

魏文薪, 江在森, 邵德胜等. 2018. 2014 年鲁甸 6.5 级地震 GPS 同震位移及反演分析. 地球物理学报, 61(4):1258-1265, doi: 10.6038/cjg2018L0141.

Wei W X, Jiang Z S, Shao D S, et al. 2018. Coseismic displacements from GPS and inversion analysis for the 2014 Ludian 6.5 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(4):1258-1265, doi:10.6038/cjg2018L0141.

2014 年鲁甸 6.5 级地震 GPS 同震位移及反演分析

魏文薪¹, 江在森^{1*}, 邵德胜², 邵志刚¹, 刘晓霞¹, 邹镇宇¹, 王岩²

1 中国地震局地震预测重点实验室(中国地震局地震预测研究所), 北京 100036

2 云南省地震局, 昆明 650224

摘要 本文综合 GPS 流动和连续观测结果, 并利用最速下降法(SDM)反演方法, 给出并分析了 2014 年鲁甸 6.5 级地震同震位移、断层面滑动位移分布特征. GPS 同震位移结果表明:此次地震沿北西方向表现出左旋应变释放特征、沿北东向表现出拉张应变释放的同震特征, 并且随着离开断裂带距离的增加, 拉张变形衰减;受包谷垭—小河断裂控制的左旋剪切应变释放的位移在莲峰、昭通—鲁甸断裂附近较弱, 说明该断裂可能没有完全切割昭通—鲁甸断裂, 不属于该区域主干断裂;昭通—鲁甸断裂带有一定的右旋应变释放, 而逆冲应变释放不明显, 表明该断裂带处于受南东向挤压的强闭锁状态. SDM 反演结果表明, 鲁甸地震以左旋走滑为主并兼有拉张性质, 地震矩震级为 $M_w 6.3$ 左右. 综上所述, 并结合其他研究成果, 我们认为莲峰、昭通—鲁甸断裂带仍存在强震危险性.

关键词 鲁甸地震; GPS; 同震位移; 滑动位移分布

doi:10.6038/cjg2018L0141

中图分类号 P228, P315

收稿日期 2017-03-08, 2018-02-12 收修定稿

Coseismic displacements from GPS and inversion analysis for the 2014 Ludian 6.5 earthquake

WEI WenXin¹, JIANG ZaiSen^{1*}, SHAO DeSheng², SHAO ZhiGang¹,
LIU XiaoXia¹, ZOU ZhenYu¹, WANG Yan²

1 Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

2 Earthquake Bureau of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract Based on campaign and continuous GPS observations, this work analyzes the coseismic displacement and the slip distribution on the rupture of the 2014 Ludian 6.5 earthquake using the Steepest Decent Method (SDM) inversion method. The results show the left-lateral strain releases in the north-west direction, and the tensile strain releases in the north-east direction which is attenuated with the distance away from the fault. The displacement of the left-lateral shear strain controlled by the Baogunao-Xiaohe fault is weak in the vicinity of the Lianfeng and Zhaotong-Ludian faults, which indicates that the ruptured fault may not completely cut through the Zhaotong-Ludian fault and the ruptured fault is not a major feature in this area. The Zhaotong-Ludian fault has a certain right-lateral strain release, on which thrust strain release is not obvious, implying that the Zhaotong-Ludian fault is highly locked due to the south-east compression. The results of

基金项目 国家自然科学基金课题(41461164004, 41274008)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项重点项目(2014IES010201)联合资助.

第一作者简介 魏文薪, 男, 1981 年生, 副研究员, 2012 年毕业于中国地震局地质研究所, 主要从事大地测量与地球动力学研究工作.

E-mail: wwx09130510@126.com

* **通讯作者** 江在森, 男, 研究员, 主要从事大地测量相关研究工作. E-mail: jiangzaisen@126.com

SDM inversion show that the Ludian earthquake is dominated by left-lateral and tensile motion, and the magnitude of the earthquake is around $M_w 6.3$. Combined with other research results, we suggest that the Lianfeng and Zhaotong-Ludian fault zones still have high seismic risk.

