

2018年云南通海 $M_s 5.0$ 震群序列重定位 及震源区速度结构成像^{*}

王月, 孟令媛, 韩颜颜, 马亚伟, 邓世广

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 利用2018年8月13日至12月31日云南通海 $M_s 5.0$ 震群震源区的观测报告, 采用双差层析成像方法对通海 $M_s 5.0$ 震群序列重定位, 获得了震源区附近上地壳的三维速度结构。结果表明: 震源区速度结构呈现明显横向不均匀, 在玉江断裂和小江断裂南段的明星—二街断裂交汇处, 5 km 深度上, 震源区出现高速异常, 延伸至10 km, 而在15 km 深度上, 表现为低速异常。重定位后的震源位置精度明显得到提高, 地震事件分布更加集中, 震中位置呈 NE—SW 向条带状分布, 2次主震空间相距约18 km, 震源深度分布范围为3 ~ 12 km, 8月13, 14日2次 $M_s 5.0$ 地震的震源深度分别约为8.63 km, 和9.16 km。综合分析震源区地震地质资料、速度结构成像结果及重定位后地震序列空间分布认为, 位于小江断裂带南段, 且与明星—二街断裂近乎平行的隐伏断裂可能是此次通海震群的发震构造。

关键词: 通海震群; 双差层析成像; 重定位; 上地壳速度结构

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0331-09

0 引言

据中国地震台网测定, 2018年8月13日1时44分, 云南省玉溪市通海县发生 $M_s 5.0$ 地震, 震中位置为 (24.19°N, 102.71°E), 震源深度7 km。8月14日3时52分, 原地再次发生1次 $M_s 5.0$ 地震, 震源深度6 km。据中国地震台网中心目录, 2次 $M_s 5.0$ 地震震中位置相同, 构成通海 $M_s 5.0$ 震群型地震序列。截至2018年12月31日, 通海震群震源区共记录到1 229次 $M_L 0.0$ 以上地震, 其中 $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震2次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震1次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震9次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震68次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震415次, $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震734次。通海2次 $M_s 5.0$ 地震共造成11人受伤, 通海、江川部分房屋受损, 对当地造成一定的经济损失。

研究震源区的上地壳速度结构, 结合震源机制、余震重定位结果对进一步明确地震孕育环境和确定发震断层具有重要意义 (房立华等, 2014)。双差层析成像方法 (tomoDD) 在反演过程中, 引入绝对走时数据, 并结合相对走时数据, 相对于双差定位方法, 不仅可反演出地下精细三

维速度结构, 而且获得地震的绝对位置和相对位置的定位精度明显提高, 因此该方法被广泛应用到速度结构成像和地震重定位研究中 (Zhang and Thurber, 2003): 如根据大地震后余震序列的地震资料, 获取震源区三维速度结构和高精度的余震序列重定位结果 (Pei 等, 2010; 王长在等, 2011; 王小娜等, 2015); 根据长时间记录的区域小震资料, 获得研究区域的精细速度结构 (王小娜等, 2014; 吕子强等, 2016; 刘伟等, 2019; 杨峰, 2019); 除此之外, Qian 等 (2018) 基于双差层析成像方法, 发展了新的延时地震层析成像方法, 反演了研究区速度结构随时间的变化特征。

本文利用中国地震台网提供的2018年8月13日至2018年12月31日通海2次 $M_s 5.0$ 震群震源区附近的震相观测报告, 采用双差层析成像方法获得震源区附近上地壳的精细速度结构和高精度的地震定位结果, 综合有关地质资料和震源机制解, 分析通海2次 $M_s 5.0$ 地震的发震构造。

1 研究区概况

2018年通海震群震中位于川滇菱形地块东南

^{*} 收稿日期: 2019-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金 (41504047) 和中国地震台网中心青年科技基金 (QNJJ201812) 联合资助.

端, 云南高原南部。该区地壳破碎, 深大断裂发育, 是几条大断裂交汇的位置, 震中 100 km 范围内发育有红河断裂、楚雄—建水断裂、普渡河断裂、曲江—石屏断裂和小江断裂等主要活动断裂, 地震活动频繁 (李坪, 汪良谋, 1975; 阚荣举等, 1977; 皇甫岗, 2009; 刘伟等, 2019)。1900 年以来, 通海 $M_s5.0$ 震群 100 km 范围内共发生 31 组 (44 次) 5 级以上地震, 其中 5.0 ~ 5.9 级地震 36 次, 6.0 ~ 6.9 级地震 6 次, 7.0 ~ 7.9 级地震 2 次, 最大为 1970 年 1 月 5 日通海 7.8 级地震, 其发震断裂为 NW 向的曲江断裂 (阚荣举等, 1977; 张之立, 刘新美, 1982)。2018 年通海 $M_s5.0$ 震群的初始定位结果显示 2 次地震均发生在 1970 年 7.8 级地震的余震区,

但震中位于小江断裂带西支南段的次级断裂明星—二街断裂和曲江—石屏断裂带的次级断裂玉江断裂的交汇区 (图 1), 为判断本次震群的发震断裂增加了难度。

2018 年 8 月 13, 14 日通海 2 次 $M_s5.0$ 地震发生后, 中国地震台网中心 (CENC)、中国地震局地球物理研究所 (IGP-CEA)、中国地震局地震预测研究所 (IEF-CEA) 分别公布了快速地震矩张量反演结果, 王光明等 (2018) 利用 CAP 方法计算了通海 2 次 $M_s5.0$ 地震的震源机制解, 4 组结果均显示通海 2 次 $M_s5.0$ 地震为走滑型地震 (表 1)。仅从上述资料分析, NE 向的明星—二街断裂和 NW 向的玉江断裂均有可能是通海 2 次 $M_s5.0$ 地震的发震断裂。

