

引文格式:关鹏虎,李斌,李自红,等.多方法求解中小地震震源机制解的可靠性分析[J].太原理工大学学报,2022,53(2):289-298.

GUAN Penghu, LI Bin, LI Zihong, et al. Reliability of Focal Mechanism Solutions for Small and Medium Earthquakes Based on Different Methods—Taking Three Events in Shanxi Seismic Belt as Examples[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(2): 289-298.

多方法求解中小地震震源机制解的可靠性分析 ——以山西地震带3次中小地震为例

关鹏虎^{1a}, 李斌^{1a, 1b}, 李自红², 宋美琴², 梁向军²

(1. 太原理工大学 a. 矿业工程学院, b. 地震与地质灾害防治研究所, 太原 030024; 2. 山西省地震局, 太原 030021)

摘要:以近年来发生在山西地震带的3次代表性中小地震为例,基于P波初动、P波初动联合P/SV/SH振幅比、CAP波形反演与矩张量反演等多种方法,通过逐步增加参与计算的台站个数及选用不同的数据类型和数据量,全面展示了中小地震震源机制的求解过程与结果,并分析验证了不同数据类型、数据量及求解方法对中小地震震源机制解可靠性与稳定性的影响与约束。结果显示:1)基于P波初动获得稳定可靠的震源机制解至少需要8个以上初动清晰、对震中包裹性较好的P波初动数据;2)对于震级较小、台站记录不足的地震,增加振幅比可在一定程度上提高对结果的约束,但过多增加振幅比的同时,往往会显著增加矛盾比,而对结果的约束不明显;3)对于 $M_L 3.2$ 这一级别的显著地震,CAP方法通常可以给出稳定且信度高的结果,但对于震级更大的中等地震,矩张量方法和CAP方法均可作为获得可靠震源机制解的理想选择。

关键词:震源机制解;P波初动;振幅比;CAP;矩张量反演

中图分类号:P315;P546 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2022.02.013 **文章编号:**1007-9432(2022)02-0289-10

Reliability of Focal Mechanism Solutions for Small and Medium Earthquakes Based on Different Methods—Taking Three Events in Shanxi Seismic Belt as Examples

GUAN Penghu^{1a}, LI Bin^{1a, 1b}, LI Zihong², SONG Meiqin², LIANG Xiangjun²

(1a. College of Mining Engineering, 1b. Institute of Prevention for Earthquake and Geology Hazards, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China)

Abstract: Three representative small and medium earthquakes in Shanxi seismic belt in recent years were taken as examples. By using different methods, such as the first motion of P-wave, first motion of P-wave combining P/SV/SH amplitude ratio, CAP (Cut and Past), and moment tensor inversion, the reliability and stability of focal mechanism solutions of small and medium earthquakes were analyzed and verified by gradually increasing calculation stations and selecting different data types and data quantities. The results indicate that in practice, 1) for a stable and

收稿日期:2021-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(NSF41504051);山西省自然科学基金资助项目(201901D111051);山西省重点研发计划(201603D321124)

第一作者:关鹏虎(1994—),博士研究生,(E-mail)1209318563@qq.com

通信作者:李斌(1980—),博士,副教授,硕士生导师,主要从事地震学与地震灾害研究工作,(E-mail)John_bli@hotmail.com

reliable solution based on P-wave first motions, at least more than eight P-wave polarity data with clear initial motion and good inclusion in the earthquake are required; 2) for small earthquakes with inadequate station records, increasing the amplitude ratio data improves constraints on the results to a certain extent, but increasing the amplitude ratio data often significantly increases the contradiction ratio, while the constraints on the results are not continuously improved; 3) for $M_L \approx 3.2$ earthquakes, the CAP method gives stable and reliable results, and for medium earthquakes with larger magnitude, moment tensor inversion method is also suggested to be an ideal choice to obtain reliable focal mechanism solutions.

Keywords: focal mechanism solution; first motion of P-wave; amplitude ratio; CAP; moment tensor inversion

地震是地下介质(岩层)在应力作用下发生脆性破裂而引起地面震动的一种自然现象,而震源机制解是推断地震发生时震源断层类型、理解断层破裂力学过程与力学机制的重要依据,也是反映震源区应力状态、地震孕育过程的重要参数。关于如何求解震源机制,国内外地震学者做了大量研究工作并提出了不同的求解方法,如 P 波初动法^[1]、振幅比法^[2]、P 波初动联合振幅比法^[1,3]、CAP 全波形反演法^[4]与矩张量反演法^[5]等等,且研究结果对世界上很多地震都作出过较为合理的解释^[6-10]。

但较多的震例研究也显示,对于同一地震,基于不同方法求解的震源机制常常存在一定的差异^[11-12]。主要原因在于不同求解方法基于的理论基础、逻辑算法、数据类型不同,以及不同研究者对数据的选用标准与用于计算的数据量等存在差异。此外,不同区域记录台站的疏密不同及记录数据的质量差异,可能会进一步增加震源机制的求解误差,从而影响解的精确性与可靠性。特别对于发震频率高的中小地震,因其震级小、记录台站相对少、台站对震中包裹性不理想、波形信噪比不高等问题^[13],其震源机制的准确求解一直是震源参数研究中的一个关键基础问题,也是当前各地震监测中心经常遇到的一个值得深入分析与探讨的实际问题。

中小地震的震源机制求解方法中,目前普遍认可和广泛应用的方法包括 P 波初动法、P 波初动联合振幅比法、CAP 波形反演法与矩张量反演法等。针对中小地震震源机制求解的可靠性问题,本文基于上述多种方法与不同数据类型、数据量,系统计算与对比分析了近年来发生在山西地震带的 3 次代表性中小地震的震源机制解,展示与验证了参与计算的数据类型、数据量及求解方法对中小地震震源机制解可靠性与稳定性的影响与约束,以期为中小地震震源机制解的可靠性分析及不同震级地震的震源

机制求解条件与方法选择提供参考依据。此外,鉴于上述求解方法基本原理清晰且以往文献均有详细描述,本文未再赘述。

1 资料选取与计算思路

1.1 地震资料选取

山西地震带历史上强震频发,中小地震活跃,近年来先后发生 2009 年 3 月 28 日原平 4.2 级、2010 年 1 月 25 日河津 4.8 级、2010 年 6 月 7 日阳曲 4.6 级、2016 年 3 月 12 日盐湖 4.8 级、2016 年 4 月 7 日原平 4.7 级、2016 年 12 月 8 日清徐 4.6 级等一系列显著地震^[14-16]。区域内的山西测震台网,目前由 72 个实时记录与传输的数字化宽频带地震台站组网而成(山西省内台站 57 个和邻省 15 个),基本上均匀分布于山西省及周边地区,如图 1 所示。现有台网条件下, $M_L 2.0$ 及以上的地震,通常能被周围几十个台站同时记录到,震中亦能被台站较好地包围^[13]。因此,山西地震带一直以来是开展中小地震研究的理想目标区域之一。

