

吕苗苗, 丁志峰, 徐小明, 李大虎, 叶庆东, 郑晨. 2015. 2012 年彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列重定位和震源机制解特征. 地震学报, 37(6): 885–898. doi:10.11939/jass.2015.06.001.

Lü M M, Ding Z F, Xu X M, Li D H, Ye Q D, Zheng C. 2015. Relocations and focal mechanism solutions characteristics of 2012 Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquake sequence. Acta Seismologica Sinica, 37(6): 885–898. doi:10.11939/jass.2015.06.001.

2012 年彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列 重定位和震源机制解特征^{*}

吕苗苗^{1,2)} 丁志峰^{1,2),*} 徐小明^{1,2)} 李大虎^{1,2,3)}
叶庆东⁴⁾ 郑 晨^{1,2)}

1) 中国北京 100081 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国成都 610041 四川省地震局

4) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

摘要 利用地震科学探测台阵在云南、贵州地区的 17 个流动台站的地震记录, 采用双差定位法对 2012 年 9 月 7 日云南彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震及其余震序列($M_L \geq 1.0$)进行重定位. 在获得精确的震源位置后, 采用 CAP 法反演了 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解. 结果显示, 彝良 $M_s5.7$ 主震位于(27.509°N, 103.971°E), 震源深度为 9.7 km, 震源机制解节面 I 走向 251°、倾角 66°、滑动角 150°, 节面 II 走向 354°、倾角 63°、滑动角 27°; 彝良 $M_s5.6$ 主震位于(27.563°N, 104.034°E), 震源深度为 10.0 km, 震源机制解节面 I 走向 235°、倾角 39°、滑动角 147°, 节面 II 走向 352°、倾角 70°、滑动角 56°. 反演结果显示断层的几何形态、余震分布特征、震源机制解特征及构造应力场等均有很好的一致性. 综合断层的运动学特征、地震活动规律和地质构造背景, 推测彝良地震的发震断裂为昭通断裂带的前缘断裂, 即 NE 走向的石门断裂. 导致震区受灾严重的主要原因是由于彝良地震震源深度较浅, 能量释放多发生在地壳浅部所致.

关键词 彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震 双差定位法 CAP 法 震源机制解

doi:10.11939/jass.2015.06.001 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Relocations and focal mechanism solutions characteristics of 2012 Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquake sequence

Lü Miaomiao^{1,2)} Ding Zhifeng^{1,2),*} Xu Xiaoming^{1,2)} Li Dahu^{1,2,3)}
Ye Qingdong⁴⁾ Zheng Chen^{1,2)}

1) Seismic Observation and Geophysical Imaging Laboratory, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

* 基金项目 国家公益性地震行业科研专项(201308011, 201008001)资助.

收稿日期 2015-03-10 收到初稿, 2015-05-20 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: zhfding@vip.sina.com

4) *First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration,
Tianjin 300180, China*

Abstract: Based on the recordings of 17 portable seismographs of ChinArray deployed in Yunnan-Guizhou region, the Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes happened on September 7, 2012 and the aftershocks with $M_L \geq 1.0$ were relocated by double-difference hypocenter location algorithm (hypoDD), and then the focal mechanism solutions of earthquakes ($M_s \geq 4.0$) were determined by CAP (cut and paste) method. Our results show that the Yiliang $M_s5.7$ mainshock is located at (27.509°N , 103.971°E) with initial rupture depth of 9.7 km. The best double-couple solutions for the Yiliang $M_s5.7$ earthquake have one nodal plane with strike 251° , dip 66° , rake 150° , and another plane with strike 354° , dip 63° and rake 27° . The Yiliang $M_s5.6$ mainshock is relocated at (27.563°N , 104.034°E) with initial rupture depth of 10.0 km, and the mechanism solutions of two nodal planes are 235° , 39° , 147° and 352° , 70° , 56° , respectively. The fault geometry, aftershock distribution characteristics, focal mechanism solutions and the tectonic stress field are in good consistency. Combining with the characteristic of fault kinematic, seismicity and the geological structure, we infer that Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes occurred on the NE-striking Shimen fault which is the leading edge of Zhaotong fracture. The shallow focal depth of Yiliang earthquake and the energy release occurred in shallow crust are the major reasons for serious damage in the hypocentral region.

Key words: Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes; double difference location method; CAP method; focal mechanism solution

引言

据中国地震台网测定, 2012 年 9 月 7 日 11 时 19 分, 云南省昭通市彝良县与贵州省毕节地区交界处发生 $M_s5.7$ 地震, 震源深度为 14 km; 12 时 16 分, 彝良县又发生 $M_s5.6$ 地震, 震源深度为 10 km(中国地震台网中心, 2012a). 据报道, 两次地震造成至少 80 人死亡, 795 人不同程度受伤(网易新闻, 2012). 彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震发生在昭通断裂带北东端, 近年来, 该断裂带及其附近区域的中强地震活动性明显增强. 例如, 2003 年鲁甸 $M_s5.0$ 和 $M_s5.1$ 地震, 2004 年鲁甸 $M_s5.6$ 地震, 2006 年盐津 $M_s5.1$ 地震, 2012 年彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震, 以及 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震等, 这些地震的发生使得昭通断裂带及其附近区域的地震活动性引起了地震学界的密切关注. 震后, 研究人员就上述地震开展了多方面的研究, 包括震源破裂过程的特征分析和震源深度的确定(吕坚等, 2013a)、震源机制解和发震构造的研究(韩立波, 蒋长胜, 2012; 徐锡伟, 于贵华, 2012; 中国地震台网中心, 2012b)等. 但现有的研究结果仍存在一些差异, 需要进一步对比和验证. 为此, 本文将增加彝良 $M_s5.7$, $M_s5.6$ 主震及余震相对位置的更加准确的空间分布结果; 在此基础上, 结合震源参数和前人的研究成果, 重点讨论彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列的震源深度分布和震源机制解特征, 为判定可能的发震构造提供科学依据.

双差定位法已被国内外地震学家广泛应用于区域地震活动性特征、活动断层空间展布及其精细结构的研究中(Waldhauser, Ellsworth, 2000; 朱艾斓等, 2005). 已有研究结果

表明, 双差定位法不依赖于主事件且能有效减小地壳速度结构的影响, 是了解震区地震活动的时空分布规律及断层构造行之有效的方法. 而震源机制解能够直观地反映震源破裂的几何特征和构造应力场特征(郑勇等, 2009). 对于中强地震, CAP(cut and paste)法是获取震源机制解的可靠方法之一, 且得到了广泛应用(韦生吉等, 2009; 谢祖军等, 2012; 吕坚等, 2013b). 震源机制解为识别发震断裂、了解区域构造应力场等提供了重要依据.

精确的震源机制解对于确定断层形态、判定相应的发震构造非常重要. 而余震序列的空间分布特征则是研究该地区地震活动性、探明断层分布方式的有力证据. 综合这两方面信息, 可以对震区孕震构造环境及地震活动特征有一全面认识(朱艾斓等, 2008; Zhao *et al.*, 2012; 赵博等, 2013).