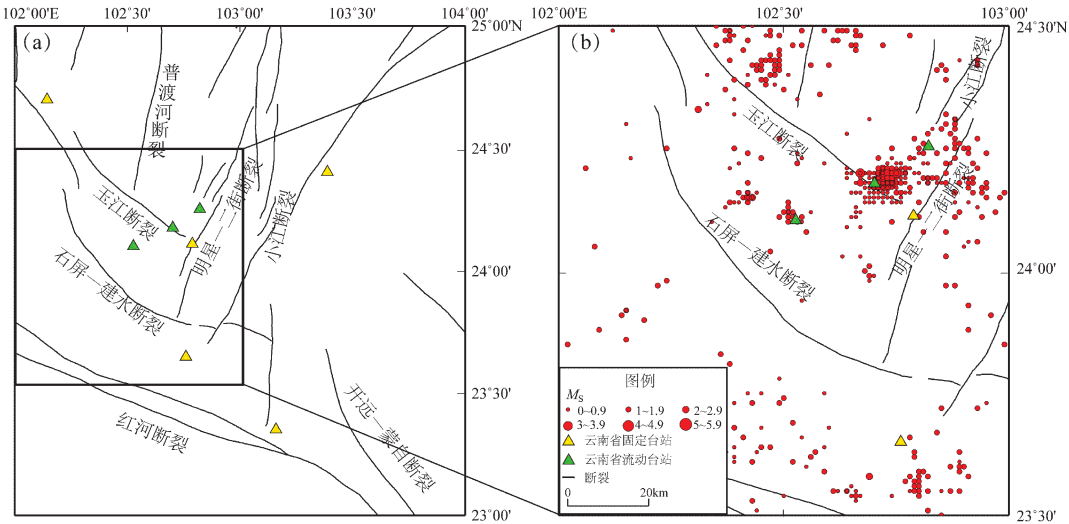










图 1 研究区域断裂和台站分布 (a), 区域断裂及地震分布 (b)
Fig. 1 Geologic structure background and distribution of stations in the study area (a), regional geologic structure background and distribution of earthquakes (b)

表 1 通海 2 次 $M_s5.0$ 地震震源机制解
Tab. 1 Focal mechanism of the two Tonghai $M_s5.0$ mainshocks

| 发震日期 | M_w | 震源机制 | | | | | | 震源机制解 |
|------------|-------|---------|------|--------|---------|------|--------|---|
| | | 节面Ⅰ/（°） | | | 节面Ⅱ/（°） | | | |
| | | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 走向 | 倾角 | 滑动角 | |
| 2018-08-13 | 5.1 | 281 | 42 | 174 | 16 | 86 | 48 |  ① |
| 2018-08-13 | 4.8 | 290 | 89 | -168 | 200 | 78 | -1 |  ② |
| 2018-08-13 | 4.8 | 20.0 | 90.0 | -3.0 | 110.0 | 87.0 | 180.0 |  ③ |
| 2018-08-13 | 4.9 | 25.0 | 83.0 | -5.0 | 115.6 | 85.0 | -173.0 |  ④ |
| 2018-08-14 | 5.0 | 292 | 52 | -179 | 201 | 89 | -38 |  ① |
| 2018-08-14 | 4.7 | 290 | 89 | -168 | 200 | 78 | -1 |  ② |
| 2018-08-14 | 4.9 | 201.0 | 89.0 | -11.0 | 291.2 | 79.0 | -179.0 |  ③ |
| 2018-08-14 | 4.8 | 297.0 | 73.0 | -171.0 | 204.3 | 81.4 | -17.2 |  ④ |

注: 数据来源①CENC; ② IGP-CEA; ③ IEF-CEA; ④ 王光明等 (2018)。

2 研究方法 with 数据选取

2.1 双差层析成像

双差层析成像方法是 Zhang 和 Thurber (2003, 2006) 在双差定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 的基础上发展而来, 目前已被应用于多个地区速度结构和震源位置的精细研究中。该方法利用地震波的绝对走时和相对走时数据实现三维速度结构的反演和地震重定位。在射线理论中, 地震事件 i 到台站 k 的时间表示为:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (1)$$

式中: τ^i 是第 i 个事件的发震时刻; u 表示慢度; ds 表示射线路径积分元。

在三维模型下, 对于事件 i , 台站 k 的观测到时与理论到时差 r_k^i 可近似表示为:

$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds \quad (2)$$

将第 i 和第 j 个地震组成事件对, 2 次地震在台站 k 的到时差为:

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j - \int_j^k \delta u ds \quad (3)$$

式中: $r_k^i - r_k^j$ 为双差。当地震对距离台站足够远时, 2 个地震到同一台站的射线路径是相似的, 则

双差仅与 2 个地震对的震源位置和地震对之间的速度有关, 因此使用双差进行反演, 减少了地震到台站之间的路径异常对结果的影响。双差层析成像方法采用阻尼最小二乘共轭梯度法求解方程, 反演得到研究区域的速度结构和震源位置。实际反演过程中, 首先赋予绝对走时较高的权重以建立整个区域的三维速度结构, 几次迭代后赋予相对走时较高的权重可更好地约束震源周围的速度结构和震源位置 (肖卓, 高原, 2017; 吴海波等, 2018)。

2.2 数据

本文利用 2018 年 8 月 13 日至 12 月 31 日通海 2 次 $M_s 5.0$ 地震周边 4 个国家地震台站和云南地震台网的 28 个台站 (22 个固定台站, 6 个流动台站), 记录的地震空间范围为 ($23^\circ \sim 25^\circ \text{N}$, $102^\circ \sim 104^\circ \text{E}$) 震相观测报告 (图 1) 进行双差地震层析成像反演计算。