本文选取了近年来发生在山西地震带的 3 次震级不等的代表性地震为研究对象,分别为 2016 年 1 月 3 日侯马 $M_L 2.0$ 地震、2015 年 6 月 2 日太原 $M_L 3.2$ 地震与 2010 年 6 月 5 日阳曲 $M_L 4.8$ 地震。选取原因:1) 发生于山西地震带中部,记录台站多,台站对震中包裹性好;2) 记录波形质量好,信噪比高;3) 震级不等,能作为不同震级地震的代表。这 3 次地震能满足系统分析与探讨不同方法求解中小地震震源机制解结果可靠性的数据要求。

1.2 地壳速度结构

以往研究表明^[10,14],无论哪种震源机制求解方法,地壳速度结构都是影响震源机制解的重要因素之一。为减少地壳速度结构对求解精度与可靠性的影响,本文在利用不同方法求解震源机制解时,均采

用了山西地震带最新的 1D 速度结构模型^[14],地壳分层及数据详见表 1。

1.3 计算思路

本文旨在分析与探讨实际求解过程中,中小地震获得可靠、稳定震源机制解的求解条件与方法选择。因此在求解过程中,总体上采用了分类计算、对比分析的研究思路,即针对不同的震级,选择适合该震级范围的求解方法系统求解,验证不同数据类型、不同数据数量、不同方法对震源机制可靠性与稳定性的影响。本文所有结果均采用下半球投影。

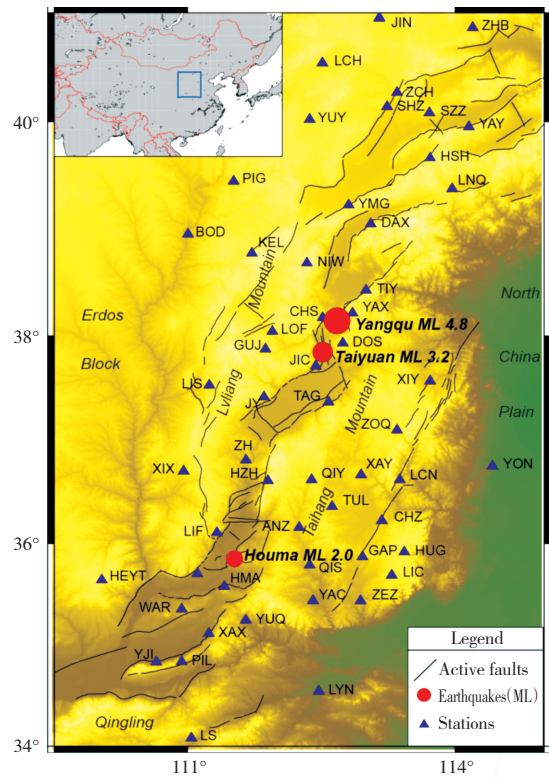


图 1 山西区域震台网及 3 次代表性地震分布图
Fig. 1 Distribution of Shanxi seismic network and the three representative events selected for this study

表 1 本文计算采用的山西地震带 1D 速度结构模型
Table 1 1D velocity model of Shanxi rift system applied in this study

层序	深度/km	$v_s/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0	2.8	4.8
2	4	3.5	6.0
3	7	3.6	6.2
4	22	3.7	6.3
5	25	3.7	6.4
6	32	4.2	7.2
7	40	4.6	8.0

2 多方法求解与对比分析

2.1 侯马 $M_L 2.0$ 地震

2016 年 1 月 3 日山西侯马发生 $M_L 2.0$ 地震,山

西地震台网共有 28 个台站记录到该次地震,其中 16 个台站的记录波形在垂直分量上有清晰的 P 波初动。对于此次侯马 $M_L 2.0$ 地震,采用了计算小震震源机制解最为广泛应用和认可的 P 波初动法、P 波初动联合振幅比法 2 种求解方法。

2.1.1 基于 P 波初动

HAVSKOV 和 OTTEMÖLLER^[17] 基于理论波形的 P 波初动数据分析震源机制解时表明,若利用 P 波初动获得可靠性可被接受的震源机制解,至少需要 6 个对震中包裹较好的台站记录到较为清晰的 P 波初动。鉴于这一认识,对于此次侯马 $M_L 2.0$ 地震,首先选取了震中距最小、方位分布最好的 5 个台站起算,基于 FOCMEC 程序^[3] 求解了震源机制解。求解中设置矛盾数为零、格点搜索步长为 2° ,并将结果与 16 个台站全方位覆盖条件下的解进行对比分析。经多次不同台站组合与反复计算,结果如图 2 所示。其中,图 2(a)为两组代表性结果,基于 5 个台站的记录,无论哪个组合,其结果都与台站全方位覆盖条件下的求解结果相差甚远,都无法求得可靠的震源机制解。

图 2(b)是在 5 个震中距最小、方位分布最好的台站基础上,增加 1 个台站后获得的震源机制解结果。该台站的增加,有助于改善台站的总体方位角分布。增加不同台站的多次求解结果显示,在此情况下震源机制解至少存在两个最优解,一个是与台站全方位覆盖条件下震源机制解结果相近,另一个则相差甚远。问题在于在实际求解过程中,无法分辨哪个结果是最接近实际的可靠结果。因此,6 个分布较好的台站记录到清晰的 P 波初动能求解可靠的震源机制解,只是理论上的分析,而在实际的求解过程中往往难以操作。