本文以 2012 年 9 月 7 日彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震为例, 采用双差定位法对该序列中 $M_L \geq 1.0$ 的 745 次地震进行重定位, 反演了 $M_s \geq 4.0$ 地震(共 4 次)的震源机制解和矩心深度. 彝良地震序列的震中空间分布特征、震源深度优势分布层位及震源机制解特征, 为进一步研究该地区地震活动性和判定发震构造提供重要的地震学基础资料, 对于分析该地区未来可能的发震趋势具有重要的现实意义.

1 研究区域构造背景

从四川西部到云南与贵州交界区域, 均受到青藏高原自西向东的推挤作用. 彝良地震震区西侧是构造活动强烈的川滇菱形地块, 东侧是相对稳定的华南地块. 青藏高原东缘地区地壳物质向 E 以及 SE 方向逃逸, 使得川滇地块整体向 SE 向滑移, 围绕喜马拉雅东构造结作顺时针运动(徐锡伟等, 2003). 第四纪以来, 川滇地块及周边区域以水平剪切变形为主, 并伴有强烈的隆升运动. 在复杂的构造环境下, 该地区发育了一系列活动断裂, 其中昭通断裂带属于大凉山次级地块东南缘边界断裂带. 根据活动地块划分方案(张培震等, 2003), 昭通断裂带位于川滇地块与华南地块边界带上(图 1), 其现今运动表现为具有显著逆冲分量的右旋走滑性质(闻学泽等, 2013). 从动力学角度来看, 其活动变形的动力直接来源于大凉山次级地块的 NE 向运动, 间接来源于川滇地块的 SSE 向运动(张培震等, 2003; 张培震, 2008).

野外地质调查和卫星影像分析结果表明, NE 向的昭通断裂带控制着昭通盆地和鲁甸盆地的发育, 并对地层发育

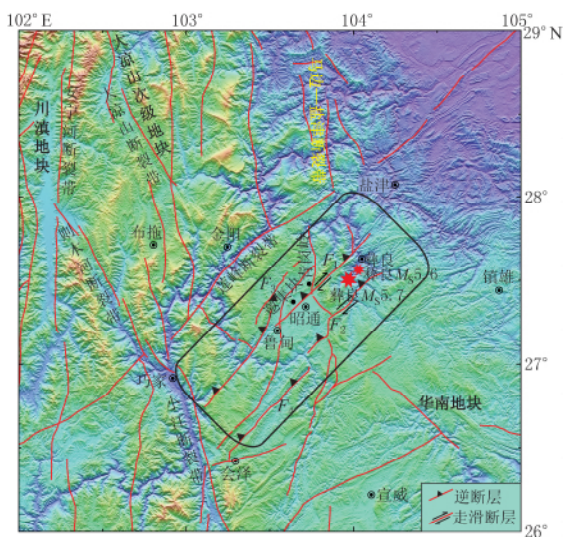


图 1 彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震震中及其邻区构造图(引自闻学泽等, 2013)

黑色框所示范围为昭通断裂带. F_1 : 昭通—鲁甸断裂; F_2 : 石门断裂; F_3 : 龙树断裂; F_4 : 会泽—彝良断裂

Fig. 1 Epicenters of Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes and the surrounding regional tectonic settings (after Wen *et al.*, 2013)

The black rectangle delineates the Zhaotong fault zone.

F_1 : Zhaotong-Ludian fault; F_2 : Shimen fault;

F_3 : Longshu fault; F_4 : Huize-Yiliang fault

及区域构造变形也有着明显的控制作用. 在卫星影像上其线性影像十分清晰, 断错一系列山脊, 形成断层垭口、断层槽谷等地貌, 邀集块—青岗岭一带断层地貌尤为明显. 昭通断裂带是由一系列大规模、结构复杂的逆冲断裂系组成. 其 NE 起自盐津东南, 向 SW 经彝良、昭通、鲁甸、会泽, 终止于巧家以南的小江断裂带东侧. 该断裂带总长约 150 km, 总体走向为 35° — 45° , 倾向 NW, 朝 SE 向推覆, 自西向东包括龙树断裂、昭通断裂带主断裂即昭通—鲁甸断裂、会泽—彝良断裂和石门断裂(闻学泽等, 2013). 2012 年彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震就发生在昭通—鲁甸断裂与石门断裂之间. 石门断裂是昭通断裂带的前缘断裂, 属于区域次级走滑兼逆冲型断裂. 其走向为 NE, 倾向为 NW, 在 15—20 km 深处与基底滑脱带相连. 根据近年来横跨昭通断裂带的 GPS 速度场和变形特征分析结果, 认为昭通断裂带鲁甸—彝良段闭锁作用加剧, 应变积累增强, 具备发生中强地震或大地震的规模(闻学泽等, 2013). 2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_s6.5$ 地震的发生, 再次印证了这一观点.

2 数据和地壳参考模型

本文所用数据源自“中国地震科学探测台阵——南北地震带南段”项目的 17 个流动地

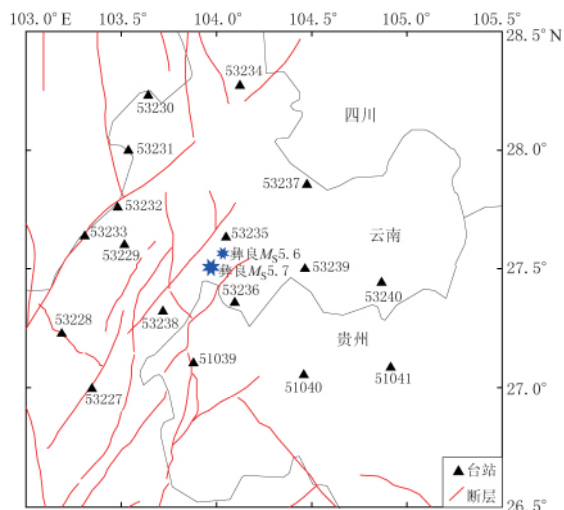


图 2 彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震震中及台站分布

Fig. 2 Epicenters of Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes and stations distribution

表 1 地壳速度和密度参考模型

Table1 Crustal velocity and density reference model

| 地壳厚度 /km | v_p /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | v_s /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) |
|-------------|---|---|--|
| 0—5 | 5.680 | 3.114 | 2.645 |
| 5—10 | 5.889 | 3.387 | 2.829 |
| 10—20 | 6.008 | 3.395 | 2.832 |
| 20—32 | 6.344 | 3.590 | 2.906 |
| 32—36 | 6.408 | 3.625 | 2.920 |
| 36—40 | 6.345 | 3.590 | 2.906 |
| 40—45 | 6.800 | 3.863 | 3.000 |
| >45 | 7.900 | 4.350 | 3.310 |

震台站于 2011 年 8 月—2013 年 8 月记录的地震波形资料. 台站及所用地震震中分布如图 2 所示. 可以看出, 这 17 个台站能够较好地包围震源区. 采用双差定位法对彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震及其余震序列($M_L \geq 1.0$)的 745 次地震进行重定位, 在获得精确的震源位置后反演 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解和矩心深度. 为避免震中距增大时速度结构的横向不均匀性增强对波形产生的影响, 反演震源机制解时选择了 200 km 范围内的台站记录(郑勇等, 2009; 谢祖军等, 2012).