观测报告中存在由不同台网定位的相同地震事件以及单台记录地震事件, 人工剔除后共获得 1 854 个 $M_L \geq 0.0$ 地震事件。根据时距曲线拟合的方法, 发现所选取的地震走时数据多位于拟合直线附近 2 s 内, 因此本文选取位于拟合直线 2 s 内的震相数据进行反演计算 (图 2)。反演过程中有 872 个地震组成地震对, 利用 160 508 条相对到时数据和 11 214 条绝对到时数据参与反演, 最终获得 871 个地震事件的重定位结果。

2.3 参数选择

参考研究区内已有的研究成果 (王椿镛等, 2002; 何正勤等, 2004; 王光明等, 2018; 刘自凤等, 2018), 本文构建了通海地区的一维速度

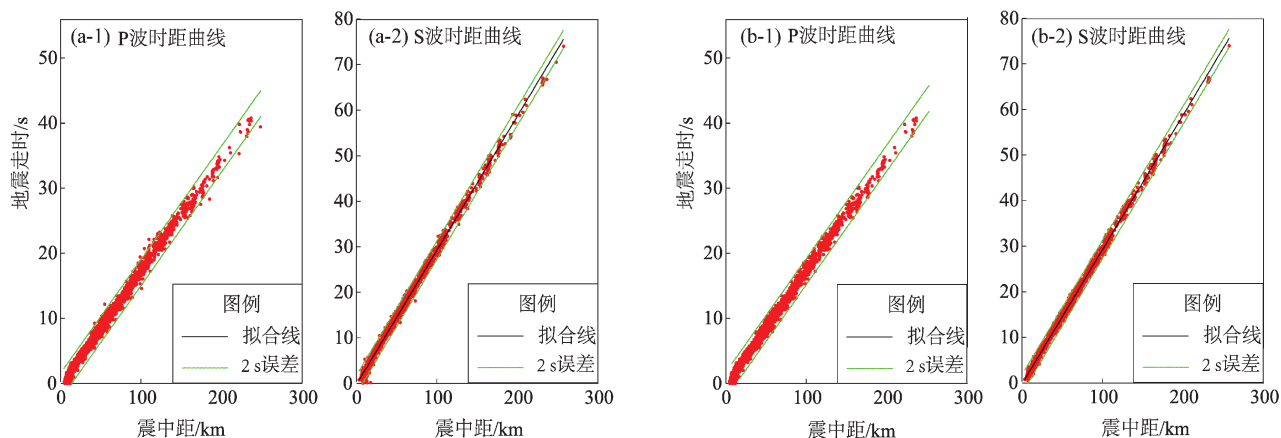


图 2 筛选前 (a) 和筛选后 (b) 数据的走时曲线拟合图

Fig. 2 The diagram for fitting travel time with epicentral distance (a) before and (b) after selection

结构模型（表 2），波速比采用 1.732（李永华等，2009）。水平方向采用 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的网格间隔，深度 $Z = 0, 5, 10, 15, 20, 25$ km。反演采用阻尼最小二乘法，由于平滑因子和阻尼参数的大小对反演结果的稳定性有较大影响，因此在反演前需要对不同平滑因子和阻尼参数的组合进行权衡分析，选取模型方差变化较小而数据方差显著降低时所对应的参数组合为最优值（王小娜等，2015；左可桢，陈继峰，2018）。本文利用 L 曲线法搜索最优参数值，设定平滑因子的搜索范围为 0.001 ~ 2 000，阻尼参数的搜索范围为 0.1 ~ 10 000，最终选取的最优平滑因子和阻尼参数分别为 20 和 300（图 3）。

根据双差层析成像方法的反演流程，对绝对到时数据和相对到时数据采用分级加权的方法。在反演的第一阶段赋予绝对到时较高的权重，与相对走时权重之比为 10，获得较大范围内地震事

件的定位结果和速度模型。之后相对到时权重增加，绝对到时权重与相对走时权重之比为 0.1，提高震源区定位和速度模型的精度。经过 4 组 12 次迭代反演，地震走时的均方根残差从 0.396 s 降至 0.093 s，获得了通海 2 次 $M_s5.0$ 地震震源区附近的上地壳三维 P 波和 S 波速度结构模型。

表 2 通海震源区附近速度模型

Tab. 2 Velocity model of the Tonghai earthquake region

| 层顶深度/km | $V_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|---------|---------------------------------------|
| 0.00 | 4.30 |
| 5.00 | 5.98 |
| 20.00 | 6.27 |
| 30.00 | 6.83 |
| 50.00 | 8.10 |
| 70.00 | 8.30 |
| 300.00 | 8.63 |