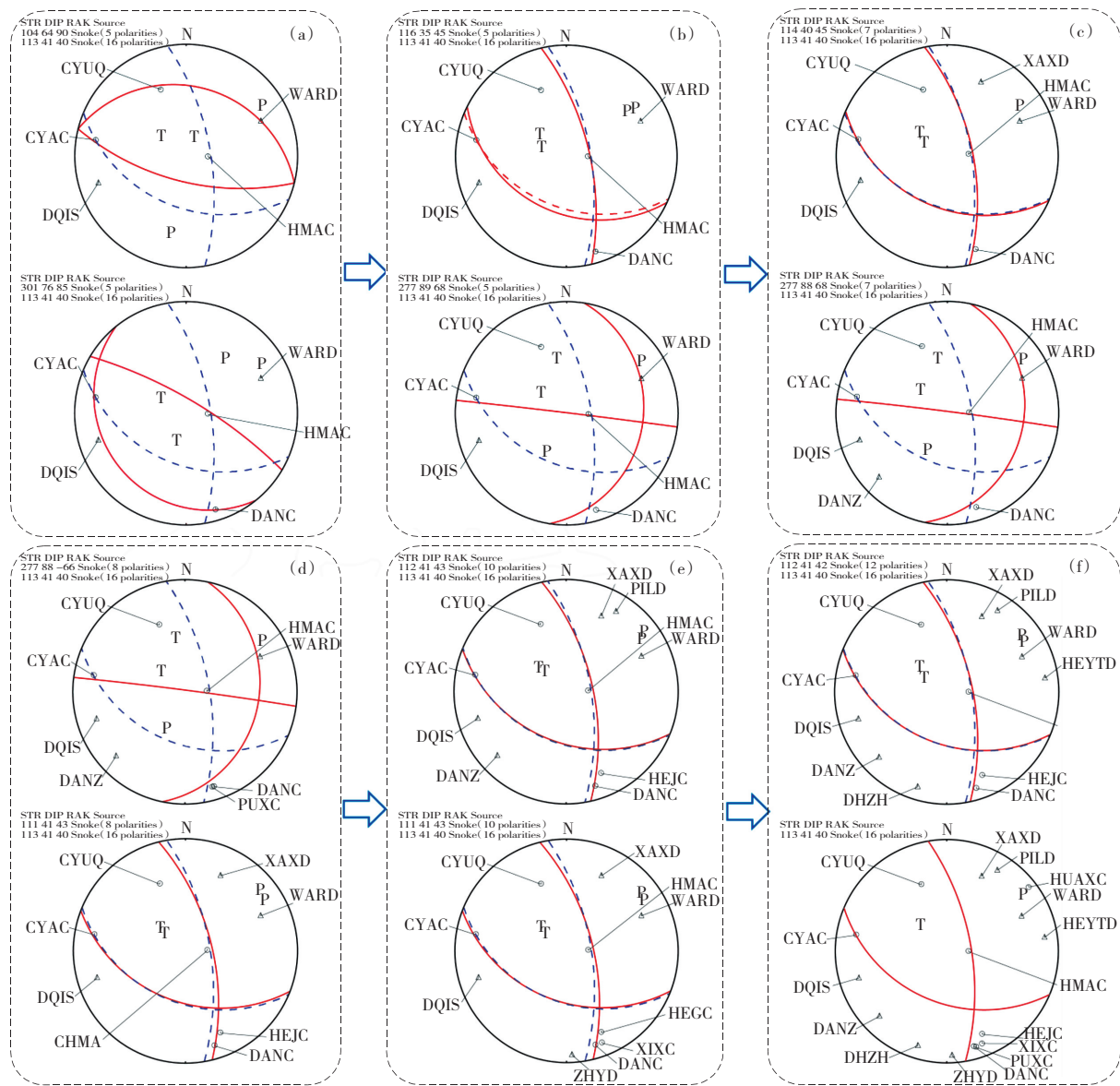
在上述 6 个台站基础上,再增加 1 个记录台站,以进一步改善台站的方位分布条件。本文共尝试了 5 组不同的组合,图 2(c)是 7 个台站条件下求解震源机制的代表性结果。结果显示,即使增加到 7 个方位较好的台站,其结果仍然存在两种可能性,难以选择可靠结果的问题仍然突出。同样的思路增加到 8 个台站,台站方位分布进一步得到改善,结果见图 2(d),同样存在两种结果难以选择。图 2(e)、2(f)是将记录台站增加到 10 个、12 个时的 2 组代表性震源机制结果,可以看出其结果完全趋于稳定,且与台站全方位覆盖条件下震源机制解结果非常接近。

2.1.2 基于 P 波初动联合振幅比

为进一步验证振幅比在震源机制求解过程中对

结果的约束,本文仍以台站记录较好的侯马 $M_L 2.0$ 地震为例,首先以 6 个震中距最小、方位分布最好的台站记录到的 P 波初动为基础,逐步增加另外 2、3、4、5 个震中距较小台站的振幅比数据,并将计算结果与台站全方位覆盖条件下的结果进行对比。计算

方法仍然采用基于 Snoke 方法的 FOCMEC 程序^[3],数据处理较为简单,即在垂向上读取 P 波极性,在垂向、径向和切向上读取 P 波、SV 波与 SH 波振幅,用到的振幅比包括 SV/P、SH/P、SV/SH。



(a) 5 个台; (b) 6 个台; (c) 7 个台; (d) 8 个台; (e) 10 个台; (f) 12 个台;
STR 为走向, DIP 为倾角, RAK 为滑动角, Source 为求解方法, 蓝虚线是基于全部 16 个台 P 波初动的求解结果, 红实线是逐步增加 P 波初动的求解结果

图 2 侯马 $M_L 2.0$ 地震基于 P 波初动方法的求解结果

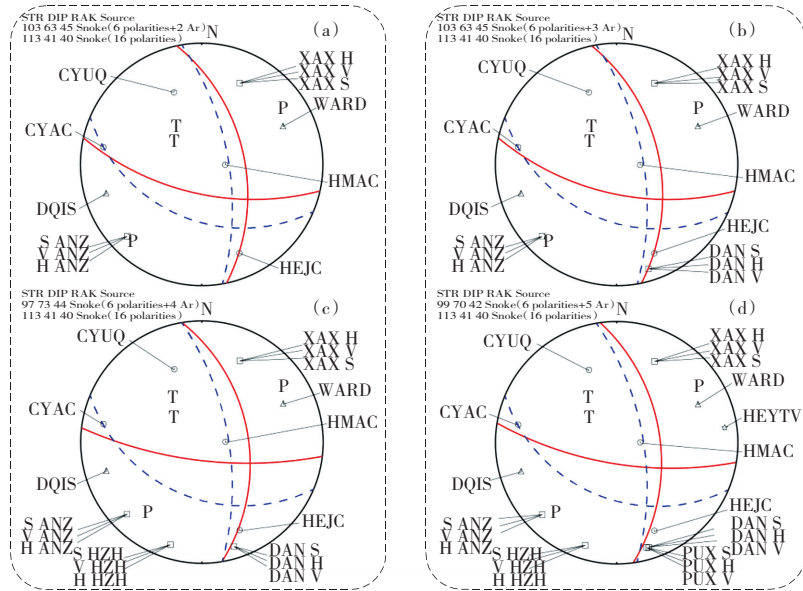
Fig. 2 Results of focal mechanism of Houma $M_L 2.0$ earthquake based on the P-wave first motion method