综合现有的华南地区上扬子地块西南缘三维结构模型(速度和密度)的研究结果(王椿镛等, 2002; 朱介寿等, 2005), 在进行双差定位时我们采用表 1 中给出的地壳速度结构模型, 计算理论地震图时使用表 1 中的密度模型.

3 方法

3.1 双差定位法

双差定位法是相对定位方法, 要求两震源间的距离远小于震源与台站间的距离和波传播路径上速度不均匀性的尺度. 在该条件成立情况下, 相邻两地震射线的

传播路径几乎完全相同, 走时差仅由两震源间的相对位置和速度结构决定 (Waldhauser, Ellsworth, 2000; 杨智娴等, 2003). 在一定搜索半径内, 两个相邻地震事件 i 和 j 到台站 k 走时差的观测值与理论计算值之差构成一个观测方程, 即

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}. \quad (1)$$

因两震源间的距离与震中距和速度非均匀性尺度相比足够小, 故式(1)可表示为

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j, \quad (2)$$

式中, $\Delta m(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau)$ 为待求震源参数的偏移量. 式(2)还可写为

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr_k^{ij}. \quad (3)$$

将满足条件的地震事件两两组对, 可得到如下矩阵方程:

$$WGm = Wd, \quad (4)$$

式中: 假设地震事件数为 N , 双差观测资料数为 M , 则 G 为 $M \times 4N$ 矩阵; m 为待求震源参数的偏移量; d 为由双差观测资料组成的 M 维矢量; W 为加权对角矩阵.

在实际计算中, 首先采用 LSQR 法求解式(1), 得到阻尼最小二乘解; 然后对部分数据采用奇异值分解法计算最小二乘误差来衡量定位精度 (杨智娴, 陈运泰, 2004).

3.2 CAP 法反演震源机制解

CAP 法反演震源机制解的基本思想是将地震波形分为广义体波和面波分别进行拟合 (Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996). 首先采用频率-波数法计算理论地震图 (Zhu, Rivera, 2002; Tan *et al.*, 2006), 然后将双力偶源的理论合成位移 $g(t)$ 与扣除仪器响应后的观测波形 $f(t)$ 作互相关, 即

$$C(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g(t + \tau) d\tau}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} g^2(\tau) d\tau}}. \quad (5)$$

当 $C(t)$ 取正的最大值时, 认为理论地震波形 $g(t)$ 与观测波形 $f(t)$ 拟合得最好, 所对应的 t 表示 $g(t)$ 相对于 $f(t)$ 的时间偏移量. 反演过程的判断标准为 $g(t) = f(t)$, 定义下式来衡量 $g(t)$ 与 $f(t)$ 的差异, 直接采用网格搜索法得到最佳震源机制解:

$$e = \left\| \left(\frac{r}{r_0} \right)^p \cdot \| g - f \| \right\|, \quad (6)$$

式中: r 为震中距; r_0 为选定的参考震中距; 为避免反演受近台记录的影响, 在拟合差函数中引入距离影响因子 p , 以减小距离产生的衰变对波形的影响, 一般体波 $p=1$, 面波 $p=0.5$. 拟合差定义中同时采用 L_1 范数和 L_2 范数准则, L_1 范数强调高频体波部分, L_2 范数则强调低频面波部分. 对于某一台站, 各分量拟合差定义相同, 该台站的拟合差为 5 个分量拟合差的平均值, 事件的拟合差为所有台站及各分量拟合差的平均值, 因此最后的拟合差包含了体波和面波各分量的信息.

CAP 法综合利用了近震体波振幅与面波振幅比, 反演时赋予体波和面波不同的权重, 在避免面波起主导作用的同时又较为全面而可靠地反映了震源信息, 尤其对震源深度有着很好的约束. 另外在拟合差定义中使用了绝对振幅, 有效避免了因振幅归一化所带来的局部极小值解, 从而便于节面的识别.

4 结果

本文挑选出具有 4 个以上台站记录的 $M_L \geq 1.0$ 地震, 共计 745 次, 采用双差定位法对这些地震的震源位置进行重新定位. 一般而言, Pg 波到时拾取相对于 Sg 波要精确些, 故反演中赋予 P 波 1.0、S 波 0.5 的权重, 最后得到了 575 次地震的震源参数. 结果显示, 彝良 $M_S 5.7$ 主震位于 $(27.509^\circ\text{N}, 103.971^\circ\text{E})$, 震源深度为 9.7 km; 彝良 $M_S 5.6$ 主震位于 $(27.563^\circ\text{N}, 104.034^\circ\text{E})$, 震源深度为 10.0 km. 平均走时残差由重定位前的 0.65 s 下降到 0.065 s, 震源位置 2 倍标准差在 EW 方向上为 0.23 km, NS 方向上为 0.23 km, UD 方向上为 0.40 km.

图 3a, b 分别为彝良 $M_S 5.7$ 和 $M_S 5.6$ 地震序列重定位前、后的震中分布图. 可以看出: 重定位后震中分布更加集中, 条带状分布特征更加明显(图 3b); 余震震中分布平行于活动断裂, 沿 NE 向延展近 20 km, 与石门断裂走向基本一致, 说明余震活动与构造密切相关. 图 3b 还给出了 4 次地震的震源机制解沙滩球, 分别为彝良 $M_S 5.7$ 和 $M_S 5.6$ 主震和两次 $M_S 4.4$ 余震. 图 4a, b 分别为彝良 $M_S 5.7$ 和 $M_S 5.6$ 地震序列沿走向剖面和垂直于走

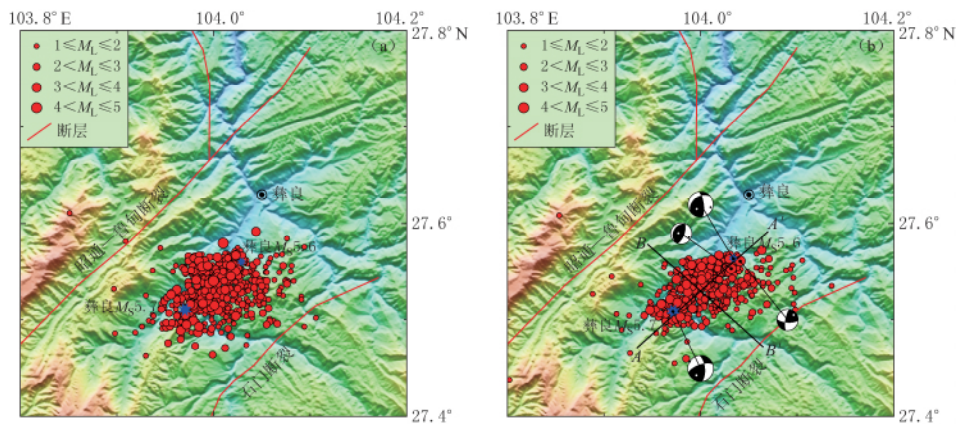


图 3 彝良 $M_S 5.7$ 和 $M_S 5.6$ 地震序列重定位前(a)、后(b)的震中分布

Fig. 3 Epicentral distribution of Yiliang $M_S 5.7$ and $M_S 5.6$ earthquake sequence before (a) and after (b) relocation

