

2021年6月17日承德 M_L 3.6地震重新定位及震源机制解研究

王嘉琦, 张玉林, 杨东辉, 袁国旭

Analysis on relocation and focal mechanism of the Chengde M_L 3.6 earthquake on June 17, 2021

Wang Jiaqi, Zhang Yulin, Yang Donghui, and Yuan Guoxu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[2020年6月9日中卫 \$M_L\$ 3.4地震的震源机制及其中心解的测定](#)

Determination on the focal mechanism and central focal mechanism of Zhongwei M_L 3.4 earthquake on June 9, 2020

地震科学进展. 2021(6): 258-265

[2020年西藏尼玛 \$M_S\$ 6.6和 \$M_S\$ 4.8地震震源机制测定](#)

Focal mechanism determination of Nima M_S 6.6 and M_S 4.8 earthquakes in Tibet in 2020

地震科学进展. 2021(5): 234-240

[2019年四川长宁 \$M_S\$ 6.0地震前破裂区内视应力和 \$b\$ 值的变化](#)

Variations in apparent stress and b value in the rupture area before the 2019 M_S 6.0 Changning earthquake

地震科学进展. 2021(2): 49-58

[上海徐汇区 \$M_L\$ 1.9有感地震分析](#)

Analysis of the M_L 1.9 earthquake in Xuhui District, Shanghai

地震科学进展. 2021(2): 59-65, 75

[河北临城 \$M_S\$ 3.7地震震例分析](#)

Analysis of the M_S 3.7 earthquake of in Lincheng, Hebei Province

地震科学进展. 2019(9): 7-13

[华南模型与AH2015模型在安徽区域地震定位中的对比研究](#)

The comparative research of South China model and AH2015 model in Anhui regional seismic location

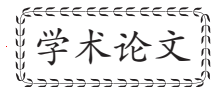
地震科学进展. 2021(8): 337-344



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王嘉琦, 张玉林, 杨东辉, 等. 2021 年 6 月 17 日承德 $M_L3.6$ 地震重新定位及震源机制解研究 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(6): 373-382. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-110

Wang J Q, Zhang Y L, Yang D H, et al. Analysis on relocation and focal mechanism of the Chengde $M_L3.6$ earthquake on June 17, 2021[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(6): 373-382. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-110



2021 年 6 月 17 日承德 $M_L3.6$ 地震 重新定位及震源机制解研究

王嘉琦* 张玉林 杨东辉 袁国旭

(承德地震监测中心站, 河北承德 067000)

摘要 2021 年 6 月 17 日河北省承德市双桥区发生 $M_L3.6$ 地震。基于河北区域数字地震台网资料, 采用双差定位算法重新定位该地震序列, 获得了精确震中分布。利用小震拟合法计算得到该次地震对应断层参数为: 走向 63.76° , 倾角 70.52° 。采用 CAP 方法反演获得了主震的最佳单位震源参数、矩张量解和双力偶解。其中, 最佳断层面解为: 走向 63.4° , 倾角 52.8° 。根据断层中心解计算, 确定最终发震断层面参数为走向 63.59° , 倾角 61.66° , 与该区域的双塔山—双峰寺断裂吻合。考虑区域构造特征, 推测本次地震可能由主张应力在该断裂上挤压而诱发, 属于一个典型的正断层活动。本次研究为确定承德地震的发震构造及该地区的应力场状态提供了重要依据。

关键词 承德 $M_L3.6$ 地震; 震源机制; 双差定位; 发震构造

中图分类号: P315.3⁺³ 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)06-0373-10

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-110

Analysis on relocation and focal mechanism of the Chengde $M_L3.6$ earthquake on June 17, 2021

Wang Jiaqi, Zhang Yulin, Yang Donghui, Yuan Guoxu

(Chengde Earthquake Monitoring Center Station of Hebei Earthquake Agency, Hebei Chengde 067000, China)

Abstract On June 17, 2021, an $M_L3.6$ earthquake occurred in Shuangqiao District, Chengde City, Hebei Province. Based on the data of Hebei regional digital seismic network, the double-difference location algorithm was used to reposition the earthquake sequence and a precise epicenter distribution was obtained. The fault plane parameters of this earthquake were computed using the small event fitting method as follows, strike 63.76° and dip 70.52° . The main shock's optimal unit source time function, moment tensor solution, and double couple solution are obtained by CAP method. Among them, the best fault plane solution is strike 63.4° and dip 52.8° . Based on the fault center solution calculations, the final fault plane parameters were determined to be strike 63.59° and dip 61.66° , which aligns with the region's

收稿日期: 2023-08-17; 采用日期: 2023-10-19。

基金项目: 河北省地震局科技星火计划(DZ2023120800009)资助。

* 通信作者: 王嘉琦(1991-), 男, 工程师, 主要从事地震监测、数字地震学方面的研究工作。E-mail: wjq6020373@163.com。



Shuangtashan-Shuangfengsi fault. Considering regional tectonic characteristics, it is postulated that this earthquake may have been induced by the principal stress squeezing on the fault, representing a typical normal fault activity. This study provides crucial evidence for identifying the seismogenic structure of the Chengde earthquake and the stress field status in the area.

