

鲁甸地区地震活动及地震构造环境*

常玉巧, 谢英情, 张彦琪, 李雷, 吴荣帮, 于江, 罗伟东

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 分析2017年鲁甸 $M_s4.9$ 地震等震线特征、震源机制解及余震序列特征, 从地震序列和震源机制解两方面, 分析昭通—鲁甸断裂带及邻区地震类型分布特征; 结合野外活动断裂考察成果及前人的研究成果, 探讨了昭通—鲁甸断裂带及邻区地震构造环境。初步认为, 鲁甸 $M_s4.9$ 地震可能不是鲁甸 $M_s6.5$ 地震的强余震。昭通—鲁甸断裂带及邻区地震类型分布受区域断裂控制明显, 具有有利的孕震构造环境。

关键词: 鲁甸 $M_s4.9$ 地震; 昭通—鲁甸断裂; 震源机制解; 地震类型; 孕震构造环境

中图分类号: P315.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)02-0286-09

0 引言

2017年2月8日19时11分, 云南省昭通市鲁甸县发生了 $M_s4.9$ 地震, 震中位于(27.07°N , 103.36°E), 震源深度10 km。现场烈度与震害调查结果显示, 此次地震烈度最高为Ⅵ度, 等震线形状呈椭圆形, 长轴走向为NE向, 灾区总面积约190 km²。

2017年鲁甸 $M_s4.9$ 地震发生在南北地震带中南段, 川滇交界东段小江断裂带东侧的NE向昭通—鲁甸断裂带上。该构造带及其邻区是一个地震活动非常活跃的地区, 2014年8月3日鲁甸 $M_s6.5$ 地震是该区2000年以来发生的最大地震, 给灾区造成了重大的人员伤亡和财产损失(李西等, 2014; 张彦琪等, 2015, 2016; 张广伟等, 2014)。大量研究表明, 鲁甸 $M_s6.5$ 地震的发震断层为北西走向的包谷垭—小河断裂(徐锡伟等, 2014a, b; 李西等, 2014, 2017; Li *et al.*, 2015; 常玉巧等, 2016)。鲁甸 $M_s4.9$ 地震发生在NW向包谷垭—小河断裂与NE向昭通—鲁甸地震交汇处, 那么此次地震是否为鲁甸 $M_s6.5$ 地震的强余震? 该地震的发生对鲁甸地区未来地震趋势的判定有何启示?

本文重点分析鲁甸 $M_s4.9$ 地震等震线、震源机制解及其余震序列特征, 初步探讨此次地震与

2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震的关系。分析昭通—鲁甸断裂带及其邻区历史中强地震序列及震源机制解特征, 并结合活动断裂考察成果及前人的研究成果等, 探讨鲁甸震区地震活动特征及昭通—鲁甸断裂带及邻区的孕震构造环境。

1 区域构造背景

鲁甸震区位于川滇块体东侧, 大凉山次级块体南缘, 属于南北地震带的中南段, 是中国大陆内部地震活动最强的地区之一(常祖峰等, 2014; 李西等, 2014)。区内构造背景复杂, 受NW向区域构造应力场控制明显(阚荣举等, 1977, 1983; 韩德润, 1993; 侯治华等, 2004; 李西等, 2014, 付芮等, 2015), 断裂构造发育, 主要有NE向、近SN向和NW向多组断裂构造。其中, NE向的莲峰断裂、昭通—鲁甸断裂为本区主要断裂构造(李西等, 2014)。

昭通—鲁甸断裂带是一条以挤压逆冲为主的区域性大断裂(闻学泽等, 2013; 常祖峰等, 2014), 由前缘主断裂彝良—会泽断裂, 反冲断裂龙树断裂、洒渔河断裂以及中央断裂昭通—鲁甸断裂组成(图1)。上述断裂走向NE, 且均表现为逆冲兼右旋走滑活动特征(闻学泽等, 2013; 常祖峰等, 2014)。昭通—鲁甸断裂倾向NW, 龙树断裂和洒渔河断裂2条反冲断裂倾向SE。龙树断

* 收稿日期: 2017-03-15.

基金项目: 国家防震减灾重点区域减轻地震灾害损失能力建设与云南省地震局青年基金资助课题“德钦—维西地区构造地貌特征研究(201604)共同资助。

裂、洒渔河断裂和昭通—鲁甸断裂3条断裂组成右阶斜列花状逆冲断裂系,构成以挤压逆冲为主的区域性大断裂。在卫星影像上,断裂带线性特征清楚,控制了昭通、鲁甸等新生代盆地的发育

(常祖峰等,2014;李西等,2014)。常祖峰等(2014)认为,昭通—鲁甸断裂和龙树断裂皆在晚更新世—全新世具有明显活动性;洒渔河断裂最晚活动是在晚更新世时期。

