

徐泰然,杨志高,徐佳静,等. 2025. 中国地震台网中心震源机制产出系统 2022—2023 年产出情况. 中国地震, 41(1): 88~100.

中国地震台网中心震源机制产出系统 2022—2023 年产出情况

徐泰然 杨志高 徐佳静 杜广宝

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 震源机制解是描述震源特性的重要参数,对了解地震断层的运动方式和动力学机制等具有重要作用。目前中国地震台网中心具备自主产出全球 $M \geq 6.0$ 和中国台站密集地区 $M \geq 4.0$ 地震震源机制解的能力,其通过全球 GSN 共享台和中国区域测震台采用多种反演方法产出,根据不同需求分别产出自动结果和人工复核结果,产出时效性强,目录完整性高。本文介绍了震源机制产出系统主要流程,展示了 2022 年 1 月—2023 年 12 月自动产出结果 527 个和人工复核结果 261 个,并将产出结果进行可靠性分析和评价,表明了中国地震台网中心震源机制结果目录的稳定性和准确性。本文还对比了自动产出结果与人工复核结果,验证了自动产出结果具有较高的可靠性。自动产出结果对震后快速响应、震源破裂过程产出、应急会商等具有重要意义,人工复核结果可为孕震机理研究、区域应力场研究等提供帮助。

关键词: 震源机制 中国地震台网中心 目录产出 复核

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0088-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

震源机制解又称断层面解,是利用地震观测资料来研究地震发生时震源处作用力和断层的错动性质。其可以帮助人们了解断层的破裂类型,能够揭示断层在地震发生时具体的运动情况,是描述地震震源特性的重要参数。该参数可以反映区域构造应力状态,利用震源机制解数据能够对应力场更好地进行研究,解释该地区的孕震环境和动力学机制(樊文杰, 2023),目前已有广泛研究成果(Gephart et al, 1984; 许忠淮, 1985; Michael, 1987; Wan et al, 2016; Xu et al, 2016)。此外,震源机制解有助于快速了解地震断层的可能产状及运动方式等震源信息(Chu et al, 2013; 易桂喜等, 2019; Long et al, 2019),已被广泛应用于震源破裂过程反演、震后灾害评估、地震烈度速报、服务应急救援等。因此,震源机制解的快速产出具有重要意义。

自 2008 年以来,中国地震台网中心(CENC,下称国家台网)陆续编写了多套可自主产出多种震后应急产品的系统(邹立晔等, 2019),同时与多家研究机构共同产出多种震后产品,

[收稿日期] 2024-03-22 [修定日期] 2024-04-25

[项目类别] 国家重点研发计划专题(2021YFC3000701-03, 2021YFC3000705)资助

[作者简介] 徐泰然,男,1992 年生,工程师,主要从事地震学与震源反演等研究。E-mail: xutairan92@seis.ac.cn

供震后应急处置、趋势会商和科学研究使用(徐泰然等,2022)。其中震源机制解作为重要的应急产品之一,早年间因受反演方法的单一化和可用台站数量的限制,仅产出全球 $M \geq 7.0$ 、国内 $M \geq 6.0$ 大震结果,产出时间为震后数小时,时效性不强。随着“十二五”、“十三五”、“十四五”和“国家地震烈度速报与预警工程”等项目的不断推进,中国大陆不断加密布设宽频带区域测震台站,为产出更小震级下限的震源机制解提供了数据支持(赵国峰等,2022;蒋长胜等,2016)。同时,国家台网引入近震波形反演方法产出震源机制解,利用近震波形数据在震后数分钟产出中国大陆事件结果,进一步提升震源机制解产出效率。此外,国家台网还引入其他反演方法产出,对反演结果进行复核,保证结果的可靠性。随着台站数据和反演方法的不断扩充,国家台网的监测能力与震源机制解产出能力进一步提升,产出结果可靠性大幅提高,产出震级范围不断扩大,目前已实现中国大陆 $M \geq 4.0$ 、全球 $M \geq 6.0$ 的结果产出,是目前震后产出震源机制解目录最全的机构之一,相关结果在国家科技资源共享服务平台的地震科学数据中心平台公布(杨志高等,2022)。

2022 年初至 2023 年末是中国乃至全球的一个显著地震活动期,相继发生了中国青海门源 $M6.9$ 、四川泸定 $M6.8$ 、甘肃积石山 $M6.2$ 等造成人员伤亡及大量建筑房屋桥梁和财产损失的大震以及中国台湾花莲 $M6.9$ 、四川芦山 $M6.1$ 、四川马尔康 $M5.8$ 和 $M6.0$ 双震等有影响的地震事件。中国东部地区人口稠密,在此期间发生的山东平原 $M5.5$ 、河北平山 $M4.3$ 、广东源城 $M4.3$ 、广东东源 $M4.5$ 等地震事件同样引起较大关注。在全球范围,该时间段内发生有洛亚蒂群岛 $M7.7$ 、巴布亚新几内亚 $M7.6$ 、墨西哥 $M7.5$ 、塔吉克斯坦 $M7.2$ 、阿富汗 $M6.9$ 等多个全球大震,还发生有土耳其 $M7.8$ 双震等特殊事件,全球地壳板块运动处于相对活跃时期,为这些事件产出准确的震源机制解对深入研究全球地壳活动十分重要。

本文简要概述了世界各国地震监测机构情况和我国国家台网震源机制产出系统,展示了 2022 年 1 月—2023 年 12 月时间段内产出的 527 个地震事件的自动产出结果和 261 个人工复核结果,其中国内 $M_w \geq 5.0$ 事件 45 个,国外 $M_w \geq 7.0$ 事件 26 个,目录涵盖全球与中国大震,是目前产出较为完整的目录。本文对目录进行初步可靠性分析与质量评价,认为产出结果稳定可靠。产出结果对震后快速响应评估、灾害应急救援和地震会商、海啸预警等具有指导意义。