Keywords Ludian earthquake; GPS; Coseismic displacement; Slip distribution

0 引言

2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分在云南省昭通市鲁甸县发生了 $M_s 6.5$ 地震, 中国地震台网中心测定震中位于 ($103.3^\circ\text{E}, 27.1^\circ\text{N}$), 震源深度约为 12 km (<http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/904/20140803164411140707936/index.html>). 本次地震是青藏高原巴颜喀拉块体及其邻近地区最新地震活跃期内发生的一次中等强度地震(邓起东等, 2014). 云南省鲁甸 6.5 级地震发生后, 多位研究学者针对发震构造、震源破裂过程、震源区三维地壳结构等开展了深入研究, 取得了丰富成果(陈石等, 2014; 刘成利等, 2014; 王未来等, 2014; 许力生等, 2014; 徐锡伟等, 2014; 张勇等, 2014). 根据活动断裂构造分布图(邓起东, 2007; 闻学泽等, 2013), 这次鲁甸 6.5 级地震发生在挤压兼右旋剪切、北东走向的昭通—鲁甸断裂带附近. 但这次地震的主破裂为北北西向左旋走滑剪切破裂(何骁慧等, 2015), 徐锡伟等(2014)通过野外地表调查及余震分布特征认为此次地震发震构造为包谷垭—小河断裂(是新发现的一条断裂), 应属鲜水河—小江断裂系东侧大凉山断裂南端部组成部分. 闻学泽等(2013)研究表明: 鲁甸地震前昭通—鲁甸断裂带无大震时间至少为 1700 余年, 属于典型的强震空区, GPS 速度剖面显示该断裂带呈不同程度闭锁, 由低 b 值区和小震定位结果识别出该断裂带的鲁甸—彝良间存在高应力状态的闭锁段. 那么, 这次鲁甸地震发生是否与昭通—鲁甸断裂的强震孕育背景有关联, 其对主干断裂带(昭通—鲁甸断裂、大凉山断裂等)应变积累状态的影响如何, 究竟是北西向断层还是北东向断层是切割区域块体的主要边界, 如包谷垭—小河断裂作为大凉山断裂的延伸对昭通—鲁甸断裂可能的切割对川滇地块挤出滑移(该区主构造动力)导致的应力应变积累分解作用如何等科学问题, 深入研究这些问题有助于深化认识此次地震的发震机理, 对区域变形在断裂带的分配作用和未来地震危险性评估等具有重要的科学意义. 而获得本次鲁甸 6.5 级地震较完整的同震位移场及断层面的滑动位移分布对研究上述科学问

题是很重要的. 本文综合处理了鲁甸地震区域的 GPS 流动复测和连续站资料, 给出了此次 6.5 级地震的地表同震位移分布, 以上述同震位移为约束, 利用 SDM 方法(Wang et al., 2003), 反演了断层面滑动位移分布, 进而对莲峰、昭通—鲁甸断裂带在本次地震的同震响应特征进行了分析; 上述结果为认识此次鲁甸 6.5 级地震的机理及区域主要断裂带地震危险性评估提供了基础资料.

1 GPS 资料处理

GPS 流动观测资料包括距震中约 150 km 范围内的 21 个陆态网络的区域站(图 1 中位移矢量蓝色箭头起点为流动站位置), 这些站在 2009、2011、2013 年有复测资料, 2014 年加密观测也在鲁甸地震前的 3 月至 9 月施测, 这对解算震前背景速度参数较为有利. 鲁甸地震后, 在中国地震局科学技术司组织专门研究中, 地震预测研究所提出了针对这次地震做 GPS 流动复测的方案被采纳, 后由云南省地震局形变测量中心实施这次复测任务, 从而获得了震后复测资料. 震后复测的这些流动站于 2014 年 9 月至 10 月施测. GPS 连续观测资料为震中区周边分布的 12 个 GPS 连续测点, 包括陆态网络 3 个基准站、云南省地震局 1 个连续观测站和中国地震局地震预测研究所布设 8 个临时连续观测站(于 2014 年 4 月开始连续观测).

根据该区分布的 12 个 GPS 连续测点在地震前后 7 天的观测数据, 并融合震后复测的 21 个流动测点(震源周边 100~150 km 范围内的流动站)采用 GAMIT/GLOBK 解算得到了此次鲁甸 6.5 级地震的同震位移场(Herring et al., 2010a, 2010b), 具体处理策略参阅文献(王敏等, 2006, 2011; 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008; 武艳强等, 2013).

考虑到流动站观测数据的采样点有限, 本文基于流动站解算同震位移经过两个主要过程, 利用 GAMIT/GLOBK 解算获取流动站时序结果, 基于线性运动模型在发震时刻施加同震阶跃参数, 一般情况下距离发震时刻越近其在计算同震位移时的作

