

徐志国,梁姗姗,刘敬光,等,2021. 2020 年云南巧家 M_s 5.0 地震微震检测及发震构造初步探讨. 中国地震,37(2):390~399.

2020 年云南巧家 M_s 5.0 地震微震检测 及发震构造初步探讨

徐志国^{1,2)} 梁姗姗³⁾ 刘敬光³⁾ 翟璐媛³⁾ 史健宇¹⁾ 周元泽²⁾

1) 国家海洋环境预报中心,北京 100081

2) 中国科学院大学,地球与行星科学学院,北京 100049

3) 中国地震台网中心,北京 100045

摘要 利用匹配定位方法对 2020 年 5 月 18 日云南巧家 M_s 5.0 地震震后 24h 震源附近台站记录的连续波形进行遗漏地震扫描和定位,共识别出 327 个地震事件,约为台网目录的 2.4 倍,最小完整震级由最初的 M_L 1.9 降至 M_L 1.1。随后,依据最新目录计算了震后震源区的 b 值,并结合余震展布形态,初步分析此次地震发震构造。研究结果显示,余震序列在平面上显示出 NNW-SSE 优势展布方向,长度约 14km,震源优势深度集中在 3~15km;深度剖面展示出主震的发震断面较陡,并且具有向西倾的趋势。综合主震震源机制解、余震展布形态和周边地质构造背景,认为巧家 M_s 5.0 地震发震断层可能为 NNW-SSE 向走滑性质的断裂,与 2014 年鲁甸 M_s 6.5 地震的发震构造密切相关。

关键词: 匹配定位方法 微震检测 巧家 M_s 5.0 地震 发震构造

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0390-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网中心(CENC)正式测定,北京时间 2020 年 5 月 18 日 21 时 47 分云南昭通市巧家县发生 M_s 5.0 地震,震中位于 27.18°N、103.16°E,震源深度 8km。此次地震震级不大,但由于震源较浅,云南昭通、四川宜宾与西昌等地震感明显,造成了一定程度的人员伤亡和财产损失。

巧家 M_s 5.0 地震发生于川滇菱形块体东缘的南北地震带中南段的 NE 向早更新世活动的莲峰断裂和 NE 向昭通-鲁甸断裂之间(徐锡伟等,2014)(图 1(a))。这 2 条断裂带属于川滇块体-华南地块边界带,也是大凉山次级块体与华南地块之间的边界带。由于受印度板块 NE 向俯冲碰撞的影响,研究区域内构造运动较强烈,中强地震活跃。该区内曾发生 1974 年 5 月 11 日云南永善大关 M_s 7.1 地震。同时,自 2000 以来,沿 NE 向昭通-鲁甸地震断裂附近

[收稿日期] 2021-01-01 [修定日期] 2021-03-16

[项目类别] 国家自然科学基金(42074103)资助

[作者简介] 徐志国,男,1979 年生,高级工程师,主要从事震源机制反演与海啸预警研究。E-mail: xuzhg04@sina.com

周元泽,通讯作者,男,1972 年生,教授,主要从事地球内部结构、地震波传播及地震信号分析等教学科研工作。E-mail: yzzhou@ucas.ac.cn

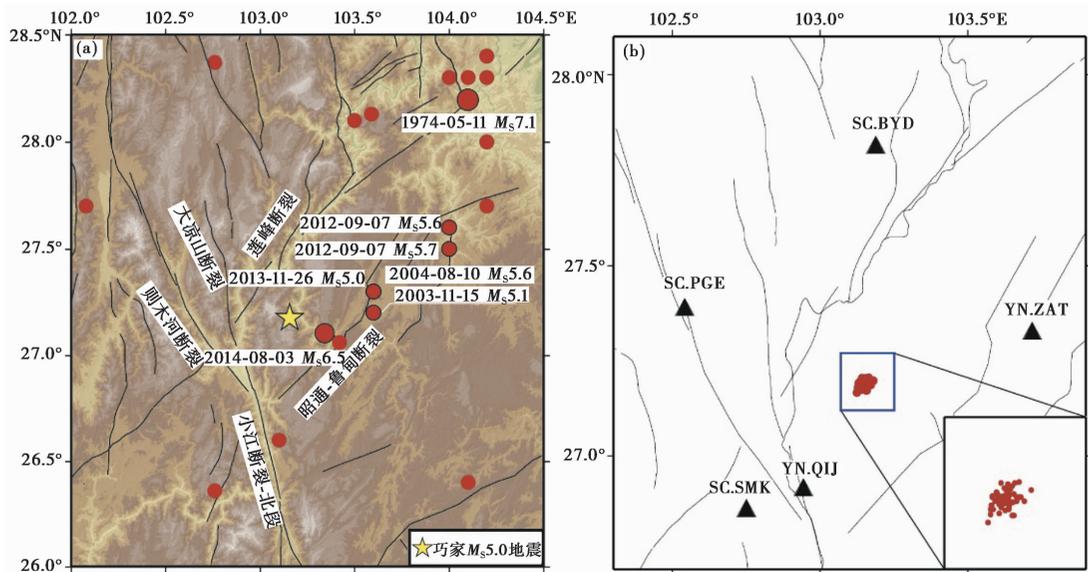


图 1 研究区域内 $M_s \geq 5.0$ 历史地震分布 (a) 及所使用的台站和模板事件分布 (b)