Keywords Chengde M_L 3.6 earthquake; focal mechanism; double-difference location; seismogenic structure

0 引言

根据中国地震台网测定,北京时间2021年6月17日08时07分53秒,河北省承德市双桥区(41.10°N, 117.91°E)发生了 M_L 3.6地震。该次地震震源较浅,深度仅有6 km,是承德有史以来规模最大的有感地震。此后2个月内,承德及周边区域共发生 $M_L \geq 1.0$ 有感地震75次,其中 M_L 0.0~0.9地震57次, M_L 1.0~1.9地震13次, M_L 2.0~2.9地震4次, M_L 3.0~3.9地震1次,最大日发震频次达16次,地震活跃性明显增强。从地震分布看,本次地震序列集中在(41.0°N~41.1°N, 117.8°E~118.0°E)范围内,这些地震主要集中在双桥区北部的一个近东西向的狭长型区域,形成了一个明显的线性分布特征。该区域位于华北克拉通北缘,地壳运动以构造下降为主,形成了承德盆地等一系列槽状洼地。承德地区主要发育11条活动断裂,这些断裂大部分呈东西向和北东向展布,切割了承德盆地北缘,均为古地质时期活动断裂,第四纪无明显活动迹象^[1](图1)。

考虑到该区域地壳结构复杂,存在低速层对传统定位方法的影响,为准确获得此次 M_L 3.6地震的震源参数,拟采用CAP反演和精确定位相结合方法进行研究。首先利用双差定位算法重新定位序列微震,获得准确的震中分布;然后基于区域台站宽频带记录,采用CAP方法反演主震的震源机制解和震源参数;最后综合分析所在区域的地质构造背景,初步探讨本次地震序列的成因及区域积累的应力状态。

本文利用河北区域数字地震台网提供的地震资料,首先采用双差定位方法对承德 M_L 3.6地震及其余震序列进行重定位,得到更精确的震源位置和深度;采用万永革等^[2-3]提出的利用小震拟合断层参数的方法,求解断层参数,给出全局最优断层参数及其误差。利用CAP波形反演方法求取主震的震源机制解和矩张量解;然后通过对比计算断层参数及震源机制解确定中心解。最后结合该区域地质构造资料和历史地震资料,分析承德 M_L 3.6地震的发震构造和成因机理,为认识承德市及周边地区的地震活动特征和构造意义等提供帮助,为承德及周

边地区的地震监测预报和震害防御工作提供依据。

1 地震精定位及断层面参数反演

1.1 双差定位

双差定位法是一种高精度的相对定位方法,由Waldhauser和Ellsworth^[4-5]在20世纪90年代提出,基本原理是选取空间邻近的2次地震事件,在同一观测站的观测到时作双差去除观测误差,可有效消除速度模型误差和观测误差的影响,显著提高定位精度^[6-8]。双差定位实现了震源参数的高精度确定,是当今地震学研究中一种常用而高效的精确定位技术^[9-13]。

本文采用HypoDD程序对承德 M_L 3.6地震序列进行双差定位计算,选用京津冀测震台网震相观测报告,其中包括在震中附近架设的2个临时流动测震台的震相数据。为保证计算结果的可靠性,我们收集整理了全部75次地震的震相观测报告,并对震相数据进行了挑选,剔除震相到时有明显错误或误差较大的震相数据,共挑选出46次地震。利用挑选的震相数据进行双差定位计算:首先,设置定位参数,最小连接数为4,最小观测数为2,最大震源间距小于10 km,最大震中距小于200 km,利用Hypoinverse程序获得地震序列的初始绝对位置信息;其次,计算相距小于10 km的地震对的P波和S波走时差,同时设置P波权重大于S波,设置P波权重为1.0,S波权重为0.5;最后,采用3轮LSQR迭代计算获得地震对的最佳相对位置信息。地震定位对速度模型选择具有较强的依赖性。本文在初始定位的基础上,调用Velest程序,利用地震序列中台站记录数较多、分布较好的地震事件,反演出本地区的精确1-D速度模型(图2)。该速度模型具有明显的地壳低速层特征,能够较好地反映燕山地区地壳速度结构,为双差精定位提供依据。

1.2 定位结果

通过双差定位计算,获得了精确的承德 M_L 3.6地震序列分布信息,较为准确地确定了该地震序列中46次地震事件的位置,提升了地震定位的精度(图3)。主震的震中坐标位于(41.089°N, 117.901°E),其震源

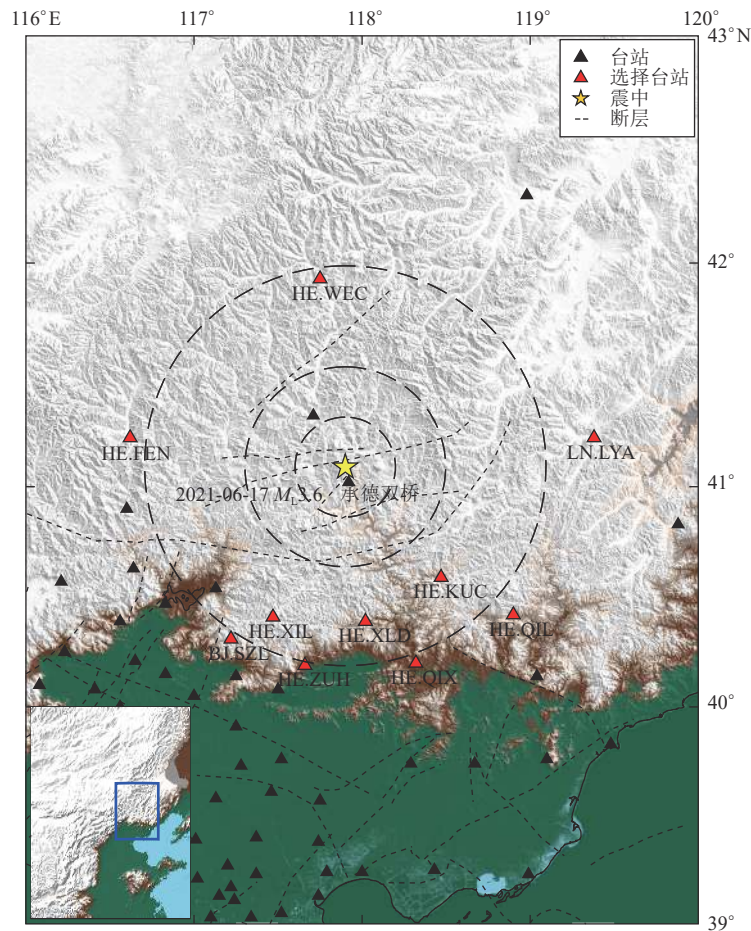


图 1 2021 年承德 $M_L3.6$ 地震震中位置及台站分布

Fig. 1 The epicenter location and station distribution of the Chengde $M_L3.6$ earthquake in 2021