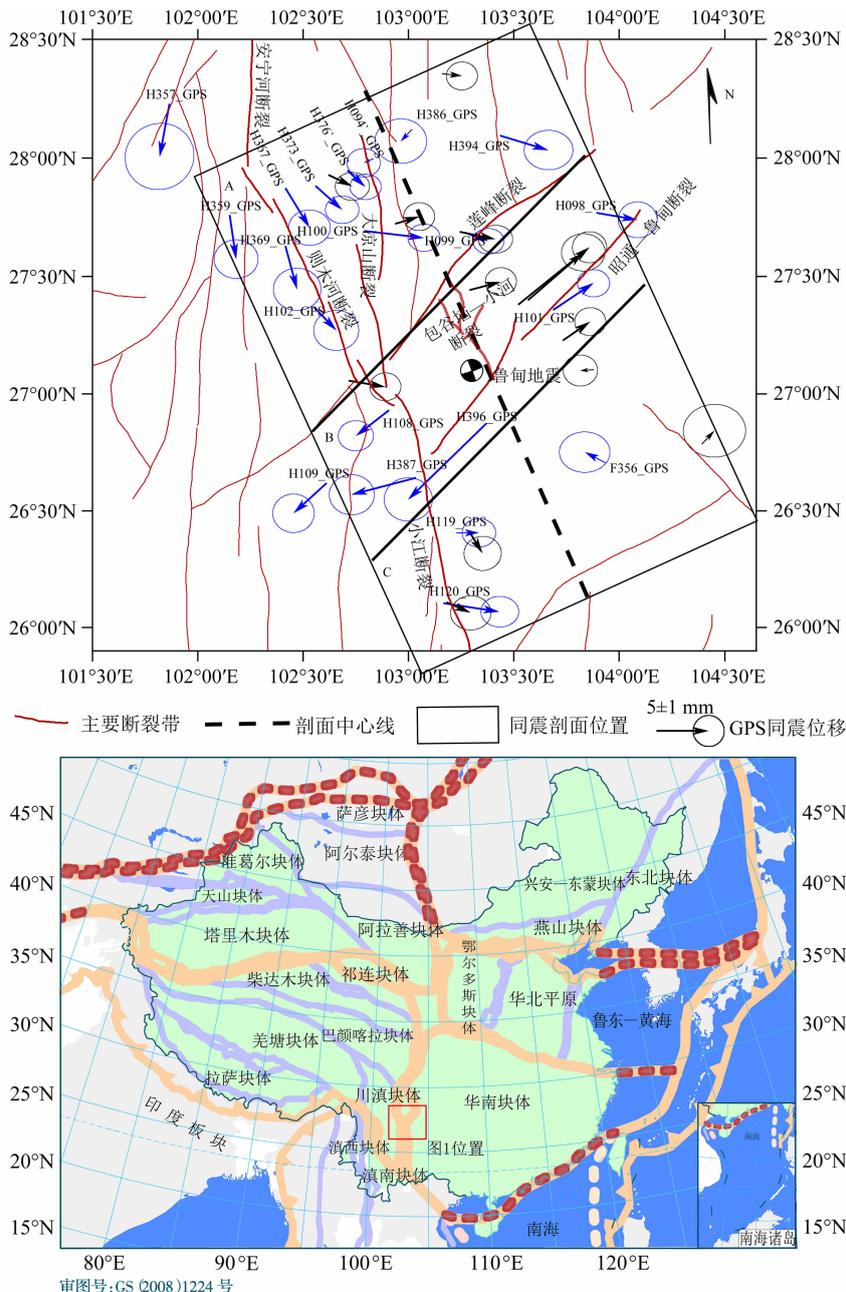


图 1 基于 GPS 连续站及流动站的鲁甸 6.5 级地震同震位移图(滤波结果)
 黑色箭头为基于连续站计算结果,蓝色箭头为基于流动站的最小二乘配置滤波结果.

Fig. 1 Coseismic displacement of the Ludian 6.5 earthquake
 from GPS continuous and campaign measurements (filtering results)

Black arrows are based on GPS continuous measurements. Blue arrows are GPS campaign observations
 using least squares configuration filter.

用也应该越大,因此在定权时采用时序最小二乘配置方法,既考虑观测误差的影响又兼顾观测时刻距离发震时刻的远近.根据上述过程计算得到流动站同震位移结果,考虑流动站和连续站解算结果的匹配问题,本文对流动站结果进行了最小二乘配置空间滤波(江在森等,2010),连续站结果同时参与滤波过程.图 1 给出的为连续站观测结果和流动站滤波

结果.表 1 给出了流动站的同震位移值(滤波结果).