断层数据引自中国地震局地质研究所^①

地震活动极其活跃。例如,先后发生 2003 年鲁甸 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.1$ 地震、2004 年鲁甸 $M_s 5.6$ 地震,以及距离此次震中东南侧不到 20km 的 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震。

巧家 $M_s 5.0$ 地震发生后,震源区余震活动持续不断。据云南省区域地震台网测定,震后 24h 内,震源区及邻近区域 ($27^\circ\text{N} \sim 27.3^\circ\text{N}$, $103^\circ\text{E} \sim 103.3^\circ\text{E}$) 共记录到 $M_L \geq 1.8$ 余震 48 个,其中最大震级为 $M_L 3.8$ 。然而,受背景噪声干扰、波形相互叠加等因素影响,传统的地震识别方法会遗漏较多的余震事件,特别是主震发生后几分钟到数小时内,常规地震目录遗漏的事件较多。

模板匹配定位方法是一种有效识别小微震事件的可靠方法 (Zhang et al, 2015), 基于较为完备的地震序列的时空分布形态,其可以直接反映发震断层的深部构造及主震发震机制等。因此,本文使用巧家 $M_s 5.0$ 地震震源区附近台站记录的连续波形数据,通过模板匹配定位方法,检测主震发震后 24h 内常规地震目录遗漏的地震事件,研究巧家地震震后 24h 序列的特征和发震构造,并进一步探讨该地震与 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震之间的关联以及发震断层与周围断裂带之间的相互作用。

1 数据与方法

本研究使用巧家地震发生后 24h 内、云南和四川区域地震台网记录的震中距在 1° 以内的 5 个台站的连续波形资料,进行余震的模板匹配识别,所使用地震台站分布如图 1(b) 所示。参考云南省地震局提供的快报地震目录,选取主震后 $M_L \geq 1.8$ 的 48 个地震事件波形作为模板 (图 1(b))。

^① <https://www.eq-igl.ac.cn/>

本研究采用张森(2015)提出的匹配定位(Match and Locate,简称M&L)方法,对常规地震目录中遗漏的地震事件进行微地震检测,该方法利用地震模板事件波形与可能的微震信号做互相关叠加来检测小微地震事件。在波形叠加之前,需要对模板地震周围的三维空间网格进行扫描搜索,计算可能的地震位置与参考位置之间在同一个台站上的相对走时差,根据走时差来对互相关波形进行校正叠加(张森,2015)。因此,相比传统的模板检测方法,M&L方法不仅对微震检测更加有效,而且能同时获得高精度的地震位置信息,此外还可以检测到距离模板事件较远的地震事件。

检测之初,需要对连续波形进行去均值、去线性趋势等预处理。进行微震检测时,地震波的滤波频段设为2~8Hz;以参考模板事件震源位置为中心,在三维网格空间内搜索微震位置,经度和纬度方向的搜索范围为 0.05° ,搜索间隔为 0.01° ;深度方向的搜索范围为2km,搜索间距为0.1km;计算模板事件与每个可能微震记录的走时差,然后按照走时差对互相关波形进行走时校正并叠加。

模板事件波形和连续波形滑动互相关时,一般选取振幅最大的震相作为参考震相,如地方震的Sg震相。在模板匹配中,基于张广伟等(2014)对2014年鲁甸地震序列进行地震定位和震源机制所使用的同一区域速度模型,计算Sg的理论到时和慢度参数,以Sg波理论到时的前1s和后3s作为模板波形的互相关窗口。