计算结果如图 3 所示。图 3(a) 显示在 6 个 P 波初动的基础上, 增加 2 个台站的 6 个振幅比数据后, 通过网格搜索在一定误差范围内可以获得基本稳定的计算结果, 且与台站全方位覆盖条件下震源机制解结果具有可比性。表明在 P 波初动数据不足的情况下增加振幅比, 可以对结果起到限定作用。图 3(b)–3(d) 显示在 6 个 P 波初动的基础上, 逐步

增加振幅比数量, 求得震源机制解的变化情况。结果表明, 增加振幅比数据会显著增加矛盾比, 同时需要不断增加振幅比误差才有解, 对结果的约束与可靠度提升并不明显。此外, 尝试在 8 个 P 波初动的基础上, 逐步增加另外 2、3、4、5 个震中距较小台站的振幅比数据求解震源机制解, 同样显示了这一问题。

2.2 太原 $M_L 3.2$ 地震

2015年6月2日的太原 $M_L 3.2$ 地震发生在山西地震带的中部,山西地震台网几乎所有的地震台站都记录到了该次地震,地震速报震源深度 16 km.



注:STR为走向,DIP为倾角,RAK为滑动角,Source为求解方法;蓝虚线是基于全部16个台站P波初动的求解结果,红实线是在6个台P波初动的基础上逐步增加振幅比的结果

图3 侯马 $M_L 2.0$ 地震基于P波初动联合振幅比方法的求解结果

Fig. 3 Results of Houma $M_L 2.0$ earthquake based on the combined P-wave first motion method and amplitude ratios

2.2.1 基于P波初动

对于此次地震,山西地震台网共有24个台站垂向上记录到了非常清晰的P波初动,如图4(a)所示。这些台站对震中的包裹性好,最大空隙角为 26° ,完全满足基于P波初动求解可靠震源机制解的条件。故上述24个台站的P波初动数据全部参与

计算,未再加入振幅比数据。为确保基于P波初动结果的可信度,分别采用了Snook与FPFIT方法^[3,18]求解,参数设置包括矛盾数为1,格点搜索步长为 2° ,FPFIT误差为 2° 。求解结果如图4(b)所示,显示两种方法获得的震源机制解具有可比性。详细的震源机制解参数见表2。

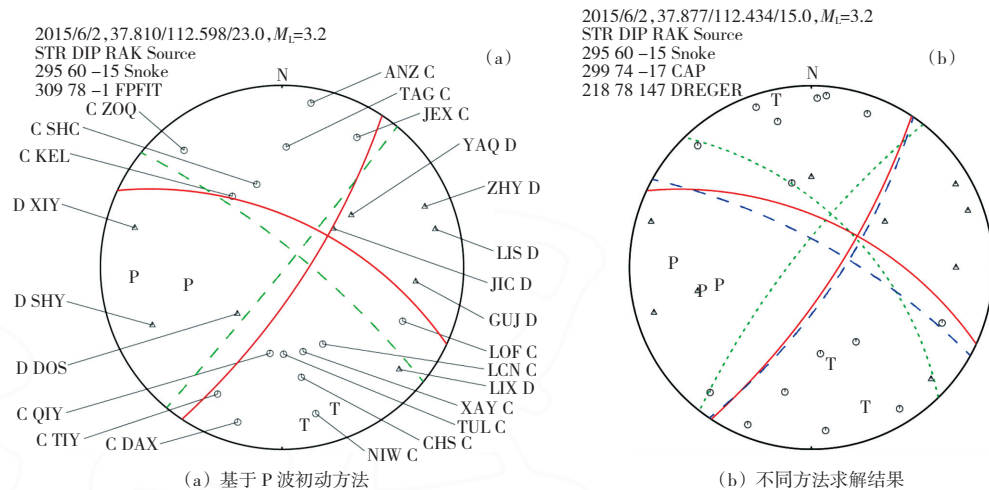


图4 太原 $M_L 3.2$ 地震结果

Fig. 4 Results of Taiyuan $M_L 3.2$ earthquake

2.2.2 CAP方法求解

此次地震的震中附近台站较多且波形记录清

晰,震中100 km范围内的台站有12个,200 km内的台站有23个,定位精度较高,在一类精度范围内

表 2 基于不同方法的 3 次代表性地震的震源机制解参数
Table 2 Parameters of focal mechanisms of the three representative earthquakes by different methods

代表性地震	时间	节面 I			节面 II			求解方法
		走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
侯马 $M_L2.0$	2016-01-03	113	41	40	351	65	134	Snoke
		295	60	-15	33	77	-145	Snoke
太原 $M_L3.2$	2015-06-02	309	78	-1	39	89	-168	FPFIT
		299	74	-17	34	74	-163	CAP
		218	78	147	316	58	14	MTI
		106	74	-31	205	60	-162	Snoke
阳曲 $M_L4.8$	2010-06-05	102	62	-41	214	55	-147	FPFIT
		109	76	-43	212	49	-161	CAP
		113	74	-45	218	47	-158	MTI

($t < 0.5$ s)。近震台站数据预处理及滤波后波形清晰,基本满足 CAP 方法的求解条件。

主要数据处理过程包括:

1) 选择波形记录质量较好、参与反演的宽频带台站,本文选取了 7 台站参与反演。

2) 进行波形资料预处理,包括去仪器响应、去均值、去倾斜、水平分量旋转至径向和切向,手动标注 P 波和面波震相,以及按一定时间窗截取震相。本文截取 P 波长度 35 s、面波长度 70 s,并对截取后的震相进行带通滤波,P 波滤波范围 0.02~0.15

Hz,面波滤波范围 0.02~0.1 Hz,并对截取后的波形进行两端尖灭处理。

3) 理论地震图计算。

4) 震源机制解反演。利用准备好的理论和观测波形数据,通过波形拟合在一定参数空间内搜索,得到相对误差最小的解便是最优解。波形拟合时允许 P 波有 5 s,S 波有 10 s 的时间移动,P 波权重 1.0,面波权重为 0.5。CAP 方法的波形拟合情况及反演结果见图 5,在震源深度 20 km 处得到最佳震源机制解^[13],具体参数详见表 2。

