

2014年云南鲁甸6.5级地震序列跟踪分析研究*

赵小艳¹, 韩立波², 徐甫坤¹, 刘自凤¹, 孙楠¹, 李永莉¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 从云南鲁甸6.5级地震序列活动特征、序列参数、历史地震活动类比、余震精定位、较大地震震源机制、发震构造分析等方面分析了鲁甸地震序列的序列类型及后续强余震预测问题。分析认为, 鲁甸地震序列余震活动表现出明显的阶段性。鲁甸地震序列 $M \geq 4.0$ 地震时间间隔遵从线性关系、精定位结果显示余震呈共轭分布、地震震源机制结果显示震源机制一致性程度较低、历史地震序列类比表明鲁甸地震序列与1974年大关7.1级地震序列活动特征类似, 这些均表明鲁甸地震序列类型为主—余型。

关键词: 云南鲁甸6.5级地震; 地震序列类型; 精确定位; 共轭地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0508-08

0 引言

据中国地震台网测定, 2014年8月3日16时30分云南省昭通市鲁甸县发生6.5级地震(27.1°N, 103.3°E), 震源深度12 km。震后灾害调查结果显示此次地震极震区烈度达到IX度。地震发生后, 正确的震后序列趋势估计及强余震预测尤为重要, 不仅有助于政府开展地震应急、抗震救灾及恢复重建的正确决策和行动, 而且对于平息社会公众的恐震情绪, 维护社会生活的稳定具有重要的意义。

云南鲁甸6.5级地震发生后, 云南省地震局在余震区布设了由3套流动测震仪组成的小孔径流动数字台网。从昭通市小孔径测震台网选取3个、巧家台阵测震台中选取5个测震台, 加上云南省区域地震台网中心原有的8个固定台站, 开展组网观测, 在震区形成了密集且包围较好的观测台网, 为我们提供了丰富的鲁甸地震序列地震波形、地震目录和到时数据。本文利用上述台网记录的数据, 从地震序列活动特征、历史地震活动类比、余震精定位、较大地震震源机制、发震构造分析等方面分析了鲁甸地震序列的序列类型及后续强余震预测问题。

1 地震序列活动分析

1.1 鲁甸地震序列活动特征

据云南地震台网测定, 截至2014年9月18日鲁甸地震序列共发生 $M_L \geq 1.0$ 地震2595次, 其中1.0~1.9级1962次, 2.0~2.9级557次, 3.0~3.9级69次, 4.0~4.9级6次, 最大余震为8月4日和9月10日 $M_L 4.7$ 地震, $M_L \geq 4.0$ 地震序列目录见表1。

从地震序列的 $M-t$ 图(图1)看出, 余震活动大致可以划分为以下几个时段: (1) 强余震活动时段: 主震后7个小时内发生了4次 $M_L \geq 4.0$ 地震; (2) 余震波动起伏阶段: 震后第2~7天内序列以3级地震起伏活动为主; (3) 余震迅速衰减阶段: 8月10日 $M_L 4.1$ 地震后, 余震活动虽有起伏, 但总体来说余震强度不断降低。从震后27天起, 小震震级出现上升趋势, 不同震级档地震都出现了较长时间平静, 在主震发生后35~38 d又出现3.0~3.9级地震丛集活动, 其后发生了4.7级序列最大强余震, 可见, 在强余震前还是可以看到余震活动从平静到增强的显著过程。

从地震序列参数计算结果看, 利用主震后46天 $M_L \geq 1.6$ 地震目录, 计算得到序列 b 值为0.871, h 值为2.2, 序列参数计算结果显示该序列

* 收稿日期: 2014-09-23.

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAK19B01-07)资助.