在微震检测过程中,以叠加相关波形的平均互相关系数($CC, CC_1 > CC_2$)和信噪比(SNR)作为地震检测的标准:当求得的平均互相关系数(CC)大于 CC_1 时,则仅用互相关系数作为判定标准;当求得的平均互相关系数(CC)大于 CC_2 而小于 CC_1 时,则采用互相关系数和信噪比联合约束作为判定标准。在本研究中,互相关系数 CC_1 、 CC_2 和波形信噪比经验性地设置为0.35、0.3和10倍背景相关系数(陈安国,2018;郭铁龙等,2020)。当检测到微震事件时,程序自动根据选取的台站分量中参考震相的振幅比中位数来确定微震震级(Peng et al, 2009; Meng et al, 2013; 张森, 2015)。地震事件的检测实例如图2所示,图中以2020年5月19日12时33分发生的2.5级地震事件为模板,检测到2020年5月18日21时58分发生的1.8级地震事件,地震模板事件波形与检测的微震信号叠加平均相关系数为0.4711,说明各个台站地震波形与2.5级模板事件的相关性较好,意味着检测到一次微地震。

最小完整震级(M_c)可以用来表征地震目录的完整程度,是评估地震台网检测能力的一项重要指标。 M_c 越小,地震目录越完整,地震台网监测能力越强。相关研究表明,利用模板匹配技术能有效降低目录的最小完整震级(Schaff, 2008; 张广伟, 2016; 韩佳东等, 2019; 徐志国等, 2020)。本文基于台网常规识别地震目录和微震检测遗漏地震目录,采用最大曲率法分别计算其最小完整震级 M_c (Wiemer et al, 2000),以此来评估2个地震目录的完整性。对于 **b** 值的计算,采用ZMAP程序包(Wiemer et al, 2000)并基于最大似然法(Aki, 1965; Shi

et al, 1982; Marzocchi et al, 2003)得到,其中,误差估计为 $\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}}$,式

中, n 为样本个数, M_i 为第*i*个地震事件的震级, \bar{M} 为平均震级。随后,结合台网目录和微震检测目录,采用震级大于最小完整震级的目录,进一步分析巧家 $M_5.0$ 地震震后24h的地震序列活动特征。

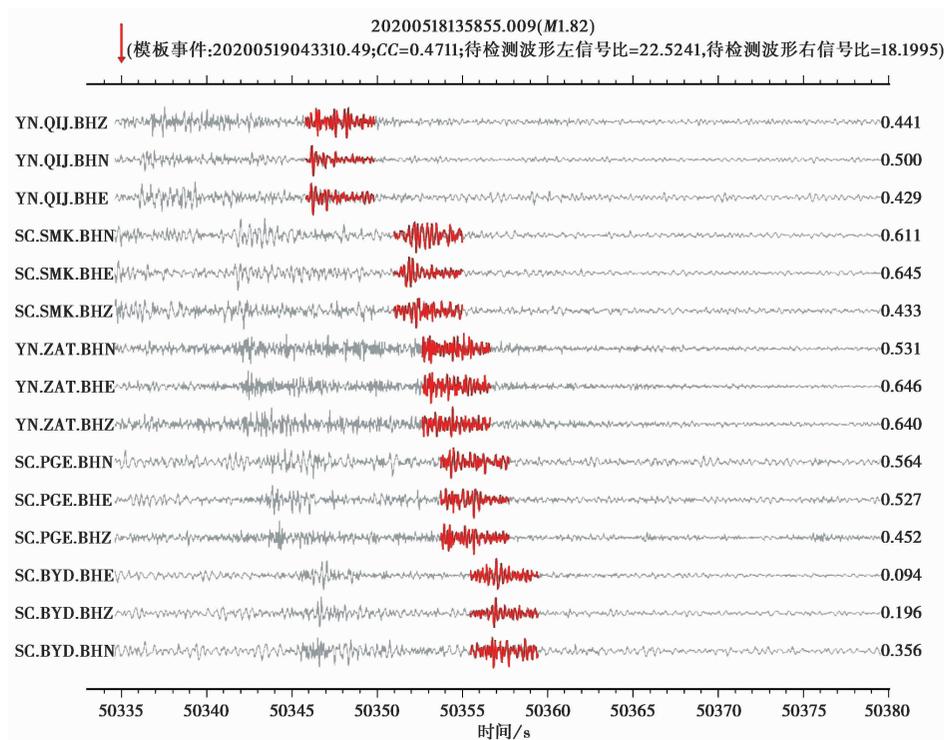


图 2 模板匹配定位识别微震实例

红色波形为模板地震事件波形;灰色为用于识别微震事件的连续波形;左侧大写字母表示台站名称和分量;右侧数字表示互相关系数

2 结果分析

2.1 地震事件检测

利用模板匹配技术对巧家 $M_s5.0$ 地震后 24h 内的遗漏地震进行检测和识别,共检测到 327 个微震事件(不包含 48 次自检测事件)。据云南省地震局提供的常规地震分析目录,震后 24h 内相同震源区范围内共发生 147 个地震事件,其中可定位地震事件 134 个,单台事件 13 个,微震模板匹配检测技术所确定的事件个数约为常规地震目录(可定位个数)的 2.4 倍。