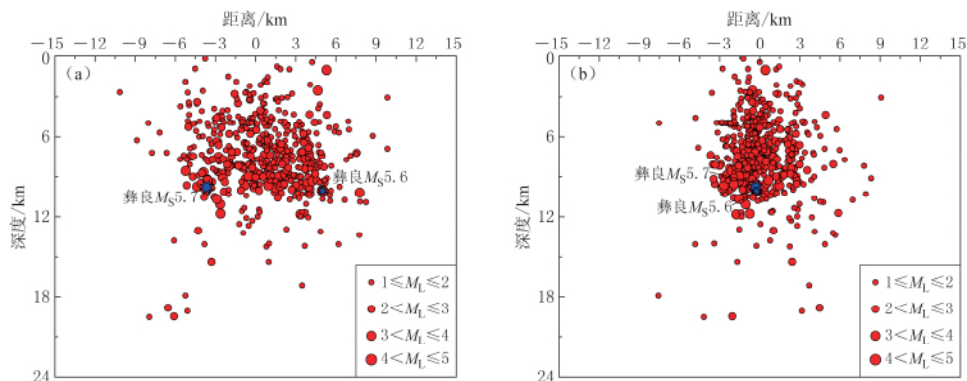


图 4 彝良 $M_S 5.7$ 和 $M_S 5.6$ 地震序列沿 AA'(a)和 BB'(b)剖面的震源深度分布

Fig. 4 Focal depth distribution of Yiliang $M_S 5.7$ and $M_S 5.6$ earthquake sequence along the profiles of AA' (a) and BB' (b)

向剖面的震源深度分布图. 图 4a 为沿震中分布长轴方向 AA' 剖面的震源深度分布图, 震源深度分布优势区间为 3—15 km, 震源深度较浅, 说明地震大多发生在脆性上地壳中. 而 BB' 剖面(图 4b)反映出沿断层倾向的震源深度分布特征, 呈现出 NW 向较深, 向 SE 向逐渐变浅的特点. 这一特征较为清晰地勾勒出可能的断层形态, 且倾角在深部较缓, 浅部略陡.

在获得精确的震源位置后, 为进一步分析主震和余震的震源参数特征, 我们选择 P 波初动明显、信噪比较高的波形记录反演了彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列中 $M_s \geq 4.0$ 地震(共 4 次)的震源机制解和震源矩心深度. 首先从原始速度记录中扣除仪器响应, 然后积分转换到位移记录, 重采样后从 ZNE 分量旋转为 ZRT 分量, 并分为体波和面波两部分, 分别对体波和面波作带通滤波, 体波部分滤波频段为 0.05—0.20 Hz, 面波部分为 0.05—0.10 Hz, 滤掉长周期地脉动和由积分造成的漂移. 由拟合差目标函数最小求得彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列中 4 次 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解和最佳矩心深度, 如表 2 所示.

表 2 彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震序列中 4 次 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解
Table 2 Focal mechanism solutions of four earthquakes with magnitude $M_s \geq 4.0$ of Yiliang $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquake sequence

| 地震 编号 | 发震时刻 | | 东经/ $^{\circ}$ | 北纬/ $^{\circ}$ | 矩心深度 /km | M_s | M_w | 走向/ $^{\circ}$ | 倾角/ $^{\circ}$ | 滑动角/ $^{\circ}$ |
|----------|------------|-------------|----------------|----------------|-------------|-------|-------|----------------|----------------|-----------------|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | | | | | | | | |
| 1 | 2012-09-07 | 11:19:41.27 | 103.971 | 27.509 | 7 | 5.7 | 5.36 | 251 | 66 | 150 |
| 2 | 2012-09-07 | 12:16:29.71 | 104.034 | 27.563 | 9 | 5.6 | 5.25 | 235 | 39 | 147 |
| 3 | 2012-09-07 | 11:58:00.41 | 104.032 | 27.553 | 7 | 4.4 | 4.36 | 216 | 25 | 105 |
| 4 | 2012-09-07 | 13:12:46.19 | 104.041 | 27.561 | 6 | 4.4 | 4.38 | 190 | 74 | 22 |

图 5 和图 6 分别给出了彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震的拟合差和震源机制解随矩心深度的变化. 可以看出: 彝良 $M_s5.7$ 地震在 7 km 深度处拟合差最小, 这与双差定位得到的震源深度 9.7 km 比较接近; 彝良 $M_s5.6$ 地震的最佳矩心深度为 9 km, 与定位得到的震源深

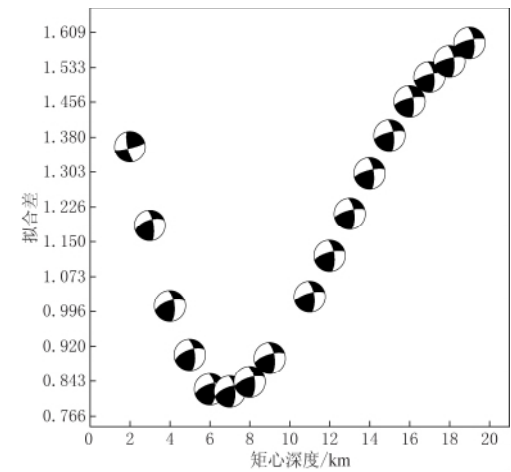


图 5 彝良 $M_s5.7$ 地震的拟合差和震源机制解(下半球投影)随矩心深度的变化

Fig. 5 Misfit plots as a function of centroid depth for Yiliang $M_s5.7$ earthquake (lower-hemisphere projection)

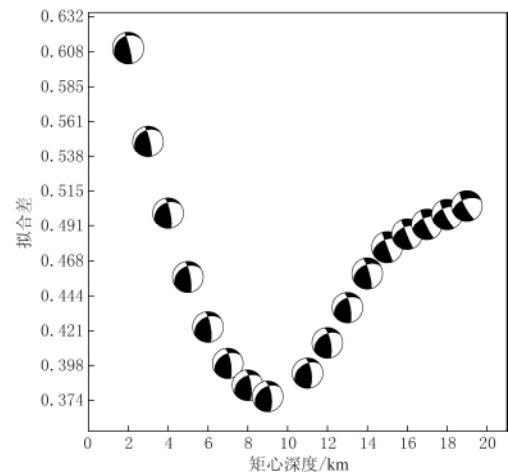


图 6 彝良 $M_s5.6$ 地震的拟合差和震源机制解(下半球投影)随矩心深度的变化

Fig. 6 Misfit plots as a function of centroid depth for Yiliang $M_s5.6$ earthquake (lower-hemisphere projection)

度 10 km 相差亦不大. 图中最佳矩心深度所对应的震源机制解即为最佳双力偶解.

图 7 为彝良 $M_s 5.7$ 地震的波形拟合结果, 其最佳双力偶解节面 I 走向 251° 、倾角 66° 、滑动角 150° , 节面 II 走向 354° 、倾角 63° 、滑动角 27° , 矩震级 $M_w = 5.36$, 拟合差为 0.8206. 在所选用的 9 个台站记录中, 理论波形与观测波形拟合相关系数大于 0.8 的占 76%. 图 8 为彝良 $M_s 5.6$ 地震的波形拟合结果, 其最佳双力偶解节面 I 走向 235° 、倾角 39° 、滑动角 147° , 节面 II 走向 352° 、倾角 70° 、滑动角 56° , 矩震级 $M_w = 5.25$, 拟合差为 0.3769. 在所选用的 8 个台站记录中, 理论波形与观测波形拟合相关系数大于 0.8 的占 82.5%.