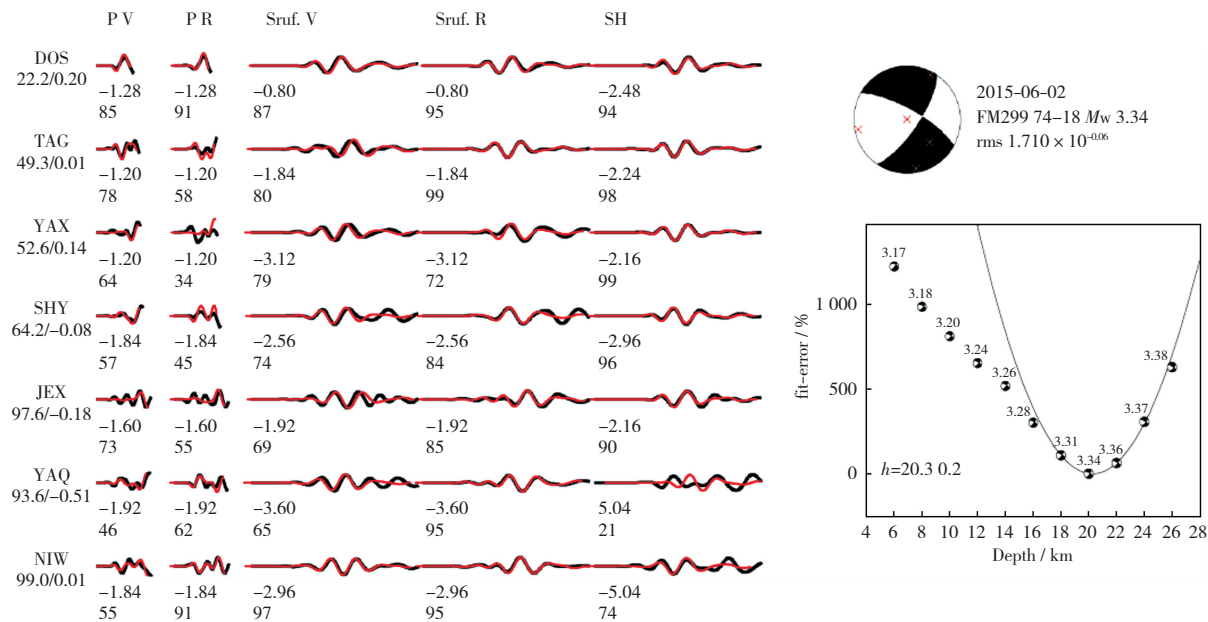


图 5 CAP 方法求解太原 $M_L3.2$ 地震震源机制解的波形拟合情况及反演结果^[13]

Fig. 5 Waveform fitting and inversion results of focal mechanism of Taiyuan $M_L3.2$ earthquake by CAP method^[13]

2.2.3 矩张量反演方法

以往震例中,对于 $M_L3.0$ 地震的震源机制求解,更多采用 P 波初动或初动联合振幅比等方法,矩张量反演应用较少,主要原因在于小震的波形资料往往不能满足滤波的要求,影响后续较好的波形拟合与结果的可信度^[15]。考虑到此次太原 $M_L3.2$ 地震的记录台站多、波形记录较好,且震级接近以往

矩张量反演震例中的最小震级,本文也尝试了利用矩张量反演方法求解该地震的震源机制解。

主要数据处理过程包括:

1) 选择参与反演的地震波形资料(滤波后波形清晰);

2) 对原始波形数据进行预处理,包括去仪器响应、去均值、去倾斜,三分量波形旋转至垂向、切向和

径向分量,积分至速度或位移数据以及滤波;

3) 基于区域速度结构等参数计算理论格林函数;

4) 进行矩张量反演及反演结果置信度的评估。

对于本次地震,仅有5个100 km内的台站满足参与矩张量反演的条件。HAVSKOV 和 OTTEMÖLLER^[17]研究表明,对于质量较好的波形数据,利用速度数据或位移数据进行矩张量反演的结果具有很好的一致性。本文在波形数据预处理过程中,直接采用的是

速度数据。此外,不同震级的地震频谱特征不同,对于本次 $M_L 3.2$ 地震,选择的滤波频带范围为 $0.02 \sim 0.1$ Hz。

波形拟合及反演结果如图6所示。显然对于 $M_L 3.2$ 地震,理论波形与实际波形的拟合程度不够理想,虽然能给出震源机制结果(具体参数详见表2),但约化方差 V_R (Variance Reduction) = 16.8% 值较低,结果与其他方法差距较大,可信度较低。

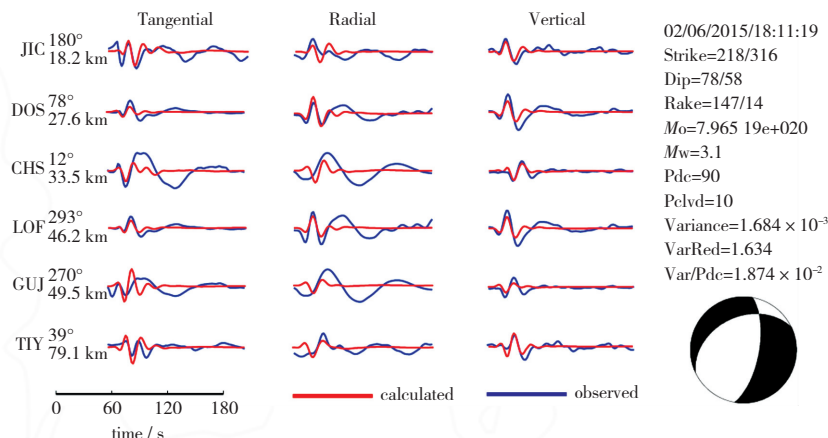


图6 矩张量反演方法求解太原 $M_L 3.2$ 地震震源机制解的波形拟合情况及反演结果

Fig. 6 Waveform fitting and inversion results of focal mechanism of Taiyuan $M_L 3.2$ earthquake based on moment tensor inversion method

2.3 阳曲 $M_L 4.8$ 地震

2010年6月5日阳曲 $M_L 4.8$ 显著地震在阳曲和太原地区震感强烈。山西地震台网72个地震台站全部记录到此次地震。本文采用了上述3种不同的方法求解其震源机制解,以实例探讨该震级的中等地震震源机制解的精度与可靠性对计算方法的依赖程度。