衰减基本正常，为主震—余震型的可能性较大。 P 值为 0.66，表明序列衰减较慢（图 2）。鲁甸 6.5 级地震后，中国地震局联合云南省地震局、四川省地震局，多次召开地震序列类型及后续震情分析视频会议，分析认为鲁甸 6.5 级地震序列类型为主震—余震型。

表 1 云南鲁甸 6.5 级地震序列目录 ($M_L \geq 4.0$)
Fig. 1 Catalogue of Ludian M_s 6.5 earthquake sequence ($M_L \geq 4.0$)

编号	日期	时间	震中位置		震级		深度 /km
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	M_L	M_S	
1	2014-08-03	16:30:10	27.10	103.33		6.5	12
2	2014-08-03	19:07:20	27.08	103.38	4.5	4.1	5
3	2014-08-03	21:47:07	27.12	103.37	4.6	4.0	5
4	2014-08-03	22:28:28	27.10	103.33	4.6	4.0	10
5	2014-08-04	03:30:30	27.08	103.35	4.7	4.2	5
6	2014-08-10	12:39:11	27.03	103.42	4.1	3.5	9
7	2014-09-10	16:59:29	27.12	103.38	4.7	4.3	10

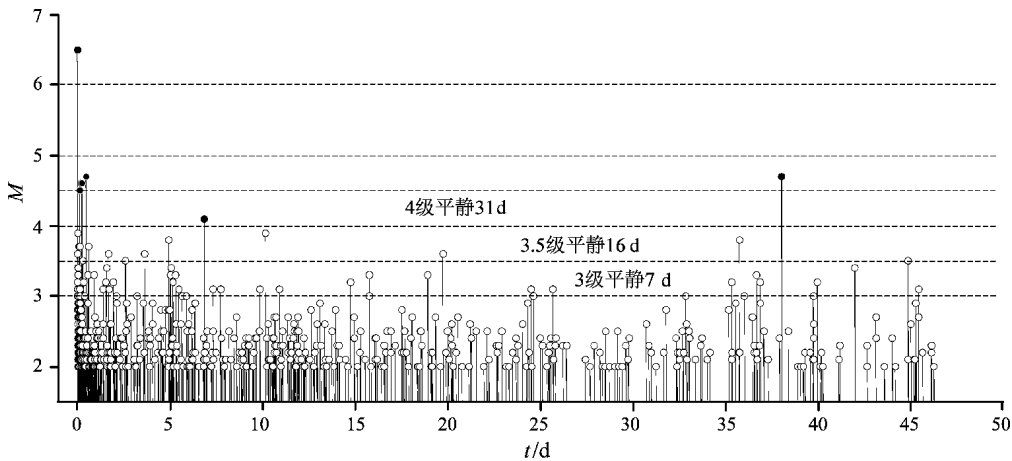


图 1 云南鲁甸 6.5 级地震序列 $M-t$ 图
Fig. 1 $M-t$ diagram of Ludian M_s 6.5 earthquake sequence in Yunnan

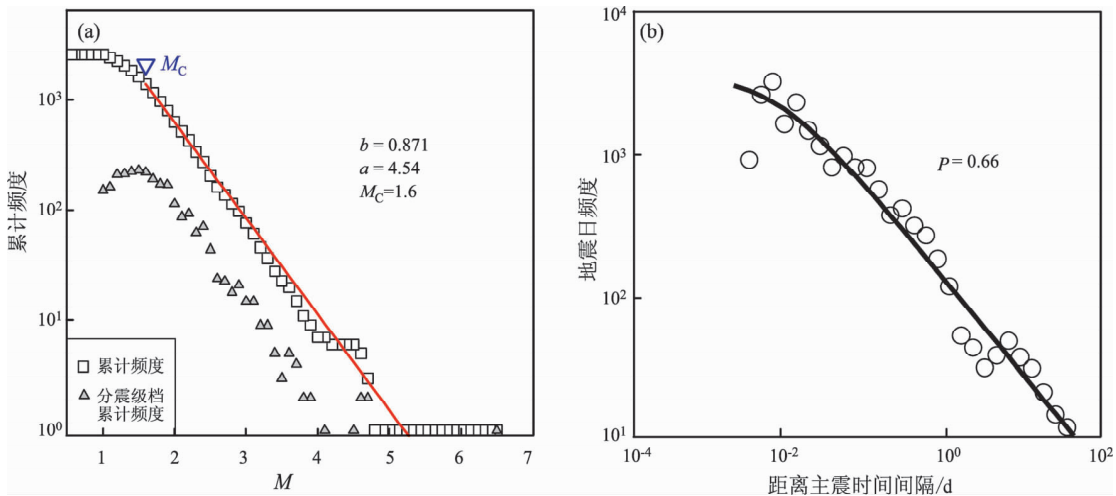


图 2 云南鲁甸 6.5 级序列 b 值 (a)、 P 值 (b)
Fig. 2 b (a), P (b) value of Ludian M_s 6.5 earthquake sequence in Yunnan