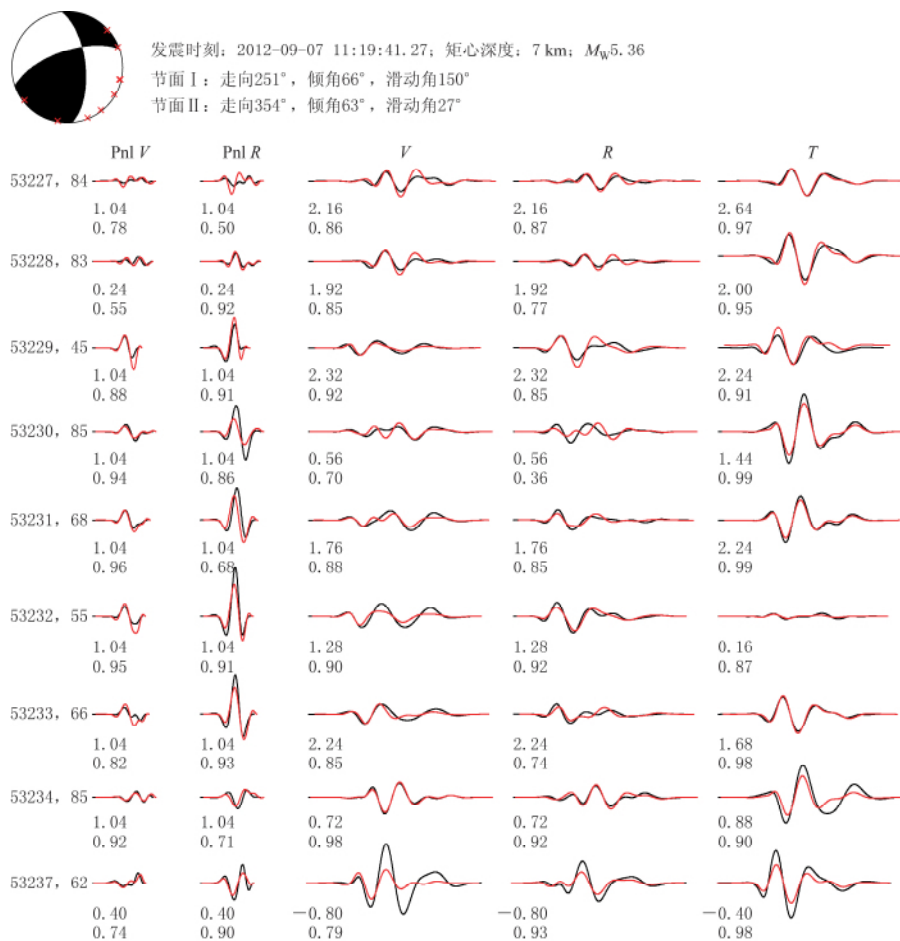


图 7 彝良 $M_s 5.7$ 地震的理论地震波形(红色)与观测波形(黑色)对比

波形下方第一行数字为理论波形相对于观测波形的时移(单位: s), 正值为理论波超前;

第二行数字为两波形的相关系数; 波形左侧数字为台站名及其震中距(单位: km)

Fig. 7 Comparison between the theoretical (red lines) and observed (black lines) waveforms of the Yiliang $M_s 5.7$ earthquake

The numbers of the first line below the waveforms are the time shift (in s) of theoretical waveforms relative to observed ones, and the positive values indicate the theoretical waveform being ahead of the observed one.

The numbers of the second line indicate the correlative coefficients between them. The name of stations and corresponding epicentral distances (in km) are given at the left side of waveforms

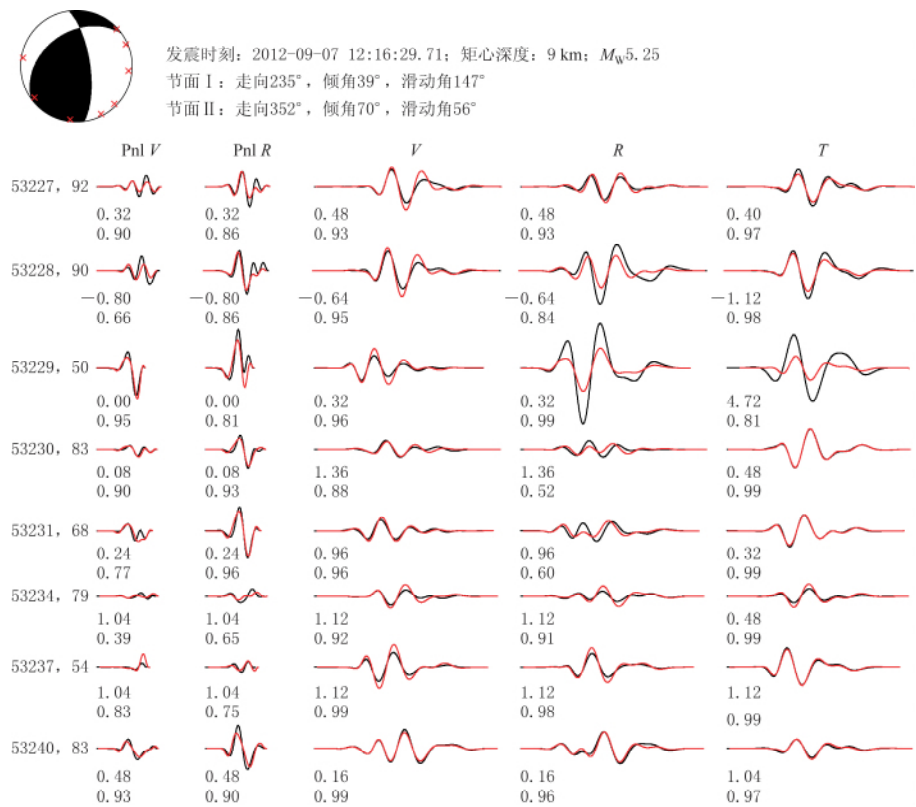


图 8 彝良 $M_s5.6$ 地震的理论地震波形(红色)与观测波形(黑色)对比(图注同图 7)

Fig. 8 Comparison between the theoretical (red lines) and observed (black lines) waveforms of the Yiliang $M_s5.6$ earthquake, where the illustration are the same as those in Fig. 7

5 讨论与结论

彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震发生至今，已有很多关于震源机制解参数的研究成果，其具体的震源机制解虽略有差别，震源矩心深度也有所不同，但两次地震的震源机制均为右旋走滑型并伴有逆冲特征。表 3 列出了本文与不同文献给出的震源机制解结果的对比。可以看出，本文结果与韩立波和蒋长胜(2012)研究结果相比，走向、倾角和滑动角均较为一致，彝良 $M_s5.7$ 地震矩心深度差异略大，但与吕坚等(2013a)矩心深度较接近。吕坚等(2013a)在矩心深度的确定中使用远震体波深度震相，对深度的约束相对更准确，从而说明本文所得的彝良 $M_s5.7$ 地震矩心深度也是可靠的。本文结果与 Global CMT (2012)结果相比，整体相差较大，可能是由于反演时所采用的数据来源和速度结构模型不同所致，其数据来自全球远震波形拟合结果，而本文数据来自近震波形拟合结果。其它断层面解的偏差可能是由于反演时所采用的速度和密度模型不同、选取的台站差异以及网格搜索步长不同等因素所致。虽然各文献采用的数据资料和方法有所不同，但结果仍在误差允许范围内保持一致，并能相互佐证；同时也说明 CAP 法对速度模型依赖程度较低，适合在彝良地区开展震源机制解的研究工作。

