

# 2019年甘肃夏河 $M_s$ 5.7 地震震源机制解和震源深度确定\*

袁伏全<sup>1</sup>, 黄浩<sup>1\*</sup>, 蔡丽雯<sup>1</sup>, 李启雷<sup>1</sup>, 赵燕杰<sup>1</sup>, 刘兴盛<sup>2</sup>

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 青海省应急管理厅信息中心, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 为了准确测定 2019 年甘肃夏河  $M_s$  5.7 地震的震源深度, 利用青海、甘肃和四川数字地震台网宽频带数字地震波形资料, 采用 CAP 方法和区域速度模型反演夏河地震震源机制, 并采用逆时成像技术进一步约束了此次地震的震源深度。结果表明, 夏河  $M_s$  5.7 地震是一次逆冲兼走滑型地震, 震源深度为 5.4 km; 基于遥感解译和野外调查新发现的夏河断裂可能是甘肃夏河 5.7 级地震的发震构造, 即节面 I (走向 305°/倾角 52°/滑动角 50°) 为发震断面。

**关键词:** 夏河  $M_s$  5.7 地震; CAP 方法; 震源深度; 逆时成像

**中图分类号:** P315.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)04-0521-08

## 0 引言

2019 年 10 月 28 日, 甘肃省甘南藏族自治州夏河县 (102.69° E, 35.10° N) 发生  $M_s$  5.7 地震, 震源深度 10 km。本次地震发生在构造特征复杂的甘东南地区, 没有造成严重的人员伤亡, 受伤人员均属避震不当造成的轻微擦伤。地震发生后, 美国地质调查局 (USGS) 给出的震源深度为 13.5 km, 全球矩心矩张量研究中心给出的震源深度为 16.3 km, 而国内研究机构利用 CAP 方法反演得到的震源深度为 7 km 或 8 km。获得准确的震源深度对于探明夏河  $M_s$  5.7 地震的发震构造机制具有重要意义, 而各机构给出的震源深度存在显著差异, 因此需要进一步测定更加精确的结果。

基于宽频带波形记录的 CAP 方法 (Zhao, Helmberger, 1994, 1996), 可通过对 Pnl 波和面波分别赋予不同的权重值和时间移动以降低对速度模型的依赖性, 还可以利用更大方位角覆盖范围内记录的 S 波或面波信息以增加震源深度测定的可靠性, 故 CAP 方法在精确测定震源深度等相关研

究中被广泛应用 (吕坚等, 2008; 韦生吉等, 2009; 曾祥方等, 2013; 赵韬等, 2019; Jiang *et al*, 2019; Lei *et al*, 2019)。逆时成像技术是一种非线性反演技术, 基于较好的观测台网和合理的速度模型在人工地震 (许力生等, 2013b)、2016 年青海门源 6.4 级地震 (黄浩等, 2017) 和 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震 (魏强等, 2017) 精确定位中已展现出优势。

为深入研究甘肃夏河及邻区的孕震机理和地震活动性, 本文搜集了青海、四川和甘肃地震台网的波形资料, 利用 CAP 方法反演了夏河  $M_s$  5.7 地震的震源机制解和最佳震源矩心深度, 利用逆时成像技术获得了夏河  $M_s$  5.7 地震的震源深度。

## 1 地质构造背景

甘东南地区位于两条区域性大断裂——东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂围限中 (图 1), 由迭部—白龙江断裂带、光盖山—迭山断裂带、临潭—宕昌断裂带、礼县—罗家堡断裂等多条规模较大的断裂 (带) 共同组成了该地区复杂的“V”字型构造体系 (郑文俊等, 2013)。受青藏高原北东

\* 收稿日期: 2021-03-15.

**基金项目:** 地震科技星火计划 (XH21036Y)、青海省重点研发与转化计划资助项目 (2021-SF-151) 和青海省地震局地震科学基金 (2021A02) 联合资助。

**第一作者简介:** 袁伏全 (1982-), 高级工程师, 主要从事地震活动性研究. E-mail: 26092846@qq.com.

**通讯作者简介:** 黄浩 (1987-), 高级工程师, 主要从事地震活动性研究. E-mail: hh175@sina.com.

向挤压作用的影响,甘东南地区新构造运动和地震活动强烈,褶皱分布广泛(俞晶星等,2012;张国伟等,2004;侯康明等,2005)。该地区曾发生过1654年天水南和1879年武都南两次8级大地震,公元前186年甘肃武都7~7¼级地震、公元143年甘谷7级、734年天水7级地震、公元842年碌曲7~7½级地震、公元1573年岷县6¾级地震、1837年岷县北6级地震等以及2013年岷县漳县6.6级地震。

夏河 $M_s5.7$ 地震震中附近断裂的发育情况不明,无明确的与该地震有关的地表断裂。张波等(2020)基于遥感解译和野外调查新发现两条隐伏断裂,该断裂暂被命名为夏河断裂( $F_1$ )和达麦—合作断裂( $F_2$ )。震中周围已知的断裂包括北侧的西秦岭北缘断裂锅麻滩段( $F_4$ )和南侧的临潭—宕昌断裂西段( $F_3$ )(图1)。