1 反演系统概述

与美国地质调查局(USGS)、德国波茨坦地学中心(GFZ)、全球矩心矩张量(Global Centroid-Moment-Tensor)、欧洲地中海地震中心(EMSC)、日本气象厅(JMA)等全球各大知名地震科学机构相同,国家台网承担全国乃至全球中等震级以上地震的监测业务,并快速发布地震事件的震源参数。早年间,各大机构仅可产出 7 级以上大震的震源机制解,随着防震减灾事业的发展和对人民生命财产安全保护要求的提高,各国震源机制解的产出震级不断下探,产出目录不断增加,使用的方法逐步多样。然而,不同研究对震源机制求解原理方法不同、台站资料不同,同一事件给出的结果不尽相同(崔效锋等,2005)。因此,不同研究者或不同机构对同一地震反演结果是否一致在一定程度上反映了结果的可信度和客观性(徐治国等,2007)。

1.1 反演方法

自定量地震学概念(Aki et al,1980)产生以来,经过多年的发展,前人创造出多种计算震

源机制解的方法,如体波振幅法(Wallace et al,1982)、区域全波形反演(RMT)(Wang et al,1980; Herrmann,2013)、W-phase(Kanamori et al,2008)、剪切粘贴法(CAP)(Zhu et al,1996)、时间域区域反演(TDMT)(Dreger et al,1993)等,每种方法都有其适用范围与优势点,在不同情况下应选择最适用的方法。

在震源机制反演过程中,人们通常将震源分为点源模型和非点源模型,其中点源模型进一步分为单力偶模型和双力偶模型。对于可以用点源近似的地震,可以用矩张量描述,但是天然地震的震源大多发生于断层,震源成分多为双力偶,极少数天然地震含非双力偶成分(Lay et al,1995; Dziewonski et al,1981)。因大多数地震采用双力偶可以更好近似,目前研究中大多默认双力偶来描述震源。国家台网具备利用 W-phase、RMT、CAP 等方法产出震源机制解的能力(默认双力偶模型),针对不同震级段、不同区域范围的地震事件使用不同方法,多种结果互补,防止出现个别地震事件产出异常或方法局限性问题。

对中国 $M \geq 5.0$ 和全球 $M \geq 6.0$ 的地震事件,使用 W-phase 方法(Kanamori et al,2008),基于 GSN 台(图 1)共 232 个台站记录的波形进行远场波形数据反演,台站位置主要分布于全球主要地震带,为大中地震产出较高质量结果提供保障。格林函数基于全球速度模型 PREM 地壳模型(Dziewonski et al,1981)计算。由于该方法使用远场波形数据,结果产出相对较慢,且为保证观测数据信噪比及结果稳定性,反演优势震级为 $M \geq 5.0$ 。

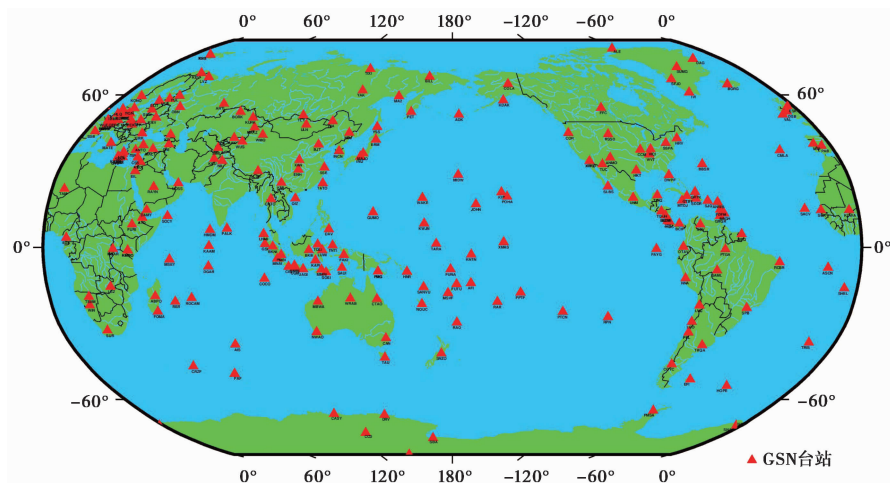


图 1 全球 GSN 台站分布

对于中国地震事件,国家台网自 2021 年初引入近震全波形反演方法(RMT)(Herrmann,2013),并于 2022 年引入 CAP 方法(Zhu et al,1996)对反演结果进行复核评价,该方法在近震产出方面已有广泛的应用(韦生吉等,2009;李圣强等,2013;易桂喜等,2021)。两种近震方法基于宽频带三分量中国大陆国家台与省级区域台共 1145 个台站的波形数据(图 2)进行反演,并随着国家各大项目的实施不断增加观测台站,为我国地震监测提供保障。台站分布的不均匀性和台间距的差别影响了震源机制解产出的时效性和稳定性,其中西部地区台站相对东部地区更为稀疏,西藏北部无人区及新疆部分沙漠地区甚至几百千米内无监测台站,产出能力相对较差,人口密集地区如首都圈、东南沿岸及川滇地区台站密集,产出能力相

对稳定可靠。全国格林函数由各区域速度模型基于 $F-K$ 水平层状模型的频率波数方法 (Zhu et al, 2002) 分别计算得到。近年来随着地震台站的不断增多, 各国学者不断下探反演震级下限, 对数量更多、包含地下信息更丰富的中小地震进行研究。目前国家台网在具备监测能力的部分地区已达到 $M \geq 4.0$ 的产出能力, 台站稀疏地区产出震级下限为 $M 5.0$ 。