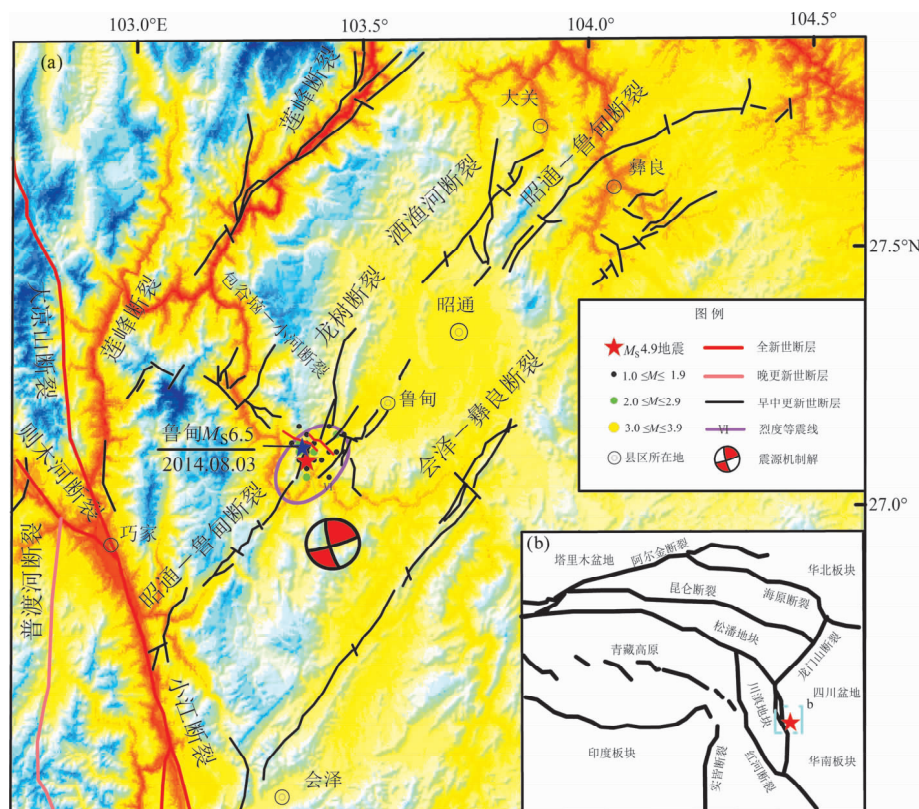


图1 震区地震构造背景图(a)与青藏高原及邻区构造简图(b)(修改自Li *et al.*, 2015)

Fig. 1 The seismotectonic background map of earthquake disaster areas (a) and tectonic map of the Tibetan plateau and its adjacent area (b) (modified from Li, *et al.*, 2015)

李西等(2014)进行鲁甸 $M_s6.5$ 地震科考时,在光明村多个断层剖面及槽谷中,发现了NE向昭通—鲁甸断裂的右旋走滑新活动痕迹。另外,笔者与课题组在2016年开展的昭通—鲁甸断裂野外考察工作中,也观察到了该断裂中一晚更新世活动的痕迹。同时,在新棚子地区探槽剖面上观察到一条活动痕迹明显的逆冲断裂,产状为 $330^\circ \angle 74^\circ$,推测可能是昭通—鲁甸断裂。该断裂明显切割晚第四纪地层,表明昭通—鲁甸断裂具有晚第四纪活动特征,具体活动时代有待测年结果的确定。

与昭通—鲁甸断裂带相交的NW走向的包谷塆—小河断裂是鲁甸 $M_s6.5$ 地震的发震断裂(金明培等,2014;赵小艳等,2014;张广伟等,2014;张振国等,2014;石磊等,2014;李西等,2014,2017;邵崇建等,2015;何骁慧等,2015;程佳等,

2016),断裂走向约 330° ,倾角较陡,倾向SW—SWW,具有左旋走滑性质,总长约40 km,由数条断续展布的断裂组成。该断裂具有晚第四纪活动特征,局部为晚更新世活动(徐锡伟等,2014a, b;李西等,2014;常祖峰等,2014;张彦琪等,2016;赵小艳,孙楠,2014;王腾文等,2015)。

2 鲁甸 $M_s4.9$ 地震特征

2.1 烈度与余震分布

鲁甸 $M_s4.9$ 地震的应急与现场烈度调查结果表明,此次地震烈度最高为Ⅵ度,等震线形状呈椭圆形,长轴走向为NE向(图2)。从鲁甸 $M_s4.9$ 地震烈度图等震线形状来看,长轴为NE向、椭圆状。

截至2月15日,鲁甸4.9级地震序列共发生

地震 44 次（含主震），其中 $M_{0.0} \sim 1.9$ 地震 31 次、 $2.0 \sim 2.9$ 地震 11 次、 $3.0 \sim 3.9$ 地震 1 次、 $4.0 \sim 4.9$ 地震 1 次。余震主要沿 NE 向展布，主要分布于烈度圈的 NE 侧，最大的余震为 3.0 级，其震中位置位于主震震中 NE 向（图 2）。鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 级余震序列的分布特征显示，NE 向为能量释放的主要方向。

2.2 震源机制解结果

表 1 为 2014 年鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$ 和 2017 年鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 地震的震源机制解结果。表中由中国地震局滇西地震预报实验场给出的 $M_{\text{s}}4.9$ 地震震源机制解的节面走向显示此次地震可能与 NEE 向或 SSW 向能量的释放有关，皆以走滑运动为主。其中，节面 I 走向与宏观烈度调查所得的等震线长轴方向最为接近（图 2）。

表 1 中，分别列出中国地震局滇西地震预报实

验场、何骁慧等（2015）以及美国地质调查局（USGS）（张勇等，2014）给出的鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$ 地震震源机制解结果。其中，美国地质调查局（USGS）与滇西实验场给出的 2017 年鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 地震震源机制解两节面极为相近。其中，NE 向节面与昭通—鲁甸断裂的走向大体一致（闻学泽等，2013）；NW 向节面对应 NW 向的包谷垭—小河断裂（何骁慧等，2015）。