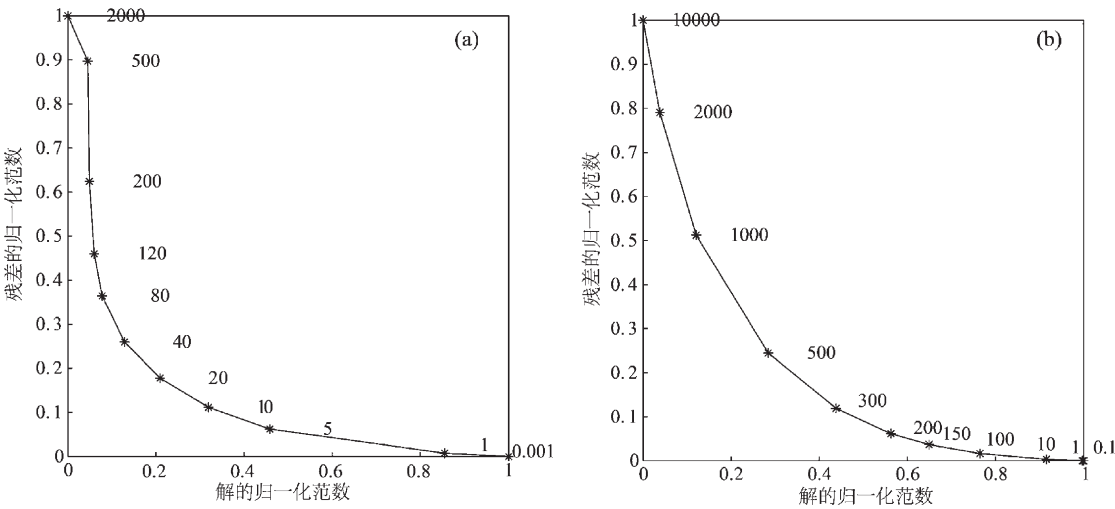


图 3 利用 L 曲线法所选的最优平滑因子 (a) 和阻尼参数 (b)

Fig. 3 The optimum smoothing parameter (a) and damping parameter (b) selected by the L curve method

3 计算结果

本文通过检测板法对反演结果的分辨率进行检测，检验所得速度模型的可靠性（图 4）。首先在初始模型的基础上添加 5% 正负相间的扰动，形成检测板；然后利用该模型以及地震和台站信息计算理论走时数据，并对数据加上随机噪声，作为实际观测数据，进一步利用双差层析成像方法反演速度模型；最后通过对比检测板的恢

复程度分析成像的分辨能力。图 4 显示，在 5 km 和 10 km 深度上， $(23.5^{\circ} \sim 24.5^{\circ} \text{N}, 102.0^{\circ} \sim 103.0^{\circ} \text{E})$ 区域内，特别是通海地震震源区内，数据得到良好恢复，分辨能力高，能够分辨 10 km 尺度的速度异常，进而得到更精细的速度结构。在 15 km 深度上，仅在 $(24.0^{\circ} \sim 24.5^{\circ} \text{N}, 102.5^{\circ} \sim 103.0^{\circ} \text{E})$ 区域内速度结构可以得到恢复。

图 5 为通海地震震源区 5 ~ 15 km 深度范围的 P 波速度和 S 波速度分布。由图 5 可见，在震源区，P 波速度和 S 波速度表现出强烈的横向不均匀

性。在 5 km 深度的 P 波速度结构显示, 玉江断裂和石屏—建水断裂之间存在高速异常, 玉江断裂将 NE 一侧的低速异常和 SW 一侧的高速异常分隔, 断裂两侧速度变化较大; 明星—二街断裂西

侧的小断裂是低速区, 而与玉江断裂交汇区域, 即通海地震震源位置为高速异常体; 该高速异常体一直延伸至 10 km 深度, 而在 15 km 深度处, 该区域出现低速异常; 明星—二街断裂东侧在 5 km