夏河断裂以拉卜楞寺为界为西段和东段:西段走向近EW,长度54 km;东段走向ESE( $110^\circ$ ),长度39 km,可见较典型的线性地貌,包括断层陡坎、左旋、断层沟槽和断层垭口等连续出露的断层地貌,为全新世活动断裂线,断裂表

现为南高北低的宏观差异构造地貌,在较大几何尺度上表现为地形的坡折,穿过断裂的多条大冲沟和山脊显示同步左旋。因此,该断裂是一条兼具逆冲和左旋走滑分量的断裂,断面倾向南西( $200^\circ$ )(张波等,2020)。达麦—合作断裂位于震中北东侧,倾向NE,倾角 $65^\circ$ ,发育在二叠系灰褐色砂岩、灰岩和三叠系灰黄色板岩之间,地表无明显断错地貌,山脊和冲沟无同步变形,为一条前第四纪断裂(张波等,2020)。西秦岭北缘断裂锅麻滩段走向近EW,长约165 km,以左旋走滑活动为主,倾向南,倾角 $45^\circ \sim 65^\circ$ 。临潭—宕昌断裂西段由南、北两支组成,走向分别为NE—ENE和WNW,以左旋走滑活动为主(何文贵等,2013;郑文俊等,2013)。

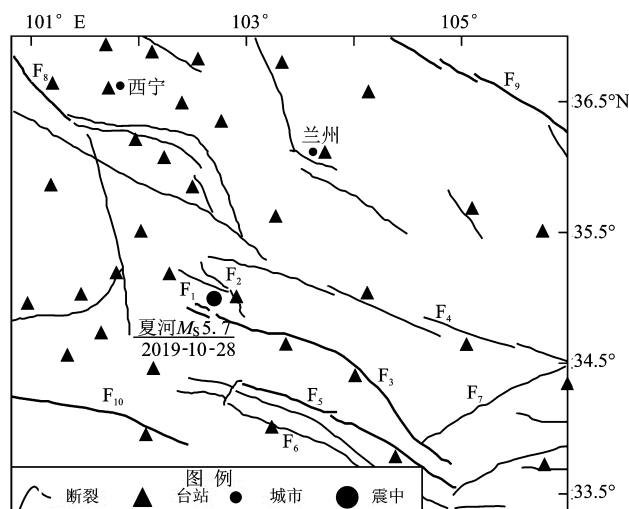
## 2 研究方法

### 2.1 CAP 方法

CAP方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996)是一种使用体波和面波联合反演的方法。该方法将宽频带数字地震记录分为体波(Pnl)和面波,采用频率—波数方法( $F-K$ )(Zhu, Rivera, 2002)计算台站的格林函数,利用格林函数得到合成地震图,在反演过程中对Pnl波和面波分别赋予不同的权重,通过格点搜索方法搜索、拟合、反演地震事件的最佳震源机制解。由于该方法分别对体波、面波进行拟合,大大减小了地壳速度模型及地壳横向不均匀性对反演结果的影响。

### 2.2 逆时成像技术

逆时成像技术是总结前人的研究成果并针对面临的具体问题提出的一种确定地震震源中心的非线性反演技术(许力生等,2013a, b)。该技术未采用任何近似,避免了传统定位方法存在的缺陷,其可行性已被多种数值实验所证实,且基于人工地震资料的检验(许力生等,2013b)表明,它能够在合理的精度水平上确定发震时刻、震源位置和震源深度。该技术直接采用直达波信号构建包络信号,采用互相关技术测量观测到时,提升了观测到时的准确性和客观性。利用波形聚束方法直接建立观测到时和震源位置的非线性关系,绕开了盖戈类方法的线性化过程,从而杜绝了非线性问题线性化过程造成的精度丢失(Liang *et al.*,



$F_1$ : 夏河断裂;  $F_2$ : 达麦—合作断裂;  $F_3$ : 临潭—宕昌断裂;  
 $F_4$ : 西秦岭北缘断裂;  $F_5$ : 光盖山—迭山断裂;  $F_6$ : 迭部—  
 白龙江断裂;  $F_7$ : 礼县—罗家堡断裂;  $F_8$ : 日月山断裂;  
 $F_9$ : 海源断裂;  $F_{10}$ : 东昆化断裂

图1 研究区地质构造背景、夏河 $M_s5.7$ 地震震中与周边台站分布

Fig. 1 Geotectonic settings and distribution of the epicenter of the Xiahe  $M_s5.7$  Earthquake and seismic stations in the study area