2.3.1 基于P波初动

对于此次地震,山西地震台网共有36个台站垂直向记录到清晰的P波初动,也完全满足基于P波初动求解可靠的震源机制解的条件。为了确保结果的可信度,同样分别采用了Snoke与FPFIT方法求解了震源机制解,求解过程中参数设置包括P波极性矛盾数为1,格点搜索步长为 2° ,FPFIT误差为 2° ,结果显示两种方法获得的震源机制解具有较好的一致性^[14]。求解结果见图7,具体参数详见表2。

2.3.2 CAP方法求解

图8为CAP方法的波形拟合情况及反演结果。共有7个台站参与反演,波形资料的预处理过程和计算参数的选择与太原 $M_L 3.2$ 地震相同,不再赘述。反演结果显示,对于 $M_L 4.8$ 地震,波形拟合程度较高,反演结果可信度高,具体震源机制解参数见表2。

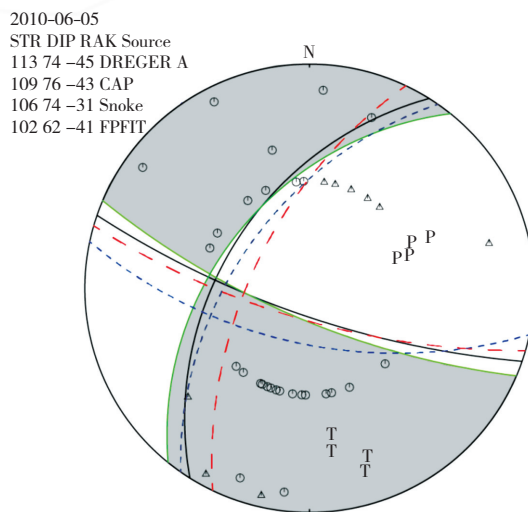


图7 阳曲 $M_L 4.8$ 地震基于P波初动及其他不同方法的震源机制求解结果

Fig. 7 Focal mechanisms of Yangqu $M_L 4.8$ earthquake based on the P-wave first motion and other different method

2.3.3 矩张量反演方法

对于此次显著地震,LI et al^[14]进行了地震矩张量求解,共有11个台站参与了反演,除滤波频带调整为 $0.02 \sim 0.5$ Hz外,其余波形资料预处理方法参数选择与太原 $M_L 3.2$ 地震的矩张量反演相同。波形拟合情况及矩张量反演结果见图9,理论波形与实际波形拟合程度较高,且在11个台站参与反演的

情况下, $V_R = 46.3\%$, 结果符合信度要求^[14-15]。具体参数详见表 2, 显示不同方法获得的震源机制解具有较好一致性。此外, 定位结果显示此次地震

震中位于交城断裂与系舟山西麓断裂的延长线上, 震源机制的两个节面走向与震中附近区域构造基本吻合。

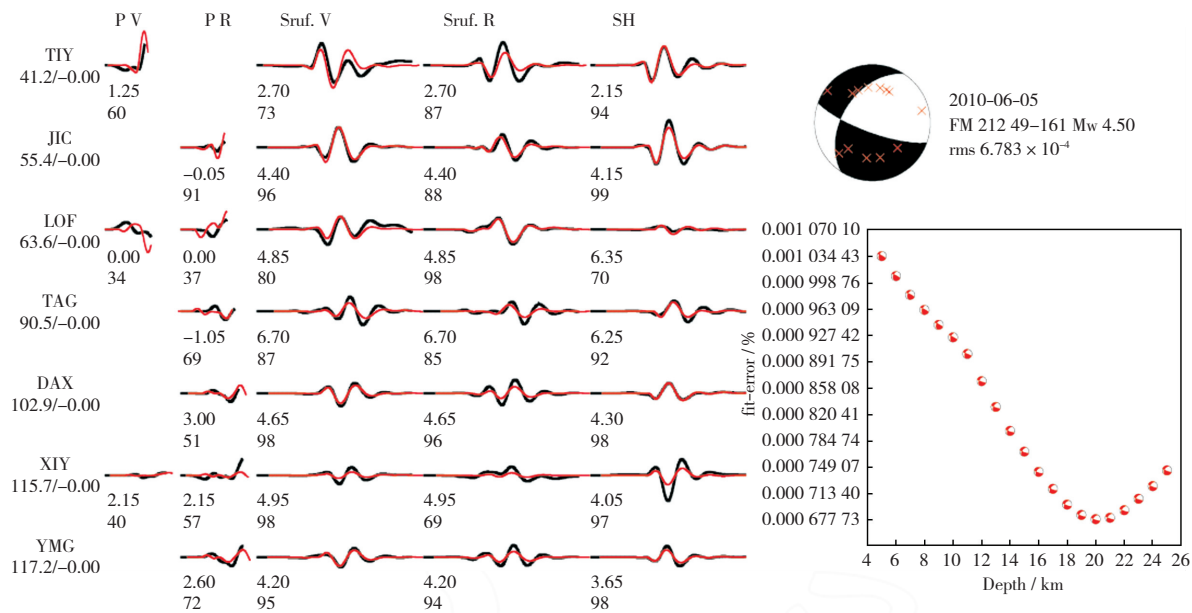


图 8 CAP 方法求解阳曲 $M_L 4.8$ 地震震源机制的波形拟合情况及反演结果

Fig. 8 Waveform fitting and inversion results of focal mechanism of Yangqu $M_L 4.8$ earthquake based on CAP

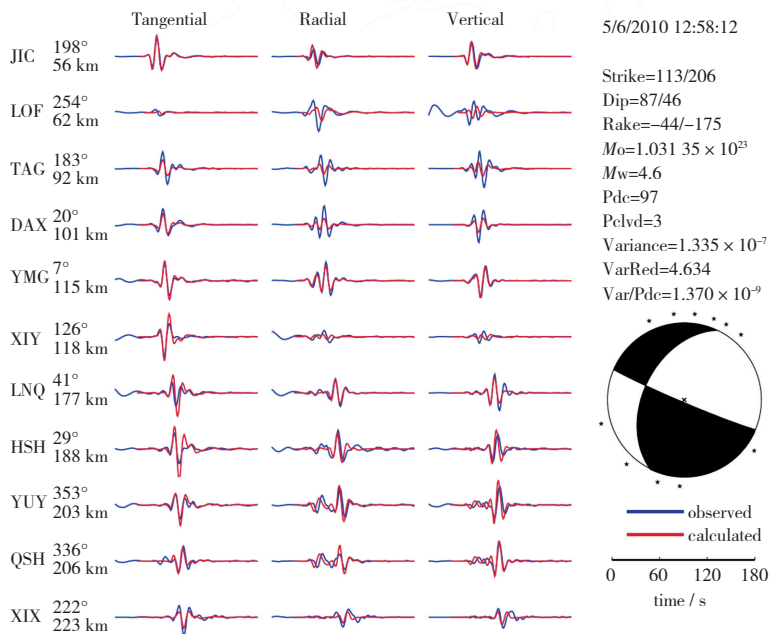


图 9 矩张量反演方法求解阳曲 $M_L 4.8$ 地震震源机制的波形拟合情况及反演结果^[14]