深度约为 3.76 km。在经过重新定位后,地震震中被确定在小营—张营断裂 F_2 的南侧以及双塔山—双峰寺断裂 F_3 的北侧。小营—张营断裂起始于北部的小营地区,向东经过双峰寺北部,最终到达张营南部,全长约 25 km,东段呈现近东西向展布,西段则以北东向布展为主,断层倾向南,倾角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间,整个断裂发育于太古界变质岩体系中。双塔山—双峰寺断裂在承德盆地的北缘形成,从红石砬村西北开始,经过滦河镇、红塔山、双峰寺东部,终止于赵文沟村北,全长约 5 km,呈北东向展布,断层倾向南东,倾角在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 之间。双峰寺以东的部分断裂在太古界变质岩体系中发育,双峰寺以西的部分则在分割太古界变质岩和侏罗纪火山沉积岩中。由图 3b 所示,震源主要集中在这两个断裂之间的区域,其空间分布较为紧密,且呈现明显的沿 NE 向的条带状特征,长约 4 km,宽约 2 km。

1.3 断层面参数反演及分析

根据重新定位结果,采用万永革等^[2]提出的利用

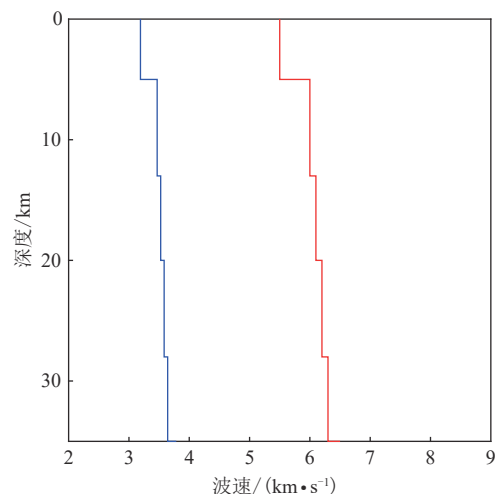


图 2 一维速度模型

Fig. 2 1-D velocity model

小震拟合断层面参数的方法,使用拟合断层面的程序 Fit_Fault, 计算得出全局最优断层面参数及其误差,即将承德地震序列进行拟合。反演结果如表 1、图 4 所示,断层走向 63.76° (标准差 1.21°)、倾角 70.52°

(标准差 1.39°)、倾向 SE、断裂长度 12 km、断层深度 2~7 km; 其中主震的震源深度相对较浅。综上初步推断, 承德地震的发震断层可能由小营—张营断裂和双塔山—双峰寺断裂之间的一条浅层高角度次

生断裂构成, 然而, 由于地震事件数量相对较少, 因此对发震断层形态的刻画可能存在一定的偏差。为了获取更精确的结果, 我们需要结合震源机制解的节面参数对断层性质进行更深入的研究和描述。

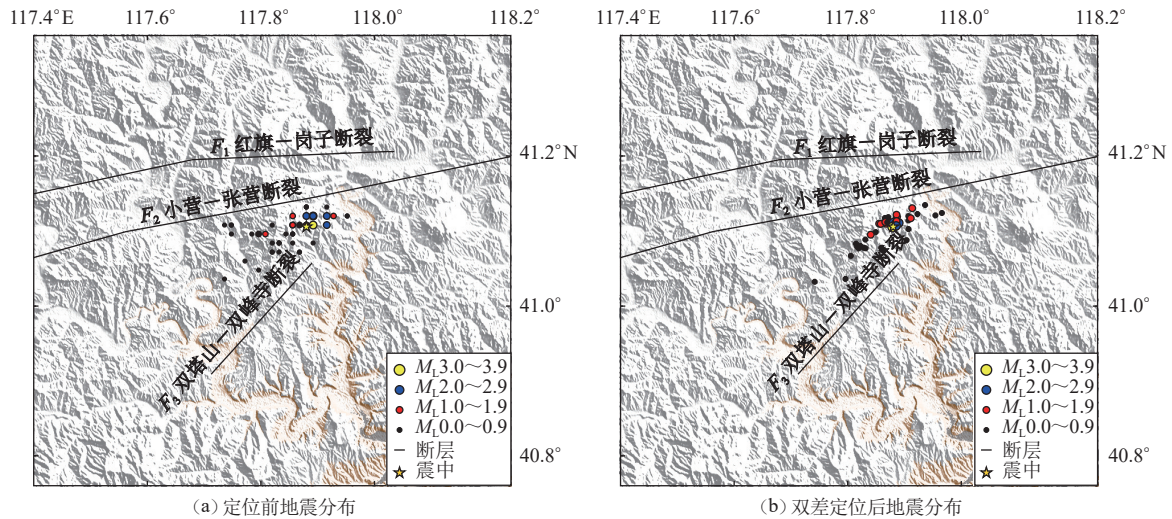


图3 承德 $M_L 3.6$ 地震序列重定位震中分布

Fig. 3 Epicenter distribution of the Chengde $M_L 3.6$ earthquake sequences using double-difference location method

