升后, 持续 1 年多发生景谷 $M_s 6.6$ 强震, 地震发生后, 应力张量方差出现转折并开始小幅下降, 2015 年 10 月左右以来持续波动上升 (图 4c)。

3 次强震前震区应力张量方差总体上经历了下降—转折—回升—发震的变化过程, 呈正“V”字型变化, 且地震均发生在正“V”字型形成过程中的趋势回升阶段, 但鲁甸地震和景谷地震前在低值阶段出现过波动变化, 期间还出现小幅度、短时间的倒“V”字型变化过程。对比 3 次强震震前应力张量方差下降过程和回升—发震过程的持续时间发现, 下降过程均持续 2 年左右出现转折回升, 而转折—回升—发震过程存在较大差异, 盈江震区转折—发震持续约 3 年, 鲁甸震区约 2 年, 而景谷震区仅持续约 1 年。

4 结论与讨论

本文利用 2008 年 1 月 1 日—2019 年 10 月 31 日云南地区 3 121 次地震的震源机制解反演了 2014 年盈江 $M_s 6.1$ 、鲁甸 $M_s 6.5$ 和景谷 $M_s 6.6$ 强震前后不同时间段的应力张量方差, 分析了 3 个震源区震源机制一致性的时空演化特征, 主要得到以下结论:

(1) 3 次强震均发生在应力张量方差低值区域及其边缘, 应力张量方差的低值表征震源机制趋于一致且区域应力水平高, 因此分析认为应力水平增强是 3 次强震发生前震源区的共性变化特征。

(2) 3 次强震震中应力张量方差变化特征存在差异, 鲁甸和景谷震区低值区域出现的时间比盈江震区要早。盈江震区低值区域表现出逐渐扩张形成的特征, 鲁甸震区应力张量方差低值区域在震前则出现逐渐向震中迁移并收缩的现象; 景谷震区震前经历了低值区域一分为二的分离过程, 之后震中小范围内的低值区域变化不大, 但震区附近的澜沧、勐海、普洱地区变化较大。由此可见, 强震前应力场的空间演化是一个复杂过程, 不同区域的表现形式不同, 因此不同区域都需要对更多的震例进行研究, 寻找更为有效的震前未来发震地点预测判据。