对于主—余型地震序列,可以利用等待时间与强余震发生时间(距离主震发生的时间)所遵从的对数—对数线性关系,估算 $M \geq 4.0$ 强余震的等待时间与发生时间之间的关系(谷继成等, 1979)。由图 3 可见,鲁甸 6.5 级地震序列 $M \geq 4.0$ 强余震遵从对数—对数线性关系,可以利用该方法对最后一次 4 级强余震做出较好的时间预测。

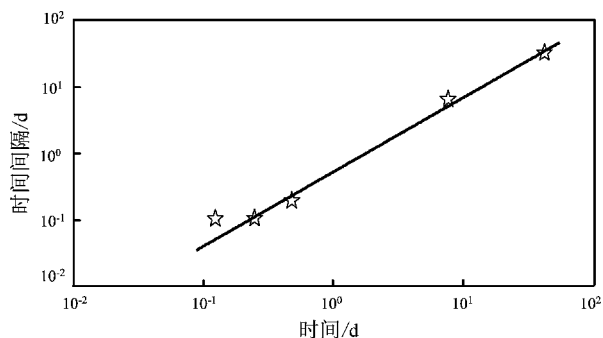


图 3 云南鲁甸 6.5 级地震的 $M \geq 4.0$ 余震的等待时间法计算结果

Fig. 3 Calculation result of $M \geq 4.0$ aftershocks of Yunnan Ludian M_s 6.5 earthquake sequence by waiting time method

1.2 历史地震序列活动特征及对比分析

统计 1900 年以来滇东北及川滇交界地区 $M \geq 5$ 地震类型,结果显示该地区以震群活动为主,76% 的地震序列为震群型,24% 的地震序列为主震—余震型(蒋海昆等, 2006)。震群型的地震序列有一个显著的特点:第一次主震后的余震少,第二次主震后的余震多。本次鲁甸 6.5 级地震后,余震丰

富,与以往的震群型地震的第一次主震后的余震活动有显著差异,因此,在序列早期判定中,分析认为鲁甸序列为主—余型。

对强余震的预测,可以类比滇东北及邻区的 $M \geq 6.0$ 地震序列。该区有小震序列记录以来共发生了 2 次 $M \geq 6.0$ 地震,分别是 1966 年东川 6.5、6.2 级双震,1974 年大关 7.1 级地震。由于已经判定鲁甸地震为主震—余震型序列,可以类比的地震序列仅有 1974 年 5 月 11 日大关 7.1 级地震序列。

图 4 给出了大关地震序列震后 2 个月内 $M \geq 3.0$ 地震 $M-t$ 图,可以看出该序列活动特征与鲁甸地震序列活动非常相似,均存在“强余震集中活跃—迅速衰减—震级上升—最大强余震发生”的阶段过程:(1) 7.1 级主震后 2 d 时间内震区发生了多次 4~5 级余震;(2) 5 月 12 日 5.0 级余震后,余震活动强度及频度均迅速衰减,震后 3~18 d 内,仅发生 2 次 4 级余震,3 级余震活动频率也不高;(3) 震后 20~35 d 这一阶段,余震强度逐渐上升,相继发生 4.0、4.6、4.9 和 5.7 级最大强余震。6 月 15 日最大强余震发生前,也出现了显著的 3 级地震平静异常(图 4)。

2 鲁甸序列双差精定位结果分析

利用云南地震台网、流动台、昭通台网和巧家台阵部分台站的观测报告,使用双差定位方法对鲁甸 6.5 级地震序列 $M_L \geq 1.0$ 地震进行了重新定位(图 5)。定位结果显示,余震分布呈现出明显的共轭特征:一支沿 NNW 方向展布,与包谷埡