根据震源机制解的结果，发现两次鲁甸地震的不同之处在于，2014 年鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$ 地震破裂方向沿 NW 向节面的拟合程度优于 NE 向节面（何骁慧等，2015），而 2017 年鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 地震等震线长轴走向为 NE 向。

综上所述，2017 年鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 地震与 2014 年鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$ 地震在等震线特征、余震序列分布及震源机制解等方面存在较大差异。

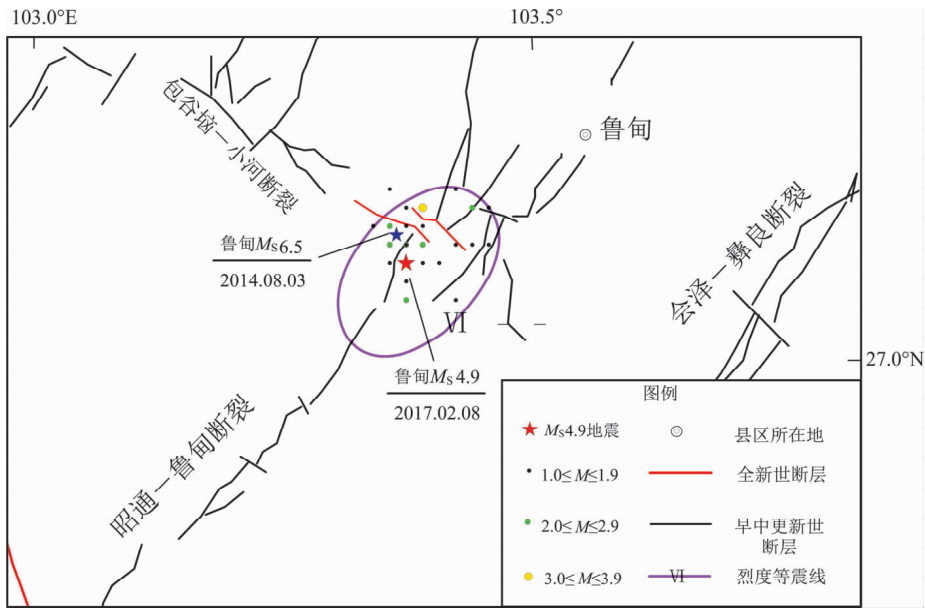


图 2 鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 地震余震序列与烈度等震线分布

Fig. 2 Distribution of aftershock sequence and intensity isoseismal of the Ludian $M_{\text{s}}4.9$ earthquake

表 1 鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$ 和 $M_{\text{s}}6.5$ 地震震源机制解

Tab. 1 Focal mechanism solutions of the Ludian $M_{\text{s}}4.9$ earthquake and $M_{\text{s}}6.5$ earthquake

地震名称	矩震级 M_{w}	节面 I / (°)			节面 II / (°)			数据来源
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
鲁甸 $M_{\text{s}}4.9$	4.8	74	83	169	165	79	7	滇西实验场
鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$	6.5	165	65	12	70	79	155	滇西实验场
鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$	6.2	168	76	19	73	71	165	何骁慧等（2015）
鲁甸 $M_{\text{s}}6.5$	6.1	162	86	6	72	84	176	USGS

3 区域地震类型特征

地震类型是研究地震活动性的重要参数,影响地震类型的主要因素有震区介质状态、动力过程和发震断层几何性状(皇甫岗等,2007)。地震序列类型与震源构造环境的不均匀程度存在密切关系(韩志军等,2003)。地震的震源机制携带着应力场和震源破裂错动的信息,与震源断层的力学性质和动力学特征相关,是了解区域应力场和地震成因的有效途径之一(郭祥云,2014)。为了探讨昭通—鲁甸断裂带及其邻区的孕震环境,本文从地震序列类型和震源机制解两个方面研究该区的地震类型。分析了1990年以来在该区发生的 $M \geq 5.0$ 地震的地震序列类型和震源机制解特征(表2、3,图3),总结昭通—鲁甸断裂带上地震序列类型的分段差异性及其震源机制解分布特征,进一步探讨该区的孕震构造环境。

3.1 地震序列类型分布

地震序列类型研究有助于地震趋势及区域地震活动性的判定(皇甫岗等,2007)。昭通—鲁甸断裂带附近地震频发,特别是2000年以来,中强地震明显增多(表2)。区内1900年以来典型中强地震震中分布图显示,昭通—鲁甸断裂带及邻区的中强地震主要分布于NE向与NW向断裂交汇处(图3)。据此,大体上可以将断裂带附近的中强地震划分为4个震中区,分别为永善—盐津震中区,大关—彝良震中区,昭通—鲁甸震中区和东川—巧家震中区(图3阴影)。其中,永善—盐津震中区位于莲峰断裂带北端,其它3个震中区位于昭通—鲁甸断裂带上(图3)。

从地震序列类型来看,该区地震主要为主震—余震型。但永善—盐津震中区、大关—彝良震中区、昭通—鲁甸震中区均分布有双震型地震,分别为2006年盐津2次 $M_{\text{s}}5.1$ 地震、2014年永善 $M_{\text{s}}5.3$ 和 $M_{\text{s}}5.0$ 地震、2012年云南彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 和 $M_{\text{s}}5.6$ 级地震、2003年鲁甸 $M_{\text{s}}5.1$ 和 $M_{\text{s}}5.0$ 地震。与滇东地区以主震—余震型为主兼具双震型的地震类型一致。