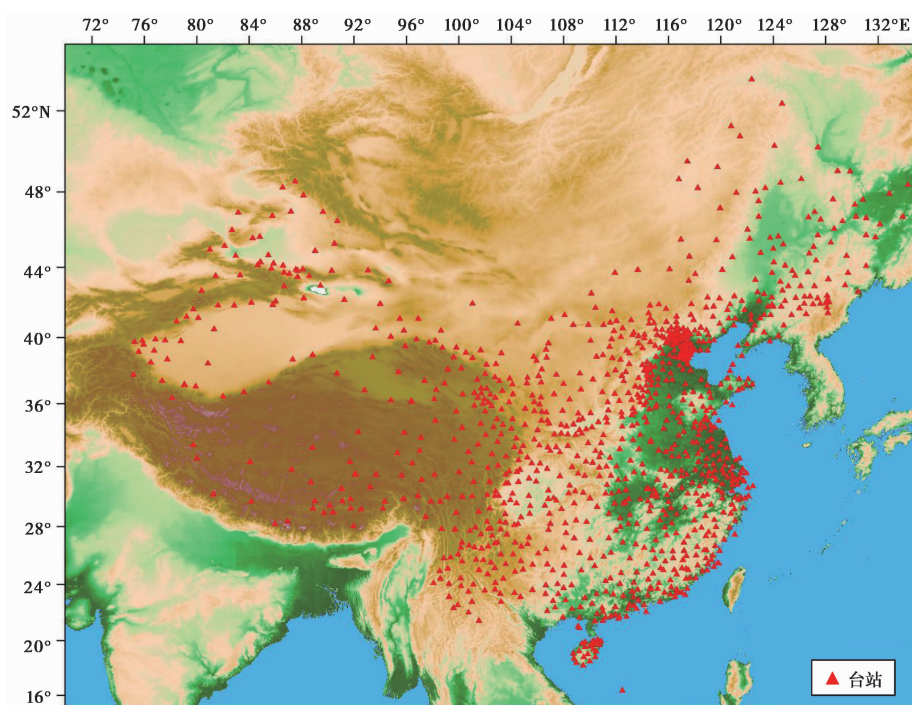


图2 宽频带三分量国家台与区域台分布

1.2 产出流程

国家台网震源机制解产出分为自动与人工复核两个目录。自动产出结果用于震后快速响应、灾害初步评估、产出震源破裂过程和烈度速报、地震预报应急会商等; 人工复核结果用于研究孕震机理、地震趋势分析、区域应力场研究和中长期地震预报等科学领域, 两种模式产出的结果满足了不同方面和不同领域的需求。

在自动产出方面, 每当地震事件发生, 自动检测程序将判断地震的震级和位置, 若事件不符合处理条件 (即国内 $M < 4.0$, 全球 $M < 6.0$), 则略过; 当满足符合条件的地震发生时, 则开始自动处理程序。自动产出以时效性优先, 同时为兼顾结果质量, 对台站有数量、拟合程度及空隙角等参数要求 (图 3)。对于 W-phase 方法, 规定至少需要 8 个地震全球台站波形数据参与反演, 平均拟合度大于 60%, 最大空隙角小于 180° 时产出的结果较为可靠。对于 RMT 方法和 gCAP 方法, 规定至少 3 个区域台站波形数据参与反演, 台站震中距选择 500 km 以内, 平均拟合度大于 60%, 最大空隙角小于 180° 时结果较为可靠。此外, 针对反演时效性、迭代次数等参照其他处理细节 (Yang et al, 2024)。

人工复核目录以稳定性和可靠性优先, 通过人工交互方式重新筛选反演所需的地震台站, 考虑细节更加深入的方位角覆盖、地震波形与理论地震图拟合度、滤波频段、历史地震对

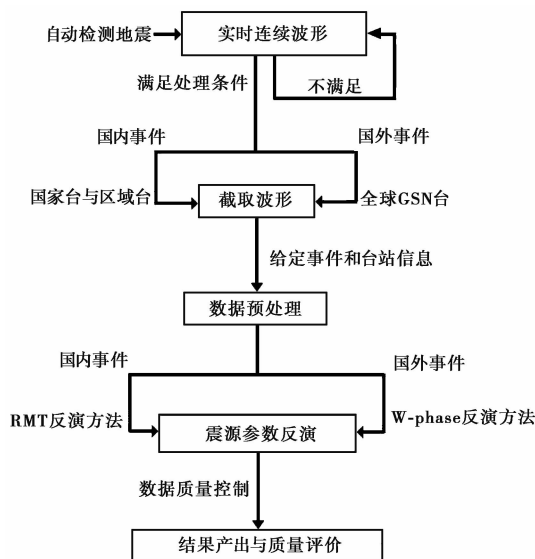


图3 自动产出震源机制流程

比、不同方法互补等方面进行细致复核,并将最终结果及时发布。由于人工复核采取更为严格的数据质量控制,复核目录的总数少于自动产出目录。

这种自动产出目录和复核目录的形式类似于 GCMT 机构,该机构 1 天内会产出快速地震矩张量目录,于震后 2~3 个月启动人工复核模式并发布正式目录(Ekström et al, 2012)。USGS 与 GFZ 机构会在震后产品最快约震后 1h 中产出矩张量反演人工结果,并不断更新反演结果,如 2008 年汶川 $M8.0$ 地震事件,USGS 矩张量反演结果最后一次更新为 2015 年 2 月 12 日。相较于国际其他机构,国家台网产出时效性更快,自动产出目录约震后 5~35min 产出,人工复核目录约震后 1 天发布,并随时更新,快速产出结果与人工复核结果能够同时满足震情快速研判和科学研究等需求。

2 目录产出情况

除个别双震与密集序列震等无法自动识别和产出的情况外,国家台网自 2022 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日共产出国内 $M \geq 4.0$ 和全球 $M \geq 6.0$ 自动震源机制目录 527 次(图 4),该目录反映了此时间段内全球地壳活跃分布情况。自动目录中产出国外事件 171 次,主要分布于全球板块活跃地区,如环太平洋地震带与部分大洋海岭;产出国内事件 356 次,绝大部分地震活动分布于天山和帕米尔高原东侧、青藏高原内部缝合带和塔里木盆地以及川滇块体和中国台湾东部环太平洋地震带,与板块边界长期处于地壳活跃状态相吻合。

人工复核目录产出结果共 261 次,其中国内地震 174 个(图 5),包含 2022 年 8 月 18 日中国台湾花莲 $M6.9$ 、2022 年 1 月 8 日青海门源 $M6.9$ 、2022 年 9 月 5 日四川泸定 $M6.8$ 、2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 $M6.2$ 等 12 个 $M \geq 6.0$ 具有较大影响力的地震。其中积石山地震共造成 100 多人死亡,近千人受伤,成为自 2014 年云南鲁甸 $M6.5$ 地震后生命财产损失最严重的地震。机制类型直接反映了震源区的应力状态和变形过程,同时也是断层面的详细解