为评估匹配检测所获得的地震目录质量,我们分析了新旧目录的完整性,检测后地震目录的最小完整震级由台网目录的 $M_L1.9$ 降至检测目录的 $M_L1.1$ (图 3(a)、3(b)),表明模板匹配技术可以有效提高区域台网实际监测能力。随后,以各自的最小完整震级为起始震级分别计算 b 值,获得检测前后巧家地震序列的 b 值,检测前 b 值为 1.04,误差为 ± 0.21 ,而检测后 b 值为 0.77,误差为 ± 0.05 。比较遗漏事件地震补充前后的 b 值结果,检测后的 b 值与误差均明显降低, b 值的降低也说明检测后的地震目录小震级事件更多,计算的 b 值更为可靠。

2.2 地震序列活动特征

为了更好地展示巧家地震震源区的地震序列活动特征,我们给出了微震检测后震源区

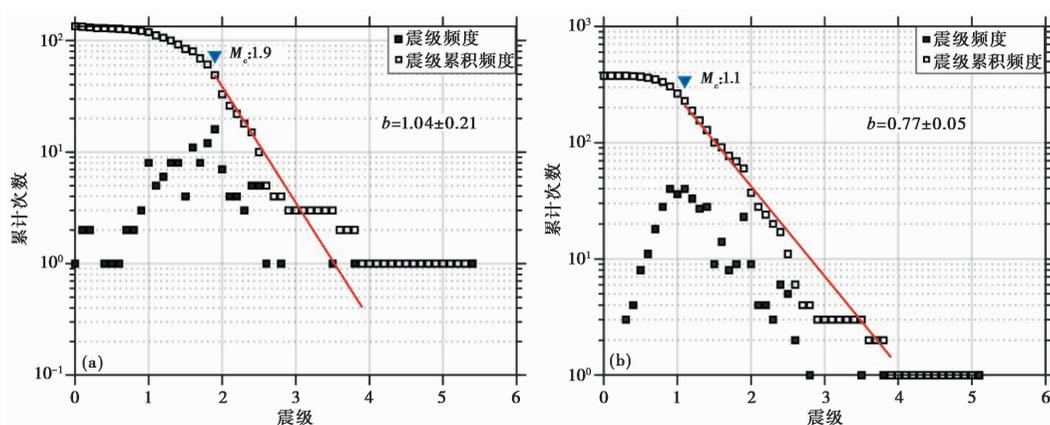


图3 台网目录(a)和微震检测目录(b)的最小完整震级

$M-t$ 分布、地震深度分布、深度统计以及震源深度与时间的关系(图4)。从时间分布(图4(a))可以看出,巧家地震序列总体呈现衰减趋势,无论是震级大小还是频度均相应降低,2020年5月19日4点35分发生了一次 $M_L 3.8$ 地震,使得余震水平略有增加;从深度分布(图4(b)~4(d))可以看出,余震震源深度集中在5~15km,平均震源深度为9.3km,震后24h内余震震源深度的每小时平均值由9.8km减至5.6km,总体呈现出由深变浅的趋势。

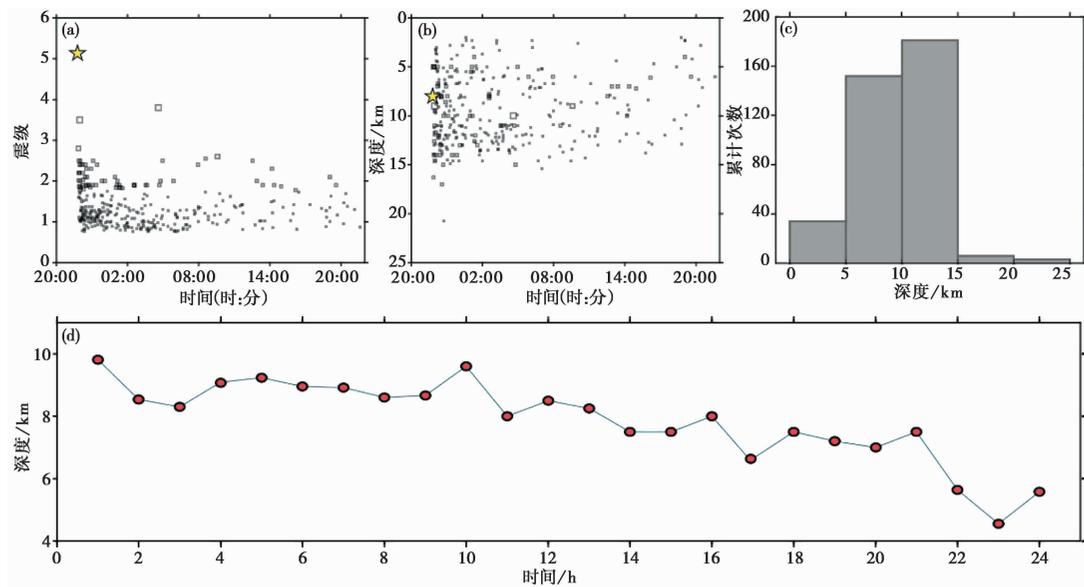


图4 $M-t$ 分布(a)、震源深度分布(b)、震源深度频度(c)和震源深度随时间变化曲线(d)