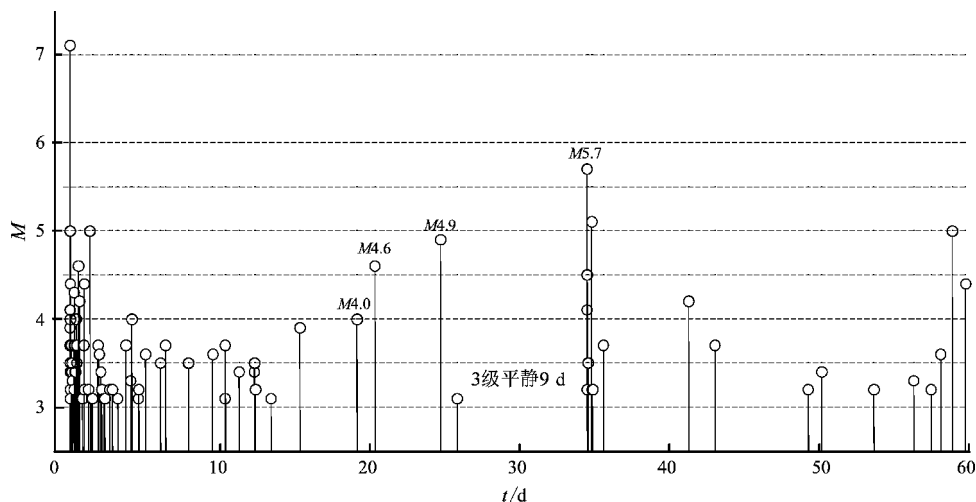


图 4 1974 年大关 7.1 级地震序列 $M-t$ 图

Fig. 4 $M-t$ diagram of Daguan M_s 7.1 earthquake sequence in 1974

一小河断裂方向相近。该分支上余震数目多，且震级较另一分支大，集中分布的余震展布约 15 km。另一支呈 NEE 向分布，地震主要分布于主震西侧，地震强度和频次均低于 NNW 分支，除去主震附近区域，分支上仅有 2 次 3 级地震，最大震级 3.2 级。此外，该与支上地震展布长度较短，分

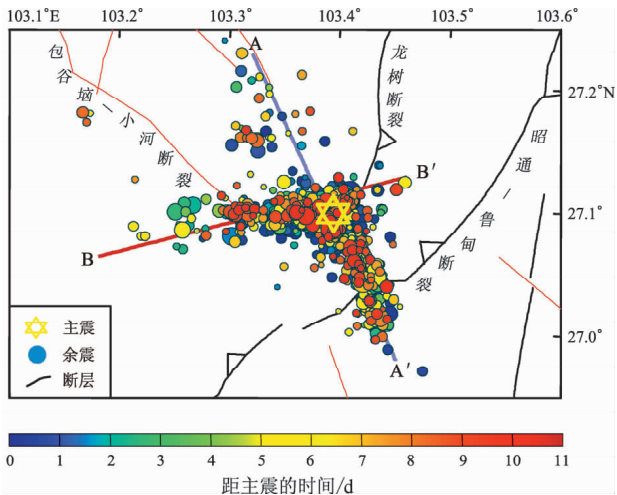


图 5 重定位后的序列震中分布图
Fig. 5 Distribution of the epicenters of Ludian sequence after relocation

布尺度约为 8 km，明显小于 NNW 分支上的 15 km。

云南鲁甸 6.5 级地震序列精定位结果显示余震为 NNW 向和近 NEE 向的共轭分布，与 2011 年 3 月盈江 5.8 级地震类似。冯希杰等（1993）研究表明共轭破裂的出现是局部地区强震活动中止的可能标志。苏刚等（1992）由经典破裂理论提出了这种可能，即在最大主应力方向不变的情况下，一点只有两个最大剪切应力方向。当沿这两个方向都发生了大剪切破裂时，该处将进入相对稳定状态，加之近东西向的地震分布在更小的次级断裂上，该断裂不具备发生大地震的条件，因此分析认为鲁甸 6.5 级地震为主—余型的可能性较大。