表1 使用重新定位的余震资料拟合的断层面参数

Table 1 Fault plane parameters determined using relocation results of aftershocks

地震个数	走向		倾角		距离		滑动角/ $^\circ$	断层面顶点位置		
	数值/ $^\circ$	标准差/ $^\circ$	数值/ $^\circ$	标准差/ $^\circ$	数值/ $^\circ$	标准差/ $^\circ$		北纬/ $^\circ$	东经/ $^\circ$	深度/km
46	63.76	1.21	70.52	1.39	0	0.06	-67.97	41.06	117.80	1.91
								41.37	117.83	12.29
								41.09	117.96	12.29
								41.12	117.94	1.91

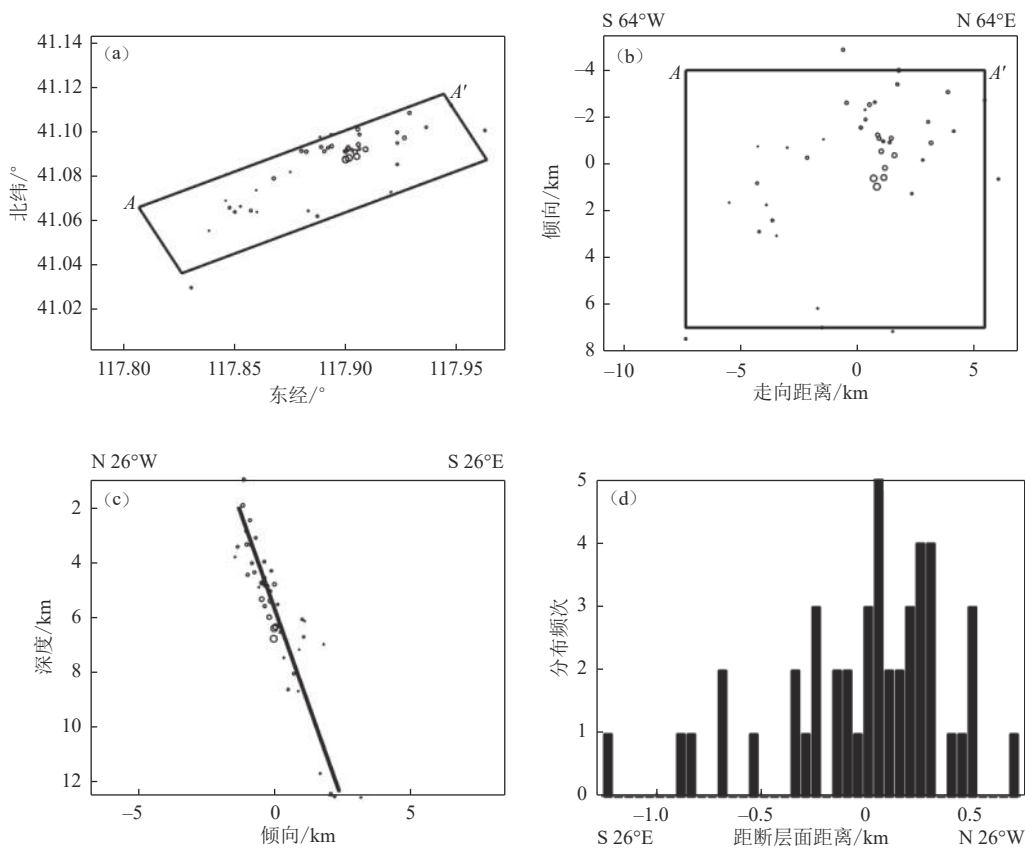
2 震源参数和震源机制分析

2.1 CAP 方法震源机制反演

本文利用 CAP 方法获得地震的震源机制解。CAP 是一种在地震波形反演中被广泛运用的技术^[14-16]。主要原理是地震波在进入近场区域后, 其波形将会发生显著变化; 通过模拟地震波的传播过程, 并迭代寻找最佳震源模型, CAP 法可以使理论计算的波形与实际观测的波形之间达到最佳匹配, 从而精确地推算出地震的震源参数^[17-23]。

选择位于震中距 50~300 km 范围内的 10 个宽频带测震台, 该台网覆盖范围广阔, 有助于提高震源机制解的可靠性。首先, 去除仪器响应对三分量地震波形的影响, 并将其旋转至大圆路径, 从而得到径

向、切向和垂向的位移记录。将实际观测数据截取为 Pn1 波和 S 波两个部分, 并对所有测震台的观测数据使用 4 阶巴特沃斯带通滤波器分别在 0.05~0.17 Hz 和 0.05~0.1 Hz 频率范围进行带通滤波处理, 以消除由于速度结构横向变化带来的影响。完成滤波计算后, 计算各测震台的格林函数, 并以 5° 的网格步长对不同震源深度的最佳双力偶解进行搜索。在反演过程中, 采用了华北地区的平均地壳速度模型(表 2)。在误差最小时对应的震源深度即为本次地震的震中深度。通过反演, 获得了本次地震的最佳单位观测震源时函数时域波形, 计算其与观测波形的相关系数以评估拟合效果, 如果大于 80%, 则表示本次反演结果比较可靠。选择拟合残差最小的震源机制解作为此次地震的最佳震源机制解。图 5 是震源深度 3.5 km



小震分布在水平面(a)、断层面(b)和垂直于断层面的横断面(c)上的投影, 圆圈表示精确小震定位, 粗线表示的是断层面边界, AA'为断层上边界端点; (d)小震距断层面距离的分布

The distribution of small earthquakes is projected onto the horizontal plane (a), the fault plane (b), and cross-sections (c) perpendicular to the fault plane. The circles represent precise small earthquake locations, while the bold lines represent the fault plane boundaries.

