

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240221002

国家地震烈度速报江苏子系统 震源机制解产出分析*

杜航, 郑江蓉, 江昊琳, 王俊, 倪昊琦, 李子烨

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 国家地震烈度速报与预警系统江苏子系统震源机制解参数速报集成了 TDMT_INV 方法, 可直接读取震相进行震源机制解反演计算并产出。为验证该方法获得震源机制解的准确性, 选取 2024 年 1 月 17 日江苏东台 3.0 级地震和 2023 年 12 月 7 日江苏赣榆海域 3.8 级地震这 2 次 3 级以上地震, 采用 TDMT_INV、CAP 和 FOCMEC 方法计算其震源机制解, 分析三种方法所得结果差异。东台 3.0 级地震位于江苏预警站网网内, 三种方法都可获得较为稳定的震源机制解结果; 赣榆海域 3.8 级地震位于江苏预警站网网外, TDMT_INV 方法仍可获得较为稳定的震源机制解结果。

关键词: 震源机制解; DMT_INV 方法; CAP 方法; FOCMEC 方法

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0730-05

Analysis of Focal Mechanism Solutions Output of the Jiangsu Subsystem in the National Earthquake Intensity Rapid Reporting System

DU Hang, ZHENG Jiangrong, JIANG Haolin, WANG Jun, NI Haoqi, LI Ziyue

(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: The Jiangsu sub-project of the National Earthquake Intensity Quick Reporting and Early Warning System integrates the TDMT_INV method for rapid reporting of source mechanism parameters, enabling direct reading of seismic phases for inversion calculation and production of source mechanism solutions. To verify the accuracy of this method, this paper selected two earthquakes of magnitudes 3 or above: the 3.0-magnitude earthquake in Dongtai, Jiangsu on January 17, 2024, and the 3.8-magnitude earthquake in Ganyu Sea, Jiangsu on December 7, 2023. The TDMT_INV, CAP, and FOCMEC methods were utilized to calculate their source mechanism solutions and to analyze the differences in results obtained from the three methods. The Donghai 3.0-magnitude earthquake, located within the Jiangsu early warning network, produced relatively stable source mechanism solutions across all three methods. Despite the Ganyu Sea 3.8-magnitude earthquake occurring outside the Jiangsu early warning network, the TDMT_INV method still produced relatively stable source mechanism

* 收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-04-28

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401014)、江苏省地震局青年科学基金(202403)、地震科技星火项目(XH23015A)、江苏省地震局科技创新团队(202201, 202204)资助

作者简介: 杜航(1991—), 男, 工程师, 硕士。主要从事地震监测工作。E-mail: duh@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 郑江蓉(1966—), 女, 研究员。主要从事地震监测预报预警工作。E-mail: 402199707@qq.com

solutions.

Keywords: focal mechanism solutions; TDMT_INV method; CAP method; FOCMEC method

0 引言

江苏地震烈度速报与预警系统是国家地震预警技术系统的重要组成部分,江苏子项目历时近5年,建成了由54个基准站、54个基本站、54个一般站融合构成的综合地震监测站网,台站平均台间距约为15 km;具备完备的数据处理能力,实现了地震烈度速报业务化运行,具备远场大震地震预警能力,地震参数与地震动参数速报能力得到进一步加强;实现地震信息“处理—发布—接收”的全链条贯通。在震后3~10分钟内,能快速自动产出县城和乡镇的地震烈度,烈度速报结果可直接为政府快速把握灾情分布和重灾区位置提供科学依据,为应急救援决策提供科技支撑服务,有效提高救灾效率。

震源机制解可揭示震源附近的应力分布状况,地震发生断层及破裂方向,震后快速、准确地产出震源机制解,对于地震灾害的快速响应和震情研判起着十分重要的作用^[1]。江苏测震台网目前使用FOCMEC(基于P、SV、SH波的初动和振幅比联合反演)^[2]和CAP(Cut and Paste)^[3]方法对不同震级的震源机制解进行反演,杜航等通过陆地、海域2次地震震源机制解计算,分析了2种方法的使用条件^[4]。国家地震烈度速报与预警系统江苏子系统震源机制解参数速报集成了TDMT_INV(Time Domain Moment Tensor Inversion)方法^[5],可直接读取震相进行震源机制解反演,提升了震源机制解计算效率。为了分析江苏子系统自动产出的震源机制解的可靠性,本文选取江苏预警台网记录到的2次3级以上陆地地震和近海地震,采用TDMT_INV、FOCMEC和CAP三种方法对江苏东台3.0级地震和江苏赣榆海域3.8级地震进行震源机制解反演计算,分析TDMT_INV方法所得结果的稳定性。图1为2次地震位置及不同方法反演震源机制解所用台站。