3 较大地震震源机制结果分析

利用云南数字地震台网记录到的波形数据，采用 CAP 方法求解得到了鲁甸 6.5 级地震主震及部分余震震源机制解（表 2）；图 6 给出 16 次地震的震源机制解随时间的变化，结合表 2 的参数可以看出，2014 年 8 月 5 日 8 时 29 分 $M_{2.8}$ （编号 7）和 2014 年 8 月 8 日 23 时 33 分 $M_{2.8}$ （编号 14）为正断兼走滑型地震、2014 年 8 月 8 日 16 时 53 分

表 2 云南鲁甸 6.5 级地震序列的震源机制解
Tab. 2 Focal mechanisms solution of Yunnan Ludian $M_{6.5}$ earthquake sequence

编号	地震事件	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		震源机制类型
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	仰角	方位角	仰角	
1	2014-08-03 16:30:10 $M_{5.6.5}$	258	81	-159	164	69	-10	123	21	30	8	走滑
2	2014-08-03 19:07:19 $M_{4.0}$	281	84	-140	186	50	-8	151	32	47	22	走滑
3	2014-08-03 21:47:07 $M_{4.1}$	100	80	170	192	80	10	-34	0	56	14	走滑
4	2014-08-03 22:28:29 $M_{4.1}$	262	80	-164	169	74	-10	126	18	35	4	走滑
5	2014-08-04 03:30:30 $M_{4.2}$	280	80	-148	184	59	-12	147	30	48	14	走滑
6	2014-08-04 07:06:10 $M_{3.1}$	101	70	147	204	59	24	154	7	59	37	走滑
7	2014-08-05 08:29:34 $M_{2.8}$	103	62	-142	353	57	-34	-40	46	-133	3	正走滑
8	2014-08-06 06:33:52 $M_{3.9}$	110	60	-160	10	73	-32	-34	34	62	8	走滑
9	2014-08-07 07:25:24 $M_{2.8}$	257	71	-159	160	70	-20	119	28	28	1	走滑
10	2014-08-08 14:39:28 $M_{3.2}$	258	79	-153	162	63	-12	123	27	27	11	走滑
11	2014-08-08 16:53:59 $M_{2.8}$	190	40	40	67	66	123	134	14	21	57	逆断型
12	2014-08-08 17:44:37 $M_{2.8}$	90	80	140	188	51	13	145	19	41	35	走滑
13	2014-08-08 19:56:44 $M_{2.5}$	280	80	-170	188	80	-10	144	14	-126	0	走滑
14	2014-08-08 23:33:03 $M_{2.8}$	296	64	-146	190	60	-30	155	41	62	3	正走滑
15	2014-08-10 12:39:11 $M_{3.5}$	220	40	126	357	59	64	105	10	-142	65	逆断型
16	2014-08-13 20:16:28 $M_{3.8}$	101	69	-160	4	71	-22	322	29	53	2	走滑

$M_{2.8}$ 地震 (编号 11)、2014 年 8 月 10 日 12 时 39 分 $M_{3.5}$ (编号 15) 为逆断型地震, 其余 11 次余震均为走滑型地震。表明随着时间的推移, 余震震源机制一致性降低, 后续发生更大地震的可能性较小。

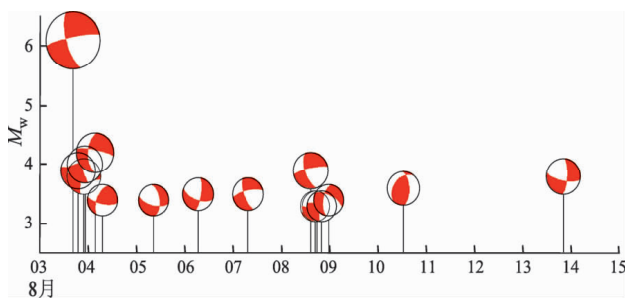


图 6 云南鲁甸 6.5 级地震序列余震震源机制解及 $M-t$ 图

Fig. 6 Focal mechanism solution and $M-t$ diagram of Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