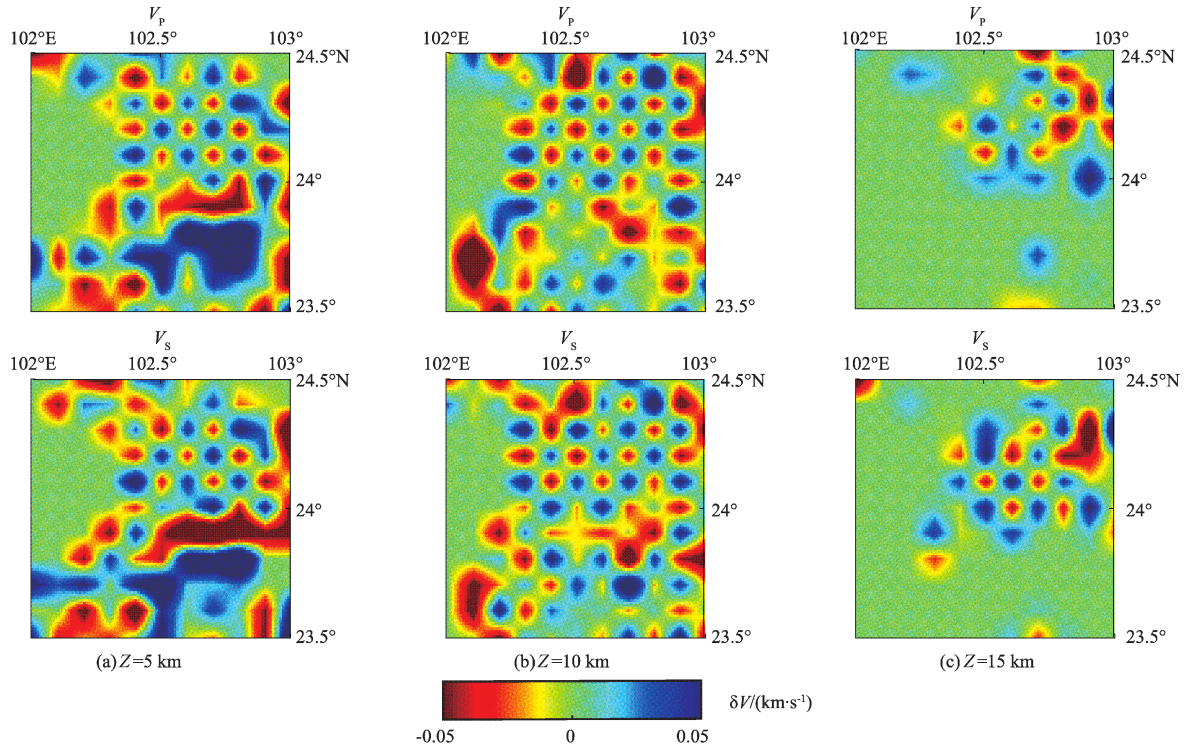


图4 不同深度剖面的棋盘模型测试结果

Fig. 4 The checkerboard resolution test at different depths

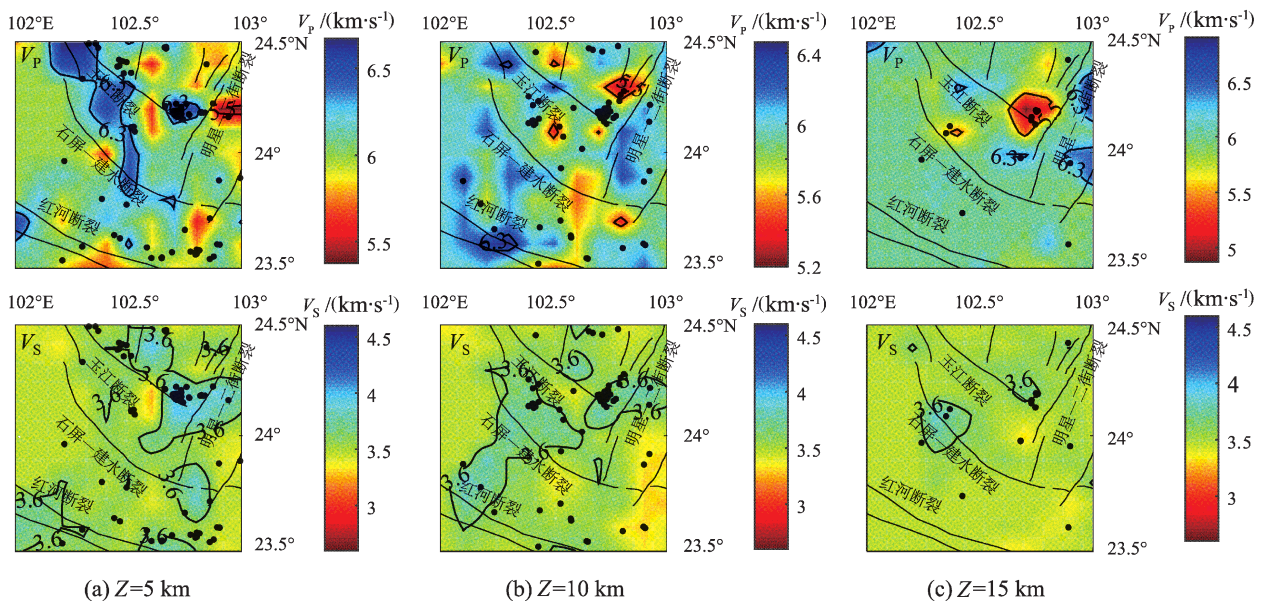


图5 不同深度 P 波速度、S 波速度和 2018 年 8 月 13 日至 12 月 31 日 $M_L \geq 0.0$ 地震分布 (黑色圆点)

Fig. 5 P-wave velocity distribution, S-wave velocity distribution, and $M_L \geq 0.0$ earthquakes distribution from Aug. 13 to Dec. 31, 2018 (black points) at different depths

深度表现为低速异常,而在 10 km 及以下,表现为高速异常。整体上,石屏—建水断裂两侧和明星—二街断裂东西两侧的速度结构变化较大,断裂将高、低速体分隔开。S 波速度结构分布与 P 波速度结构基本一致,特别是在震源位置 P 波速度和 S 波速度均表现为高速异常。

双差层析成像也同时获得了 2018 年 8 月 13 日至 12 月 31 日的 871 个 $M_L \geq 0.0$ 地震的震源位置。图 6 显示:重定位前地震走时残差分布位于 $-2 \sim 2$ s, $-0.2 \sim 0.2$ s 的走时残差数据占 77.21% (图 6a);重定位后地震走时残差分布更集中, $-0.2 \sim 0.2$ s 的走时残差数据占 91.65% (图 6b);地震走时均方根残差 (RMS) 由重定位前的 0.396 s 降到定位后的 0.093 s,定位精度有了显著改进;震源深度的分布范围为 $0 \sim 20$ km,优势分布范围为 $5 \sim 11$ km,占地震总数的 66.70%,其中, $8 \sim 9$ km 范围内的地震共为 176 个,所占比例最高 (图 6c)。

本文选取 2018 年 8 月 13 日至 31 日的 $M_L \geq$

0.0 地震序列进行初始定位和重定位的结果对比。与初始定位结果相比 (图 7a),重定位后的 2 次主震分别位于余震序列两侧,空间相距约 18 km,8 月 13 日 $M_s 5.0$ 地震位于余震序列 SE 向,距序列集中区域约 10 km,8 月 14 日 $M_s 5.0$ 地震位于余震序列 SW 向,距序列集中区域约 8 km (图 7b)。主震定位结果距离余震事件较远的原因是,在利用时距曲线进行震相筛选时,主震事件可用的台站数量较少,与后续余震事件所用台站差异较大,数据质量具有一定的局限性,因此,主震定位结果与实际震中具有一定误差。地震序列随时间演化显示,余震主要集中在主震后 5 天内,震源深度主要分布在 $3 \sim 12$ km (图 7c)。2 次主震之间共发生 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震 37 次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震 93 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震 16 次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 4 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震 1 次,最大为 8 月 13 日 1 时 49 分通海 $M_L 4.0$ 地震,并且该地震位于余震序列集中区域。