从构造位置上看,以NW向包谷垭—小河断裂为界,昭通—鲁甸断裂带附近的地震序列类型存在明显分区。NE段以主震—余震型为主,兼有双

震型;SE段总体表现为主震—余震型。

3.2 震源机制解分析

昭通—鲁甸断裂带是一条比较活跃的重要活动断裂,2000年以来断裂带两侧中强地震频发。本文收集了2000年以来该区中强地震的震源机制参数,并参照三角形分类图解法对这些地震的震源机制解进行力学机制归类(李亚敏等,2008)。结果表明,该区中强地震以走滑型地震为主,部分兼具逆冲性质(表3)。

从构造位置来看,昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震震源机制类型的分布具有明显的分区,受区域活动断裂控制明显。断裂带NE段以走滑兼逆冲型地震为主,SW段以走滑型地震为主。整体而言,逆冲分量由NE向SW逐渐变弱。NE端永善—盐津震中区逆冲分量最强,SW端与小江断裂

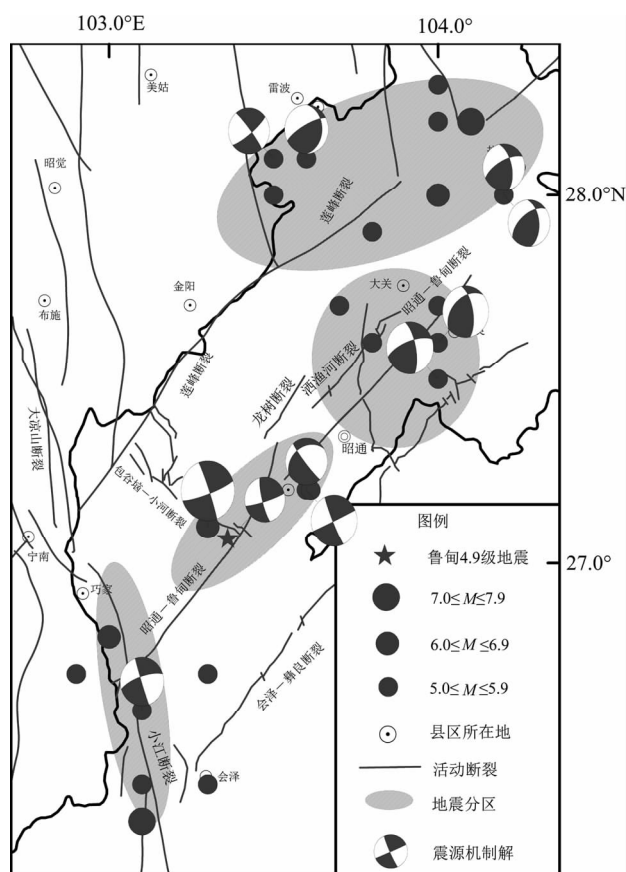


图3 昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震震中及震源机制解分布图

Fig. 3 The epicenter location and focal mechanism solutions map of moderate earthquakes of Zhaotong - Ludian Fault Zone and its adjacent areas

带交汇处基本为走滑型，而中段大关—彝良震中区和昭通—鲁甸震中区两类兼具。以上表明震源机制解的分布和变化与地震序列类型具有很好的对应关系。

表 2 1900 年以来昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震目录

Tab. 2 The earthquake catalogue of moderate earthquakes on Zhaotong – Ludian Fault Zone and its adjacent areas since 1900

序号	日期/年-月-日	震级	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	地名	序号	日期/年-月-日	震级	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	地名
1	1733-08-02	7.75	26.3	103.1	东川	15	1974-07-10	5.2	28.2	103.8	大关
2	1914-09-26	5.0	26.4	103.3	会泽	16	2003-11-15	5.1	27.2	103.6	鲁甸
3	1916-03-02	5.2	26.7	103.3	会泽	17	2003-11-26	5.0	27.3	103.62	鲁甸
4	1917-07-31	6.7	28.0	104.0	大关	18	2004-08-10	5.6	27.2	103.6	鲁甸
5	1930-05-15	6.0	26.8	103.0	巧家	19	2005-08-05	5.3	26.6	103.1	川滇交界
6	1947-06-07	5.5	26.7	102.9	川滇交界	20	2006-07-22	5.1	28.0	104.2	盐津
7	1948-10-10	5.7	27.6	103.8	大关	21	2006-08-25	5.1	28.0	104.2	盐津
8	1948-12-05	5.0	26.4	103.1	巧家	22	2012-09-07	5.7	27.5	104.0	彝良
9	1948-12-14	5.2	28.0	103.5	永善	23	2012-09-07	5.6	27.6	104.0	彝良
10	1959-03-11	5.0	28.2	104.0	盐津	24	2014-04-05	5.3	28.1	103.6	永善
11	1959-08-13	5.0	27.7	103.7	大关	25	2014-08-03	6.5	27.1	103.3	鲁甸
12	1966-10-11	5.1	27.9	103.8	永善	26	2014-08-17	5.0	28.1	103.5	永善
13	1973-04-22	5.0	27.7	104.0	彝良	27	2017-02-08	4.9	27.07	103.36	鲁甸
14	1974-05-11	7.1	28.2	104.1	大关						