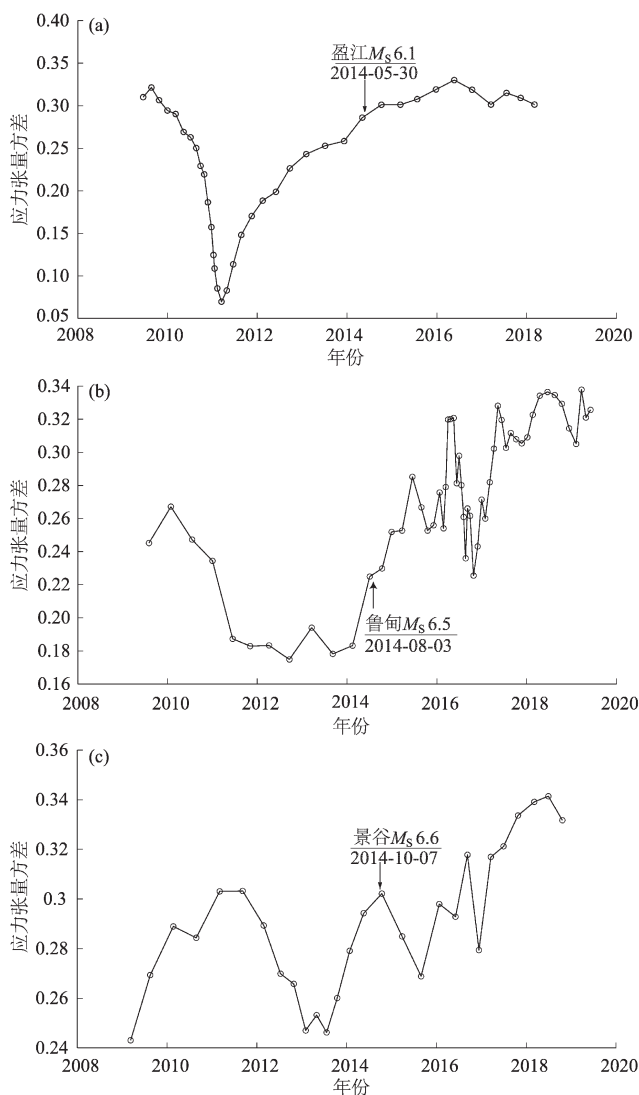


图 4 2014 年 3 次强震震源区应力张量方差时序图

Fig. 4 Time series of stress tensor variance in focal region of three strong earthquakes in 2014

(3) 3次强震发生后, 3个震区附近应力张量方差低值区域迅速消失, 而在小滇西至滇西北和滇南至滇西南地区形成2个应力张量低值主体区域。根据应力张量变化与应力水平之间的关系分析认为, 2014年强震后新形成的低值区域应力水平较高, 应注意存在发生强震的可能。

(4) 3次强震前3~5年震源区的应力张量方差时间变化特征总体呈正“V”字型变化, 并在下降过程持续2年左右后, 开始出现转折并趋势回升, 在正“V”字型形成过程中的趋势回升阶段发生地震, 但回升至发震过程的时间间隔存在差异, 景谷地震最短, 鲁甸地震次之, 盈江地震最长。由此可见, 应力张量方差回升至发震时间长短与震级大小没有直接关系, 强震前的应力场时间变化是一个复杂的过程。

(5) 鲁甸 $M_s6.5$ 和景谷 $M_s6.6$ 地震前, 应力张量方差均在低值阶段出现波动变化, 期间还表现出小幅度、短时间的倒“V”型变化过程, 这是否属于 $M \geq 6.5$ 地震前的共性变化特征还需要更多震例加以验证。

综上所述, 根据震源机制一致性参数空间分布可以预测强震的发震地点, 时间预测方面则适合用于中-长期预测。但小震震源机制解具有一定的不确定性, 可能会对计算结果产生一定的影响, 因此今后需要结合其它地震学参数和地球物理场观测资料进行综合判定。

参考文献:

- 陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 21(2): 142-159.
- 刁桂苓, 于新昌. 1980. 唐山地震前后京津唐张地区的综合断层面解[J]. 西北地震学报, 2(3): 39-47.
- 刁桂苓, 于新昌. 1982. 海坨山地震前综合断层面解矛盾比的变化[J]. 地震, (5): 16-17.
- 刁桂苓, 赵英萍, 啜永清, 等. 2004. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 内陆地震, 18(3): 202-206.
- 郭祥云. 2014. 中小地震震源机制解的测定及其在地震趋势分析中的应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 11-13.
- 阚荣举, 刘祖荫, 王绍晋, 等. 1983. 龙陵地区大地震前后平均应力轴取向的时间变化[J]. 地球物理学报, 26(6): 564-573.
- 吕坚, 郑秀芳, 肖健, 等. 2013. 2012年9月7日云南彝良 $M_s5.7$ 、 $M_s5.6$ 地震震源破裂特征与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 56(8): 2645-2654.
- 罗钧, 赵翠萍, 周连庆. 2015. 2013年8月香格里拉德钦-得荣 $M_s5.9$ 地震序列震源机制与应力场特征[J]. 地球物理学报, 8(2): 424-435.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017年云南漾濞 $M_s5.1$ 及 $M_s4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定[J]. 地震研究, 42(3): 338-348.
- 万永革. 2008. 美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致现象的研究[J]. 中国地震, 24(3): 216-225.
- 王光明, 刘自凤, 赵小艳, 等. 2018. 2018年云南通海 $M_s5.0$ 地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究, 41(4): 503-510.
- 徐彦. 2013. 云南地区 $M_L3.0$ 以上中小地震震源机制解汇编[M]. 昆明: 云南科技出版社, 168-186.
- 许忠淮, 刘玉芬, 张郅珍. 1979. 京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征[J]. 地震学报, 1(2): 121-132.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, 5(3): 268-279.
- 阎明, 赵仲和. 1989. 地震监测与预报方法清理成果汇编测震学分册——唐山地震前后京津唐张地区小震初动符号的时空分析[M]. 北京: 地震出版社, 256-264.
- 赵英萍, 刁桂苓, 高景春, 等. 2004. 张北强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 华北地震科学, 22(1): 1-4.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413-426.
- Herrmann R B, Malagnini L, Munafo I. 2011. Regional moment tensors of the 2009 L'Aquila earthquake sequence[J]. Bull Seismol Soc Am, 101(3): 210-215.
- Lu Z, Wyss M, Pulpan H. 1997. Detail of stress directions in the Alaska subduction zone from fault plane solutions[J]. J Geophys Res, 102(B3): 5383-5402.
- Lund B. 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes[J]. Bull Seismol Soc Am, 77(2): 347-365.
- Michael A J, Ellsworth W L, Oppenheimer D H. 1990. Coseismic stress changes induced by the 1989 Loma Prieta, California earthquake[J]. Geophys Res Lett, 17(9): 1441-1444.
- Michael A J. 1984. Determination of stress from slip data; Faults and folds[J]. J Geophys Res, 89(B13): 11517-11526.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress; A control study[J]. J Geophys Res, 92(B1): 357-368.
- Wiemer S, Malone S. 2001. A software package to analyze seismicity; ZMAP[J]. Seism Res Lett, 72(2): 374-383.
- Xu Y, Herrmann R B, Koper K D. 2010. Source parameters of regional small-to-moderate earthquakes in the Yunnan-Sichuan region of China[J]. Bull Seismol Soc Am, 100(5B): 2518-2513.
- Zhu L P, Helmberger D V, Saikia C K, et al. 1997. Regional waveform calibration in the Pamir-Hindu Kush region[J]. J Geophys Res, 102(B10): 22799-22813.

Temporal and Spatial Evolutionary Characteristics of Focal Mechanism Consistency before and after Three Strong Earthquakes in Yunnan in 2014

LIU Zifeng¹, FU Hong², PENG Guanling¹, ZHAO Xiaoyan¹, LI Xiaobin², CHA Wenjian²

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Office of the Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China Earthquake Administration, Dali 671000, Yunnan, China*)

Abstract

Using the focal mechanism data of 3 121 earthquakes $M_L \geq 2.5$ in Yunnan from 2008 to 2019, the spatial variation of the variance of the stress tensor and the temporal variation of the three strong earthquakes in 2014 were inversely used by using the method of superposition stress field inversion, the temporal and spatial evolution characteristics of focal mechanism parameters before and after strong earthquakes were further analyzed. The results show that the epicenters of the three strong earthquakes are located in the region or the edge of the low variance of the stress tensor, and there are obvious regional differences in the spatial evolution before the earthquakes in each seismic region. The variance of stress tensor rises rapidly after earthquake, at the same time, two regions with low variance of stress tensor are formed in Western and south – southwest Yunnan. Change process about variance of stress tensor in the focal region generally showed a positive “V” shape in the three to five years before the three strong earthquakes, the descending process lasted for about two years and then began to turn and trend to rise again, the earthquake occurred in the rising phase of the “V” shape forming process, and the time interval between the rising and the occurrence of an earthquake is 1 to 3 years. The preliminary analysis shows that the focal mechanism of the source region before the three strong earthquakes tends to be the same, which is a manifestation of the stress enhancement in the seismogenic process. The turning point of the stress tensor variance after the decreases with time indicates that the urgency of strong earthquake is increased.

Keywords: strong earthquakes; focal mechanism consistency; variance of stress tensor; evolution in time and space