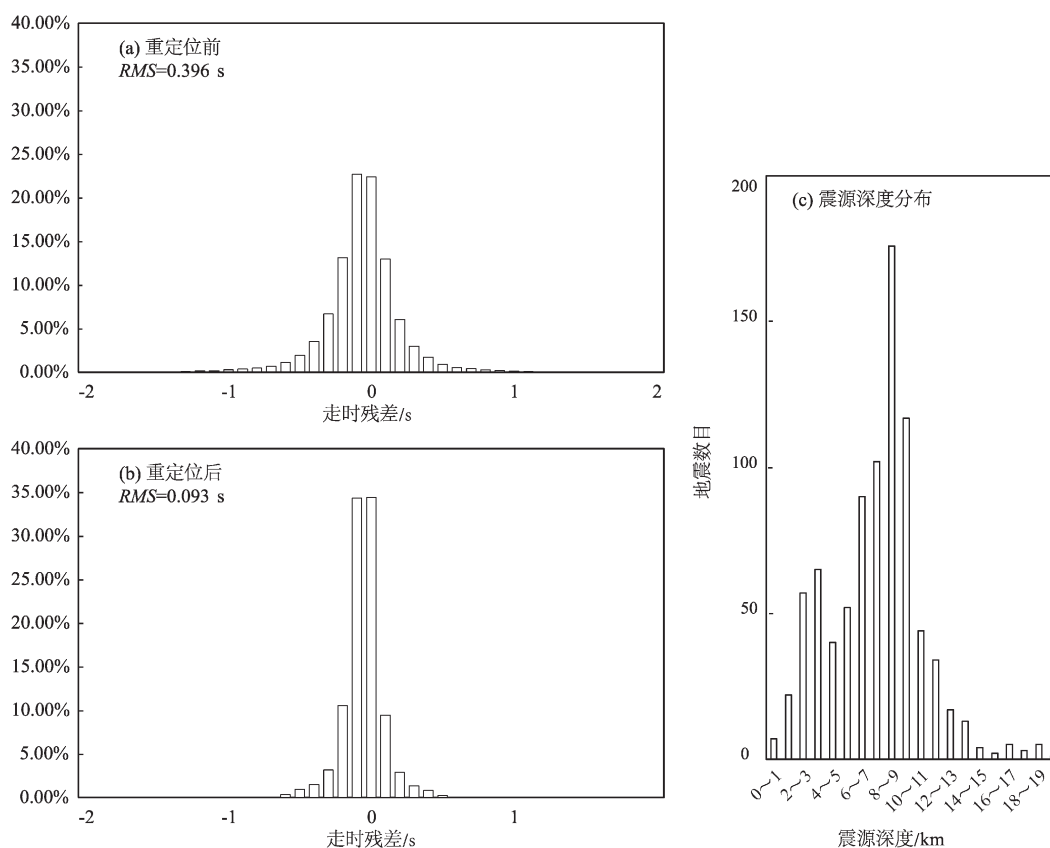


图 6 2018-08-13—2018-12-31 $M_L \geq 0.0$ 地震重定位前 (a), 后 (b) 走时残差分布和震源深度分布 (c)

Fig. 6 The arrival time residual distribution before (a) and after (b) event relocation of $M_L \geq 0.0$ from Aug. 13 to Dec. 31, 2018, and the distribution of earthquake depth (c)

分别沿 NE 向的明星—二街断裂和 NW 向的玉江断裂做 AA' 和 BB' 测线, 设这两个剖面的 P 波速度结构和发震投影显示 (图 7d, e), 重定位后的余震序列在 AA' 剖面内分布于呈宽约 8 km 的条带内, 无明显倾向, 而在 BB' 剖面内分布于呈近乎垂直的宽约 4 km 的条带内, 倾向 ES, 倾角约为 80° 。因此, 本文认为通海地震余震沿 NE -

SW 方向破裂。由于余震序列距离有相同走向的明星—二街断裂较远, 约 10 km, 因此, 在破裂区域可能存在与明星—二街断裂近乎平行的隐伏断裂, 该隐伏断裂为本次通海震群的发震断裂。8 月 13, 14 日 2 次 $M_s 5.0$ 地震分别位于余震序列的两侧, 震源深度分别为 8.63 km 和 9.16 km, 比初始定位的 6 km 和 7 km 更深。