2 鲁甸地震同震位移场分布特征

从图 1 给出的鲁甸 6.5 级地震同震 GPS 位移场分布来看,总体上这次地震造成的地表位移幅度不大,GPS 观测到最大位移的测点为 H396_GPS,

表 1 GPS 流动站的同震位移值(滤波结果)

Table 1 Coseismic displacements from GPS campaign observations (filtering results)

测点名	震中距 (km)	东向同震位移 (mm)	北向同震位移 (mm)
F356_GPS	76.0	-2.0±1.6	1.0±1.3
H094_GPS	108.6	-0.9±1.1	-0.4±0.9
H098_GPS	93.6	3.9±1.2	-0.7±1.2
H099_GPS	64.5	2.2±1.0	-0.8±0.8
H100_GPS	82.8	5.7±1.0	-0.7±0.9
H101_GPS	48.0	3.8±1.0	2.6±0.9
H102_GPS	80.4	2.2±1.4	-2.3±1.3
H108_GPS	41.7	-3.2±1.1	-2.5±1.0
H109_GPS	86.0	-3.2±1.3	-2.9±1.2
H119_GPS	76.6	2.2±1.1	0.0±0.9
H120_GPS	110.2	5.4±1.2	-0.8±1.0
H357_GPS	188.0	-0.9±2.2	-5.1±2.1
H359_GPS	134.8	0.6±1.4	-4.2±1.2
H367_GPS	105.8	2.3±1.3	-3.8±1.1
H369_GPS	121.9	1.1±1.5	-4.2±1.4
H373_GPS	113.3	2.5±1.1	-2.3±0.9
H376_GPS	110.6	1.7±1.0	-1.6±0.8
H386_GPS	116.1	-1.1±1.7	-1.1±1.4
H387_GPS	57.4	-6.2±1.4	-1.6±1.3
H394_GPS	111.4	4.6±1.6	-1.4±1.3
H396_GPS	26.3	-7.5±1.5	-7.3±1.4

量值约为 SW10.5 mm,该测点的震中距为 26.3 km.从位移场分布的宏观特征来看,此次地震北北西主破裂带两侧存在一定的不对称性,西侧总体上的左旋应变释放特征较明显,而东侧则不明显.在 GPS 流动复测区的中部与北部、南部位移优势方向不同.震中附近的中部位移幅度最大,是以震中为中心的南西西与北东东向位移为主,而北部是以南南东向位移为主,南部位移幅度最小(在误差范围之内),略显示受地震主破裂带控制的左旋应变释放趋势.

为了进一步分析同震位移分布的整体与分区特征,以包谷垭一小河断裂带为中心线,建立 GPS 同震位移剖面,并将剖面区域分成三个小的区域(图 1 所示).A 区的平行断裂带结果表明(图 2):断裂带中心线两侧表现为左旋剪切变形的整体特征;西侧的点表现出一定的左旋变形的同震位移趋势,东侧由于点位较少,看不出显著的特征;另一显著特征表现为断裂带两侧变形的不对称性,A 区域内包含

的断裂带(则木河断裂带、大凉山断裂带中南段、莲峰断裂带等)错综复杂、断裂带运动性质的差异性可能是造成了同震应变释放的不对称性主要原因. B 区(震源区域)平行断裂带结果表明:靠近断裂带中心线的两个 GPS 点位(H396_GPS、NJ13)表现出明显的左旋应变释放特征,远场仍然表现出左旋特征,但左旋应变释放量小于近场;从跨昭通断裂带(NJ14、ZHYD、NJ15、NJ16、H101_GPS)近场测点来看表现出一定的逆冲同震应变释放特征,量值并不是很大. C 区平行断裂带的结果表明:虽然该区域的点位较少,利用反正切函数拟合该区域的同震位移剖面,确实存在左旋剪切应变释放,但是量值很小,由于断裂带近场无 GPS 站点,只能给出趋势性判定,具体的量值还是无法估计.三个区域的平行断裂带剖面结果表明:此次鲁甸 6.5 级地震表现出左旋应变释放的特征,这与此次地震震源机制结果较为一致,但由于靠近震中附近没有 GPS 测点,此次鲁甸地震的左旋同震应变释放的具体量值无法估计;A 区域的左旋应变释放特征要比 B 区(震源区域)的应变释放特征显著,一方面表现出了川滇块体