注：列入 1733 年东川 7¼ 级地震作为历史强震补充。

表 3 2000 年以来昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震震源机制节面解

Tab. 3 Focal mechanism solutions of moderate earthquakes of Zhaotong – Ludian Fault Zone and its adjacent areas since 2000

日期	震级	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	节面 I/($^{\circ}$)			节面 II/($^{\circ}$)			地名	类型	参数来源
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角			
2003-11-15	5.1	27.2	103.6	238	36	-170	146	84	-55	鲁甸	走滑型	GCMT
2004-08-10	5.6	27.2	103.6	156	85	1	66	89	175	鲁甸	走滑型	GCMT
2005-08-05	5.3	26.6	103.1	252	73	-178	161	88	-17	川滇交界	走滑型	GCMT
2006-07-22	5.1	28.0	104.2	347	59	27	242	67	146	盐津	走滑兼逆冲型	GCMT
2006-08-25	5.1	28.0	104.2	355	50	45	232	57	130	盐津	走滑型	GCMT
2012-09-07	5.7	27.5	104.0	250	69	158	348	70	22.5	彝良	走滑兼逆冲型	罗钧, 2013
2012-09-07	5.6	27.6	104.0	229	44	141	349	64	53.1	彝良	走滑兼逆冲型	罗钧, 2013
2014-04-05	5.3	28.1	103.6	242	75	115	0	29	31	永善	走滑兼逆冲型	滇西试验场
2014-08-03	6.5	27.1	103.3	340	86	-9	71	81	-175	鲁甸	走滑型	GCMT
2014-08-17	5.0	28.1	103.5	321	84	-11	52	79	-173	永善	走滑型	滇西试验场
2017-02-08	4.9	27.07	103.36	165	79	7	74	83	169	鲁甸	走滑型	滇西试验场

4 讨论与结论

4.1 讨论

2017 年鲁甸 $M_s4.9$ 地震发生在昭通—鲁甸断

裂 SW 段和 NE 段结合部位，也是 NE 向断裂和 NW 向断裂的交汇地带，是应力最容易集中的地方。张勇等（2015）通过近、远震数据的联合反演，认为 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震是在 NW – SE 向主压应力和 NE – SW 向主张应力的应力场作用下

发生的一次共轭断裂先后破裂引起的地震事件。研究结果认为，NE 向的右旋走滑断裂（昭通—鲁甸断裂）先破裂，随后触发了 NW 向左旋走滑断裂（包谷垭—小河断裂）的破裂，导致 NE 向断裂东段进一步闭锁。昭通—鲁甸断裂带东段在 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震后闭锁而使得原先积累的能量未能释放完全， $M_s4.9$ 地震的发生可能是这部分能量因构造活动等原因解锁而重新释放的结果。但由于两次地震等震线特征、余震序列分布及震源机制解存在很大差异，因此，笔者认为鲁甸 $M_s4.9$ 地震可能不属于鲁甸 $M_s6.5$ 地震的强余震。

4.1.1 区域构造应力场

震源机制解是岩石圈脆性层应力状态的客观反映（刘平江等，2007；唐渊，刘俊来，2010）。由于多个地震的 P、B、T 轴在一定条件下（断层面的取向有随机性、地震散布于全区等）可平均反映某地区构造应力场的最大、中等、最小主压应力的方向（许忠淮等，1983）。根据震源机制解的 P、B、T 轴推断应力场主轴方向是一种常用的简便方法（武敏捷，2006）。

2000 年以来昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震震源机制解显示，主压应力方向为 NW—SE 向，主张应力方向为 NE—SW 向（表 4、图 4），与区域现代构造应力场是一致的。其中，P 轴倾角较稳定，近于水平；T 轴倾角北东段陡，南西段缓；

B 轴在彝良以北东倾角约 30° ，至鲁甸往南西变为近直立。P、T 轴倾向区域变化明显，P 轴北东段（永善和盐津地区）倾向 NW，往南西转为倾向 SE；T 轴则由倾向 SW 变为倾向 NE（表 4、图 4）。根据主应力轴的分布特征及历史中强地震震源类型特征，推测可能在区域应力场的作用下，整个川滇块体向 SE 滑移过程中，在昭通—鲁甸断裂带及邻区受到稳定华南地块的阻挡，造成该区活动断裂表现为 NE 向走滑为主兼具逆冲性质。同时，由于阻挡作用的差异，以及小江断裂带走滑活动的影响，导致昭通—鲁甸断裂带及邻区所属的滇东块体逆时针扭转（林向东，2009）。

4.1.2 孕震构造环境

印度板块持续向欧亚板块的北东向俯冲碰撞为川滇地块现今的 SSE 向沿喜马拉雅东构造结顺时针旋转提供动力来源。川滇地块、松潘地块和华南地块的相互运动表现为华南地块以稳定被动地块的形式阻挡着松潘地块、川滇地块的 E 向和 SSE 向挤压，这种相互运动及阻挡使得块体边界断裂带上应力不断积累，最终以地震的形式释放能量。因此，边界断裂带上及断裂交汇部位地震频发（李西，2015）。近年来昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震频发，断裂带上分布的地震以右旋走滑断层为主，受川滇地块与坚硬的华南块体的共同影响，逆冲分量沿 NE 向逐渐增加（李君，2016）。