2.3 发震构造分析

为了详细地展示巧家 $M_s 5.0$ 地震发震断层面的结构特征,我们给出了2条剖面,分别为沿余震展布的SSE方向剖面(170°,纵剖面AA')和垂直方向剖面(纵剖面BB'),并以本次主震地震发震时间为参考零点,用非等间距时间段来显示地震序列空间分布,如图5所示。由

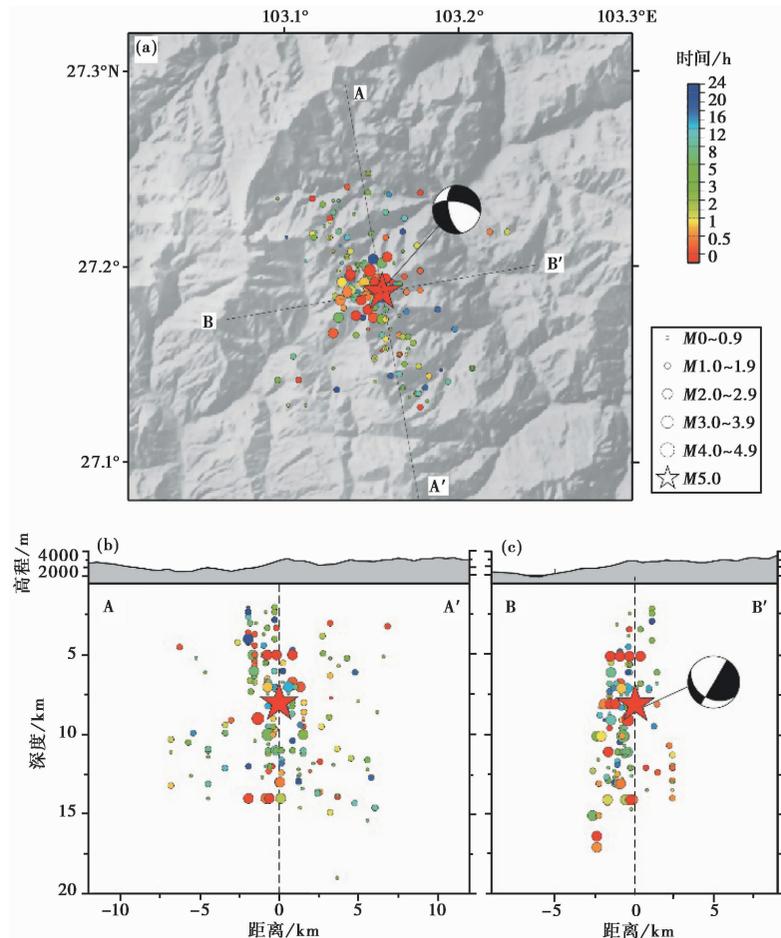


图 5 震后 24h 微震检测后的地震事件平面 (a) 及纵剖面图 (b)、(c)

星号代表巧家地震主震；圆圈代表余震，不同颜色描述不同时间段发生的地震；AA'、BB'剖面纵横比例 1:1；地震事件为距离剖面 1.5km 范围内的地震，震源机制解结果取自中国地震台网中心梁姗姗给出的应急产品产出结果^②

图 5 可以看出，在时间尺度上，余震分布未看出明显的扩展过程，这可能与本次地震震级规模较小有关；在空间分布上，主震 NNW 向和 SSE 向余震分布较多，且分布较广，沿余震展布方向，AA' 扩展方向地震延展范围约 14km (图 5 (a)、5 (b))，震源深度集中在 3~15km，属于中上地壳 (图 5 (c))；穿过主震且近似垂直于余震扩展方向的纵剖面 BB' 显示出主震由深至浅的余震活动较为连续，发震断层面较陡，呈略向西倾的趋势 (图 5 (c))。为了定量研究发震断层的倾角，将模拟退火全局搜索算法和高斯牛顿局部搜索算法相结合，拟合发震断层面倾角 (万永革等, 2008)，结果表明巧家地震发震断层倾角约 81°，与震源机制反演所得到的 2 个节面倾角 75° 和 73° 均较为接近。结合主震震源机制解结果，推断此次地震的发震断层为