2020; 赵博等, 2019)。许力生 (2013a, b) 已经对逆时成像技术的原理做过详尽的描述, 因此本文只做扼要介绍。

设  $\xi_0$  为震源中心、 $\tau_0$  为发震时刻、 $x_m$  为第  $m$  个观测台站的位置、 $t_m$  为震源信号在台站  $m$  的观测到时, 用  $S_n^m$  表示振幅归一化后的第  $m$  个台站的第  $n$  个分量 (可以是直达 P 波、直达 S 波或者它们的包络线), 观测点的数目为  $M$  且每个观测点有  $N$  ( $N \leq 3$ ) 个分量, 定义:

$$S_0(x, t) = \frac{1}{N \times M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_n^m(x_m - \xi_0, t_m - \tau_0) \quad (1)$$

式中:  $S_0(x, t)$  为广义震源时间函数;  $M$  为台站数;  $N$  为分量数。

对式 (1) 求积分, 可得:

$$E = \int_0^{T_w} S_0^2(x, t) dt \quad (2)$$

式中:  $E$  为广义震源时间函数的积分;  $T_w$  为选用的直达波或其包络线的有效持续时间。当式 (2) 取最大值时,  $\xi_0 = x_m$  且  $\tau_0 = t_m$ , 震源中心及其激发时间即可确定。

由于速度模型的不确定性以及观测误差的存在, 式 (2) 的解不是唯一的, 往往是一个集合, 因此,  $\xi_0$  和  $\tau_0$  的模糊度可表示为:

$$\Delta \xi_{\max} = \max(|\xi_i - \xi_0|) \quad (3)$$

$$\Delta \tau_{\max} = \max(|\tau_i - \tau_0|) \quad (4)$$

基于上述公式, 并借助观测到时与理论到时的残差的标准差描述震源位置的不确定性。

若各观测信号返回震源时可以表示为  $S_n^m(\xi_0^l, \tau_0^l)$ , 则观测到时  $\tau_0^l$  与理论到时  $\tau_0$  的残差为:

$$\Delta \tau_0^l = \tau_0^l - \tau_0 \quad (5)$$

令

$$\Delta \tau^- = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L \tau_0^{l2}}{L}} \quad (6)$$

如果用  $\xi_0^c$  和  $\tau_0^c$  描述  $\xi_0$  和  $\tau_0$  的不确定性, 则  $\xi_0$  及  $\tau_0$  模糊度可表示为:

$$\tau_0^c = \begin{cases} 2\Delta \tau_{\max} & (\Delta \tau_{\max} \geq \Delta \tau^-) \\ 2\Delta \tau^- & (\Delta \tau_{\max} < \Delta \tau^-) \end{cases} \quad (7)$$

$$\xi_0^c = \begin{cases} 2\Delta \xi_{\max} & (\Delta \tau_{\max} \geq \Delta \tau^-) \\ 2\frac{\Delta \xi_{\max}}{\Delta \tau_{\max}} \Delta \tau^- & (\Delta \tau_{\max} < \Delta \tau^-) \end{cases} \quad (8)$$

### 3 数据选取和计算结果

#### 3.1 数据选取与处理

本文选取青海、四川和甘肃省地震台网宽频带地震台站记录的震中距小于 240 km、震相清晰且信噪比较高的波形记录。根据初步反演时波形拟合的优劣情况, 在震中 240 km 范围以内的 41 个台 (图 1) 中, 选用其中 12 个台的波形资料进行 CAP 反演, 这些台站的宽频记录范围在 50 s ~ 20 Hz 内的幅频响应平坦, 并对夏河  $M_s 5.7$  地震震中形成较好方位覆盖。波形的数据处理过程如下: ①对原始的速度记录消除仪器响应后进行积分得到位移记录; ②将位移记录两水平分量分别旋转到  $R$ 、 $T$  分量, 分为 Pnl 波和面波两个部分; ③Pnl 波与面波截取波形窗长分别为 35 s 和 60 s, 相应的带滤波频带宽度为 0.02 ~ 0.15 Hz 和 0.02 ~ 0.1 Hz; ④以 1 s 采样率进行重采样, 与格林函数保持一致; ⑤断层面参数走向、倾角、滑动角搜索步长为  $5^\circ$ , 深度步长为 1 km, 设 Pnl 波的权重为 2, 面波的权重为 1。

#### 3.2 地壳速度模型

目前关于夏河地区的速度结构已经有不少研究结果, 如 Xu 和 Song (2010) 联合反演青藏高原东缘 P 波速度和莫霍面深度所设定的初始速度模型; 李少华等 (2012) 利用甘肃东南部及邻区 24 个宽频带固定地震台站记录的 2008 年 8 月 1 日汶川地震余震的三分量全波形资料, 采用小生境遗传算法和反射率法相结合的波形反演方法, 给出了甘肃东南部地壳速度模型; Zhang 等 (2013) 布设了一条跨越甘肃合作—景泰、长约 430 km 的人工地震高分辨率宽角反射/折射探测剖面, 得到了区域内的 P 波速度模型; 肖卓和高原 (2017) 对青藏高原东北缘及其邻区进行双差成像时, 分别选取以上 3 种速度模型作为初始模型进行反演效果测试, 结果显示 Zhang 等 (2013) 研究得到的速度模型总走时残差 (均方根、均值、方差) 最小, 震源位置空间误差均值最小, 因此本文将其作为最佳速度模型 (表 1)。