表 4 昭通—鲁甸断裂带及邻区 2000 年以来中强地震震源机制解应力轴参数
Tab. 4 Focal mechanism solutions for principle axes of moderate earthquakes of Zhaotong-Ludian Fault Zone and its adjacent areas since 2000

日期	震级	$\varphi_N/$ ($^\circ$)	$\lambda_E/$ ($^\circ$)	T 轴/($^\circ$)		B 轴/($^\circ$)		P 轴/($^\circ$)		地名	类型	参数来源
				方向	仰角	方向	仰角	方向	仰角			
2003-11-15	5.1	27.2	103.6	214	30	328	35	94	40	鲁甸	走滑型	GCMT
2004-08-10	5.6	27.2	103.6	21	4	230	85	111	2	鲁甸	走滑型	GCMT
2005-08-05	5.3	26.6	103.1	208	11	335	73	115	13	川滇交界	走滑型	GCMT
2006-07-22	5.1	28.0	104.2	201	40	31	49	296	5	盐津	走滑兼逆冲型	GCMT
2006-08-25	5.1	28.0	104.2	198	57	27	32	295	4	盐津	走滑型	GCMT
2012-09-07	5.7	27.5	104.0	197	49	32	40	296	7	彝良	走滑兼逆冲型	GCMT
2012-09-07	5.6	27.6	104.0	199	39	5	51	104	7	彝良	走滑兼逆冲型	GCMT
2014-04-05	5.3	28.1	103.6	196	58	35	30	300	9	永善	走滑兼逆冲型	GCMT
2014-08-03	6.5	27.1	103.3	26	3	133	80	296	9	鲁甸	走滑型	GCMT
2014-08-17	5.0	28.1	103.5	181	12	26	77	272	5	永善	走滑型	GCMT
2017-02-08	4.9	27.07	103.36	29	13	221	77	120	3	鲁甸	走滑型	滇西实验场

川滇块体的 SE 向滑移在莲峰、昭通—鲁甸断裂附近受到稳定华南地块的抵挡,致使这 2 条断裂带发生显著 NE 向右旋错动与逆冲作用。这正是该区震源机制解主要表现为右旋走滑兼逆冲特征的构造因素(罗钧,2013)。

受小江断裂带具备较大应变积累影响,加上该断裂带和周边区域地壳速度偏低,强度相对较小,处于应力和应变的集中区域,昭通—鲁甸断裂带的活动性,值得重点关注(徐涛等,2014)。

李大虎(2016)通过视密度反演与 P 波速度结构研究结果表明,昭通—鲁甸断裂北段(鲁甸—彝良段)上地壳深度范围内的介质较南段坚硬,有利于应力积累,具有强震/大震危险背景。鲁甸震源体下方壳内低速层的存在可能使得其上覆脆性上地壳物质易于构成应力集中,易于形成强震,这正是昭通—鲁甸断裂带中强震孕育和发生的深部构造背景(李大虎,2016)。

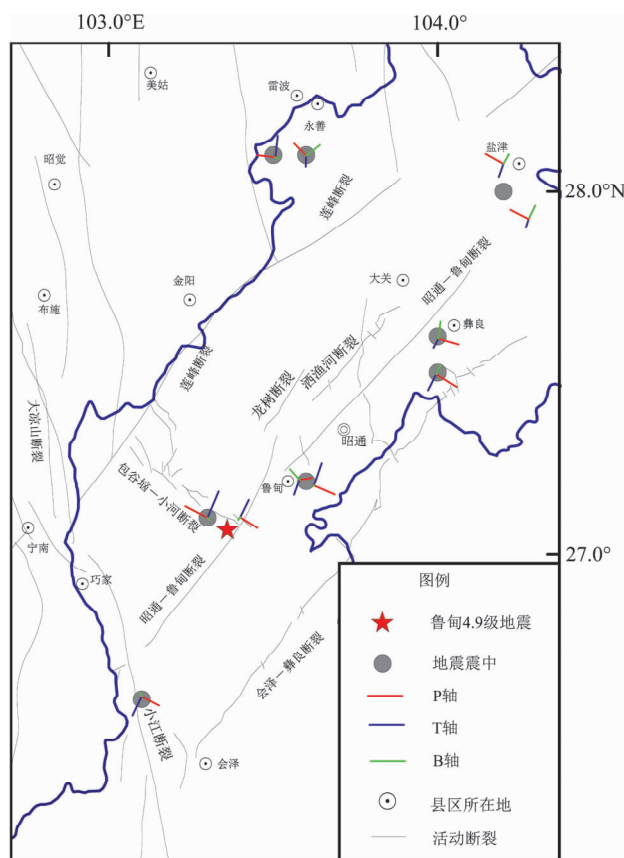


图 4 昭通—鲁甸断裂带及邻区中强地震震源机制解应力轴分布图

Fig. 4 The focal mechanism solutions map for principle axes of moderate earthquakes of Zhaotong - Ludian Fault Zone and its adjacent areas

重力研究结果显示的密度结构(陈石等,2014)、GPS 监测反映的应变速率(闻学泽等,2013)、噪声成像给出的面波群速度(鲁来玉等,2014)以及地壳精细结构显示的地壳厚度和泊松比变化(王兴臣等,2015)等研究结果都表明,青藏高原下地壳物质在向 SE 运移的过程中受到昭通—鲁甸断裂 SW 段和 NE 段的阻挡作用有所差异,SW 段的阻挡作用较弱,NE 段的阻挡作用较强。使得昭通—鲁甸断裂 NE 段对青藏高原下地壳物质向 SE 运移有较强的阻挡作用,有利于应变能的积累。这些特征表明,昭通—鲁甸断裂 NE 段与 SW 段地壳物质组分存在较大差异,结合该地带是应力积累的理想场所(王兴臣等,2015),为鲁甸 $M_s 4.9$ 地震乃至鲁甸地区的中强地震的孕育提供了环境。