② <https://www.cenc.ac.cn>

NNW-SSE 向走滑性质的断裂。本研究给出的推断与云南省地震局根据现场调查^③得到的震源区地震烈度结果有较好的一致性。

为进一步了解余震的扩展模式,将震后 2h 内的地震在平面及深度上的分布展示出来,如图 6 所示,由图可见主震发生后 0~1h,余震多集中在主震周围;主震发生后 1~2h,余震扩展范围增大,主震 NNW 向和 SSE 向两侧均有余震分布,且 NNW 侧余震明显多于 SSE 侧。

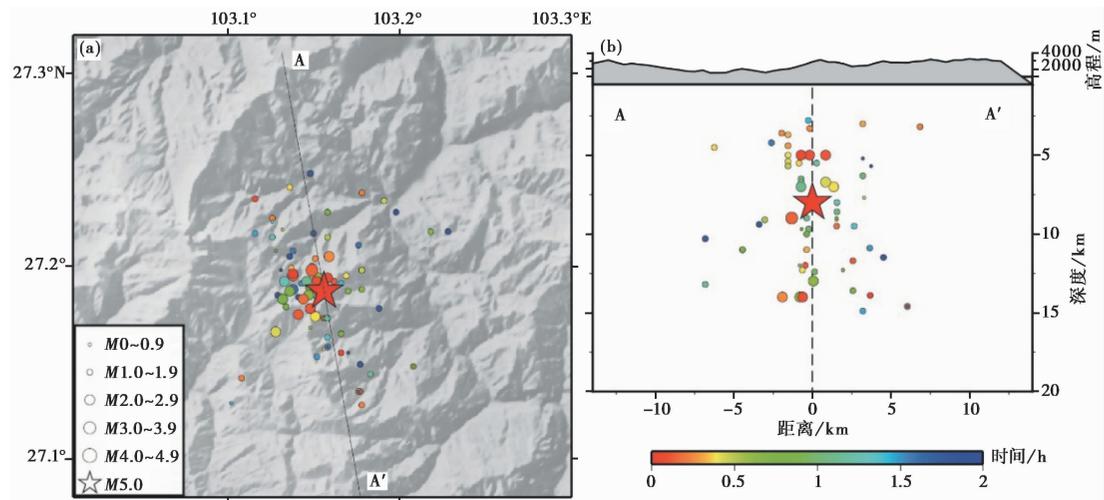


图 6 主震发生后 2h 内地震的平面(a)及深度剖面图(b)

星号代表巧家地震主震;圆圈代表余震,不同颜色描述不同时间段发生的地震;AA'剖面纵横比例 1:1;地震事件为距离剖面 1.5km 范围内的地震

对比巧家 $M_s5.0$ 地震和 2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_s6.5$ 地震的余震序列分布(图 7)可以看出,2 次地震序列分布均展示出发震断层具有高倾角的特征,有所不同的是巧家余震优势展布方向为 NW 向,呈现出单侧扩散模式,而在主震区东南方向十余千米处的 2014 年鲁甸地震主震区的余震优势展布方向为 NW 向和 NE 向,呈明显的共轭性破裂模式。前人结合断裂构造性质、主震震源机制和余震时空分布特征等综合认为,2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震的发震断层为 NW 向的包谷埡-小河断裂,该断裂为 NE 向昭通-鲁甸地震的次级断裂,同属小江断裂系(房立华等,2014;张广伟等,2014;张勇等,2015;徐锡伟等,2014)。

根据震源区余震展布特征和震源机制解结果,认为巧家地震的发震断层为 NNW 向的走滑断裂,这表明鲁甸 $M_s6.5$ 地震和巧家 $M_s5.0$ 地震的发震断层均为 NW 向走滑断裂,且此次巧家地震和鲁甸地震均发生在小江断裂、昭通-鲁甸断裂和莲峰断裂所围限的块体内。由于 2 次地震的震源位置较为接近,故认为这 2 次地震有着紧密的联系。从前人给出的地震波速结构来看,巧家地震和鲁甸地震均发生在地壳厚度和泊松比变化较为剧烈的区域(王兴臣等,2015),且震中区域地壳内存在高、低速相间的多层次状异常结构(李永华等,2014;李大虎等,2019),而巧家地震的震源体低速异常显著,深度可达 15km(张娜等,2019)。特有的深部结构可能为此次巧家地震的发生提供了孕震环境。因此,我们认为巧家地震的发生机制