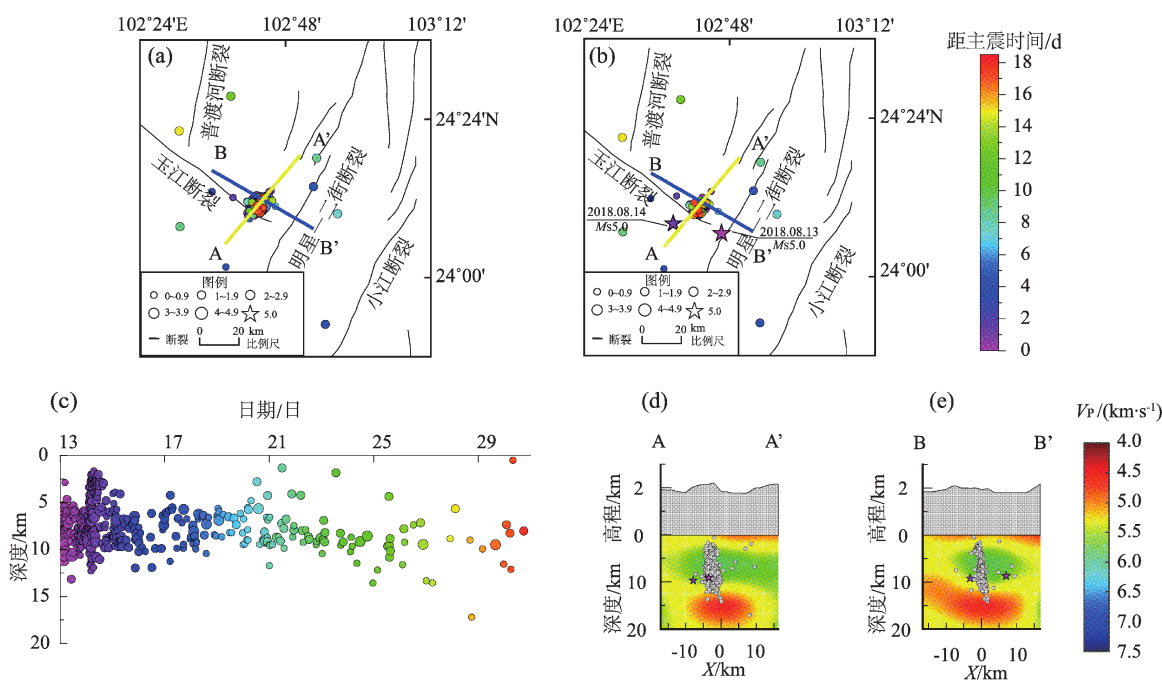


图 7 2018-08-13—2018-08-31 研究区域内 $M_L \geq 0.0$ 地震的初始定位结果 (a)、重定位结果 (b)、重定位后地震震源深度随时间变化图 (c)、沿 AA' (d) 和沿 BB' 剖面 (e) 地震分布图

Fig. 7 Initial (a) and relocation (b) results of epicenter distribution of $M_L \geq 0.0$ earthquakes from Aug. 13 to Aug. 31, 2018 results; the relocated earthquake depth changes with time (c);

P wave velocity along the AA' section (d) and BB' section

4 讨论

2018 年 8 月 13 日和 14 日通海 2 次 $M_s 5.0$ 地震后余震序列不丰富, 尤其 $M_L \geq 3.0$ 地震数目极少, 因此本文采用 2018 年 8 月 13 日至 2018 年 12 月 31 日发生的 $M_L \geq 0.0$ 地震参与双差层析成像。层析成像结果显示在震源区下方约 13 km 深度上存在低速异常区, 即玉江断裂和明星—二街断裂交汇处, 该低速区速度结构由地表向下, 显示逐渐由高速到低速, 再到高速的变化特征。Wang 等 (2010) 利用远震接收函数对云南地区速度结构成像结果显示该地区存在低速异常; 胥颐等 (2013)

和贾源源 (2018) 对云南地区进行速度结构层析成像, 结果显示在小江断裂带南端存在低速异常; 吴建平等 (2013) 对小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构成像结果也显示断裂带南端存在低速异常, 与本文研究结果一致。该低速异常可能是震源区下部存在流体的显示, 而低黏度的流体层易与上地壳发生相对运动, 从而引发此次通海 $M_s 5.0$ 震群。通海 2 次 $M_s 5.0$ 地震及其余震序列大部分发生在约 13 km 处低速体的上部, 可能与该低速异常阻挡了岩石破裂向深部发展的趋势有关。

本文对比重定位前后的 2018 年 8 月 13 日至 31 日的通海震群序列在 NE 向的 AA' 和 NW 向的 BB' 2 个剖面上的分布, 结果显示余震序列在 AA'

剖面分布较宽,无明显倾向趋势,在 BB' 剖面分布较窄,形成约 80° 倾角,倾向 ES 向。地震序列的空间分布特征与 2 次主震震源机制解的 NE 向节面相吻合(表 1),因此可推测 NE 向节面为通海震群的主断裂面。

但是,由于本文使用的观测报告数据量仍然较少,反演的速度结构分辨率较低,为了获得该地区更加精细的速度结构,后续研究需尽可能利用更长时间记录的地震数据进行层析成像。

5 结论

本文根据 2018 年 8 月 13, 14 日通海 2 次 $M_s 5.0$ 地震后震源附近的 $M_L \geq 0.0$ 地震的震相报告,利用双差层析成像方法反演了震源区附近的上地壳速度结构,同时得到了 871 个地震的重定位结果。结合云南地区断裂分布,得到以下认识:

(1) 通海地震震源区的 P 波和 S 波速度结构呈现明显的横向不均匀性。在 5 km 深度,研究区内玉江断裂带的北侧表现为低速,与石屏—建水断裂带之间的区域呈现高速异常,石屏—建水断裂带南侧表现为低速。小江断裂带南段的次级断裂,明星—二街断裂的 NW 侧表现为低速区,与玉江断裂交汇处在 5 ~ 10 km 深度呈现高速异常,在 15 km 深度呈现低速异常。综合分析,研究区内的速度结构与断裂走向具有较好的一致性。

(2) 震源机制解和重定位后的地震序列空间展布显示,通海 2 次 $M_s 5.0$ 地震的发震构造的走向为 NE 向,倾角约为 80°,倾向为 ES 向。结合研究区的断裂分布,推测发震断裂为小江断裂带南段的隐伏断裂,与 NE 向的明星—二街断裂近乎平行。

(3) 重定位后的大部分地震的震源深度集中在 3 ~ 12 km,将重定位后的地震分别投影在 5, 10 和 15 km 深度的速度结构平面上,显示震中大多分布在高速体内部,或者高速体向低速体过渡的部位。

(4) 沿 AA' 和 BB' 深度剖面的速度结构以及余震分布图像显示,在 13 km 深度附近存在 P 波低速异常区。本文重定位后的 2 次 $M_s 5.0$ 地震均发生在低速区的边界,余震大部分集中分布在低速区上部,表明该低速异常的存在可能是促使断层发生运动而引发地震的原因。