综上,昭通—鲁甸断裂带及邻区构造位置特殊,地震构造背景复杂。川滇地块南南东向运动为其提供了活动和变形的动力来源,深部低速层的存在以及地壳物质的差异性等特征为区域地震孕育与发生提供了有利的深部构造环境。

4.1.3 地震活动性

通过对地震序列和震源机制特征分析表明,昭通—鲁甸断裂带及邻区地震类型存在明显分区,主要受区域断裂控制。昭通—鲁甸断裂带及邻区位于川滇块体东侧、大凉山次级块体南缘、川滇块体与华南块体的交界带上。青藏高原物质向东流动,受到坚硬的华南块体的阻挡而转向,致使川滇块体向 SE、SSE 方向移动并发生顺时针旋转,形成了一系列 NE 向右旋走滑兼具逆冲的活动构造带,如莲峰断裂带、昭通—鲁甸断裂带和会泽—彝良断裂带等(李君等,2016;罗钧等,2014)。从而形成了以走滑型和走滑兼逆冲型地震的震源机制解特征。地壳物质的不均匀,导致块体不同部位遭受不同的构造变形,在相对软弱地带,应力容易集中,沿块体运动方向形成 NW 向活动断裂。区域上形成 NE 向与 NW 向断裂网格状交错的构造格局,断裂交汇处成为区域地震孕育的有利场所。地震序列和震源机制解的分布特征很好地说明了这一点。

在鲁甸 $M_s 4.9$ 地震发生后仅 32 天,2017 年 3 月 12 日 20 时 21 分鲁甸再次发生 $M_s 4.5$ 地震,震中位置为 (27.09°N, 103.4°E),震源深度 10 km。可见,鲁甸地区地震活动异常活跃,值得重点

关注。

4.2 结论

通过 2017 年鲁甸 $M_s4.9$ 地震等震线长轴方向、震源机制解、余震分布等特征以及昭通—鲁甸断裂带及邻区地震类型特征分析,得出以下结论:

(1) 等震线长轴方向、震源机制解、余震序列分布等特征表明鲁甸 $M_s4.9$ 地震可能不属于鲁甸 $M_s6.5$ 地震的强余震。

(2) 据历史中强地震震中分布特征,将昭通—鲁甸断裂带及邻区划分为永善—盐津震中区、大关—彝良震中区、昭通—鲁甸震中区和东川—巧家震中区 4 个震中区。震源机制解的分布和变化与地震序列类型具有很好的对应关系,受区域活动断裂控制明显。

(3) 昭通—鲁甸断裂带及邻区构造位置特殊,地震构造背景复杂。区内 NE 向与 NW 向活动断裂交错,断裂交汇处成为有利的地震孕育场所。

笔者还注意到,川滇地区在 104.0°E 线上中强地震震中成串分布,几乎为等间距出现(图 3),往南会泽地区亦有该现象。此现象只是巧合,还是与区域未知构造存在某种内在联系,有待进一步研究。

参考文献:

常玉巧,钱文品,杨仁华,等. 2016. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震前昆明地震台定点形变观测异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 37(3): 124–131.

常祖峰,周荣军,安晓文,等. 2014. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及其构造意义[J]. 地震地质, 36(4): 1260–1279.

陈石,王青华,王谦身,等. 2014. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源区和周边三维密度结构及重力场变化[J]. 地球物理学报, 57(9): 3080–3090.

程佳,徐锡伟,刘杰. 2016. 2014 年鲁甸 6.5 级地震成因、破裂特征和余震分布特征的库仑应力作用[J]. 地球物理学报, 59(2): 556–567.

付芮,单斌,熊熊,等. 2015. 2014 年云南鲁甸地震同震库仑应力对余震分布及周边断层的影响[J]. 地震地质, 37(4): 1084–1095.

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.

韩德润. 1993. 马边—永善地震带构造形式及地震特征[J]. 地震地质, 15(3): 253–260.

韩志军,王桂兰,周成虎,等. 2003. 地震序列研究现状与研究方向探讨[J]. 地球物理学进展, 18(1): 74–78.

何晓慧,倪道,刘杰. 2015. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M6.5$ 地震破裂方向性研究[J]. 中国科学:地球科学, 45(3): 253–263.

侯治华,钟南才,赵建荣. 2004. 马边—永善地震带及邻区新构造应

力场和现代构造应力场的探讨[C]. 全国地壳应力会议文集.

皇甫岗,李忠华,秦嘉政,等. 2007. 川滇菱形块体强震活动关联分析[J]. 地震研究, 30(3): 205–209, 303.

金明培,杨军,陈佳,等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M6.5$ 级地震概况[J]. 地球物理学进展, 29(4): 1980–1984.

阚荣举,王绍晋,黄崑,等. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, 5(2): 79–90.

阚荣举,张四昌,晏凤桐,等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96–109.

李大虎. 2016. 川滇交界地段强震潜在危险区深部结构和孕震环境研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.