表 1 青藏高原东北缘地壳速度模型 (Zhang *et al.*, 2013)  
Tab. 1 The crustal velocity model for northeastern Tibet  
(based on Zhang *et al.*, 2013)

层号	厚度/ km	P 波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	S 波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
1	5	5.80	3.41	2.72
2	5	6.00	3.53	2.72
3	10	6.20	3.65	2.72
4	10	6.40	3.76	2.92
5	17	6.70	3.94	3.32
6	33	8.00	4.71	3.35

3.3 CAP 方法反演结果

本文利用 CAP 方法反演夏河  $M_s5.7$  地震的震源机制解, 图 2 波形拟合结果显示震源机制在震源深度为 5.4 km 时拟合结果最好, 最佳双力偶解节面 I 的走向为  $305^\circ$ 、倾角为  $52^\circ$ 、滑动角为  $50^\circ$ , 节面 II 的走向为  $179^\circ$ 、倾角为  $53^\circ$ 、滑动角为  $129^\circ$ 。

从不同国内外研究机构给出的夏河  $M_s5.7$  地震震源机制解 (表 2) 可以看出, 该次地震为逆冲兼走滑型, 节面走向为 NNW, 但震源深度存在差

异, 在 5.4 ~ 16.3 km。本文得到的震源机制解结果与 GCMT 和张波等 (2020) 给出的结果较为一致, 表明本文利用 CAP 方法得到的结果比较可靠。图 3 为夏河  $M_s5.7$  地震波形拟合相关系数, 共有 12 个台站 54 个震相参与反演, 其中相关系数  $\geq 90\%$  的有 29 个, 比例为 53.7%; 相关系数  $\geq 80\%$  的有 45 个, 比例为 83.3%; 相关系数  $\geq 70\%$  的有 54 个, 比例为 100%, 反演结果较可靠。