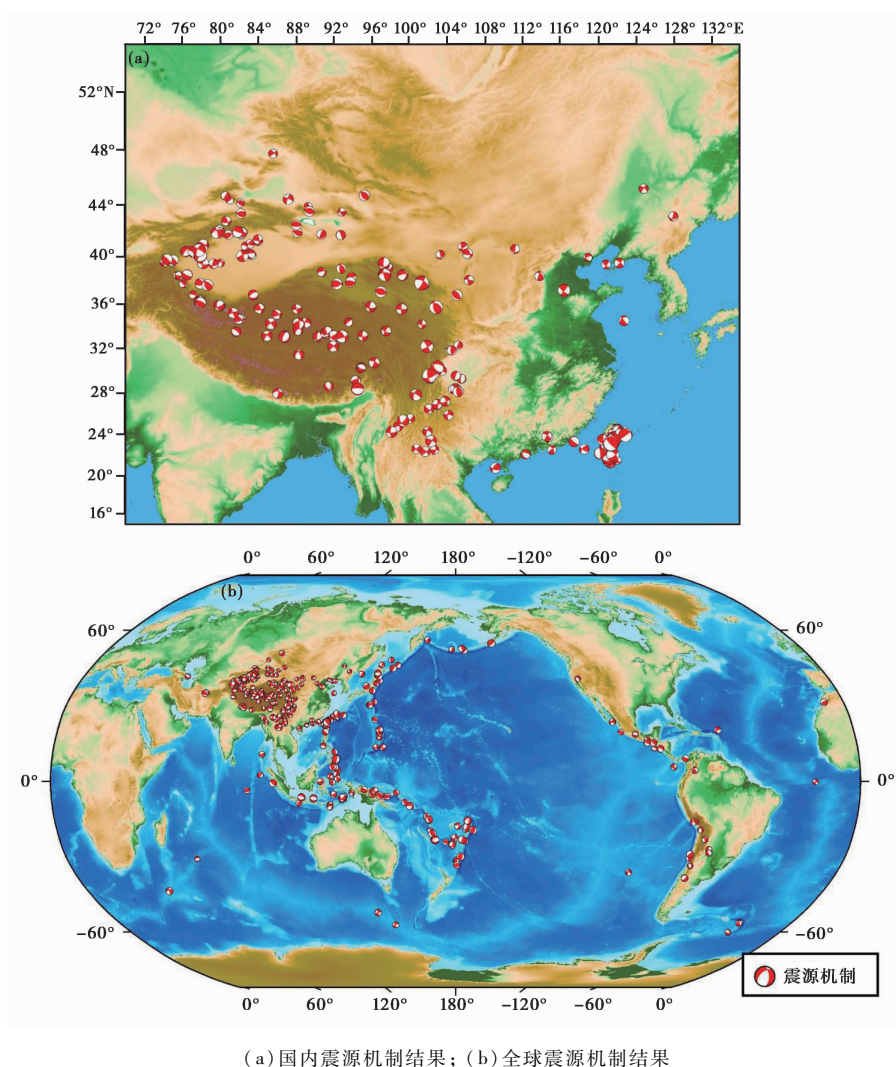


图 4 2022—2023 年国内 $M \geq 4.0$ 、国外 $M \geq 6.0$ 震源机制自动产出结果分布

释,对我国整体应力分布和孕震情况研究具有重要作用。从机制类型来看,利用 P 、 T 、 B 轴倾角参数划分或三角形图解法可将机制类型划分为正断型、逆断型、走滑型和剩余型 (Zoback, 1992; Frohlich, 1992)。近年来 Álvarez-Gómez (2019) 利用 python 程序改进了三角形图解法,使机制类型的划分更加详细。通过改进的三角形分类方法将震源机制结果进行分类 (图 5(b)), 其中纯正断型 (N) 12 个,纯逆断型 (R) 54 个,纯走滑型 (SS) 47 个。三角形中间各类型统称为混合型,其中有正断成分的走滑型 (SS-N) 19 个,有走滑成分的正断型 (N-SS) 12 个,有逆断成分的走滑型 (SS-R) 16 个,有走滑成分的逆断型 (R-SS) 14 个。图 5(a) 中沙滩球通过不同颜色进行区分,其中纯正断型为蓝色,占比最少,为 7%,主要分布在青藏高原东南缘和内部缝合带,这与西藏内部各地体拆离作用和青藏高原东南缘川滇菱形地体右旋作用导致发生正断机制的地震事件相符;纯逆断型为黑色,占比 31%,该地震类型最为常见,主要产生原因为板块间相互挤压对冲,分布于国内大部分地区,以天山断裂带、