本文选取的 745 次地震事件的震源深度主要分布在 0—30 km 范围内，重定位后震源

表 3 本文结果与不同文献给出的震源机制解结果对比

Table 3 Comparison of focal mechanism solutions by this paper with those from other studies

| 文献 | 走向/° | 倾角/° | 滑动角/° | 矩心深度/km |
|-------------------|---------|-------|---------|---------|
| 韩立波和蒋长胜(2012) | 248/233 | 59/39 | 149/151 | 10/10 |
| 吕坚等(2013a) | 243/241 | 62/37 | 149/162 | 6/6 |
| Global CMT (2012) | 236/235 | 52/45 | 139/158 | 12/12 |
| 本文 | 251/235 | 66/39 | 150/147 | 7/9 |

注: 数据为同一节面的走向、倾角和滑动角。“/”前、后分别为彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 和 $M_{\text{s}}5.6$ 地震的震源机制解结果。

深度向浅部偏移且分布范围更加集中, 平均震源深度为 8.32 km. 彝良两次中强地震造成的重大伤亡和财产损失, 其主要原因是主震震源深度较浅, 能量释放主要发生在上地壳; 另一方面, 从地震序列来看, 这两次地震属于地震学中的“双震”现象, 发震时刻仅隔 1 小时, 震中相距 10 km 且震级大小非常接近, 仅这两次主震就释放掉 90% 以上的能量, 且第二次地震距县城仅 5 km, 因此破坏程度非常严重.

地震震源深度是研究发震构造和动力学特征的重要参数(张国民等, 2002), 而矩心深度表征着地震能量的释放深度, 因此深度特征在一定程度上反映了震源区的孕震环境和对地表的破坏情况. 本文得到的彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 地震的震源深度为 9.7 km, 最佳矩心深度为 7 km; 彝良 $M_{\text{s}}5.6$ 地震的震源深度为 10.0 km, 最佳矩心深度为 9 km. 初始破裂深度与震源矩心深度接近, 说明主震破裂过程自初始点开始沿断层两侧扩展, 且 NE 侧破裂长度稍长于 SW 侧, 滑动量主要集中在破裂点附近. 赵国泽等(2008)对青藏高原东边缘及其附近区域的大地电磁测深研究发现, 川滇地块在 15 km 左右深度处存在低阻层; 李冉等(2014)在云南南部布设的孟连—罗平大地电磁测深剖面经过该震区南侧, 同样发现壳内存在低阻体. 15 km 以上的高阻地壳是脆性上地壳, 容易发生脆性断裂, 是地震频发地段; 而低阻的中下地壳由于具有一定塑性, 缓解了地壳应力的不均匀性, 从而降低了地震发生概率. 上述研究结果表明本文通过双差定位法得到的震源深度分布集中在 3—15 km 是合理的.

由图 3b 中沿彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 和 $M_{\text{s}}5.6$ 地震序列震中分布长轴方向的 AA' 剖面可以看出, 余震震中基本呈 NE 向条带状丛集分布, 与石门断裂走向一致, 延展 20 km 左右. 该结果与云南省地震局发布的云南彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 和 $M_{\text{s}}5.6$ 地震烈度图上极震区等震线呈椭圆形, 长轴走向近 $NE45^\circ$ 结果一致(周桂华等, 2013). 此外, 张璇等(2013)对中国静止气象卫星亮温变化资料研究发现, 彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 地震前震中区红外热异常沿 NE 向和 SW 向大范围延伸, 这可能与该方向上构造应力的集中和调整有关. 从震源机制解结果来看, 彝良两次主震有一组相近的节面, 其平均走向为 243° , 平均倾角约为 52° , 平均滑动角约为 149° . 该节面走向与彝良两次地震震中分布的优势走向比较吻合. 由此可见, 本文重定位后的震中分布结果与震源机制解结果有着较好的一致性.

从彝良 $M_{\text{s}}5.7$ 和 $M_{\text{s}}5.6$ 地震序列震中分布长轴方向的几何特征来看, 余震沿 NE 方向呈条带状展布, 推测该地震的发震断裂为一条 NE 走向断裂. 而沿其倾向的深度剖面图所揭示出的断层倾向特征表明: 彝良地震震源深度分布在 NW 侧较深, 向 SE 侧逐渐变浅, 说明断层倾向为 NW 向; 断层上盘为 NW 盘, 下盘为 SE 盘, 结合震源机制解类型, 推测发震断裂具有右旋走滑兼逆冲的运动学特征. 川滇交界东段昭通断裂带的地震危险性背景分析资料(闻学泽等, 2013)表明, 位于震区西侧的昭通—鲁甸断裂和震区东侧的石门断裂均满足走向 NE, 倾向 NW, 右旋走滑兼逆冲的特征. 由震源机制解结果可知, 断层的平均

倾角为 52° , 并非特别陡峭, 所以余震震中分布与发震断裂在空间位置上应有一定距离。从图 3 余震震中分布与地表可见断裂的空间位置关系可知, 余震震中分布于石门断裂西侧、昭通—鲁甸断裂东侧。若发震断裂为昭通—鲁甸断裂, 则余震震中应分布于该断裂西侧, 这与图 3 中实际余震震中分布相矛盾, 因此可排除昭通—鲁甸断裂为发震断裂的可能性。考虑石门断裂走向 NE, 倾向 NW, 与发震断裂的几何特征相符, 又具有右旋走滑兼逆冲的运动学特征; 该断层走向与重定位后余震震中的空间分布特征一致, 与震源机制解所反映的断层类型相吻合, 其几何学、运动学特征以及地震活动性等方面均满足发震断裂的可能性, 又能够合理地解释地震震中的分布情况, 故本文认为石门断裂为此次地震的发震断裂。该结果与前人研究结果(徐锡伟, 于贵华, 2012; 吕坚等, 2013a)一致。