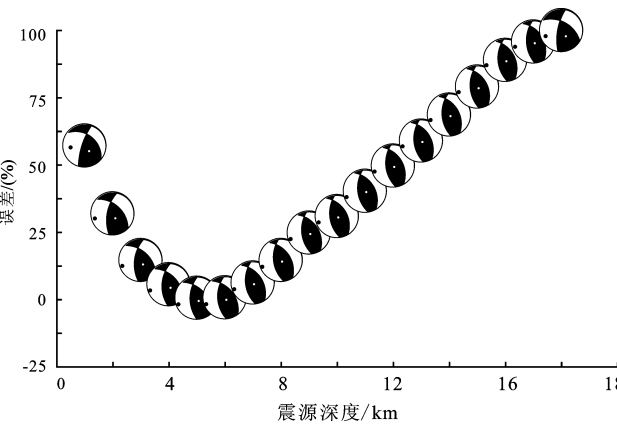


图 2 波形拟合误差随深度的变化  
Fig. 2 Waveform fit errors as function of focal depth

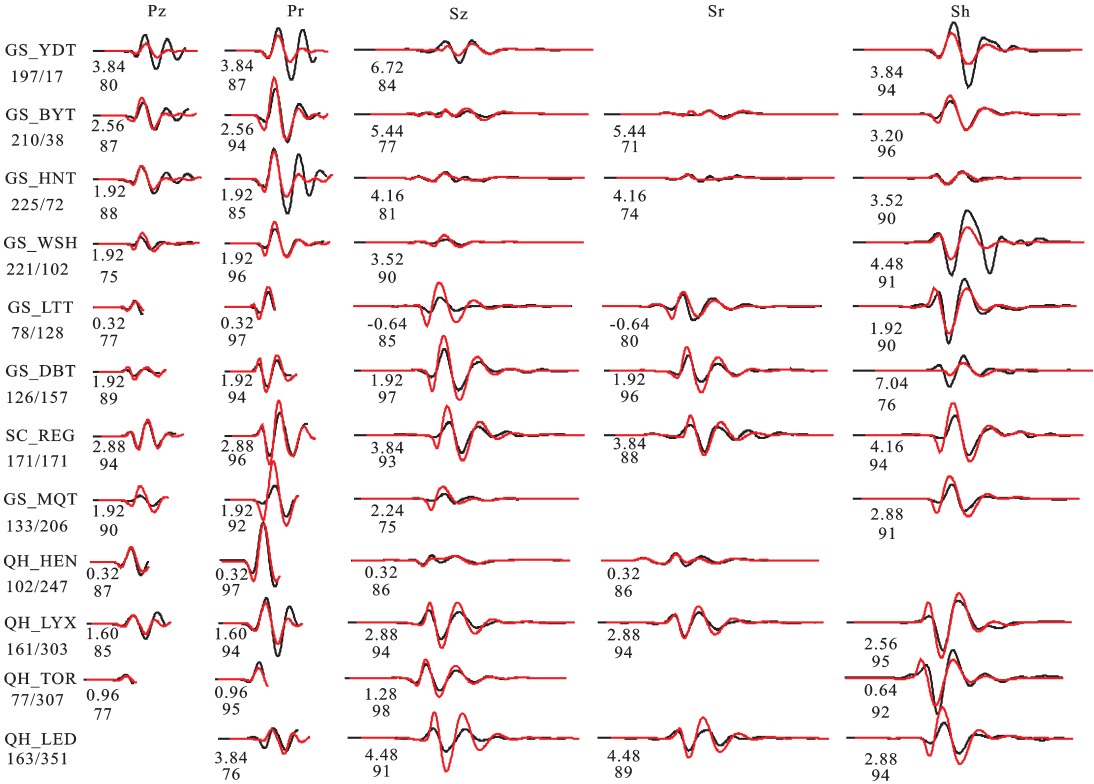


图 3 夏河  $M_s5.7$  地震理论 (红线) 和实际 (黑线) 波形拟合结果  
Fig. 3 Comparison of the theoretical (red line) and observed (black line) waves  
of the Xiahe  $M_s5.7$  earthquake by the CAP inversion method

表2 不同机构给出的夏河 $M_s5.7$ 地震震源机制解及震源深度  
Tab. 2 Focal mechanisms and focal depths of the Xiahe  $M_s5.7$  earthquake provided by different institutes

$M_w$	震源深度/km	节面 I / (°)			节面 II / (°)			来源
		走向	倾向	滑动角	走向	倾向	滑动角	
5.3	16.3	307	48	40	188	62	131	GCMT
5.3	13.5	308	38	40	184	67	121	USGS, NEIC
5.3	8.0	356	28	114	149	65	78	CENC
5.3	7.0	322	49	67	175	46	114	CEA-IEF
5.3	5.4	305	52	50	179	53	129	本文
5.3	5.9	312	48	48	185	56	127	张波等(2020)

注：GCMT 为哈佛大学矩张量反演中心；USGS、NEIC 为美国地质调查局、国家地震信息中心；CENC 为中国地震台网中心；CEA-IEF 为中国地震局地震预测研究所。

3.4 逆时成像技术测定震源深度

本文选择 9 个震中距小于 130 km 的台站 (图 4、表 3)，平均震中距为 82 km，最近台站 (GS\_HZT) 的震中距仅为 22 km。从图 4 可以看出，这些台站对夏河地震震中的包围较好，在四象限均有分布。因此，使用这些台站的资料有利于确定这次地震的震源深度。

基于表 1 所示的地壳速度模型，本文测定夏河地震的破裂起始时刻为 2019 年 10 月 28 日 1 时 56 分 47.41 秒，震中位置 ( $35.067^\circ\text{N}$ ,  $102.660^\circ\text{E}$ )，震源深度 5.4 km。发震时刻、震中纬度、震中经度和震源深度的不确定性依次为 0.08 s、 $0.005^\circ$ 、 $0.005^\circ$ 和 1.0 km (图 4)。