李君. 2016. 川滇地块东边界及邻区震源机制解与应力场空间分布特征[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.

李西,徐锡伟,张建国,等. 2017. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震发震断层地表破裂特征、相关古地震的发现和年代测定[J]. 地学前缘, 24: 1–13.

李西,张建国,谢英情,等. 2014. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震地表破坏及其与构造的关系[J]. 地震地质, 36(4): 1280–1291.

李西. 2015. 川滇地块云南地区不同发育阶段边界断裂破裂特征研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.

李亚敏,徐辉龙,孙金龙,等. 2008. 红河断裂带及其邻区的震源机制解特征及其反映的断裂活动分段性[J]. 热带海洋学报, 27(2): 32–39.

林向东. 2009. 小将断裂中段及邻近地区震源机制及构造应力场分析[D]. 北京:中国地震局兰州地震研究所.

刘平江,刁桂琴,宁杰远. 2007. 川滇地块的震源机制解特征及其地球动力学解释[J]. 地震学报, 29(5): 449–458, 560.

鲁来玉,何正勤,丁志峰等. 2014. 基于背景噪声研究云南地区面波速度非均匀性和方位各向异性[J]. 地球物理学报, 57(3): 822–836.

罗钧,赵翠萍,周连庆. 2014. 川滇块体及周边区域现今震源机制和应力场特征[J]. 地震地质, 36(2): 405–421.

罗钧. 2013. 川滇块体及周边现今震源机制和应力场特征研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.

邵崇建,李勇,周游,等. 2015. 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震发震构造特征及动力源分析[J]. 地震工程学报, 37(4): 1082–1089.

石磊,贾晓东,陈石,等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震前重力变化特征与 3 维反演[J]. 地震地质, 36(4): 1217–1227.

唐渊,刘俊来. 2010. 川滇西部上新世以来构造地貌:断裂控制的盆地发育及对于远程陆内构造过程的约束[J]. 岩石学报, 26(6): 1925–1937.

王腾文,李勇,李敬波,等. 2015. 包谷垭—小河断裂——2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震发震构造[J]. 防灾科技学院学报, 17(2): 1–7.

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[J]. 地球物理学报, 58(11): 4031–4040.

闻学泽,杜方,易桂喜,等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361–3372.

武敏捷. 2006. 基于震源机制解的地震序列及区域应力场特征研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.

徐涛,张明辉,田小波,等. 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 $M_s6.5$ 级地震孕震环境的关系[J]. 地球物理学报, 57

- (9):3069–3079.
- 徐锡伟,程佳,许冲,等. 2014a. 青藏高原块体运动模型与地震活动主体地区讨论:鲁甸和景谷地震的启示[J]. 地震地质,36(4):1116–1134.
- 徐锡伟,江国焰,于贵华,等. 2014b. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报,57(9):3060–3068.
- 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.
- 张广伟,雷建设,梁姗姗,等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s6.5$ 级地震序列重定位与震源机制研究[J]. 地球物理学报,57(9):3018–3027.
- 张彦琪,李西,谢英情,等. 2015. 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震人员震害研究[J]. 地震研究,38(3):432–441.
- 张彦琪,李西,谢英情,等. 2016. 以鲁甸地震和彝良地震为例分析云南昭通地质构造与地震灾害特点[J]. 地震研究,39(2):270–278.
- 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[J]. 地球物理学报,58(1):153–162.
- 张勇,许力生,陈运泰,等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_w6.1$ ($M_s6.5$) 地震破裂过程[J]. 地球物理学报,57(9):3052–3059.
- 张振国,孙耀充,徐建宽,等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸地震强地面运动初步模拟及烈度预测[J]. 地球物理学报,57(9):3038–3041.
- 赵小艳,韩立波,徐甫坤,等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列跟踪分析研究[J]. 地震研究,37(4):508–514.
- 赵小艳,孙楠. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震震源位置及震源区速度结构联合反演[J]. 地震研究,37(4):523–531.
- LI X, XU X W, RAN Y K. 2015. Compound Fault Rupture in the 2014 $M_s6.5$ Ludian, China, Earthquake and Significance to Disaster Mitigation[J]. Seismological research letters, 86(3):764–774.

Seismic Activity and Seismic Tectonic Environment in Ludian Area

CHANG Yuqiao, XIE Yingqing, ZHANG Yanqi, LI Lei,
WU Rongbang, YU Jiang, LUO Weidong

(Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We analyzed characteristics of isoseismic lines, earthquake focal mechanism solutions and aftershocks distribution of the Ludian $M_s4.9$ earthquake. Based on earthquake sequences and focal mechanism solutions, the characteristics of spatial distribution of earthquake type on Zhaotong – Ludian fault zone and its adjacent areas are investigated; Combining the results of field work and previous studies, the seismic tectonic environment is discussed. Main conclusions are drawn as follows: (1) Ludian $M_s4.9$ earthquake may be related to the activity of the NE-trending Longshu fault; (2) Ludian $M_s4.9$ earthquake may not be a strong aftershock of the Ludian $M_s6.5$ earthquake occurred on August 3, 2014; (3) The characteristics of spatial distribution of earthquake type among Zhaotong – Ludian fault zone and its adjacent areas are apparently controlled by the regional faults, which creates a good seismogenic environment.

Keywords: Ludian $M_s4.9$ earthquake; Zhaotong – Ludian fault zone; focal mechanism solutions; earthquake type; seismogenic environment