AA' marks the upper boundary endpoint of the fault; (d) Distribution of small earthquake distances from the fault plane

图 4 采用 Fit_Fault 软件和精确定位的承德 $M_L3.6$ 地震序列地震精定位数据拟合断层面的结果

Fig. 4 Result of fitting the fault plane according to precisely located Chengde earthquake sequence by using Fit_Fault software

表 2 一维速度模型

Table 2 1-D velocity model

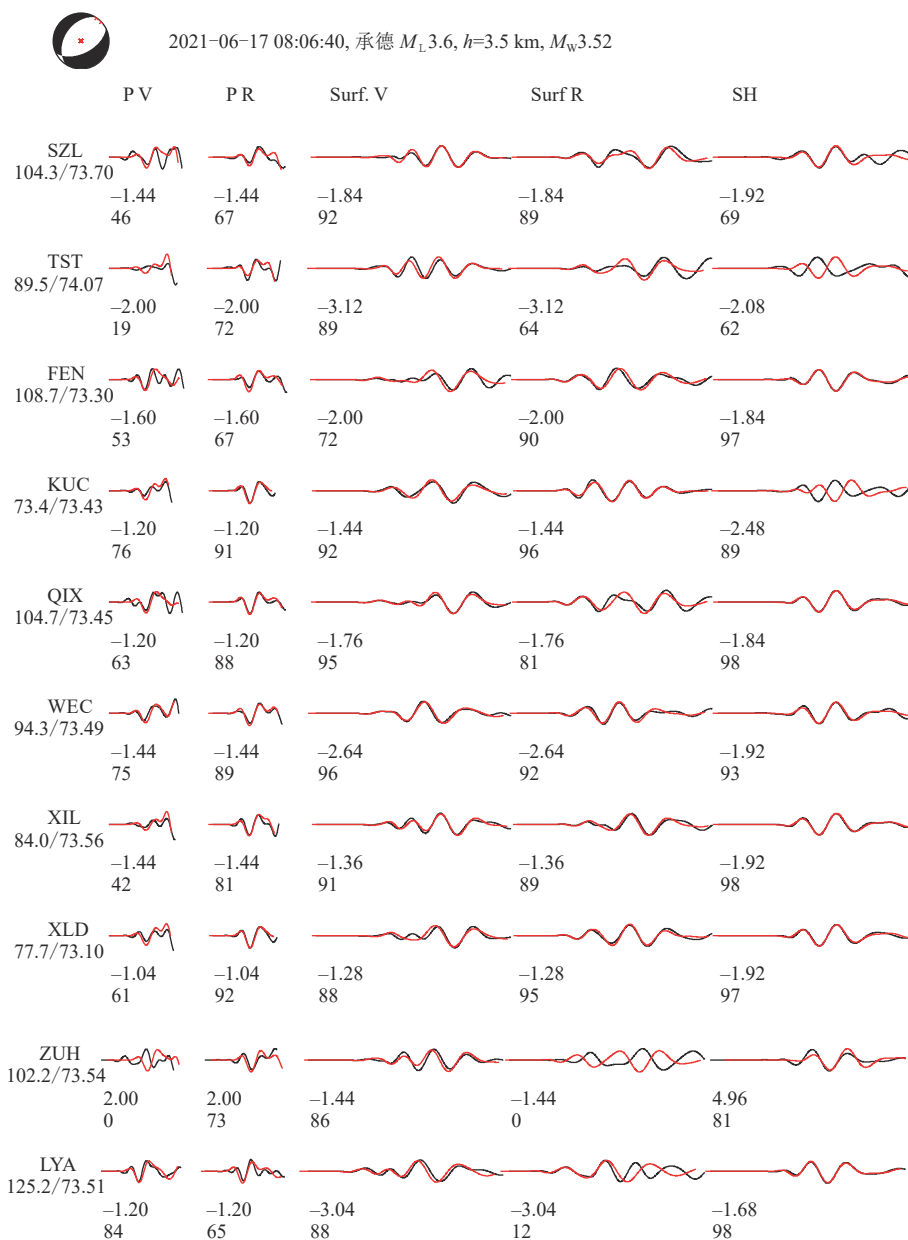
深度/km	$v_p/(km \cdot s^{-1})$	v_p/v_s
0.0	5.20	1.73
5.0	5.80	1.73
10.0	6.00	1.73
15.0	6.30	1.73
20.0	6.50	1.73
25.0	6.70	1.73
35.0	7.00	1.73

附近时的位移谱拟合结果和 CAP 反演得到的震源机制解。图 6 显示了不同深度的震源机制解和波形拟合残差。从图中可以看出, 当震源深度为 3.6 km 时, 观测波形与理论波形的拟合残差达到最小, 反演结果较为可信。最佳震源机制解的结果为: 节面 I 的

走向是 214° , 倾角是 41° , 滑动角是 -113° ; 节面 II 的走向是 63.4° , 倾角是 52.8° , 滑动角是 -71.2° ; 矩震级 $M_W3.5$, 矩心深度 3.6 km, 最大主压应力 P 轴方位角 28.4° , 最大主张应力 T 轴方位角 140.1° (表 3)。

2.2 断层滑动角参数的确定及分析

在计算断层面滑动角参数时, 需要使用研究区 P 轴与 T 轴的方位角与倾伏角。本文在计算时使用上述 CAP 震源机制解的计算结果。其中, R 值是由 Wan^[24]利用震源机制反演构造应力场得到的, 其数值为 0.45。在假定 P 轴与 T 轴方位角及其倾伏角的误差分别为 5° 和 10° 的情况下, 根据前文拟合的断层面参数, 采用表 3 所示的震源机制解求解断层面滑动角(表 1)。从滑动角计算结果来看, 断裂活动具有明显的正断性质。此外, 与震源机制结果相比(表 3), 本文拟合的断层面走向、倾角与滑动角也与节面 II 结果比较吻合。