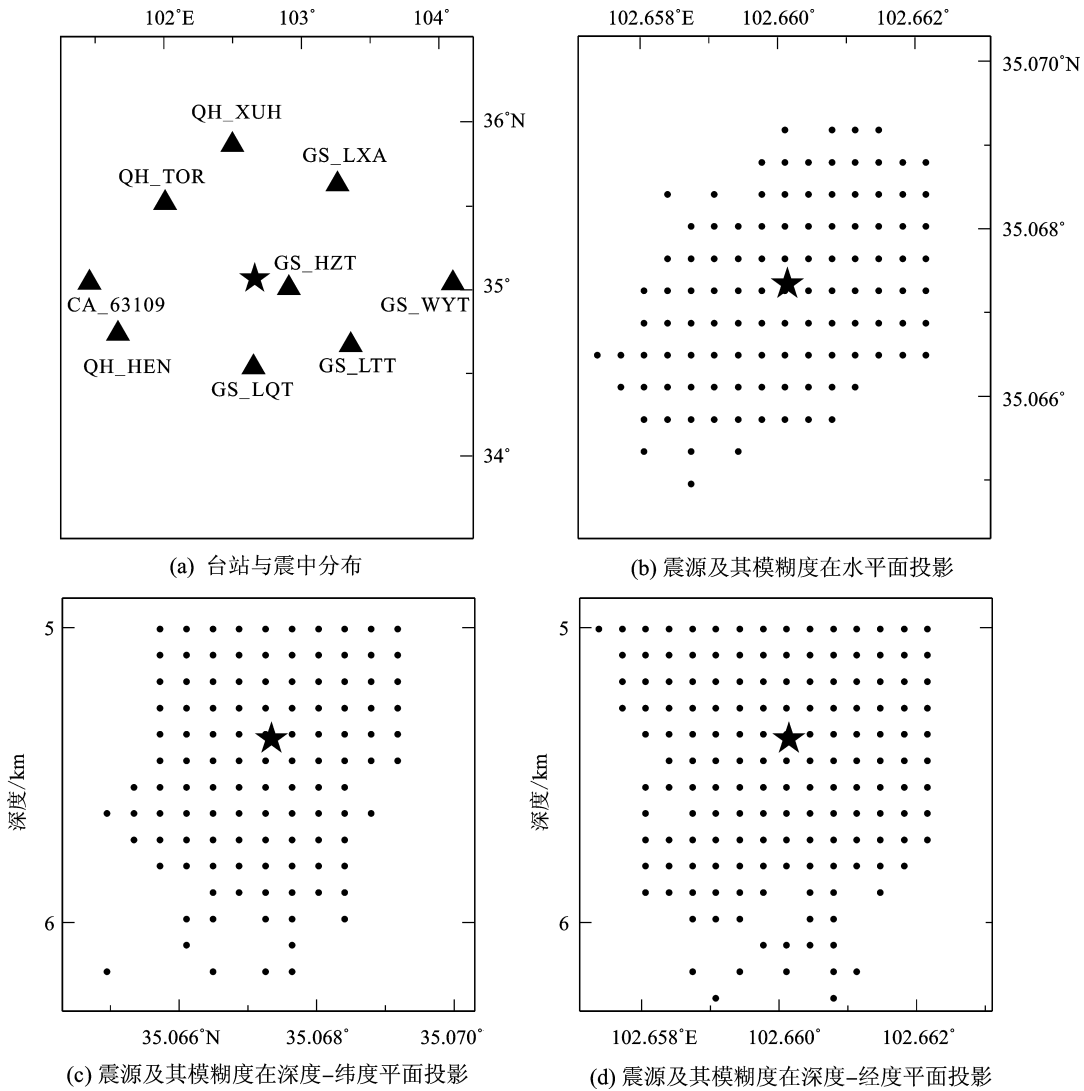


图4 使用逆时成像技术确定的夏河 $M_s5.7$ 地震震源位置及其模糊度  
Fig. 4 Locations and their ambiguities of the focus determined by means of TRIT

表 3 选取的台站及其相对于夏河地震震中的距离和方位  
Tab. 3 The selected seismic stations and their distances and azimuths to the epicenter of the Xiahe earthquake

台站	震中距/ km	方位角/ (°)	所属台网	所属象限
GS_HZT	22	116	甘肃数字地震台网	第二象限
GS_LQT	62	183	甘肃数字地震台网	第三象限
GS_LTT	77	127	甘肃数字地震台网	第二象限
QH_TOR	77	307	青海数字地震台	第四象限
GS_LXA	78	41	甘肃数字地震台网	第一象限
QH_XUH	86	348	青海数字地震台	第四象限
QH_HEN	101	246	青海数字地震台	第三象限
CA_63109	112	267	甘青川地震流动观测台阵	第三象限
GS_WYT	128	92	甘肃数字地震台网	第二象限

4 讨论

4.1 计算结果

本文采用 CAP 方法反演得到的 2019 年夏河  $M_s5.7$  地震的震源机制解与 GCMT 和张波等 (2020) 得出的结果较为一致, 皆为逆冲兼具少量走滑类型。考虑到本文收集了更丰富、对震中方位覆盖更好的 12 个台站的地震波形资料, 采用了更贴近实际、经过研究区域层析成像研究 (肖卓, 高原, 2017) 筛选的地壳速度模型 (Zhang *et al*, 2013), 虽然在 CAP 反演中对地壳速度模型要求不高, 但罗钧 (2013) 和潘瑞等 (2019) 研究均表明一个贴近实际的地壳速度模型能够获得较准确的震源机制解, 因此, 本文反演得到的震源机制解具有较高的可靠性。

本文利用 CAP 方法得出的夏河  $M_s5.7$  地震震源深度较浅 (5.4 km), 比不同机构得到的结果都浅, 但与张波等 (2020) 的结果 (震源深度为 5.9 km) 接近。其原因为研究机构需在震后短时间内根据区域地震台站波形资料和基于 Crust 1.0 或 Crust 2.0 等区域地壳速度模型获得的格林函数库计算并公布震源机制结果, 而个人研究则有充足时间搜集不同地震台网的观测资料、测试不同速度模型下反演结果的优劣, 因此震源深度的差异可能与使用的观测资料和速度模型不尽相同有关。为了进一步确认夏河  $M_s5.7$  地震的震源深度, 本