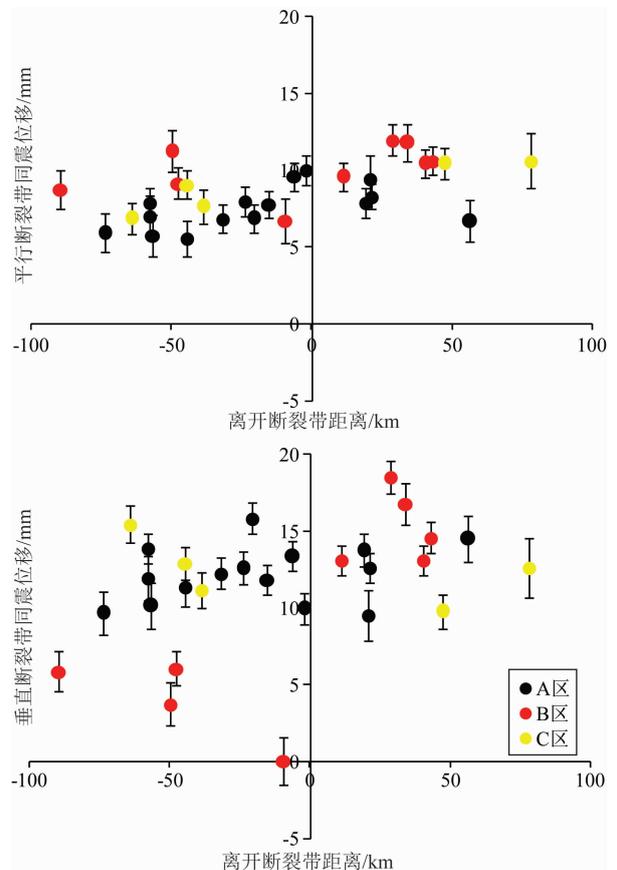


图 2 鲁甸 6.5 级地震同震位移剖面
Fig. 2 Coseismic displacement profile of the Ludian 6.5 earthquake

侧向挤出滑移运动可能是本区域同震变形的主要动力源,另一方面也表明了此次地震的影响范围还是十分有限. A 区垂直断裂带的剖面结果表明(图 2):整体来看表现出少量的拉张变形同震特征,剖面中心线两侧的同震位移值没有显著的变化,考虑到区域的主要断裂为川滇块体东边界的主干断裂,并顾及这些断裂带几何特征(切割深度深,倾角陡)及运动特征(走滑为主),这种微弱的拉张同震变形特征是显而易见的. B 区(震源区域)垂直断裂带的剖面结果表明:靠近剖面中心线两侧的 GPS 测点表现为显著的拉张变形同震应变释放特征,随着离开断裂带距离的增加,拉张变形表现为衰减的特征,拉张位移幅度明显比沿破裂带左旋走滑量大;跨昭通—鲁甸断裂带 NJ14、ZHYD 与 H101_GPS 测点的同震位移有显著差异,表现为较为显著的右旋应变释放特征;造成这种变形特征可能的原因就在于震区的主要构造动力作用来源于川滇地块向南东挤出滑移,如果破裂带东侧目前在南东向挤压应力应变积累水平较高,就可能使这个方向的位移响应受到抑制. 而 C 区位移方向基本上与昭通—鲁甸断裂平行也显示受到该主干断裂的控制. C 区垂直断裂带剖面结果表明:由于该区域 GPS 测点较少,离震中较远,并且考虑到此次地震的影响范围有限,因此,该区域垂直断裂带未见显著的同震变形特征. 另外,分别位于 A 区和 B 区的跨莲峰断裂(NJ12、NJ13)近场测点来看表现出少量的逆冲兼右旋的同震应变释放特征.

综上所述,由 GPS 连续站及流动站测定的鲁甸地震同震位移有以下特征:第一,由于 GPS 连续站的点位分布较为稀疏,不能捕捉到精细的近场同震变形,流动站的加入也使得 GPS 点位分布更加密集,本文综合了流动站和连续站的同震位移场结果,可清晰的看出本次地震的左旋应变释放及近场拉张应变释放的特征. 第二,三个区域(A 区、B 区、C 区)的变形差异性(南南东向位移衰减等)表明,川滇块体的侧向挤出滑移可能是造成区域变形的主要动力源. 第三,测点更为密集的 GPS 同震结果还表现出震源区拉张应变释放的同震特征,并且随着离开断裂带距离的增加,拉张变形衰减,这种拉张位移量明显大于主破裂方向的左旋位移量,这与地震现场考察看到的北北西向破裂带上有明显的拉张分量(徐锡伟等, 2014)是较一致的. 我们还注意到,地表 GPS 同震变形特征与震源机制和余震分布确定的主破裂方向为北北西向左旋剪切的结果存在一定差异,较靠近震中区的南西西、北东东方向拉张位移幅

度更大. 这与昭通—鲁甸断裂走向一致,呈现出鲁甸地震次级破裂方向北东东向的右旋应变释放量更大. 这表明虽然这次地震的发震断层不是昭通—鲁甸断裂,但同震位移可能受到该主干断裂的控制. 由于该主干断裂背景应力应变积累是以南东向挤压为主兼有右旋剪切,这次主要显示该断裂带有一定的右旋应变释放,而逆冲应变释放不明显,表明该断裂带处于受南东向挤压的强闭锁状态. 第四,由于受包谷埡一小河断裂控制的左旋剪切应变释放的位移在莲峰、昭通—鲁甸断裂附近较弱,说明该断裂可能没有完全切割昭通—鲁甸断裂,即包谷埡一小河断裂不属于该区域的主干断裂. 第五,综合考虑到上述同震位移场特征及此次地震同震的影响区域有限,与此次地震密切相关的莲峰、昭通—鲁甸断裂带高应变积累背景特征并没有得到缓解,仍需关注该断裂带的地震危险性.