1 震源机制解计算

1.1 江苏东台3.0级地震震源机制解

2024年1月17日江苏盐城市东台市(北纬

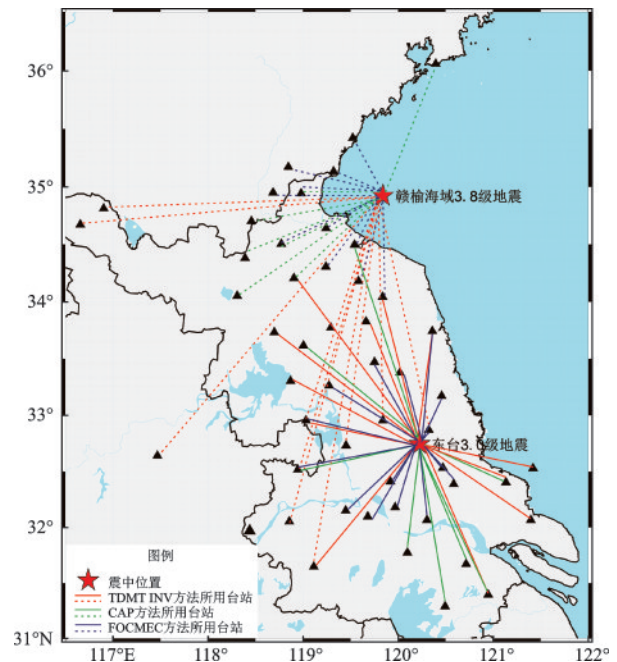


图1 震中位置及不同震源机制解反演所用台站

Fig.1 Epicenter locations and stations used for inversion of different source mechanism solutions

32.75°,东经120.19°)发生3.0级地震,震源深度9 km。该地震位于预警站网网内,震中100 km范围内有7个台站,距震中最近台站34 km,方位角覆盖良好。

MSDP(地震交互分析处理软件)为地震定位分析处理软件,只要标注少量台站波形震相即可进行定位,定位完成后在未标注震相的台站波形上根据定位结果自动生成理论震相。MSDP集成的TDMT_INV软件可自动读取人工标注及理论震相进行震源机制解反演计算,具有方便快捷等优势。首先采用TDMT_INV方法反演计算东台3.0级地震震源机制解,根据波形质量好、台站分布均匀等原则,选取11个震相清晰、方位覆盖均匀的台站波形资料,用于震源机制解反演,计算结果见图2(a)。图中包含震源机制解图形及参数、所用台站位置图及参数、波形拟合图等,可直观展现所计算地震震源机制解及相关参数。最终反演得到震源机制解节面走向358°、倾角75°、滑动角158°。

采用CAP方法计算震源机制解时,需要将人工标注的震相和事件波形导入其中,所需时间较TD-

MT_INV 软件计算时间长。根据波形质量好、台站分布均匀等原则,选取 8 个震相清晰、方位覆盖均匀的台站波形资料,用于震源机制解反演。可以看出 8 个台站的实际波形与理论波形相关系数大于 0.7 的震相占 93%,相关系数大于 0.8 的震相占 73%,表明实际波形与理论波形整体相关性非常好(图 2(b))。最终反演得到震源机制解节面走向 0° 、倾角 75° 、滑动角 162° ,与 TDMT_INV 方法所得结果基本一致。

采用 FOCMEC 方法对该地震震源机制计算时,需要先将该地震事件波形导入,然后准确标注每个台站 P、SV、SH 波震相的极性以及相应的振幅,对震相标注的数量及准确性要求较高,所需要时间在 3 种方法中最长。按 FOCMEC 方法步骤处理,最终得到 P 波初动 18 个、SV 波初动 4 个、SH 波初动 10 个,选取均方差最小的震源机制作为东台 3.0 级地震震源机制最优解,该震源机制解节面走向、倾角、滑动角分别为 359° 、 74° 、 161° (图 2(c))。