Fig. 9 Waveform fitting and inversion results of Taiyuan $M_L 4.8$ earthquake by moment tensor inversion method^[14]

3 讨论与结论

本文基于山西地震台网数字波形资料, 利用 P 波初动、P 波初动联合 P/SV/SH 振幅比、CAP 全波形反演与矩张量反演等多种方法, 计算了发生在山西地震带的 3 次震级不等、具有代表性的中小地震

的震源机制解。通过由少到多逐步增加参与计算的 P 波初动与振幅比数据, 以及基于不同方法求解结果的对比分析, 全面动态展示了参与计算数据的类型、数量及采用方法对中小地震震源机制解可靠性与稳定性的约束。经反复计算与对比分析, 取得了以下认识。

1) 对于 $M_L 2.0$ 及以下小震的震源机制,基于 P 波初动和 P 波初动联合振幅比仍是当前最适用的求解方法。实际求解过程中,基于 P 波初动获得稳定可靠的震源机制解,理想条件下至少需要 8 个以上对震中包裹性较好的台站记录到较为清晰的 P 波初动。当震级较小、记录台站数量不足时,往往需要联合振幅比来丰富参加计算的数据量。无论从理论推导、以往震例或本文的计算结果,都表明联合振幅比能在一定程度上提高对计算结果的约束^[1,19]。但过多增加振幅比数据的同时会显著增加振幅的矛盾比,需要不断增大振幅比误差才有解,而过大的矛盾比可能会直接影响到震源机制最终解的可靠性。其主要原因,一是振幅比受介质影响较大,特别是 SV 波又同时受到自由表面反射的较大影响,导致在实际操作中过多地增加振幅比数据时引入了较大的数据误差^[17];二是准确读取振幅比还需要更为准确的震相识别,这对震级较小、信噪比不高的地震来说有时更为困难。因此,在台站记录数量较多、波形记录清晰的情况下,仅基于 P 波初动即可获得相对可靠的震源断面解,适当增加振幅比可以对结果起到更好的约束,但过多地引入振幅比有时可能并非是最好的选择。

2) 对于 $M_L 3.0$ 这一级别的显著地震,其震源机制求解方法除传统的基于 P 波初动或 P 波初动联合振幅比方法外,近年来也有不同学者尝试利用 CAP 波形反演和矩张量反演方法求解震源机制解^[10,12]。CAP 方法和矩张量反演方法是否是这一级别地震最佳的震源机制求解方法,CAP 方法与矩张量反演方法获得可靠性震源机制解的震级下限是多少仍然是求解震源机制解时需要关注的问题。本文以台站记录较为理想的太原 $M_L 3.2$ 地震为例,采用 3 种不同的方法分别进行了震源机制的求解并进行了结果间的对比分析。结果表明对于该 $M_L 3.2$ 地震,基于 P 波初动和 CAP 波形反演方法均能给出稳定且信度高的结果,但矩张量反演得到的理论波形与实际波形的拟合程度不够理想, V_R 值偏低,结果置信度较低。

针对矩张量反演方法的震级适用下限问题,笔者系统统计了近年来不同学者基于矩张量反演方法求解不同地区的中小地震震源机制解的计算实例。

如 LI et al^[15] 利用矩张量反演求解山西地震带 $M_L > 3.0$ 地震的震源机制解时,其震级下限为 $M_L 3.7$ 地震;赵韬等^[20] 利用矩张量反演方法求解了陕西、四川和甘肃省地震台网记录到的 165 次地震的震源机制解,其计算震例中的震级下限为 $M_L 3.5$;刘俊清等^[21] 利用矩张量反演方法求解了 2017 年 9 月 23 日朝鲜 $M_L 3.4$ 地震;毛燕等^[22] 对云南数字地震台网记录的 2000 年姚安 $M 6.5$ 地震的余震进行了地震矩张量反演,其震级下限为 $M_L 3.0$ 等等。尽管前人研究结果中有 $M_L 3.0$ 震级的计算实例,但已有大多数震例的震级下限都在 $M_L 3.5$ 或更高。结合前人研究结果与本文实例,认为一般情况下对于 $M_L 3.5$ 或以上的地震选择矩张量反演方法可能更为理想。

3) 对于 $M_L 4.8$ 左右的显著地震,记录台站较多、波形数据的信噪比高,满足多种方法求解震源机制的条件^[23]。本文实例也证明这一点,即对于震级较大的中等地震,只要记录台站数量满足基本要求,无论采用上述哪种方法一般都能求得较为可靠的震源机制解。基于 P 波初动的断层面解反映的是初始破裂情况,而基于波形反演的 CAP 方法与矩张量反演方法,则更好地诠释了整个地震破裂过程,特别对于台网稀疏地区的地震。地震矩张量可以分解为表示断层面剪切错动的双力偶分量(DC)、震源体膨胀或收缩的各向同性分量(ISO)与震源体优势方向的张裂或挤压变形(CLV),加之构造地震通常是由断层两盘的剪切位错触发,因此矩张量能更好地反映断层破裂信息。在条件许可的情况下,矩张量反演方法或许是获得可靠震源机制解的理想选择。

4) 本文以记录较为理想的 3 次代表性中小地震为例,从数据的类型、数据量及采用方法上展示了中小地震获得可靠震源机制解的条件和求解建议。震级较小地震的震源机制的准确求解是当前震源参数研究中一个重要而又复杂的问题,除地震波形记录质量、参与计算台站个数、台站对震中的包围程度等因素外,区域地壳速度结构、发震断层的复杂程度、地震定位误差(特别是震源深度误差)、台站与震中的方位误差等,都会对结果准确性与可靠性产生一定影响^[23],相关问题在今后工作中值得进一步研究。

参考文献:

- [1] SNOKE J A, MUNSEY J W, TEAGUE A G, et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and sv-p amplitude ratio data [J]. Earthquake Notes, 1984, 55(3): 15-20.
- [2] KISSLINGER C, BOWMAN J R, KOCH K. Procedures for computing focal mechanisms from local (sv/p)z data [J]. Bulletin