P 轴、 B 轴和 T 轴反映的是地震前后震源区应力状况的变化, 并非构造应力场本身。如果对同一地区大量地震的 P 轴和 T 轴方向作统计平均, 可获得该地区的构造应力方向^①。由于本文中 $M_s \geq 4.0$ 地震事件偏少, 无法作统计平均, 但所得的 P 轴和 T 轴方位角和倾角可作为与现代构造应力场比较的一个参考值。根据现今中国构造应力场资料可知, 彝良及其附近区域 P 轴方位约为 $N58^\circ W - N35^\circ W$ (许忠淮等, 1989), 主压应力优势方位呈近 SE—ESE 向(谢富仁等, 2004; 钟继茂, 程万正, 2006; Wan, 2010), 且以水平作用为主。彝良 $M_s5.7$ 地震的 P 轴方位角为 $303^\circ (N57^\circ W)$, 倾角为 2° ; 彝良 $M_s5.6$ 地震的 P 轴方位角为 106° , 倾角为 18° , 与吕坚等(2013a)研究结果基本一致。彝良 $M_s5.6$ 地震的 P 轴方位角偏大, 可能与震源区应力调整有关。总体来看, 本文求得的震源机制解 P 轴方位角能够反映 SE—ESE 向的挤压作用, 倾角较缓说明力的作用近水平向, 与现代构造应力场作用表现一致。由综合 SKS 分裂快波方向(常利军等, 2008)和 GPS 观测资料(Gan *et al.*, 2007)可知, 在青藏高原东缘地壳物质的东向逃逸作用下, 震区西侧的川滇菱形地块向 SE 方向滑动, 遇到其东侧稳定的华南地块的阻挡, 使得附近断裂带受到右旋走滑和逆冲作用。在这种动力作用下, 石门断裂附近应力不断积累, 最终导致失稳破裂, 触发了此次彝良 $M_s5.7$ 和 $M_s5.6$ 地震。

中国地震局地球物理研究所“地震科学探测台阵数据中心”为本研究提供了地震波形数据; Felix Waldhauser 博士提供了 hypoDD 定位程序以及朱露培教授提供了 CAP 反演程序; 审稿专家对本文提出了宝贵修改意见和建议。作者在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2008. 四川及邻区上地幔各向异性研究[J]. 中国科学: D 辑, 38(12): 1589—1599.
- Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. 2008. Seismic anisotropy of upper mantle in Sichuan and adjacent regions[J]. *Science in China: Series D*, 51(12): 1683—1693.
- 韩立波, 蒋长胜. 2012. “中国地震科学台阵探测”项目快报: 2012 年 9 月 7 日云南昭通 5.7 级和 5.6 级地震[EB/OL]. [2015-05-08]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/263563.shtml>.
- Han L B, Jiang C S. 2012. “China Seismic Array” project bulletin: Zhaotong $M_s5.7$ and $M_s5.6$ earthquakes occurred on September 7, 2012[EB/OL]. [2015-05-08]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/263563.shtml> (in Chinese).
- 李冉, 汤吉, 董泽义, 肖骑彬, 詹艳. 2014. 云南南部地区深部电性结构特征研究[J]. 地球物理学报, 57(4): 1111—

① 陈运泰, 顾浩鼎. 2007. 震源理论基础. 中国科学院研究生院教材: 39—42.

- 1122.
- Li R, Tang J, Dong Z Y, Xiao Q B, Zhan Y. 2014. Deep electrical conductivity structure of the southern area in Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(4): 1111–1122 (in Chinese).
- 吕坚, 郑秀芬, 肖健, 谢祖军, 曾新福, 黎斌, 董菲菲. 2013a. 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.
- Lü J, Zheng X F, Xiao J, Xie Z J, Zeng X F, Li B, Dong F F. 2013a. Rupture characteristics and seismogenic structures of the $M_s5.7$ and $M_s5.6$ Yiliang earthquakes of Sep. 7, 2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(8): 2645–2654 (in Chinese).
- 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 潘林山, 李正, 尹利文, 曾新福, 邓辉. 2013b. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征[J]. *地球物理学报*, **56**(5): 1753–1763.
- Lü J, Wang X S, Su J R, Pan L S, Li Z, Yin L W, Zeng X F, Deng H. 2013b. Hypocentral location and source mechanism of the $M_s7.0$ Lushan earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(5): 1753–1763 (in Chinese).
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 吴建平, 楼海, 王飞. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. *地震学报*, **24**(1): 1–16.
- Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, Wu J P, Lou H, Wang F. 2002. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **24**(1): 1–16 (in Chinese).
- 网易新闻. 2012. 云南彝良地震致 80 人遇难[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://news.163.com/12/0908/00/8ARCCKP0001124J.html>.
- Netease News. 2012. 80 people were dead in Yiliang earthquake occurred in Yunnan Province[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://news.163.com/12/0908/00/8ARCCKP0001124J.html> (in Chinese).
- 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 郑勇, 陈颢. 2009. 2003 年 8 月 16 日赤峰地震: 一个可能发生在下地壳的地震 ?[J]. *地球物理学报*, **52**(1): 111–119.
- Wei S J, Ni S D, Chong J J, Zheng Y, Chen Y. 2009. The 16 August 2003 Chifeng earthquake: Is it a lower crust earthquake ?[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 111–119 (in Chinese).
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 龙锋, 范军, 杨攀新, 熊仁伟, 刘晓霞, 刘琦. 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.
- Wen X Z, Du F, Yi G X, Long F, Fan J, Yang P X, Xiong R W, Liu X X, Liu Q. 2013. Earthquake potential of the Zhaotong and Lianfeng fault zones of the eastern Sichuan-Yunnan border region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(10): 3361–3372 (in Chinese).
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 陈群策, 李宏. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. *地球物理学报*, **47**(4): 654–662.
- Xie F R, Cui X F, Zhao J T, Chen Q C, Li H. 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**(4): 654–662 (in Chinese).
- 谢祖军, 郑勇, 倪四道, 熊熊, 王行舟, 张炳. 2012. 2011 年 1 月 19 日安庆 $M_L4.8$ 地震的震源机制解和深度研究[J]. *地球物理学报*, **55**(5): 1624–1634.
- Xie Z J, Zheng Y, Ni S D, Xiong X, Wang X Z, Zhang B. 2012. Focal mechanism and focal depth of the 19 January 2011 Anqing earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1624–1634 (in Chinese).
- 徐锡伟, 程国良, 于贵华, 宋方敏, 向宏发, 张兰凤, Ron H, 王洋龙, 闻学泽. 2003. 川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据[J]. *地震地质*, **25**(1): 61–70.
- Xu X W, Cheng G L, Yu G H, Song F M, Xiang H F, Zhang L F, Ron H, Wang Y L, Wen X Z. 2003. Tectonic and paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of the Sichuan-Yunnan rhombic block[J]. *Seismology and Geology*, **25**(1): 61–70 (in Chinese).
- 徐锡伟, 于贵华. 2012. 云南昭通 5.7、5.6 级双震地震构造图[EB/OL]. [2015-03-05]. http://www.eq-igl.ac.cn/www-root/c_000000090002/d_0730.html.
- Xu X W, Yu G H. 2012. The seismotectonic map of $M_s5.7$ and $M_s5.6$ double earthquakes in Zhaotong, Yunnan Pro-