3 鲁甸地震同震断层滑动位移分布反演

上述同震位移结果表明:莲峰、昭通—鲁甸断裂带为控制区域变形的骨干断裂,为了进一步印证此断裂带在鲁甸地震的响应特征,我们又通过构建区域断层几何模型,利用 SDM 方法反演了此次地震的同震位移及断层面的滑动位移分布,联合同震位移分布及断层面的滑动位移分布结果对理解此次地震的发震机理具有重要的意义.

地震发生后,虽然地质结果给出了此次地震发震构造为近南北向的包谷埡一小河断裂(徐锡伟等, 2014),但此断裂为先前未知的一条次级断裂,其精细的几何性质特征还不是很明确;并且考虑到上述同震结果给出的莲峰、昭通—鲁甸断裂带在此次地震的响应特征. 本文在构建区域断层模型过程中,根据房立华等(2014)给出的余震分布特征,构建了近南北向及北东向的两条断层,断层的几何参数如表 2 所示,地壳分层结构采用了刘成利等(2014)的结果. 本文采用的 SDM 反演方法是通过利用最小二乘迭代使得先验条件下的误差最小来得到最佳位错

表 2 断层模型几何参数

Table 2 Geometric parameters of the fault model

断层编号	断层名称	走向(°)	倾角(°)	深度(km)	长度(km)
1	近南北向断层	350	87	20	40
2	北东向断层	80	45	20	50

反演结果的 (Wang et al., 2009). 为获得较为合理的位错反演结果, 避免结果中过多地出现奇异点, 除了先验约束外, 断层位错反演通常会附加断层位错或应力降平滑约束, 即在数据拟合程度与断层滑动粗糙度之间做一权衡, 一般会依据拟合度与粗糙度曲线确定平滑因子 (Diao et al., 2011), 本文所采用的平滑因子为 0.2. 反演过程中, 按照表 2 所示输入发震断层参数, 并将断层划分为 20×10 个和 25×10 个矩形单元, 对于滑动角的范围设定为 $[-180, 180]$. 在此基础上, 根据上节给出的同震位移结果为约束, 给出了包谷垭—小河断裂的滑动位移分布 (本文重点关注近南北向断层的滑动位移分布, 因此并未给出北东向断层的滑动位移分布结果). 反演的同震滑动分布结果表明 (图 3), 依据该滑动分布模型得到的地震矩震级为 $M_w 6.3$, 同震最大滑动量达 0.13 m,

平均滑动量为 0.05 m, 滑动角为 -21.28° , 断层最大滑动量集中在接近地表位置. 另外, 断层的滑动方向以左旋走滑为主兼有拉张运动的趋势, 这与上节给出同震结果较为一致, 也与地质结果具有一致性 (徐锡伟等, 2014).

此外, 利用反演得到了 GPS 点位的模型预测同震位移与 GPS 观测同震位移的对比结果 (如图 4 所示), 东西向的残差中误差为: 2.2 mm; 南北向的残差中误差为 1.8 mm. 从拟合的效果来看, 靠近震中的点位拟合效果较好, 东西向和南北向残差中误差均小于 1.0 mm; 而远离断裂的点位拟合误差较大, 这可能由于设定断层的几何参数有较大关系, 由于包谷垭—小河断裂的规模较小, 较远点位在拟合过程中所占权重较小, 约束不够, 导致了这些点位的误差较大. 但从总体的趋势来看, 与观测值的整体变形趋势有一致性.

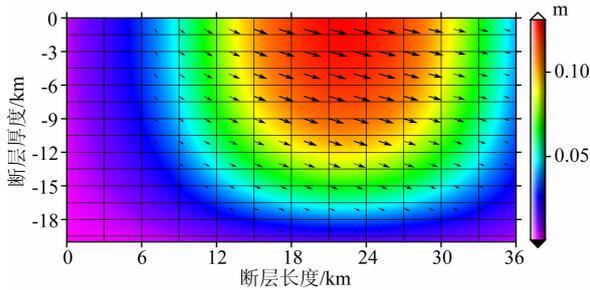


图 3 近南北向断层滑动位移分布

Fig. 3 Slip displacement distribution of the nearly north-south trending fault

4 讨论与结论

本文利用鲁甸 6.5 级地震周边的 GPS 连续站和流动站数据给出了此次地震的同震位移结果, 基于上述同震位移作为约束, 给出此次地震的断层面滑动位移分布结果, 获得了以下主要认识:

(1) 鲁甸地震 GPS 连续站及流动站同震位移结果显示, 沿北西方向表现出左旋应变释放特征、沿北东方向表现出右旋兼拉张应变释放特征; 观测到的最大同震位移测点为 H396_GPS, 量值约为 SW10.5 mm, 上述测点的震中距为 26.3 km; 震源区表现出拉张应变释放的同震特征, 并且随着离开断裂带距离的增加, 拉张变形衰减, 这种拉张位移量明显大于主破裂方向的左旋位移量; 同震结果还显示莲峰、昭通—鲁甸断裂带有一定的右旋应变释放, 而逆冲应变释放不明显, 表明该断裂带处于受南东向挤压的强闭锁状态; 受包谷垭—小河断裂控制的左旋剪切应变释放的位移在莲峰、昭通—鲁甸断裂附近较弱, 说明该断裂可能没有完全切割昭通—鲁甸断裂.

(2) SDM 反演结果表明: 鲁甸地震以左旋走滑为主并兼有拉张性质, 地震矩震级为 $M_w 6.3$ 左右; 另外, 区域的背景 GPS 速度场的结果表明: 横跨莲峰、昭通—鲁甸断裂带的 GPS 形变图像与 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震之前横跨龙门山断裂带中段的 GPS 形变图像很相似 (江在森等, 2009), 反映两断裂带已不同程度闭锁 (闻学泽等, 2013); 其次, 本次

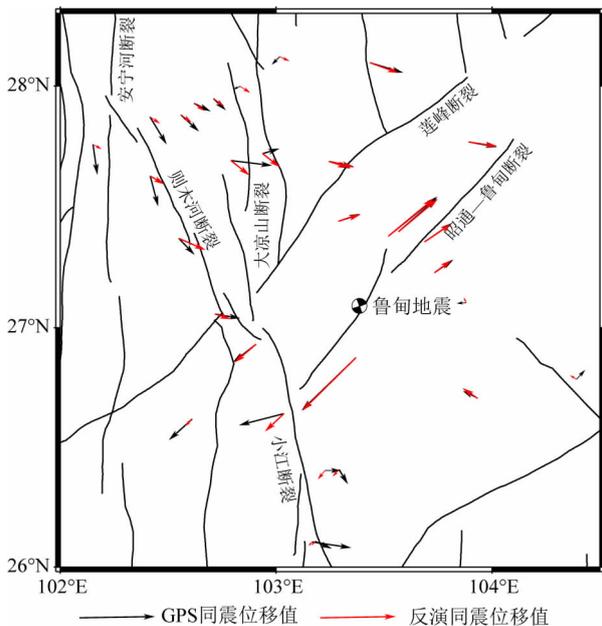


图 4 GPS 同震位移值与反演值对比图

Fig. 4 Comparison of GPS coseismic displacement and inversion results

鲁甸地震的地表 GPS 同震变形特征与震源机制和余震分布确定的主破裂方向为北北西向左旋剪切的结果存在一定差异,表明虽然这次地震的发震断层不是昭通—鲁甸断裂,但同震位移可能受到该主干断裂的控制,同震结果还表明该断裂带处于受南东向挤压的强闭锁状态.结合其他研究结果及本文给出的同震位移、SDM 反演结果,此次鲁甸 6.5 级地震发震的包谷垭—小河断裂的左旋兼拉张应变释放及昭通—鲁甸断裂带右旋释放量值有限,不足以缓解莲峰、昭通—鲁甸断裂带的强震危险性.我们认为,莲峰、昭通—鲁甸断裂带的强震危险性仍需高度关注.

致谢 鲁甸地震 GPS 流动站加密观测、地震预测研究所川滇交界东部 GPS 科研临时连续站的运转得益于云南省地震局形变测量中心、四川省地震局测绘工程院的大力支持,GPS 数据处理得到中国地震局第一监测中心武艳强研究员、占伟、朱爽、李腊月数据解算团队的技术支持,在此一并表示感谢.