从序列震源机制空间分布图 (图 7) 可见, 部分具有逆冲分量的地震分布于余震区的东南段, 位于包谷垭—小河断裂和鲁甸—昭通断裂的交汇地段, 节面走向与 NNE 向的鲁甸—昭通断裂更为一致, 且其错段类型更符合以逆冲为主要错动方式的昭通—鲁甸断裂, 根据图 5 给出的余震与断裂分布可见, 余震活动已经穿越了昭通—鲁甸断裂。这些具有逆冲分量地震的发生, 可能表明鲁甸地震部分余震发生在同样错断方式的昭通—鲁甸断裂上。

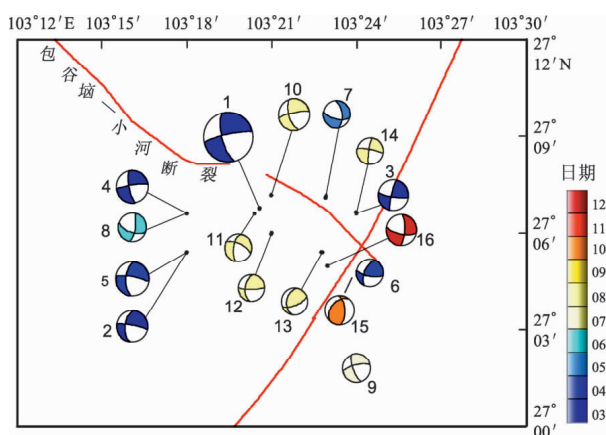


图 7 云南鲁甸 6.5 级地震序列余震震源机制空间分布图

Fig. 7 Focal mechanism solution of Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

由序列震源机制解主应力玫瑰图 (图 8) 可见, 该序列的压应力主轴优势方向为 NNW, 张应力主轴优势方向为 NNE, 表明该地区受控于 NNW 向挤压、NNE 向拉张的区域应力场作用。余震的压应力主轴 P 轴和张应力主轴 T 轴方位角优势分布方向并没有改变, 表明区域应力虽然局部有所调整, 但总体来看, 整个区域依然受控于 NNW 向挤压、NNE 向拉张区域应力作用。此外, 震源机制空间分布的复杂性可能受震区多条断裂活动的影响。因此, 需要注意鲁甸地震序列后续强余震的发生。

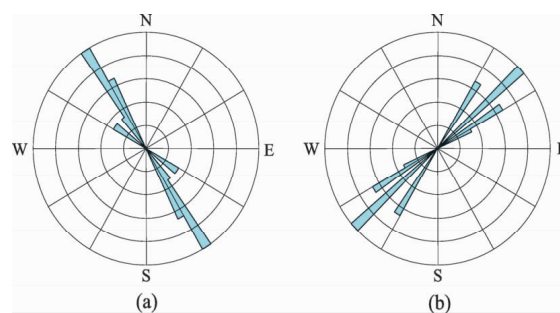


图 8 云南鲁甸 6.5 级地震序列 P (a)、T (b) 轴方位角玫瑰图

Fig. 8 Rose graph of azimuths of P (a), T (b) axis of Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

鲁甸 6.5 级地震及部分较大余震的震源机制解存在时空上的变化。已有研究结果显示, 地震序列的震源机制可能存在变化, 例如 1976 年唐山 7.8 级地震和 2008 年汶川 8.0 级地震的余震震源机制解在空间分布上明显不同 (李轶群, 王健, 2008; 易桂喜等, 2012); 1988 年澜沧—耿马地震序列在主破裂以外的地区 P 轴方位分布复杂, 显示了震后震区应力场方向时、空上的急剧调整变化 (王绍晋等, 1991)。1975 年海城地震 (顾浩鼎等, 1976) 和 1966 年邢台地震 (何志桐, 谢挺, 1977) 等均有此现象。大震后余震的震源机制有的与主震一致, 有的则大不一样, 反应了震源应力场的变化 (魏柏林, 1980)。这些余震震源机制变化的原因目前还没有明确和统一的解释, 但多归结于应力状态的不均匀性、应力场 (李轶群, 王健, 2008) 和区域构造的复杂性 (易桂喜等, 2012), 以及震源应力场和区域应力场作用于序列的阶段性的 (魏柏林, 1980)。