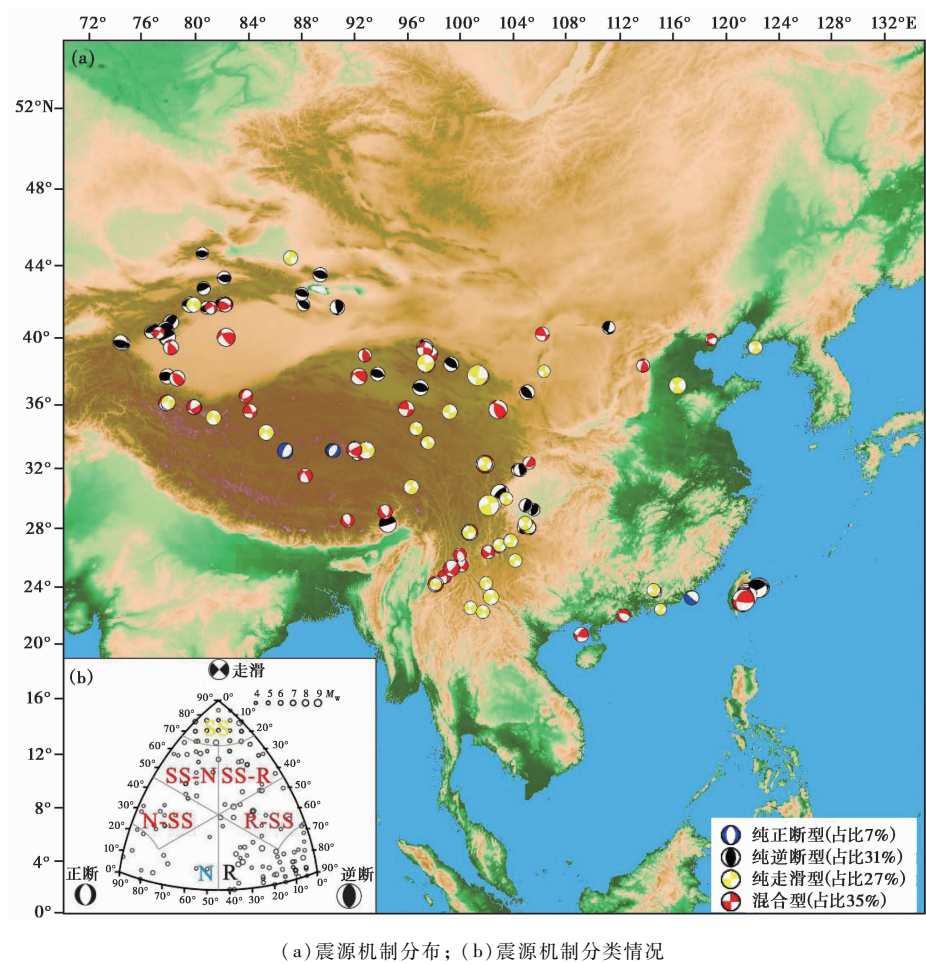
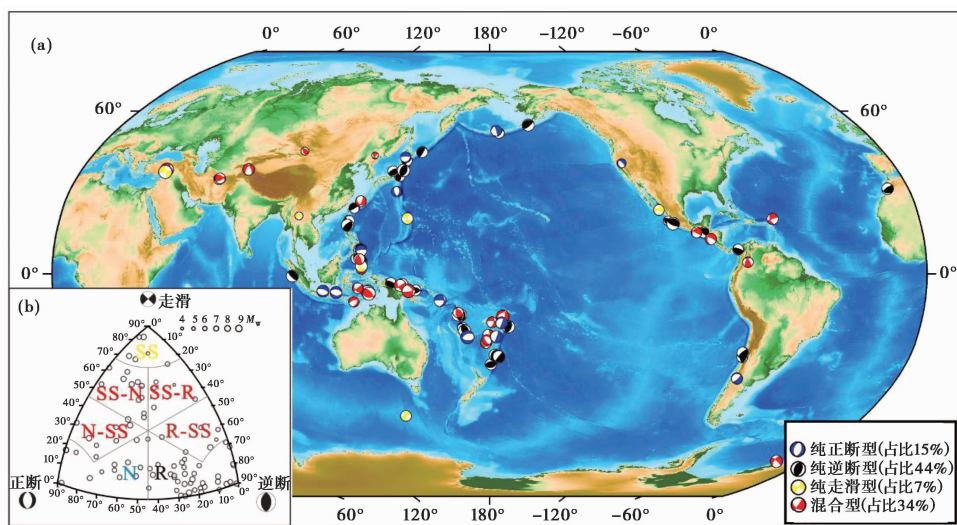


图 5 2022—2023 年国内 $M \geq 4.0$ 震源机制复核结果

青藏高原东北缘和环太平洋带中国台湾地区分布较多;纯走滑型为黄色,占比 27%,主要分布于青藏高原内部与东缘、东北缘,表现为板块挤压过程中导致的侧向逃逸及剪切应力发育等情况,该类型同样在新疆地区、山东平原和广东河源地震中出现。其余四种混合型机制都拥有部分走滑成分,总数占比最高,以红色表示,分布于全国大部分地区。

通过各类型震源机制分布可见,地壳间通过碰撞挤压产生的逆冲型地震的情况最为常见,通过板块间拆沉作用产生正断型地震的情况并不多,且混合型机制地震占比最大,体现出地震的复杂性和多样性。

复核目录产出国外地震 87 个(图 6),主要分布于安第斯山脉、日本沿岸、印尼苏门答腊岛及斐济群岛等环太平洋地震带以及塔吉克斯坦及土耳其等陆地地区,其中最大地震为土耳其两次 $M7.8$ 强震。同样以三角形图解法(图 6(b))得出纯正断型 13 个,纯逆断型 38 个,纯走滑型 6 个,混合型共 30 个。从图 6(a)来看,纯正断型为蓝色,占比 15%,主要分布于北美、日本及印度尼西亚附近;纯逆断型为黑色,占比最大,为 44%,主要分布于环太平洋逆冲地震带;纯走滑型为黄色,占比 7%。可见全球较大地震主要以逆冲碰撞为主。混合型地震