文使用逆时成像技术对其震源深度进行了再次测定, 并确定了夏河地震的起始破裂点的位置。定位结果表明, 夏河地震发生于 2019 年 10 月 28 日 1 时 56 分 ( $47.41 \pm 0.08$ ) s, 震中位置 ( $35.067 \pm 0.005$ )°N、( $102.660 \pm 0.005$ )°E, 震源深度 ( $5.3 \pm 1.0$ ) km。逆时成像技术测定的震源位置在水平面、深度 - 纬度和深度 - 经度剖面的模糊度都分布均匀、相对较好。基于近震宽频带波形的 CAP 方法反演得到的该地区其他中等地震事件, 如 2013 年岷县漳县 6.6 级地震 (李晓峰等, 2013)、2013 年岷县 4.5 级地震 (王丽霞, 张晖, 2017) 和 2011 年甘肃迭部 4.0 级地震 (张辉等, 2013) 的震源深度为 6~7 km, 这些研究结果均表明该地区的发展震深度较浅, 因此本文得到的夏河地震的震源深度较为可靠。

4.2 发震构造

夏河  $M_s5.7$  地震震中周边发育 4 条断裂 (图 1), 分别为夏河断裂 ( $F_1$ )、达麦—合作断裂 ( $F_2$ )、临潭—宕昌断裂 ( $F_3$ )、西秦岭北缘断裂 ( $F_4$ ), 其中西秦岭北缘断裂锅麻滩段和临潭—宕昌断裂西段距离夏河  $M_s5.7$  地震震中较远 (分别为 27 km、19 km), 因此判定这两条断裂不是本次地震的发震断层。本文得到的夏河地震的发震断层节面走向为  $305^\circ$ , 与震中附近夏河断裂东段走向 ( $110^\circ$ ) 两者之间的夹角仅为  $15^\circ$ ; 本文得到的发震构造和滑动角为  $50^\circ$ , 与夏河断裂兼具逆冲和左旋走滑分量的活动性质相一致。另外, 达麦—合作断裂位于二叠系与三叠系之间, 而夏河断裂发育于三叠系内部, 达麦—合作断裂的深度相对更深, 而本文得到的夏河地震震源深度为 5.4 km, 根据震源位置和发震断层面倾角的几何关系, 将震源位置投影至水平面后, 震中距离发震断层约 4.1 km, 而夏河断裂距离夏河地震震中北侧约 2.5 km, 因此节面 I 与夏河断裂构造特征具有较好的匹配性, 推断夏河断裂为本次地震的发震断层。

5 结论

本文使用青海、甘肃和四川地震台网宽频带数字地震波形资料, 利用 CAP 方法反演 2019 年夏河  $M_s5.7$  地震的震源机制解, 并结合逆时成像

技术对其震源深度进行了再次测定, 得到以下主要结论:

(1) 本文反演获得的震源机制解与 GCMT 和张波等 (2020) 给出的结果较为一致。节面 I 参数 (走向  $305^\circ$ /倾角  $52^\circ$ /滑动角  $50^\circ$ ) 与张波等 (2020) 基于遥感解译新发现并暂命名为夏河断裂的隐伏断裂产状 (走向  $312^\circ$ /倾角  $42^\circ$ /滑动角  $48^\circ$ ) 基本一致, 因此节面 I (走向  $305^\circ$ /倾角  $52^\circ$ /滑动角  $50^\circ$ ) 应为夏河  $M_s5.7$  地震的发震断层层面。

(2) 本文得到的夏河地震的震源深度为 5.4 km, 比不同机构得到的结果都浅, 与张波等 (2020) 给出的结果相近, 符合该地区地震震源深度较浅的特征。

(3) 由于缺乏近台数据, USGS 和 GCMT 等机构给出的远震事件震源深度常存在较大的不确定性, 如 2012 年南北地震带 5 次中等地震 (李志伟等, 2015)、2016 年广西苍梧 5.4 级地震 (赵韬等, 2019)、2019 年甘肃夏河  $M_s5.7$  地震的震源深度均存在明显偏差, 未来在使用 USGS 和 GCMT 等机构给出的远震事件震源深度时, 应该考虑震源深度的误差。