4 发震构造分析

云南鲁甸 6.5 级地震震中位于鲁甸县城西南，震中发育有 NE 向的莲峰山断裂、昭通断裂、近 NS 向的小江断裂、安宁河断裂、元谋—绿汁江断裂，以及 NNW 向的则木河断裂和包谷埡一小河断裂（图 9）。鲁甸 6.5 级地震后，中国地震局地质研究所根据主震震源机制、余震空间分布、区域地质构造、地震烈度等，分析认为鲁甸地震的发震构造是 NNW 向的包谷埡一小河断裂，该断裂属于北东向昭通—鲁甸断裂系的次级横向断裂。包谷埡一小河断裂历史上没有 5 级地震记录，最大地震为 1989 年 8 月 6 日鲁甸 4.4 级地震。本次地震是该断裂及其所处大断裂系的最大地震。

苏有锦等（2013）对全球 7 级以上大震的研究结果表明：余震区长宽比值 L/W 较大的序列，其余

震活动水平（频度和最大余震水平）较低，震区背景地震活动水平与余震活动水平呈正相关关系。本次鲁甸 6.5 级地震序列尽管呈共轭分布，但 NNW 向主体余震区长宽比值大，NNW 向包谷埡一小河断裂震区历史背景活动水平很低，仅有 2 次 4 级地震活动，这些特征或许可以解释迄今为止鲁甸序列最大余震震级小、余震活动水平低的现象。

5 结论

本文从鲁甸地震序列活动特征、序列参数、历史地震活动类比、余震精定位、较大地震震源机制、发震构造分析等方面阐述了鲁甸地震序列跟踪过程中序列类型判断及强余震预测问题。得到如下结论：

（1）鲁甸地震序列余震活动表现出明显的阶段性，与 1974 年大关 7.1 级地震序列活动特征类

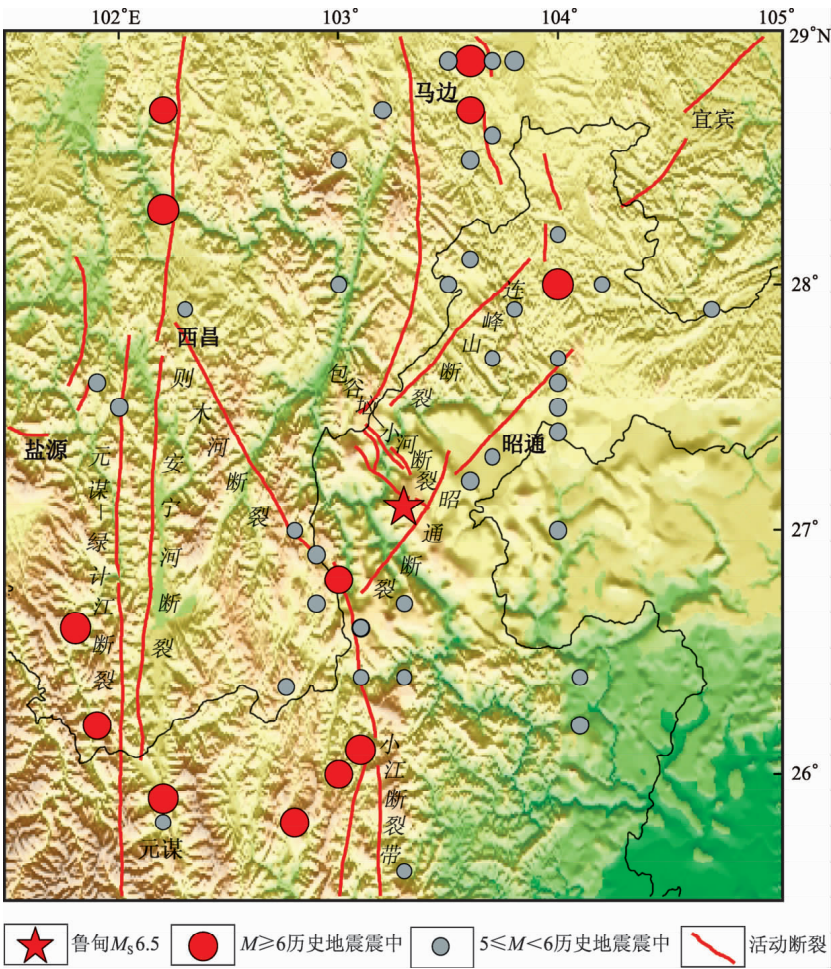


图 9 云南鲁甸 6.5 级地震发震构造与历史地震分布

Fig. 9 Seismogenic structure of Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquakes and distribution of historical earthquakes