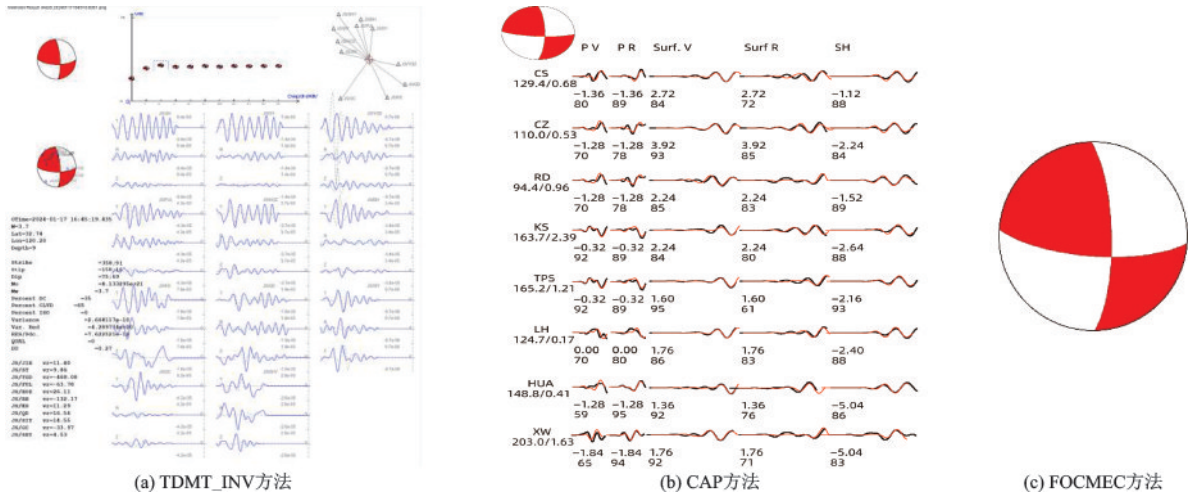


图 2 东台 M3.0 地震震源机制解

Fig.2 Source mechanism solutions of the Dongtai M3.0 earthquake

为验证 3 种方法的稳定性,分别以 3 种结果作为初始解计算中心震源机制和标准差进行对比^[6]。表 1 可以看出以 3 个震源机制解作为初始解得到的中心震源机制差异很小,标准差可以精确到小数点后 6 位,表明 3 种方法所得结果都非常稳定,最终获得最优中心震源机制解其走向、倾角、滑动角分别为 358.98° 、 74.63° 、 160.30° (图 3)。压应力 P 轴走向 47.20° ,倾伏角 2.43° ,不确定范围分别为 $45.69^{\circ}\sim 48.69^{\circ}$ 和 $1.32^{\circ}\sim 3.56^{\circ}$ 。T 轴的走向 316.08° ,倾伏角 24.66° ,不确定范围分别为 $314.57^{\circ}\sim 317.57^{\circ}$ 和 $23.60^{\circ}\sim 25.72^{\circ}$ 。B 轴的走向 142.47° ,倾伏角 65.20° ,不确定范围是 $139.94^{\circ}\sim 145.15^{\circ}$ 和 $64.06^{\circ}\sim 66.39^{\circ}$ 。

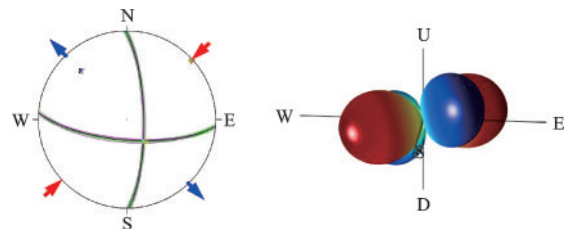


图 3 东台 M3.0 地震中心震源机制解及空间三维辐射花样
Fig.3 Source mechanism solutions and spatial three-dimensional radiation pattern of the epicenter of the Dongtai M3.0 earthquake

3 组解与中心震源机制解都十分接近,各参数误差在正常误差范围内,表明 TDMT_INV 方法在计算预警网网内地震时所得结果稳定。

表 1 东台 M3.0 地震震源机制解及中心震源机制解

Table 1 Comparison of source mechanism solutions and central source mechanism of the Dongtai M3.0 earthquake

序号	机构	震源机制解走向/($^{\circ}$), 倾角/($^{\circ}$),滑动角/($^{\circ}$)	作为初始解得到的 中心震源机制走向/($^{\circ}$), 倾角/($^{\circ}$),滑动角/($^{\circ}$)	作为初始解 得到标准差 S/($^{\circ}$)	中心震源机制与 其他震源机制的 最小空间旋转角/($^{\circ}$)
1	TDMT_INV 方法	358, 75, 158	358.98, 74.62, 160.30	1.755 660	2.28
2	CAP 方法	0, 75, 162	358.98, 74.62, 160.30	1.755 711	1.78
3	FOCMEC 方法	359, 74, 161	358.98, 74.63, 160.30	1.755 499	0.94