- vince[EB/OL]. [2015-03-05]. http://www.eq-igl.ac.cn/wwwroot/c_000000090002/d_0730.html (in Chinese).
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 高阿甲. 1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, **32**(6): 636–647.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, Gao A J. 1989. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **32**(6): 636–647 (in Chinese).
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 于湘伟. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学: D 辑, **33**(增刊): 129–134.
- Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, Yu X W. 2003. Accurate relocation of earthquakes in central-western China using the double-difference earthquake location algorithm[J]. *Science in China: Series D*, **46**(Suppl): 181–188.
- 杨智娴, 陈运泰. 2004. 用双差地震定位法再次精确测定 1998 年张北-尚义地震序列的震源参数[J]. 地震学报, **26**(2): 115–120.
- Yang Z X, Chen Y T. 2004. Relocation of the 1998 Zhangbei-Shangyi earthquake sequence using the double difference earthquake location algorithm[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(2): 115–120 (in Chinese).
- 张国民, 汪素云, 李丽, 张晓东, 马宏生. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. 科学通报, **47**(9): 663–668.
- Zhang G M, Wang S Y, Li L, Zhang X D, Ma H S. 2002. Focal depth research of earthquakes in mainland China: Implication for tectonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(12): 969–947.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D 辑, **33**(S1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(2S): 13–24.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学: D 辑, **38**(9): 1041–1056.
- Zhang P Z. 2008. The tectonic deformation, strain distribution and deep dynamic processes in the eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science in China: Series D*, **38**(9): 1041–1056 (in Chinese).
- 张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 冯红武. 2013. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红外异常[J]. 地震工程学报, **35**(1): 171–176.
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, Tian X F, Feng H W. 2013. Thermal infrared anomaly prior to Yiliang of Yunnan $M_s 5.7$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(1): 171–176 (in Chinese).
- 赵博, 高原, 黄志斌, 赵旭, 李大虎. 2013. 四川芦山 $M_s 7.0$ 地震余震序列双差定位、震源机制及应力场反演[J]. 地球物理学报, **56**(10): 3385–3395.
- Zhao B, Gao Y, Huang Z B, Zhao X, Li D H. 2013. Double difference relocation, focal mechanism and stress inversion of Lushan $M_s 7.0$ earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(10): 3385–3395 (in Chinese).
- 赵国泽, 陈小斌, 王立凤, 王继军, 汤吉, 万战生, 张继红, 詹艳, 肖骑彬. 2008. 青藏高原东边缘地壳“管流”层的电磁探测证据[J]. 科学通报, **53**(3): 345–350.
- Zhao G Z, Chen X B, Wang L F, Wang J J, Tang J, Wan Z S, Zhang J H, Zhan Y, Xiao Q B. 2008. Evidence of crustal “channel flow” in the eastern margin of Tibetan Plateau from MT measurements[J]. *Chinese Science Bulletin*, **53**(12): 1887–1893.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 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: D 辑, **39**(4): 413–426.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, Ni S D, Li Y C, Wei S J. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics[J]. *Science in China: Series D*, **52**(6): 739–753.
- 中国地震台网中心. 2012a. 云南省昭通市彝良县、贵州省毕节市威宁彝族回族苗族自治县交界发生 5.7 级地震[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/904/20130528150011546350018/index.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2012a. The $M_s 5.7$ earthquake occurred in the border area of Yiliang, Zhaotong in Yunnan Province and Yi, Hui, Miao Nationality Autonomous County, Weining, Bijie in Guizhou Province[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/904/20130528150011546350018/index.html> (in Chinese).

- 中国地震台网中心. 2012b. 2012 年 9 月 7 日云南彝良、贵州威宁交界 5.7 级、5.6 级地震[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/886/20130528145652625283910/index.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2012b. The M_s 5.7 and M_s 5.6 earthquakes occurred in the border area of Yiliang in Yunnan Province and Weining in Guizhou Province[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/886/20130528145652625283910/index.html> (in Chinese).
- 钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, **28**(4): 337–346.
- Zhong J M, Cheng W Z. 2006. Determination of directions of the mean stress field in Sichuan-Yunnan region from a number of focal mechanism solutions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(4): 337–346 (in Chinese).
- 周桂华, 非明伦, 张彦琪, 郑定昌. 2013. 彝良 5.7、5.6 级地震烈度分布及烈度异常区震害特征初步分析[J]. 地震研究, **36**(3): 364–371.
- Zhou G H, Fei M L, Zhang Y Q, Zheng D C. 2013. Analysis on intensity distribution and seismic disaster characteristics in intensity abnormal areas of Yiliang M_s 5.7, 5.6 earthquakes[J]. *Journal of Seismological Research*, **36**(3): 364–371 (in Chinese).
- 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 尹京苑, 甘卫军, 陈桂华. 2005. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, **48**(3): 629–636.
- Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, Yin J Y, Gan W J, Chen G H. 2005. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(3): 629–636 (in Chinese).
- 朱艾斓, 徐锡伟, 刁桂苓, 苏金蓉, 冯向东, 孙晴, 王亚丽. 2008. 汶川 M_s 8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质, **30**(3): 759–767.
- Zhu A L, Xu X W, Diao G L, Su J R, Feng X D, Sun Q, Wang Y L. 2008. Relocation of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake sequence in part: Preliminary seismotectonic analysis[J]. *Seismology and Geology*, **30**(3): 759–767 (in Chinese).
- 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 高德章, 赵风清, 杜杨松, 汪洋. 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社: 50–51.
- Zhu J S, Cai X L, Cao J M, Gao D Z, Zhao F Q, Du Y S, Wang Y. 2005. *The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Sea*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 50–51 (in Chinese).
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, Niu Z J, Wang M, Wan Y G, Zhou D M, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *J Geophys Res*, **112**(B8): B08416.
- Global CMT. 2012. Global CMT Catalog Search[EB/OL]. [2015-03-05]. <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/form?type=y&mo=2012&day=7&otype=y&oyr=2012&omo=9&oday=7&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=0&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=-90&ulat=90&llon=-180&ulon=180&lhd=0&uhd=1000<s=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>.
- Tan Y, Zhu L P, Helmberger D V, Saikia C K. 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations[J]. *J Geophys Res*, **111**(B1): B01306.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China[J]. *Earthquake Science*, **23**(4): 377–386.
- Zhao B, Shi Y T, Gao Y. 2012. Seismic relocation, focal mechanism and crustal seismic anisotropy associated with the 2010 Yushu M_s 7.1 earthquake and its aftershocks[J]. *Earthquake Science*, **25**(1): 111–119.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media[J]. *Geophys J Int*, **148**(3): 619–627.



吕苗苗 中国地震局地球物理研究所读博士研究生。2012年长安大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事地震定位、震源机制解和地球内部深部结构方面的研究工作。



倪红玉 安徽省地震局预报研究中心工程师。2005年安徽师范大学物理学专业毕业，获理学学士学位；2008年中国科学技术大学物理化学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事水等重要大气分子的近红外弱吸收带的研究工作，现主要从事震源机制、视应力、构造应力场和地震预测等方面的研究工作。



张佩 中国科学技术大学地球和空间科学学院在读硕士研究生。2012年吉林大学地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事微地震震源机制反演方法的研究工作。SEG学生会会员。



李勇江 中国地震局地球物理勘探中心实习工程师。2011年长江大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位；2015年中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。现主要从事重力观测、资料处理及地震监测预报方面的研究工作。



黄显良 安徽省地震局地震工程研究院高级工程师。1996年安徽大学数理统计专业毕业，获理学学士学位；2005年中国科学技术大学固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震观测技术和地震预测预报方法的研究工作，现主要从事地震中长期预报方面的研究工作。安徽省地震学会理事。



韩晓明 内蒙古自治区地震局高级工程师。2004年河南理工大学大地测量专业毕业，获工学学士学位；2007年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事地震学和地震预测方法的研究与应用工作。内蒙古自治区地震学会会员。