References

- Chen S, Wang Q H, Wang Q S, et al. 2014. The 3D density structure and gravity change of Ludian $M_s6.5$ Yunnan epicenter and surrounding regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3080-3090, doi: 10.6038/cjg20140933.
- Crustal Movement Observation Network of China. 2008. The coseismic displacement fields of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake occurrence in 2008 using GPS data. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 38(10): 1195-1206.
- Deng Q D. 2007. Map of Active Tectonic in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Deng Q D, Cheng S P, Ma J, et al. 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(7): 2025-2042, doi: 10.6038/cjg20140701.
- Diao F Q, Xiong X, Wang R J. 2011. Mechanisms of transient postseismic deformation following the 2001 $M_w7.8$ Kunlun (China) Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 168(5): 767-779.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. 2014. Relocation of the aftershock sequence of the $M_s6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(4): 1173-1185.
- He X H, Ni S D, Liu J. 2015. Rupture directivity of the August 3rd, 2014 Ludian earthquake (Yunan, China). *Science China Earth Sciences*, 58(5): 795-804.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010a. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.4. Massachusetts Institute Technology. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010b. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4. Massachusetts Institute Technology. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, et al. 2009. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(2): 505-518.
- Jiang Z S, Liu J N. 2010. The method in establishing strain field and velocity field of crustal movement using least squares collocation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(5): 1109-1117, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.011.
- Liu C L, Zheng Y, Xiong X, et al. 2014. Rupture process of $M_s6.5$ Ludian earthquake constrained by regional broadband seismograms. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3028-3037, doi: 10.6038/cjg20140927.
- Wang L, Wang R, Roth F, et al. 2009. Afterslip and viscoelastic relaxation following the 1999 $M7.4$ izmit earthquake from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 178(3): 1220-1237.
- Wang M, Li Q, Wang F, et al. 2011. Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System. *Chinese Science Bulletin*, 56(23): 2419-2424.
- Wang M, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2006. Far-field coseismic displacements associated with the great Sumatra earthquakes of December 26, 2004 and March 29, 2005 constrained by Global Positioning System. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 365-368.
- Wang R J, Martin F L, Roth F. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust-FORTRAN programs EDGRN/EDCMP. *Journal Computers & Geosciences*, 29(2): 195-207.
- Wang W L, Wu J H, Fang L, et al. 2014. Double difference location of the Ludian $M_s6.5$ earthquake sequences in Yunnan province in 2014. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3042-3051, doi: 10.6038/cjg20140929.
- Wen X Z, Du F, Yi G X, et al. 2013. Earthquake potential of the Zhaotong and Lianfeng fault zones of the eastern Sichuan-Yunnan border region. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(10): 3361-3372, doi: 10.6038/cjg20131012.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al. 2013. Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan $M_s7.0$ earthquake, as reflected by GPS surveying. *Chinese Science Bulletin*, 58(28-29): 3460-3466, doi: 10.1007/s11434-013-5998-5.
- Xu L S, Zhang X, Yang C, et al. 2014. Analysis of the Love waves for the source complexity of the Ludian $M_s6.5$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3006-3017, doi: 10.6038/cjg20140925.
- Xu X W, Jiang G Y, Yu G H, et al. 2014. Discussion on

seismogenic fault of the Ludian $M_s6.5$ earthquake and its tectonic attribution. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3060-3068, doi: 10.6038/cjg20140931.

Zhang Y, Xu L S, Chen Y T, et al. 2014. Rupture process of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan, $M_w6.1$ ($M_s6.5$) earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3052-3059, doi: 10.6038/cjg20140930.

附中文参考文献

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. *地球物理学报*, 57(9): 3080-3090, doi: 10.6038/cjg20140933.

邓起东. 2007. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社.

邓起东, 程绍平, 马冀等. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57(7): 2025-2042, doi: 10.6038/cjg20140701.

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.

国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. 2008. GPS 测定的 2008 年汶川 $M_s8.0$ 级地震的同震位移场. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(10): 1195-1206.

何晓慧, 倪四道, 刘杰. 2015. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M6.5$ 地震破裂方向性研究. *中国科学: 地球科学*, 45(3): 253-263.

江在森, 方颖, 武艳强等. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. *地球物理学报*, 52(2): 505-518.

江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与

应变场的方法. *地球物理学报*, 53(5): 1109-1117, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.011.

刘成利, 郑勇, 熊熊等. 2014. 利用区域宽频带数据反演鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震源破裂过程. *地球物理学报*, 57(9): 3028-3037, doi: 10.6038/cjg20140927.

王敏, 张培震, 沈正康等. 2006. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门达腊巨震的远场同震地表位移. *科学通报*, 51(3): 365-368.

王敏, 李强, 王凡等. 2011. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 $M_w9.0$ 级地震远场同震位移. *科学通报*, 56(20): 1593-1596.

王未来, 吴建平, 房立华等. 2014. 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的双差定位. *地球物理学报*, 57(9): 3042-3051, doi: 10.6038/cjg20140929.

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. *地球物理学报*, 56(10): 3361-3372, doi: 10.6038/cjg20131012.

武艳强, 江在森, 王敏等. 2013. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果. *科学通报*, 58(20): 1910-1916.

许力生, 张旭, 严川等. 2014. 基于勒夫波的鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源复杂性分析. *地球物理学报*, 57(9): 3006-3017, doi: 10.6038/cjg20140925.

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, doi: 10.6038/cjg20140931.

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. *地球物理学报*, 57(9): 3052-3059, doi: 10.6038/cjg20140930.

(本文编辑 张正峰)