红线表示理论地震图，黑线为观测地震图；波形左侧台站名下方的数字为震中距和台站理论 P 波初至与观测 P 波初至的差值；波形下方的两行数字分别表示理论地震图相对观测地震图的移动时间及二者的相关系数

The red lines represent the synthetic seismograms, the black lines represent the observed seismograms; The numbers below the station name on the left side of the seismograms represent the epicenter distance and time shifts between the synthetics and the observed data; The numbers on the lower left side of the seismograms are the time shifts and cross-correlation coefficient in percent

图 5 最佳震源机制解及其理论波形与观测波形的对比

Fig. 5 The best focal mechanisms and comparison between synthetics and observed seismograms

2.3 断层中心解确定

首先，将上述震源机制解的结果(表 3)的 2 个节面参数分别与余震拟合的断层面参数(表 1)作为初始解，采用 Fault_Center 软件进行迭代求解，该软件通过迭代方法最小化与断层面参数的空间旋转角之和，从而输出每个节面的中心解及其法向轴的标准差，对两个潜在节面进行中心解误差的评估^[25-26]。其

次，依据标准差的大小，选取标准差最小的中心解，即为最后所确定的中心解。计算结果(表 4、图 7)显示，节面 II 的法向轴标准差仅为 8.86°，相对于节面 I 的 53.29°，其结果具有更低的不确定性。进一步分析还发现，节面 II 的走向和倾角误差范围较小，综上所述，节面 II 更可能是承德地震的实际活动面。采用节面 II 作为初始解得到的中心解，所对应的标准差

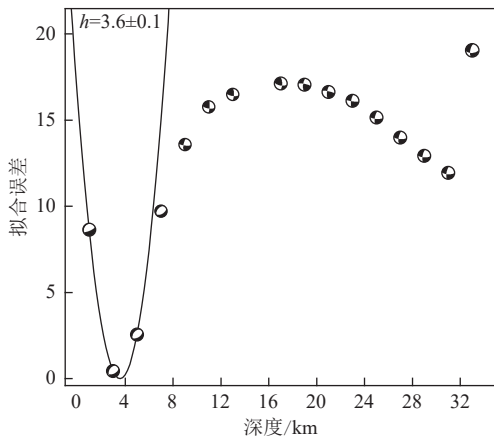


图 6 拟合残差与震源机制解随深度的变化

Fig. 6 Focal mechanisms and misfit at different depths

最小, 将此中心解(走向 63.59° , 倾角 61.66°)作为最终结果。

3 发震构造讨论

承德 $M_L3.6$ 地震位于小营—张营断裂和双塔山—双峰寺断裂之间, 小营—张营断裂走向 NEE 向, 倾向 SE, 倾角在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 之间。双塔山—双峰寺断裂走向 NE 向, 倾向南, 倾角在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 之间。根据双差定位计算结果, 承德地震序列位于小营—张营断裂和双塔山—双峰寺断裂之间, 呈 NE 向条带状分布, 余震断层参数反演结果为走向 63.76° 和倾角

70.52° , 倾向基本一致, 同为 SE, 该带状走向与双塔山—双峰寺断裂走向基本一致, 即此次承德地震的发震断裂应为双塔山—双峰寺断裂。此外, 根据震源机制解给出的 2 个可能断层面的参数解中, 节面 I (走向: 214.0° , 倾向: 41.0° , 滑动角: -113.0°) 与节面 II (走向: 63.4° , 倾向: 52.8° , 滑动角: -71.2°) 的断层中心解显示, 该地震可能发生在走向为 63.59° , 倾向为 61.66° 的断层面上, 与双塔山—双峰寺断裂更为接近, 应为一个倾向西南的正断层。Wan^[24]研究表明承德地区构造应力场主压应力 σ_1 走向 87° 、倾角 14° , 主张应力 σ_3 走向 354° 、倾角 13° , 推测双塔山—双峰寺断层以右旋走滑错动为主, 与本文震源机制解计算得到的发震断裂为正断层的双塔山—双峰寺断层有所出入。笔者认为是由于双塔山—双峰寺全长 50 km 左右, 本文仅计算了承德 $M_L3.6$ 地震序列的震源机制解, 断层东西两侧地震资料不充分, 无法进行反演, 且断裂历史活动资料不齐全无法从构造角度充分分析双塔山—双峰寺断层, 因此在双塔山—双峰寺断层类型上与前人研究有所出入。综上所述, 基于应力场和震源机制解, 这次地震很可能是一次正断层地震。它可能是由于主张应力在双塔山—双峰寺断裂上产生的挤压引发的。这种张应力导致岩层沿着断层面下滑, 在该区域应力场形成了正断层是可能的。这是一个基于数据的初步分析, 实际情况可能更复杂。

表 3 承德 $M_L3.6$ 地震震源机制解

Table 3 Focal mechanism solutions for the Chengde $M_L3.6$ earthquake

北纬/ $^\circ$	东经/ $^\circ$	震级 (M_w)	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
				倾向/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	倾向/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾伏角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾伏角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	倾伏角/ $^\circ$
41.09	117.90	3.5	3.6	41	214	-113	52.8	63.4	-71.2	28.4	73.9	140.1	6.1	218.4	16.1