1.2 江苏赣榆海域3.8级地震震源机制解

2023年12月7日江苏连云港市赣榆区海域(北纬34.9°,东经119.86°)发生3.8级地震,震源深度8 km(图1)。该地震发生在黄海海域,位于预警站网外,震中100 km范围内有4个台站,偏于陆地一侧,距震中位置最近台站70 km。仍然采用三种不同的方法计算该地震震源机制解,分析TD-MT_INV方法反演计算网外地震时结果的稳定性。

采用TDMT_INV方法开展反演计算,根据波形质量好、台站分布均匀等原则,选取10个台站波形资料用于震源机制解反演,最终反演得到震源机制解节面走向196°、倾角39°、滑动角158°(图4(a))。采用CAP方法反演计算时,选取7个震相清晰的台站波形资料用于震源机制解反演,可以看出7个台站的实际波形与理论波形相关系数大于0.6的震相占86%,相关系数大于0.8的震相占69%,表明实际波形与理论波形整体相关性较好(图4(b))。最终反演得到震源机制解节面走向201°、倾角47°、滑动角159°,与TDMT_INV方法所得结果基本一致。采用FOCMEC方法对该地震震源机制解进行计

算,按FOCMEC方法步骤处理,由于该地震位于海域导致SV波初动难以识别,最终得到P波初动10个、SV波初动0个、SH波初动6个,选取均方差最小的震源机制作为赣榆海域3.8级地震震源机制最优解,该震源机制解节面走向、倾角、滑动角分别为205°、16°、162°(图4(c))。

为验证3种方法的稳定性,同样以3种结果作为初始解计算中心震源机制和标准差进行对比。表2可以看出以3个震源机制解作为初始解得到的中心震源机制差异较小,最终获得最优中心震源机制解其走向、倾角、滑动角分别为199.86°、33.97°、158.81°(图5)。压应力P轴走向62.50°,倾伏角26.33°,不确定范围分别为49.77°~75.77°和18.16°~35.66°。T轴的走向184.33°,倾伏角46.82°,不确定范围分别为171.60°~198.30°和39.85°~53.79°。B轴的走向314.92°,倾伏角31.40°,不确定范围是299.39°~328.90°和19.60°~43.06°。3组解中TD-MT_INV与CAP方法所得结果基本一致与中心震源机制解较为接近,而FOCMEC方法所得结果与中心震源机制解差异较大。这是由于该地震位于海域,地震附近站点稀疏且波形信噪比较差,在使

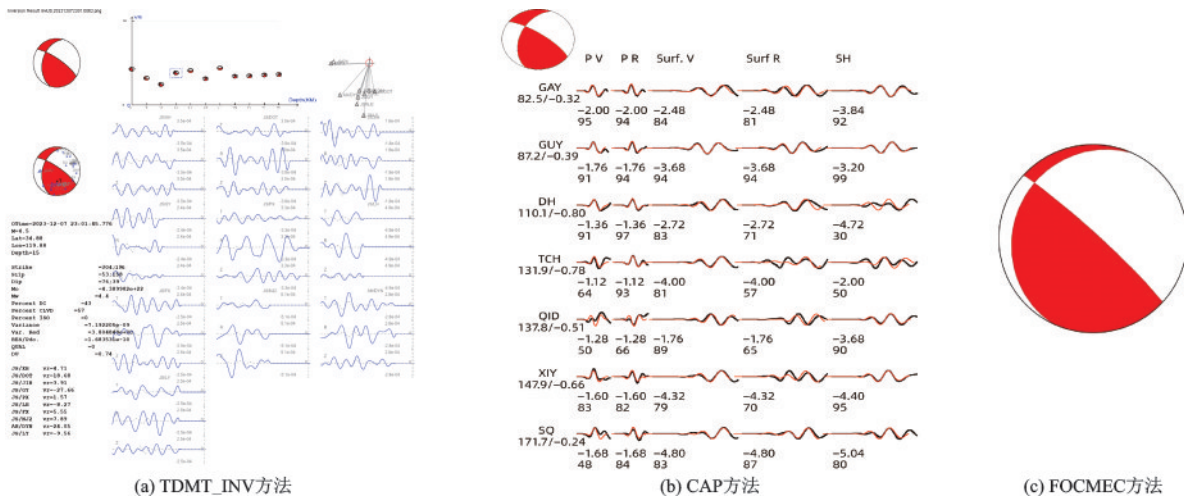


图4 赣榆海域M3.8地震震源机制解

Fig.4 Source mechanism solutions of the Ganyu sea M3.8 earthquake

表2 赣榆海域M3.8地震震源机制解

Table 2 Comparison of source mechanism solutions of the Ganyu sea M3.8 earthquake