- of the Seismological Society of America, 1981, 71(6): 1719-1730.
- [3] SNOKE J A. FOCMEC: Focal Mechanism Determinations. International handbook of earthquake and engineering seismology [M]. San Diego: Academic Press, 2013: 85.
- [4] 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.
- [5] DREGER D S. TDMT INV: Time domain seismic moment tensor INVersion[J]. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 2003, 81B: 1627.
- [6] 刘杰, 郑斯华, 康英, 等. 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解[J]. 地震, 2004, 24(1): 19-26.
LIU J, ZHENG S H, KANG Y, et al. The source of small and medium earthquakes was calculated by using the initial motion and amplitude ratio of P wave and S wave mechanisms solution[J]. Earthquakes, 2004, 24(1): 19-26.
- [7] 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 $M_{\text{s}}5.7$ 、 $M_{\text{s}}4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 158-164.
LYU J, ZHENG Y, NI S D, et al. Focal mechanism and seismogenic structures of the $M_{\text{s}}5.7$, $M_{\text{s}}4.8$ Jiujiang-Rui-chang earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(1): 158-164.
- [8] AMMON C, LAY T, KANAMORI H, et al. A rupture model of the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake[J]. Earth Planets Space, 2011, 63(7): 693-696.
- [9] 崔效锋, 胡幸平, 俞春泉, 等. 汶川地震序列震源机制解研究[J]. 北京大学学报, 2011, 6: 1063-1072.
CUI X F, HU X P, YU C Q, et al. Focal mechanism solution of Wenchuan earthquake sequence[J]. Journal of Peking University, 2011, 6: 1063-1072.
- [10] 宋美琴, 李华玥, 韩立波, 等. 用 CAP 方法反演 2010 年 6 月 5 日山西阳曲 $M_{\text{s}}4.6$ 地震震源机制解[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 692-697.
SONG M Q, LI H Y, HAN L B, et al. Inversion of the Yangqu $M_{\text{s}}4.6$ earthquake on June 5, 2010 in Shanxi province by CAP method focal mechanism solution[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 692-697.
- [11] 刘旭宙, 张元生, 秦满忠, 等. 九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ 地震震源机制解及构造应力场研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5): 913-918.
LIU X Z, ZHANG Y S, QIN M Z, et al. Focal mechanism solution and tectonic stress field of the Jiuzhaigou $M_{\text{s}}7.0$ earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 913-918.
- [12] 祁玉萍, 龙锋, 肖本夫, 等. 2017 年九寨沟 7.0 级地震序列震源机制解和构造应力场特征[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 622-634.
QI Y P, LONG F, XIAO B F, et al. Focal mechanism solutions and tectonic stress field characteristics of the 2017 $M_{\text{s}}7.0$ Jiuzhaigou earthquake sequence[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(5): 622-634.
- [13] 彭利媚, 梁向军, 陈祥开. 山西数字地震台网震源参数的测定——以 2015 年 6 月 2 日山西太原 $M_{\text{s}}3.2$ 级地震为例[J]. 高原地震, 2016, 28(3): 1-8.
PENG L M, LIANG X J, CHEN X K. Determination of focal parameters of Shanxi digital seismic network——taking Taiyuan $M_{\text{s}}3.2$ earthquake in Shanxi on June 2, 2015 for an example[J]. Plateau Earthquake Research, 2016, 28(3): 1-8.
- [14] LI B, KUVVET A, MATHILDE B S, et al. Stress pattern of the Shanxi rift system, North China, inferred from the inversion of new focal mechanisms[J]. Geophysical Journal International, 2015a, 201: 505-527.
- [15] LI B, HAVSKOV J, OTTEMÖLLER L, et al. New Magnitude Scales, M_{L} and spectrum based M_{w} for the area around Shanxi rift system, North China[J]. Journal of Seismology, 2015b, 19: 141-158.
- [16] 张淑亮, 刘瑞春, 王霞. 汶川地震前后太原盆地应力场变化特征研究[J]. 中国地震, 2017, 33(1): 46-55.
ZHANG S L, LIU R C, WANG X. The variation characteristics of stress field of the Taiyuan basin before and after the Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1): 46-55.
- [17] HAVSKOV J, OTTEMÖLLER L. Routine data processing in earthquake seismology[M]. New York: New York Springer, 2010.
- [18] REASENBERG P, OPPENHEIMER D. Fpfit, fpplot, and fppage: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions[R]. U. S. Geol: Survey Technical report, 1985.
- [19] 倪红玉, 刘泽民, 沈小七, 等. 利用 FOCMEC 方法计算震源机制解的影响因素分析——以九江-瑞昌 $M_{\text{s}}5.7$ 地震为例[J]. 华北地震科学, 2011, 29(3): 1-7.
NI H Y, LIU Z M, SHEN X Q, et al. Analysis of influencing factors on FOCMEC method-taking Jiujiang-RuiChang $M_{\text{s}}5.7$ earthquake as an example[J]. North China Earthquake Sciences, 2011, 29(3): 1-7.
- [20] 赵韬, 赵曦, 王莹, 等. 区域台网地震矩张量快速反演系统研究[J]. 地震学报, 2016, 38(6): 889-897.
ZHAO T, ZHAO X, WANG Y, et al. Study on the fast seismic moment tensor inversion system using regional seismic network data[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(6): 889-897.
- [21] 刘俊清, 刘财, 张宇, 等. 2017 年 9 月 23 日朝鲜 $M_{\text{L}}3.4$ 地震矩张量反演[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 534-543.
LIU J Q, LIU C, ZHANG Y, et al. The moment tensor of $M_{\text{L}}3.4$ earthquake on September 23, 2017, Democratic People's Republic of Korea (DPRK)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 534-543.
- [22] 毛燕, 王彬, 周光全. 2000 年姚安 $M_{\text{s}}6.5$ 地震 $3.0 \leq M_{\text{L}} < 5.0$ 余震的地震矩张量反演[J]. 地震研究, 2006, 29(2): 131-136.
MAO Y, WANG B, ZHOU G Q. Earthquake moment tensor inversion of the aftershocks ($3.0 \leq M_{\text{L}} < 5.0$) of the 2000 Yao'an $M_{\text{s}}6.5$ earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(2): 131-136.
- [23] 李斌, 李自红, 宋美琴, 等. 山西原平 $M_{\text{L}}4.7$ 地震矩张量反演[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(5): 598-605.
LI B, LI Z H, SONG M Q. The moment tensor inversion of Yuanping $M_{\text{L}}4.7$ earthquake in Shanxi Province[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(5): 598-605.

(编辑: 贾丽红)