似;序列后期要注意晚期强余震发生的可能,后续跟踪中要重点关注小震平静和余震活动水平升级等异常。

(2) 精定位结果显示鲁甸地震序列呈共轭分布,绝大多数地震呈 NNW 向分布,与主震震源机制节面 II 及包谷垭—小河断裂带的走向一致。

(3) 鲁甸地震序列的震源机制结果显示随着时间的推移,余震震源机制一致性在降低,表明后续震区发生更大地震的可能性较低。

从本文的序列跟踪过程及其实际效果来看,序列跟踪分析除了传统的序列活动特征、序列参数、历史地震活动类比外,还可以结合精定位、余震震源机制等数字地震学方法,对序列进行综合分析是一种可以尝试的方法。

参考文献:

冯希杰,苏刚,麻水歧. 1993. 中国大陆共轭破裂强震[J]. 内陆地震, 7(3):225-233.

谷继成,谢小碧,赵莉. 1979. 强余震的时间分布特征及其理论解释[J]. 地球物理学报, 22(1):32-46.

顾浩鼎,陈运泰,高祥林,等. 1976. 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城地震的震源机制[J]. 地球物理学报, 19(4):274-284.

何志桐,谢挺. 1977. 邢台地震系列空间分布、构造应力场及其发生过程的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2):131-141.

蒋海昆,李永莉,曲延军,等. 2006. 中国大陆中强地震序列类型空间分布特征[J]. 地震学报, 28(4):289-298.

李轶群,王健. 2008. 唐山余震区中小地震震源机制解分区特征的初步研究[J]. 中国地震, 24(2):150-158.

苏刚,冯希杰,麻水歧. 1992. 局部地区强震活动中止的可能标志—共轭破裂[J]. 国际地震动态, (7):1-5.

苏有锦,李忠华,赵小艳,等. 2013. 全球 $M \geq 7.0$ 地震序列研究[M]. 昆明:云南科技出版社.

王绍晋,于利民,李钦祖. 1991. 利用 P/S 振幅比资料测定澜沧—耿马震区中、小地震震源机制[J]. 地震研究, 14(3):195-202.

魏柏林. 1980. 余震震源机制变化的原因[J]. 地球物理学报, 23(1):25-34.

易桂喜,龙锋,张致伟. 2012. 汶川 $M_s 8.0$ 地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 55(4):1213-1227.

Research on Tracking Analysis for Ludian $M_s 6.5$ Earthquake Sequence in Yunnan in 2014

ZHAO Xiao-yan¹, HAN Li-bo², XU Fu-kun¹, LIU Zi-feng¹, SUN Nan¹, LI Yong-li¹

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract

We discuss the seismic sequence type and prediction of subsequent strong aftershocks of Ludian $M_s 6.5$ earthquake on Aug. 3, 2014 through the activity characteristics, the sequence parameters, the accurate location of aftershock and the focal mechanism of the bigger earthquake of Ludian $M_s 6.5$ earthquake sequence, the analogy with historical earthquake activity and the seismogenic structure. The result shows that the characteristic of aftershock activity of Ludian $M_s 6.5$ earthquake sequence appeared the obvious phased. The time interval of $M \geq 4.0$ strong aftershocks obeys the linear relationship, and the accurate location result shows that the distribution of aftershock is conjugate. The source mechanism results show that the consistency of focal mechanism is in the low degree, the results of analogy with history sequence indicate that the activity characteristic of Ludian earthquake sequence is same as that of Dagan $M_s 7.1$ earthquake sequence in 1974. These results all make sure that the type of Ludian earthquake sequence is the mainshock-aftershock.

Key words: Yunnan Ludian $M_s 6.5$ earthquake; earthquake sequence type; accurate location; conjugate earthquake