## 参考文献:

- 何文贵, 郑文俊, 王爱国, 等. 2013. 临潭—宕昌断裂新活动特征与岷县漳县  $M_s6.6$  地震关系研究 [J]. 地震工程学报, 35(4): 751–760.
- 侯康明, 雷中生, 万夫岭, 等. 2005. 1879 年武都南 8 级大地震及其同震破裂研究 [J]. 中国地震, 21(3): 295–310.
- 黄浩, 付虹, 沙成宁, 等. 2017. 2016 年青海门源  $M_s6.4$  地震重定位 [J]. 地震学报, 39(2): 176–187.
- 李少华, 王彦宾, 梁子斌, 等. 2012. 甘肃东南部地壳速度结构的区域地震波形反演 [J]. 地球物理学报, 55(4): 1186–1197.
- 李晓峰, 裴惠娟, 徐辉, 等. 2013. 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震震源机制解 [J]. 地震工程学报, 35(3): 459–462.
- 李志伟, 黄志斌, 王晓欣, 等. 2015. USGS 地震目录中 4~5 级震源深度异常地震可靠性初步研究: 以南北地震带若干地震为例 [J]. 地球物理学报, 58(4): 1236–1250.
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等. 2008. 2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌  $M_s5.7$ 、 $M_s4.8$  地震的震源机制解与发震构造研究 [J]. 地球物理学报, 51(1): 158–164.
- 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.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017 年云南漾濞  $M_s5.1$  及  $M_s4.8$  地震震源机制解和震源深度测定 [J]. 地震研究, 42(3): 338–348.
- 王丽霞, 张辉. 2017. 甘肃岷县两次中等地震震源机制解及其误差分析 [J]. 国际地震动态, (8): 51–52.
- 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 等. 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.
- 魏强, 许力生, 李春来, 等. 2017. 2014 年鲁甸  $M_s6.5$  地震序列发震构造的再研究 [J]. 地震地质, 39(2): 374–389.
- 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(6): 2213–2225.
- 许力生, 杜海林, 严川, 等. 2013a. 一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术 (一)——原理与数值实验 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1190–1206.
- 许力生, 严川, 张旭, 等. 2013b. 一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术 (二)——基于人工地震的检验 [J]. 地球物理学报, 56(12): 4009–4027.
- 俞晶星, 郑文俊, 袁道阳, 等. 2012. 西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率 [J]. 第四纪研究, 32(5): 957–967.
- 曾祥方, 罗艳, 韩立波, 等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M_s7.0$  地震: 一个高角度逆冲地震 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1418–1424.
- 张波, 王爱国, 袁道阳, 等. 2020. 甘肃夏河断裂新活动的发现——兼论 2019 年夏河  $M_s5.7$  地震的发震构造 [J]. 地震学报, 42(5): 629–644.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结 [J]. 地学前缘, 11(3): 23–32.
- 张辉, 王熠熙, 徐辉. 2013. 甘肃迭部  $M_s4.0$  地震震源机制解和震源深度精确测定 [J]. 地震工程学报, 35(4): 908–913.
- 赵博, 高原, 刘杰, 等. 2019. 2010 年以来四川地区中强地震震源机制反演及深度确定 [J]. 地球物理学报, 62(1): 130–142.
- 赵韬, 储日升, 倪四道, 等. 2019. 广西苍梧  $M_s5.4$  地震震源深度 [J]. 地震地质, 41(3): 619–632.
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 2013. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 6.6 级地震孕震机制 [J]. 地球物理学报, 56(12): 4058–4071.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016  $M_s5.0$  Yunnan Earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications [J]. Pure and Applied Geophysics, 176(3): 1225–1241.
- Lei X, Wang Z, Su J. 2019. The December 2018  $M_L5.7$  and January 2019  $M_L5.3$  earthquakes in South Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing [J]. Seismological Research Letters, 90(3): 1099–1110.
- Liang H, Fu Z, Li C L, et al. 2020. Preliminary analysis of the shear-wave splitting observations from the Qiaojia seismic array [J]. Earthquake Science, 33(2): 82–97.
- Xu Z J, Song X. 2012. Joint inversion for crustal and Pn velocities and Moho depth in Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 491(1): 185–193.
- Zhang Z J, Bai Z M, Klemperer S L, et al. 2013. Crustal structure across northeastern Tibet from wide-angle seismic profiling: Constraints on

- the Caledonian Qilian orogeny and its reactivation[J]. *Tectonophysics*, 606:140 – 159.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seis Soc Amer*, 84(1):91 – 104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bull Seis Soc Amer*, 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*, 148:619 – 627.

## Determination of the Focal Mechanism and Focal Depth of the Xiahe, Gansu $M_s5.7$ Earthquake in 2019

YUAN Fuquan<sup>1</sup>, HUANG Hao<sup>1</sup>, CAI Liwen<sup>1</sup>, LI Qilei<sup>1</sup>, ZHAO Yanjie<sup>1</sup>, LIU Xingsheng<sup>2</sup>

(1. *Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, Qinghai, China*)

(2. *Emergency Management Department of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

### Abstract

In order to accurately determine the focal depth of the Xiahe, Gansu  $M_s5.7$  earthquake, we used the broadband waveforms from Qinghai Seismic Networks, Gansu Seismic Networks and Sichuan Seismic Networks to invert the focal mechanism of this earthquake on the basis of Cut – and – Paste (CAP) method and the regional velocity model. We further delimited the earthquake's depth by the time – reversal imaging technique. We find that this earthquake is a thrust and strike slip one, and its focal depth is about 5 km. And its seismogenic fault is the Xiahe fault, which is newly discovered by remote sensing interpretation and field investigation, i. e. the plane I (strike  $305^\circ$ /dips  $52^\circ$ /rake  $50^\circ$ ) could be the seismogenic fault.

**Keywords:** the Xiahe earthquake; CAP method; focal depth; time – reversal imaging technique