本文在撰写过程中,蒋海昆研究员和周龙泉研究员提出宝贵的修改意见,张海江教授提供 tomoDD 算法程序,陈余宽博士和朱慧宇博士在计算方法方面进行的有益讨论,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 房立华,吴建平,王未来,等. 2014. 云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震余震重定位及其发震构造[J]. 地震地质,36(4):1173-1185.
- 何正勤,叶太兰,苏伟. 2004. 云南地区地壳中上部横波速度结构研究[J]. 地球物理学报,47(5):839-845.
- 皇甫岗. 2009. 云南地震活动性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学.
- 贾源源. 2018. 云南地区地壳结构的双差层析成像研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 阙荣举,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.
- 李坪,汪良谋. 1975. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨[J]. 地质科学,75(4):308-325.
- 李永华,吴庆举,田小波,等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报,52(1):67-80.
- 刘伟,吴庆举,张风雪. 2019. 利用双差层析成像方法反演青藏高原东南缘地壳速度结构[J]. 地震学报,41(2):155-168.
- 刘自凤,张天继,付虹,等. 2018. 2018 年云南通海 5.0 级地震前波速比变化特征[J]. 地震研究,41(4):494-502.
- 吕子强,郑建常,张刚,等. 2016. 濮阳地震集中区双差层析成像研究[J]. 地震研究,39(2):255-260.
- 裴军令,李海兵,孙知明,等. 2010. 汶川地震断裂带断层滑移作用——来自高磁化率断层岩的信息[J]. 第四纪研究,(4):125-133.
- 王长在,吴建平,房立华,等. 2011. 2009 年姚安地震序列定位及震源区三维 P 波速度结构研究[J]. 地震学报,32(2):123-133.
- 王椿镛,Mooney W D,王溪莉,等. 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.
- 王光明,刘自凤,赵小艳,等. 2018. 2018 年云南通海 $M_s 5.0$ 地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究,41(4):503-510.
- 王小娜,于湘伟,章文波. 2014. 昭通地区地震层析成像及彝良震区构造初步分析[J]. 地球物理学进展,29(4):1573-1580.
- 王小娜,于湘伟,章文波. 2015. 芦山震区地壳三维 P 波速度精细结构及地震重定位研究[J]. 地球物理学报,58(4):1179-1193.
- 吴海波,申学林,王杰,等. 2018. 三峡库区上地壳三维速度结构的双差层析成像研究[J]. 地球物理学报,61(7):2802-2814.
- 吴建平,杨婷,王未来,等. 2013. 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义[J]. 地球物理学报,56(7):2257-2267.
- 肖卓,高原. 2017. 利用双差成像方法反演青藏高原东北缘及其邻区地壳速度结构[J]. 地球物理学报,60(2):2213-2225.
- 胥颐,杨晓涛,刘建华. 2013. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究[J]. 地球物理学报,56(6):1904-1914.
- 杨峰. 2019. 华北北部地区地壳三维 P 波速度结构的双差地震层析成像[J]. 地震,39(1):58-71.
- 张之立,刘新美. 1982. 1970 年 1 月 5 日云南通海地震的震源特征

- [J]. 地球物理学报, 25(5): 441 – 447.
- 左可桢, 陈继峰. 2018. 门源地区地壳三维体波速度结构及地震重定位研究[J]. 地球物理学报, 61(7): 2788 – 2801.
- Qian J W, Zhang H J, Westman E. 2018. New time – lapse seismic tomographic scheme based on double – difference tomography and its application in monitoring temporal velocity variations caused by underground coal mining[J]. Geophy J Int, 215(3): 2093 – 2104.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double – difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward Fault, California[J]. Bull Seism Soc Am, 96(6): 1353 – 1368.
- Wang P, Wang L S, Mi N, *et al.* 2010. Crustal thickness and average VP/VS ratio variations in southwest Yunnan, China, from teleseismic receiver functions[J]. J Geophys Res, 115(B11): B11308.
- Zhang H J, Thurber C H. 2003. Double – difference tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California[J]. Bull Seism Soc Am, 93(5): 1875 – 1889.
- Zhang H J, Thurber C H. 2006. Development and application of double – difference seismic tomography[J]. Pure and Applied Geophys, 163(2 – 3): 273 – 403.

Relocation of the 2018 Tonghai $M_s5.0$ Earthquakes Swarm, Yunnan and Velocity Imaging of the Source Region

WANG Yue, MENG Lingyuan, HAN Yanyan, MA Yawei, DENG Shiguang
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

In this study, we relocated the 2018 Yunnan Tonghai $M_s5.0$ earthquakes swarm and determined a 3D velocity model of the upper crust of source area using the double – difference seismic tomography method. All the seismic phase observation reports are provided by the China Earthquake Networks Center (CENC). The results show that the velocity structure of the epicenters of the Tonghai sequence present obvious lateral inhomogeneity. At the junction of the Yujiang fault and the Mingxing – erjie fault which was located in the south of Xiaojiang fault, and the velocity presents high values at the depth 5 km and till to the 10 km, while the velocity presents low values at the depth of 15 km. The well relocated epicenters of the Tonghai $M_s5.0$ earthquakes sequence exhibited in a narrow band along the NE – SE direction, the distance between two main events is approximately 18 km, and the predominant range of depth distribution is from 3 km to 12 km. The depths of the two main events occurred on 13 and 14 August are 8.63 km and 9.16 km, respectively. Based on the comprehensive results of the velocity structure of source area, the distribution of the relocated epicenters and hypocenters, and the geological structures, we infer that a pre – exist fault which is parallel to the Mingxing – erjie fault is the seismogenic fault of the Tonghai $M_s5.0$ seismic swarm.

Keywords: Tonghai seismic swarm; double-difference location; relocated sequence; upper crustal velocity