(a)震源机制分布; (b)震源机制分类情况

图6 2022—2023 年全球 $M \geq 6.0$ 震源机制复核结果

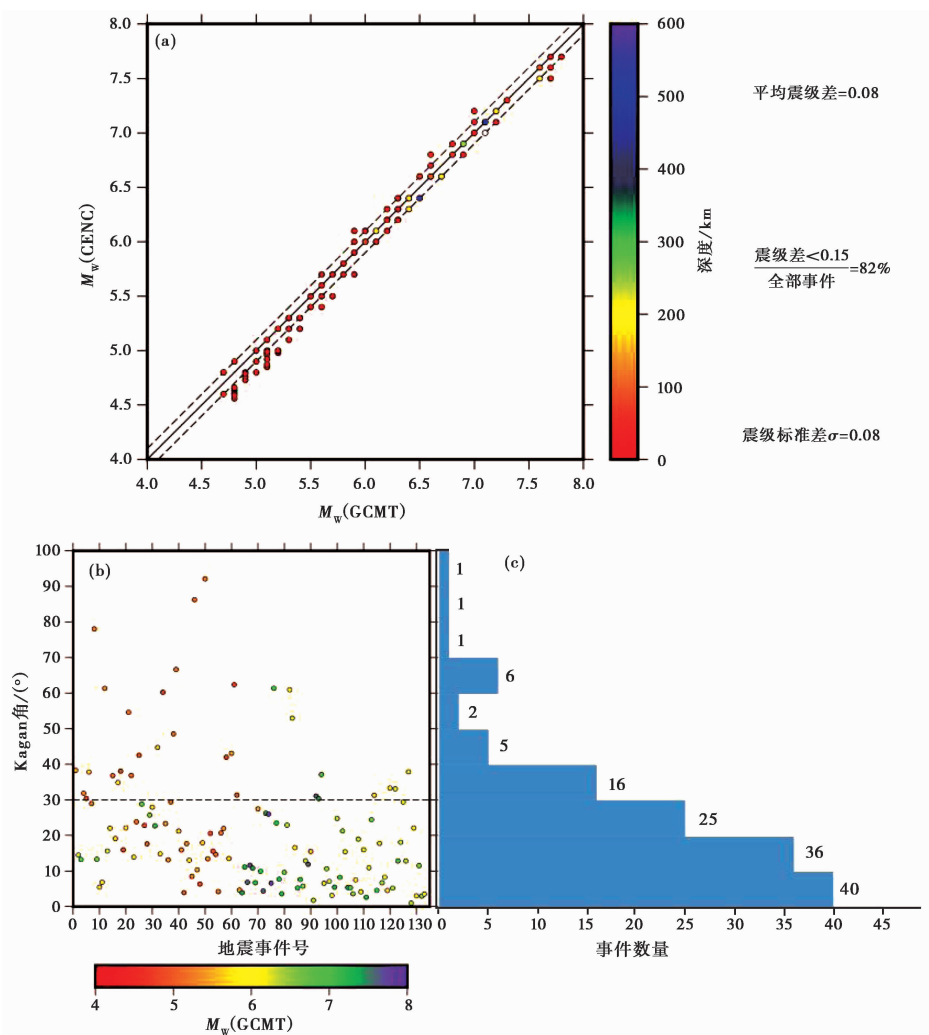
统一用红色表示,占比 34%,同样主要分布于环太平洋带。土耳其 $M7.8$ 双震类型显示为一次纯走滑型,一次混合型,对该事件的深入研究需利用更多地球物理数据。

3 可靠性分析

在复核目录中,国内 $M_w \geq 7.0$ 地震仅一个,为中国台湾花莲 $M_w 7.0$ 地震。 $M_w 6.0 \sim 6.9$ 事件 7 个, $M_w 5.0 \sim 5.9$ 事件 37 个, $M_w 4.9$ 以下事件 129 个。国外 $M_w \geq 7.0$ 事件 26 个,其中最大地震为 2023 年 2 月 6 日土耳其双大震之一的 $M7.7$ 地震和 2023 年 5 月 19 日洛亚蒂群岛 $M7.7$ 地震; $M_w 6.0 \sim 6.9$ 事件 56 个, $M_w 5.9$ 以下事件 5 个。

GCMT 机构作为震源机制解发布权威机构,其地震目录结果较为稳定可靠,尤其是全球大震产出结果。为评价目录产出结果质量,分别从机制和矩震级两方面将国家台网目录与 GCMT 发布结果进行对比。利用双力偶源震源机制三维空间最小旋转角(Kagan Angle)对机制结果进行定量比较(Kagan, 1991、2007),两个震源机制解在空间坐标下通过旋转一定角度可以达到一致,旋转角越小表示两个机制差别越小,反之越大。目前认为 Kagan 角小于 30° 时两组解差异不大(郑建常等,2012),为相同或相近机制。

由于 GCMT 产出震级下限与国家台网不同,且正式目录会延迟 3~4 个月,因此 GCMT 结果少于国家台网,本文将 GCMT 产出的中国和全球共计 133 个地震事件进行对比分析。图 7 给出了国家台网与 GCMT 矩震级与 Kagan 角结果对比,所有地震事件震级处于 $M_w 4.5 \sim 8.0$ 之间,可以看到国家台网矩震级结果多数位于 GCMT 结果 0.1 内,结果较稳定,且多数地震为浅震。在 $M_w \leq 5.5$ 范围内国家台网结果震级偏差较大,有多个地震事件矩震级偏差大于 0.1,且相较 GCMT 结果出现普遍偏小现象,这可能与国家台网对于中小地震采用近台使用近震拟合反演方法有关。通过对比图 7(a)中 133 个事件产出的矩震级,计算得出两家机构平均震级差约为 0.08,其中震级差 ≤ 0.15 的事件占全部事件的 82%,震级差的