序号	机构	震源机制解走向/(°), 倾角/(°),滑动角/(°)	作为初始解得到的 中心震源机制走向/(°), 倾角/(°),滑动角/(°)	作为初始解 得到标准差S/(°)	中心震源机制与 其他震源机制的 最小空间旋转角/(°)
1	TDMT_INV方法	196, 39, 158	199.65, 33.98, 158.62	13.367 081	5.98
2	CAP方法	201, 47, 159	199.86, 33.97, 158.81	13.366 209	13.07
3	FOCMEC方法	205, 16, 162	199.62, 33.97, 158.61	13.367 277	18.15

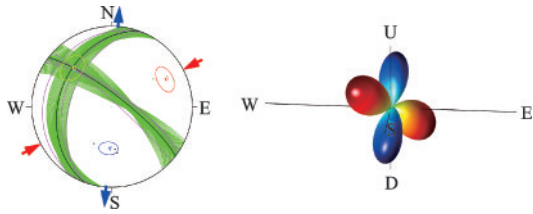


图5 赣榆海域M3.8地震中心震源机制解及空间三维辐射花样

Fig.5 Source mechanism solutions and spatial three-dimensional radiation pattern of the epicenter of the Ganyu sea M3.8 earthquake

用FOCMEC方法时无法获取较为准确的初动信息。因此,TDMT_INV与CAP方法所得结果与中心震源机制解较为接近。由于FOCMEC方法反映的是地震初始破裂情况,而CAP和TDMT_INV方法则反映的是整个地震的破裂过程,因此TDMT_INV方法可更好反映断层破裂信息,在多种方法都可计算震源机制解时可优先选择TDMT_INV方法。

2 结 语

对于江苏预警站网内地震,三种方法所得震源机制解结果都一致,这是由于预警站网网内记录到清晰波形的台站较多,台站覆盖良好,同时波形信噪比较高,满足三种方法求解震源机制解的条件。因此,三种方法都可获得较为稳定的震源机制解结果,其中TDMT_INV方法反演震源机制解所需时间最短,可优先考虑。

对于江苏预警站网外地震,三种方法所得震源机制解结果存在一定的差异,TDMT_INV与CAP方法所得结果与中心震源机制解较为接近,而与FOCMEC方法所得结果倾角存在一定差异。这是由于预警站网网外地震震中附近站点稀疏,且波形信噪比较差。使用FOCMEC方法时无法获取较为准确的初动信息,在此情况下TDMT_INV方法仍能获得较为准确的震源机制解结果。

参考文献:

- [1] 孙业君,黄耘,刘泽民,等.日本 M_w 9.0地震前后郯庐断裂带中南段构造应力场动态变化特征[J].地球物理学报,2022,65(6):2124-2136.
Sun Y J, Huang Y, Liu Z M, et al. Dynamic variation characteristics of tectonic stress field in the middle-southern segment of Tan-Lu fault zone before and after the 2011 Tohoku-Oki M_w 9.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65 (6) : 2124-2136. (in Chinese)
- [2] 刘泽民,黄显良,倪红玉,等.2014年4月20日霍山 M_s 4.3地震发震构造研究[J].地震学报,2015,37(3):402-410.
Liu Z M, Huang X L, Ni H Y, et al. Seismogenic structure of the 20 April 2014 Huoshan M_s 4.3 earthquake in Anhui region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2015,37(3):402-410. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 杜航,郑江蓉,江昊琳,等.利用FOCMEC和CAP方法反演2021年大丰海域M5.0及天宁M4.2地震震源机制解[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4):874-880.
Du H, Zheng J R, Jiang H L, et al. Inversion for the focal mechanisms of the 2021 Dafeng Sea M5.0 earthquake and Tianning M4.2 earthquake using FOCMEC method and CAP method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (4) : 874-880. (in Chinese)
- [5] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data [J]. Journal of Geophysical Research,1993,98(B5):8107-8125.
- [6] 万永革.同一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. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)