表 4 承德 $M_L3.6$ 地震断层中心解

Table 4 Fault center solution for Chengde $M_L3.6$ earthquake

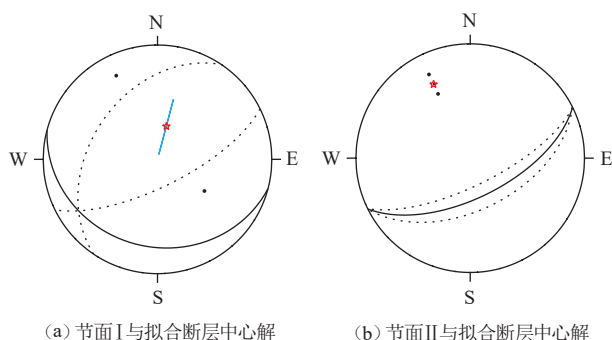
	标准差/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	法向走向/ $^\circ$	倾伏角/ $^\circ$
节面 I	53.29	104.86	24.47	14.86	65.53
节面 II	8.86	63.59	61.66	333.59	28.34

结合上述结论, 虽然双塔山—双峰寺断裂的地质活动性较差, 但从震源机制解、精定位结果和断层地质结构等方面考虑, 可以初步判断, 本次地震的发震构造可能为双塔山—双峰寺断裂。然而, 由于震源深度较浅, 不能排除地震可能由更表层的构造诱发

的可能性, 例如水库诱发地震。未来需要收集更多的数据和深入的研究来进一步确认这个假设。

4 结论与讨论

本文基于 2021 年 6 月 17 日承德 $M_L3.6$ 地震序列的地震波形和震相走时数据, 利用双差定位方法获得了承德地震序列的精定位结果, 通过小震拟合法计算得到该次地震对应断层面参数, 并利用 CAP 方法反演了承德 $M_L3.6$ 地震的震源机制解, 利用断层中心解计算, 确定最终发震断层面参数。结合上述理论计算与地质资料对承德地震的发震构造和序列发



点弧线为要平均给出中心断层面的断层面，其对应的极用黑点表示，统计的中心断层用粗黑线表示，其对应的极用红五星表示，在红五星周围的青色线为统计的误差范围

The dotted arc lines represent the fault planes averaged to give the central fault plane, with their corresponding poles indicated by black dots. The central fault determined statistically is represented by a thick black line, with its corresponding pole indicated by a red pentagram. The cyan lines surrounding the red pentagram represent the statistical error range

图7 承德 $M_L 3.6$ 地震断层中心解

Fig. 7 Fault center solution for Chengde $M_L 3.6$ earthquake

生、发展过程进行了初步分析和讨论：

(1) 双差定位结果显示，本次地震序列形成一个明显的NE向分布，位于小营—张营断裂和双塔山—双峰寺断裂之间，与双塔山—双峰寺断裂的走向一致。结合精确定位结果，本次地震序列与该断裂存在显著的空间关联性，提示双塔山—双峰寺断裂为潜在的地震源。利用Fit_Fault软件和精定位的地震序列地震数据，拟合出该次地震序列对应的断层面参

数：走向 63.76° ，倾角 70.52° ，呈现出高角度断层的特征。拟合结果表明，该次地震序列位于一个长约12 km、宽约2 km的近东西向狭长带内，震源深度集中在2~7 km范围。该条带状分布与区域内的双塔山—双峰寺断裂走向一致，说明本次地震发生在该断裂上或其附近区域。

(2) 基于区域台站的宽频带记录，采用CAP法反演获得了主震的最佳单位震源时函数、矩张量解和双力偶解。其中，最佳断层面解为：走向 63.4° ，倾角 52.8° ，属于一个倾向西南的正断层。为确认最优解，计算了两个可能断层面的断层中心解，结果表明走向 63.59° ，倾角 61.66° 的解标准差最小，与双塔山—双峰寺断裂构造参数吻合。这进一步验证了CAP法反演结果，确定了本次地震的发震断层为该断裂。

(3) 本次地震发生在承德盆地北缘，位于燕山褶皱带与华北地台的交汇处，受构造运动和地应力场共同影响。根据区域应力场分析，本次地震可能是由主张应力 σ_3 在双塔山—双峰寺断裂上产生的挤压而诱发。尽管双塔山—双峰寺断裂的活动性较差，但从多方面证据看，本次地震的发震构造可能由该断裂造成，不排除也可能与该区域的其他浅层构造有关。

(4) 确定了承德地震的精确震源分布、发震断层参数和震源机制解，为该地区的地震活动及地质构造研究提供了重要依据。但由于研究所用数据有限，结果还存在一定的不确定性，需要进一步收集资料进行验证。今后需要系统收集该区域的地质、地球物理和地震资料，建立精细的地震危险性模型，以提高对未来强震的预测能力。

参考文献

- [1] 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 900-915
Zhao Y, Chen B, Zhang S H, et al. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 900-915
- [2] 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 793-804
Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, et al. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 793-804
- [3] 王福昌, 万永革, 胡顺田. 粒子群算法在主震断层面参数估计中的应用[J]. 地震研究, 2008, 31(2): 149-154
Wang F C, Wan Y G, Hu S T. Application of particle swarm optimization to the estimation of mainshock fault plane parameters[J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(2): 149-154
- [4] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6): 1353-1368
- [5] Waldhauser F, Ellsworth W L. Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake

- locations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B3): ESE3-1-EAE3-15
- [6] 戴宗辉, 李冬梅, 王鹏, 等. 2020年2月18日长清 $M_S4.1$ 地震发震构造研究[J]. *地震*, 2022, 42(1): 111-121
Dai Z H, Li D M, Wang P, et al. Study on the seismogenic structure of the $M_S4.1$ earthquake in Changqing on February 18, 2020[J]. *Earthquake*, 2022, 42(1): 111-121
- [7] 黄小梅, 陈强, 张一君, 等. 2019-07 Ridgecrest地震及其余震的双差重定位分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(8): 858-864
Huang X M, Chen Q, Zhang Y J, et al. Analysis of the July 2019 Ridgecrest earthquake and aftershocks using double-difference relocation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(8): 858-864
- [8] 周琳, 张佩, 宋尚武, 等. 基于双差定位方法的渤海地区中小地震重定位研究[J]. *工程勘察*, 2020, 48(10): 43-46
Zhou L, Zhang P, Song S W, et al. Research on relocation of small to moderate earthquakes in the Bohai area based on double-difference location algorithm[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020, 48(10): 43-46
- [9] 殷翔, 绽蓓蕾, 姚生海, 等. 2022年1月8日青海门源 $M_S6.9$ 地震序列、地表破裂特征及其工程效应[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 57-64
Yin X, Zhan B L, Yao S H, et al. The earthquake sequence, surface rupture characteristics and engineering effects of the $M_S6.9$ Qinghai Menyuan earthquake on January 8, 2022[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 57-64
- [10] 王光明, 吴中海, 刘昌伟, 等. 2022年1月2日宁蒗 $M_S5.5$ 地震序列重定位与发震构造分析[J]. *地震学报*, 2022, 44(4): 581-593
Wang G M, Wu Z H, Liu C W, et al. Relocation and seismogenic structural analysis of the $M_S5.5$ Ninglang earthquake sequence on January 2, 2022[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2022, 44(4): 581-593
- [11] 宋倩, 梁姗姗, 于湘伟, 等. 云南2020年巧家 $M_S5.0$ 地震序列发震构造及其与2014年鲁甸 $M_S6.5$ 地震的关系[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(4): 1303-1324
Song Q, Liang S S, Yu X W, et al. Seismogenic mechanism of the 2020 Qiaojia $M_S5.0$ earthquake sequence and its relationship with the 2014 Ludian $M_S6.5$ earthquake in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(4): 1303-1324
- [12] 李君, 王勤彩. 2013年松原5级震群序列精定位、震源机制解及发震构造特征[J]. *地震*, 2018, 38(4): 62-73
Li J, Wang Q C. Relocation and focal mechanism of the Songyuan earthquake swarm sequence in 2013[J]. *Earthquake*, 2018, 38(4): 62-73
- [13] 王小娜, 叶秀薇, 黄元敏, 等. 2018年11月26日台湾海峡 $M_S6.2$ 地震发震构造研究[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(12): 4673-4683
Wang X N, Ye X W, Huang Y M, et al. Seismogenic structure of the $M_S6.2$ Taiwan strait earthquake on 26 November, 2018[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(12): 4673-4683
- [14] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(1): 91-104
- [15] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(5): 1634-1641
- [16] 郭蕾, 宫猛, 王宁. 2012年唐山 $M_L5.2$ 地震前后的速度结构对比分析[J]. *中国地震*, 2019, 35(4): 695-708
Guo L, Gong M, Wang N. Comparative analysis of velocity structure before and after the Tangshan $M_L5.2$ earthquake in 2012[J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 35(4): 695-708
- [17] 许英才, 郭祥云. 2022年6月1日四川芦山 $M_S6.1$ 地震的震源参数及其构造启示[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(8): 3202-3217
Xu Y C, Guo X Y. Source parameters of the $M_S6.1$ Lushan earthquake on June 1, 2022 in Sichuan Province and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(8): 3202-3217
- [18] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源参数和破裂特征[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 75-85
Guo X Y, Han L B, Zhang X, et al. Source parameters and rupture characteristics of the $M6.2$ Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85
- [19] 张广伟, 雷建设, 梁姗姗, 等. 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*, 2014, 57(9): 3018-3027
Zhang G W, Lei J S, Liang S S, et al. Relocations and focal mechanism solutions of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan $M_S6.5$ earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9): 3018-3027

- [20] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2017年8月8日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4083-4097
Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4083-4097
- [21] 许英才, 曾宪伟, 王银, 等. 2020年6月9日中卫 $M_L3.4$ 地震的震源机制及其中心解的测定 [J]. 地震科学进展, 2021, 51(6): 258-265
Xu Y C, Zeng X W, Wang Y, et al. Determination on the focal mechanism and central focal mechanism of Zhongwei $M_L3.4$ earthquake on June 9, 2020 [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51(6): 258-265
- [22] 刘建明, 王琼, 李金, 等. 2016年12月8日呼图壁 $M_S6.2$ 地震序列重定位与发震构造 [J]. 地震地质, 2018, 40(3): 566-578
Liu J M, Wang Q, Li J, et al. Relocation of the Hutubi $M_S6.2$ earthquake sequence on 8 December 2016 and analysis of the seismogenic structure [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(3): 566-578
- [23] 黄浩, 付虹. 2015年11月23日祁连 5.2 级地震发震构造初步研究 [J]. 地震, 2019, 39(1): 114-125
Huang H, Fu H. A preliminary study of the seismogenic structure of the Nov. 23, 2015 Qilian 5.2 earthquake [J]. Earthquake, 2019, 39(1): 114-125
- [24] Wan Y G. Contemporary tectonic stress field in China [J]. Earthquake Science, 2010, 23(4): 377-386
- [25] 万永革. 同一地震多个震源机制中心解的确定 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(12): 4718-4728
Wan Y G. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(12): 4718-4728
- [26] 万永革. 联合采用定性和定量断层资料的应力张量反演方法及在乌鲁木齐地区的应用 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3144-3156
Wan Y G. A grid search method for determination of tectonic stress tensor using qualitative and quantitative data of active faults and its application to the Urumqi area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3144-3156