注：(a)中两条虚线分别对应与 GCMT 矩震级结果上下相差 0.1 的边界,各圆点颜色表示该地震事件的深度,深度信息以 GCMT 结果为参考。

(a)震级偏差对比；(b)Kagan 角对比；(c)Kagan 角各角度数量

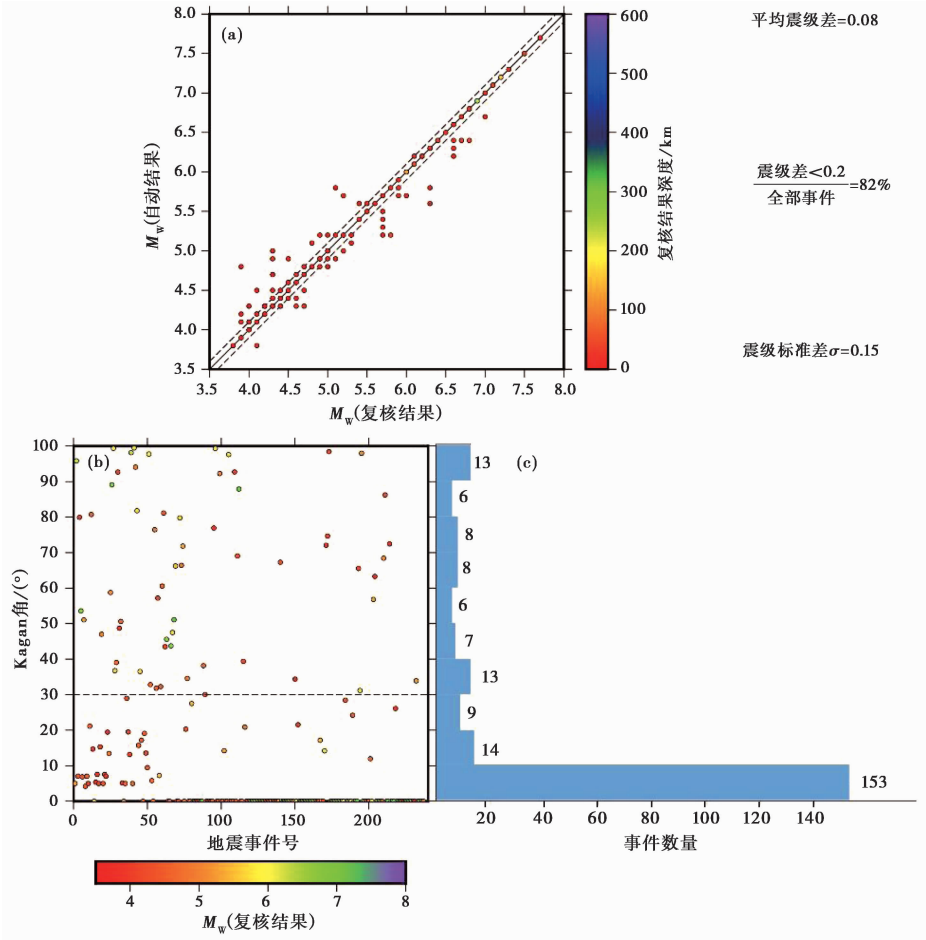
图 7 GCMT 与国家台网对比情况

标准差约为 0.08,可见国家台网矩震级产出可信度较高。

图 7(b)和图 7(c)为两家机构 Kagan 角对比结果。可以看到有 101 个事件 Kagan 角处于 30° 以下,占比约 76%,可见两家机构大多数事件的震源机制结果相近,断层面参数差别不大,其中 Kagan 角大于 30° 地震中多数为 $M_w \leq 5.5$ 事件。不同方法测定的地震事件的震源机制解及矩震级有不同的偏差(万永革等,2001;徐志国等,2007),不同研究者对同一地震测定的 M_w 也有偏差(赵仲和,2013),我们认为误差在合理范围内。

由此可见,国家台网对 2022 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日时间内发生的全球 $M \geq 6$ 、国内台站密集地区 $M \geq 4.0$ 和台站稀疏地区 $M \geq 5.0$ 共 261 个地震事件产出的震源机制解结果可靠性较高。目前产出结果已应用于大震应急产品、科学服务等领域。然而,复核结果在

时效性上有所滞后,而自动化快速产出震源机制结果在震后快速响应和应急救援、地震应急会商等方面具有重要作用,对自动化产出结果的评价同样重要。针对震源机制人工复核目录与自动产出目录相同的 237 个事件进行对比(图 8),其中有 135 个事件复核结果与自动产出结果相同,总体平均震级偏差 0.08,震级差小于 0.2 的事件占比超过 80%。同样使用 Kagan 角对两种结果进行对比,有 176 个事件 Kagan 角小于 30° ,占比约 74%,可见自动产出结果在多数情况下是可靠的。



注：(a)中两条虚线分别对应与人工复核矩震级结果上下相差 0.1 的边界,各圆点颜色表示该地震事件的深度,深度信息以人工复核结果为参考；(b)中各圆点颜色表示该地震的矩震级。

(a)震级偏差对比；(b)Kagan 角对比；(c)Kagan 角各角度数量

图 8 国家台网自动产出结果与人工复核结果对比情况

目前,国家台网产出结果已应用于地震预报紧急会商、大震应急产品、科学服务等领域,目录结果发布在国家地震科学数据中心网站,该目录最大化覆盖了全球发生的所有满足震级要求的地震事件,为全球各地区区域研究提供数据支持,对开展各项研究具有重要意义。

4 结语

本文简要介绍了国家台网反演全球大震和国内大中地震震源机制解的产出系统,包括反演所使用的技术方法、处理流程、产出时效性和产出能力等,展示了 2022 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日国家台网自动系统产出的 527 次震源机制解和 261 次人工复核结果,以及每个事件结果的类型分类,并简要讨论了该时间段内中国和全球地震活动性情况。同时,文中对产出目录进行了可靠性分析与 GCMT 机构结果进行对比,利用双力偶源震源机制三维空间最小旋转角判断机制结果的差异,给出矩震级偏差和标准差,结果显示国家台网产出结果可靠性较高。国家台网产出目录数量多、结果准确,通过自动产出与人工复核结果对比得到自动结果具有较高的可靠性,可服务于震后快速响应、灾害初步评估、产出震源破裂过程和烈度速报、地震预报应急会商等,人工复核结果可为广大研究者进行孕震机理研究、区域应力场研究和中长期地震预报等提供帮助。