^③ <https://www.yndzj.gov.cn>

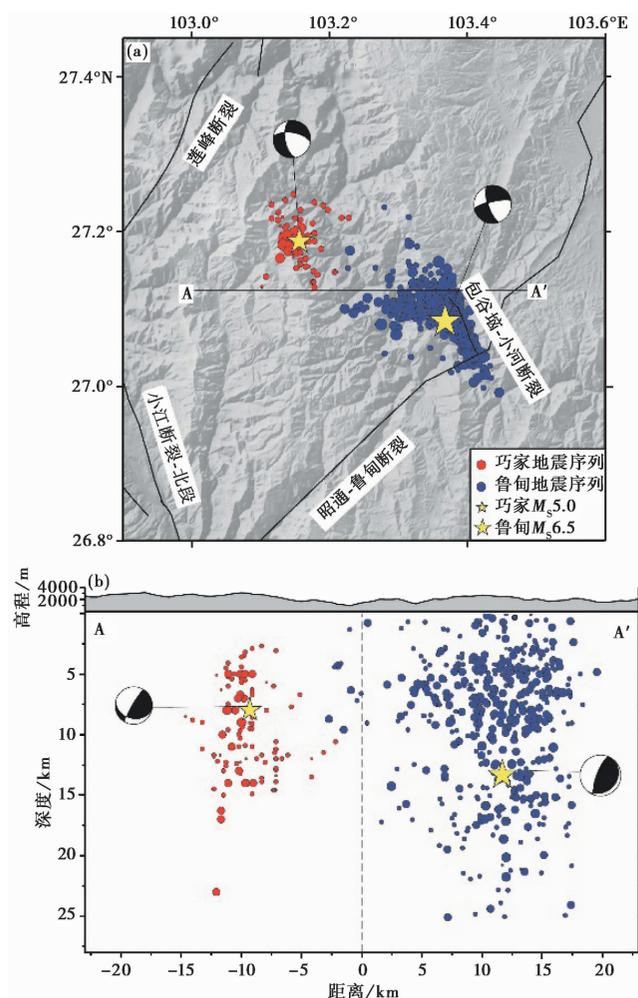


图 7 巧家地震序列、鲁甸地震序列平面(a)及深度剖面图(b)

圆圈大小代表震级大小;剖面纵横比例 1:1;地震事件为所有地震在剖面 AA'上的投影;鲁甸地震序列重定位和主震震源机制解结果取自张广伟等(2014)

与 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s6.5$ 和 2011 年云南盈江 $M_s5.8$ 地震相同(杨婷等,2016),其与印度板块和欧亚板块相互作用形成的高温、高压深部流体作用于断裂带密切相关。值得注意的是,巧家地震序列并未显现出像鲁甸地震序列和盈江地震序列触发共轭断层的特征,可能与本研究所用资料的时间较短或者震级规模较小有关,需要进一步增加震后余震序列资料来证实。

3 结论

本文使用匹配定位方法对 2020 年 5 月 18 日云南巧家 $M_s5.0$ 主震后 24h 的波形进行遗漏事件检测,总共检测出 327 个新的地震事件,约为台网目录的 2.4 倍。检测后,地震目录的完整性有了明显改善,最小完整震级由最初的 $M_L1.9$ 降至 $M_L1.1$,从而完善了巧家地震序

列目录,为该地区的地震活动性和构造分析提供了丰富的微震数据。通过对检测后的地震事件进行活动性分析,初步分析了此次地震的发震构造,获得如下认识:

(1)巧家地震序列总体呈现衰减趋势,无论是地震大小还是频度均相应降低;从深度分布可以看出,主震后 24h 内余震震源深度总体呈现出由深变浅的趋势。

(2)余震在平面上显示出 NNW-SSE 向优势展布方向,长度约 14km,震源优势深度集中在 3~15km 之间;深度剖面展示出主震的发震断层面较陡,并且具有向西倾的趋势。由于震源区内台站分布比较稀疏,关于此次地震的可能发震断层面,仍需要结合其他资料进一步分析。

(3)此次巧家地震发生在小江断裂、昭通-鲁甸断裂和莲峰断裂所围限的块体内,是自 2014 年鲁甸 6.5 级地震以来在该区域发生的最大一次地震,2 次地震的震中相距仅 19.9km,从震源位置、震源机制类型、余震展布形态和速度结构等方面,我们均认为这 2 次地震关系密切,并认为本次地震的发生与印度板块和欧亚板块相互作用形成的高温、高压深部流体作用于断裂带密切相关。关于此次巧家地震和 2014 年鲁甸地震之间的关系还有待进一步深入研究。