致谢: 匿名审稿专家提出了宝贵修改意见,与中国地震台网中心梁建宏正高级工程师和梁姗姗高级工程师进行了有益讨论,本文使用 GMT 作图,在此一并感谢。

参考文献

- 崔效锋,谢富仁,赵建涛. 2005. 中国及邻区震源机制解的分区特征. 地震地质, **27**(2):298~307.
- 樊文杰. 2023. 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s 6.4$ 地震及周边的构造应力场特征和动力学意义. 地震地质, **45**(1):208~230.
- 蒋长胜,刘瑞丰. 2016. 国家地震烈度速报与预警工程——测震台网的机遇与挑战. 工程研究-跨学科视野中的工程, **8**(3):250~257.
- 李圣强,陈棋福,赵里,等. 2013. 2011 年 5 月中国东北 $M_w 5.7$ 深震的非同寻常震源机制: 区域波形反演与成因探讨. 地球物理学报, **56**(9):2959~2970.
- 万永革,周公威,吴忠良,等. 2001. 中国地震震源机制测定结果的比较. 地震地磁观测与研究, **22**(5):1~15.
- 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? 地球物理学报, **52**(1):111~119.
- 徐泰然,戴丹青,杨志高,等. 2022. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 6.8 级地震初步研究结果. 中国地震, **38**(3):412~424.
- 徐志国,刘瑞丰,任泉,等. 2007. 中国地震台网中心与美国哈佛大学快速震源机制解的对比. 地震地磁观测与研究, **28**(4):1~6.
- 许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场. 地震学报, **7**(4):349~362.
- 杨志高,徐泰然,梁建宏,等. (2022-09-26) [2022-01-15]. 中国地震台网中心大震震源机制 CMT 产品. <https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=datasourcelist&dt=ff8080828282b0a5c00182b0ad4ecf0004>.
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, **62**(9):3432~3447.
- 易桂喜,赵敏,龙锋,等. 2021. 2021 年 9 月 16 日四川泸县 $M_s 6.0$ 地震序列特征及孕震构造环境. 地球物理学报, **64**(12):4449~4461.
- 赵国峰,高楠,杨大克. 2022. 国家地震烈度速报与预警工程建设进展. 地震地磁观测与研究, **43**(3):165~171.
- 赵仲和. 2013. 关于震级标度的讨论. 国际地震动态, (2):16~20.
- 郑建常,陈运泰. 2012. 基于 Langston 分解和 Hilbert 变换约束的区域偏量矩张量反演方法及其应用. 地震学报, **34**(2):171~190.
- 邹立晔,黄志斌,周静,等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 $M 6.0$ 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震, **35**(3):573~583.

- Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology, Theory and Methods. San Francisco: Freeman.
- Álvarez-Gómez J A. 2019. FMC—Earthquake focal mechanisms data management, cluster and classification. *SoftwareX*, **9**: 299~307.
- Chu R, Helmberger D V. 2013. Source parameters of the shallow 2012 Brawley earthquake, Imperial Valley. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(2A): 1141~1147.
- Dreger D S, Helmberger D V. 1993. Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data. *J Geophys Res Solid Earth*, **98**(B5): 8107~8125.
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference earth model. *Phys Earth Planet Inter*, **25**(4): 297~356.
- Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J Geophys Res Solid Earth*, **86**(B4): 2825~2852.
- Ekström G, Nettles M, Dziewoński A M. 2012. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13, 017 earthquakes. *Phys Earth Planet Inter*, **200~201**: 1~9.
- Frohlich C. 1992. Triangle diagrams; ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Phys Earth Planet Inter*, **75**(1~3): 193~198.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data; application to the San Fernando earthquake sequence. *J Geophys Res Solid Earth*, **89**(B11): 9305~9320.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research. *Seismol Res Lett*, **84**(6): 1081~1088.
- Kagan Y Y. 1991. 3-D rotation of double-couple earthquake sources. *Geophys J Int*, **106**(3): 709~716.
- Kagan Y Y. 2007. Simplified algorithms for calculating double-couple rotation. *Geophys J Int*, **171**(1): 411~418.
- Kanamori H, Rivera L. 2008. Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning. *Geophys J Int*, **175**(1): 222~238.
- Lay T, Wallace T. 1995. Modern Global Seismology. Cambridge: Academic Press Inc.
- Long F, Yi G X, Wang S W, et al. 2019. Geometry and tectonic deformation of the seismogenic structure for the 8 August 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake sequence, northern Sichuan, China. *Earth Planet Phys*, **3**(3): 253~267.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study. *J Geophys Res Solid Earth*, **92**(B1): 357~368.
- Wallace T C, Helmberger D V. 1982. Determining source parameters of moderate-size earthquakes from regional waveforms. *Phys Earth Planet Inter*, **30**(2~3): 185~196.
- Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, et al. 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos. *J Earth Sci*, **27**(5): 777~785.
- Wang C Y, Herrmann R B. 1980. A numerical study of P-, SV-, and SH-wave generation in a plane layered medium. *Bull Seismol Soc Am*, **70**(4): 1015~1036.
- Xu Z G, Huang Z C, Wang L S, et al. 2016. Crustal stress field in Yunnan; implication for crust-mantle coupling. *Earthq Sci*, **29**(2): 105~115.
- Yang Z G, Xu T R, Liang J H. 2024. Towards fast focal mechanism inversion of shallow crustal earthquakes in the Chinese mainland. *Earthq Res Adv*, **4**(2): 100273.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, **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. *Geophys J Int*, **148**(3): 619~627.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *J Geophys Res Solid Earth*, **97**(B8): 11703~11728.

Production Review of the China Earthquake Networks Center Focal Mechanism Output System from 2022 to 2023

Xu Tairan, Yang Zhigao, Xu Jiajing, Du Guangbao

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The focal mechanism solution is a crucial parameter for characterizing seismic sources, as it plays a significant role in understanding the motion mode and dynamic mechanisms of seismic faults. Currently, the China Earthquake Networks Center (CENC) is capable of independently producing focal mechanism solutions for earthquakes with magnitudes $M \geq 6.0$ in the world and $M \geq 4.0$ within China, utilizing a dense network of domestic stations. Through a variety of inversion methods, the CENC generates both automatic and manually rechecked results, leveraging global GSN (Global Seismographic Network) shared stations and domestic regional seismic stations. This system ensures strong timeliness and high catalog integrity. This paper outlines the main processes of the focal mechanism output system and presents the results from January 2022 to December 2023, including 527 automatic outputs and 261 manually rechecked results. A reliability analysis and evaluation of these outputs are conducted, confirming the stability and accuracy of the CENC's central catalog of focal mechanism results. Furthermore, the study compares the automatic output results with the manually reviewed results, verifying the high reliability of the automatic system. The automatic output of focal mechanism results holds significant value for post-earthquake rapid response, earthquake source rupture process modeling, and emergency consultations. Meanwhile, the manually rechecked results provide valuable support for scientific disciplines such as earthquake mechanism research and regional stress field studies.

Keywords: Focal mechanism; China Earthquake Networks Center; Catalog output; Recheck