参考文献

- 陈安国,2018. 南北地震带重点构造区上地壳地震各向异性与微震分析. 硕士学位论文. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 房立华,吴建平,王未来,等,2014. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造. 地震地质,36(4):1173~1185.
- 郭铁龙,高原,2020. 剪切波分裂揭示的青藏高原上地壳地震各向异性基本特征. 地球物理学报,63(3):1085~1103.
- 韩佳东,杨建思,刘莎,等,2019. 2017m 林 $M6.9$ 地震序列监测及南迦巴瓦地震活动性研究. 地球物理学报,62(6):2059~2069.
- 李大虎,丁志峰,吴萍萍,等,2019. 川滇交界东段昭通-莲峰断裂带的深部结构特征与 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震. 地球物理学报,62(12):4571~4587.
- 李永华,徐小明,张恩会,等,2014. 青藏高原东南缘地壳结构及云南鲁甸、景谷地震深部孕震环境. 地震地质,36(4):1204~1216.
- 万永革,沈正康,刁桂苓,等,2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用. 地球物理学报,51(3):793~804.
- 王兴臣,丁志峰,武岩,等,2015. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源区地壳结构及孕震环境研究. 地球物理学报,58(11):4031~4040.
- 徐锡伟,江国焰,于贵华,等,2014. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论. 地球物理学报,57(9):3060~3068.
- 徐志国,梁姗姗,盛书中,等,2020. 2019 年四川长宁 $M_s6.0$ 地震序列重定位和震源特征分析. 地震学报,42(4):377~391.
- 杨婷,吴建平,房立华,等,2016. 2014 年云南盈江 $M_s5.6$ 和 $M_s6.1$ 地震余震序列重定位. 地震地质,38(4):1047~1057.
- 张广伟,2016. 云南地区地震的重新定位及 b 值研究. 中国地震,32(1):54~62.
- 张广伟,雷建设,梁姗姗,等,2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列重定位与震源机制研究. 地球物理学报,57(9):3018~3027.
- 张森,2015. 地震定位和检测. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 张娜,赵翠萍,李春宏,等,2019. 基于加密观测的金沙江下游水库区速度结构成像. 地震地质,41(6):1380~1394.
- 张勇,陈运泰,许力生,等,2015. 2014 年云南鲁甸 $M_w6.1$ 地震:一次共轭破裂地震. 地球物理学报,58(1):153~162.
- Aki K,1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. Bulletin of Earthquake Research Institute of the University of Tokyo,43(2):237~239.
- Marzocchi W, Sandri L,2003. A review and new insights on the estimation of the b -value and its uncertainty. Ann Geophys,46(6):1271~1282.

- Meng X F, Peng Z G, Hardebeck J L, 2013. Seismicity around Parkfield correlates with static shear stress changes following the 2003 $M_w6.5$ San Simeon earthquake. *J Geophys Res Solid Earth*, **118**(7):3576~3591.
- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, **2**(12):877~881.
- Schaff D P, 2008. Semiempirical statistics of correlation-detector performance. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(3):1495~1507.
- Shi Y L, Bolt B A, 1982. The standard error of the magnitude-frequency b value. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(5):1677~1687.
- Wiemer S, Wyss M, 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4):859~869.
- Zhang M, Wen L X, 2015. An effective method for small event detection: match and locate (M&L). *Geophys J Int*, **200**(3):1523~1537.

Microseismic Detection and Seismogenic Structure Analysis of the Qiaojia $M_s5.0$ Earthquake in Yunnan Province in 2020

Xu Zhiguo^{1,2)} Liang Shanshan³⁾ Liu Jingguang³⁾ Zhai Luyuan³⁾ Shi Jianyu¹⁾
Zhou Yuanze²⁾

1) National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

2) College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In this paper, we used the Match and Locate (M&L) method to detect the micro-earthquakes through scanning the 24 hours continuous waveform of the Qiaojia $M_s5.0$ earthquake in Yunnan on May 18, 2020 recorded by seismic stations close to focal source, in which 327 missing micro-earthquakes were detected, and the complete magnitude was reduced from $M_L1.9$ to $M_L1.4$. Then, we calculated the b -value with the adding catalog of the Qiaojia earthquake sequence, and discussed the seismogenic structure of main shock preliminarily based on the spatial distribution of aftershocks. Our results show that the aftershocks are mainly distributed in the NNW-SSE direction extending about 14km, and the focal depth ranges from 3 to 15km. The depth cross-section shows that the seismogenic fault dips westward deeply. By integrating with the focal mechanism solution of the main shock, the distribution characteristics of aftershocks and the surrounding geological structure setting, we proposed that the seismogenic fault may be a strike-slip fault with NNW-SSE trending, and is closely correlated to the seismogenic structure of the Ludian $M_s6.5$ earthquake in 2014.

Keywords: Match and location method; Microseismic detection; Qiaojia $M_s5.0$ earthquake; Seismogenic structure