引用格式：顾培苑，万永魁，宋泽尧，等，2025. 2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 M_S 7.3 地震对周围及后续 M_S 6.2 地震、M_S 6.3 地震的应力影响[J]. 地质力学学报，31（4）：690−703. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024111

Citation: GU P Y，WAN Y K，SONG Z Y，et al.，2025. Coulomb stress effects of the April 3, 2024 Hualien, Taiwan, China M_S 7.3 earthquake on the surrounding faults and subsequent April 23, 2024 M_S 6.2 and M_S 6.3 earthquakes[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：690−703. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024111

2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 M_S 7.3 地震对周围及后续 M_S 6.2 地震、M_S 6.3 地震的应力影响

顾培苑[1,2]，万永魁[1,2,3]，宋泽尧[1,2]，王润妍[1,2]，关兆萱[1,2]

GU Peiyuan[1,2]，WAN Yongkui[1,2,3]，SONG Zeyao[1,2]，WANG Runyan[1,2]，GUAN Zhaoxuan[1,2]

1. 防灾科技学院地球科学与工程学院，河北 三河 065201；
2. 河北省地震动力学重点实验室，河北 三河 065201；
3. 廊坊市地球探测与信息技术重点实验室，河北 三河 065201

1. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Institute of Disaster Prevention*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
3. *Langfang Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*

Coulomb stress effects of the April 3, 2024 Hualien, Taiwan, China M_S 7.3 earthquake on the surrounding faults and subsequent April 23, 2024 M_S 6.2 and M_S 6.3 earthquakes

Abstract: ［**Objective**］To determine the rupture mode of the M_S 7.3 earthquake in Hualien, Taiwan, China on April 3, 2024 and its triggering effect on subsequent seismic events in the surrounding area, the co-seismic displacement field and the induced areal strain response were analyzed by inverting the geometric structure and sliding characteristics of the seismogenic fault. The static Coulomb Failure Stress (CFS) triggering effect of the main earthquake event on the two M_S 6.2 and M_S 6.3 earthquakes that occurred on April 23, 2024 was evaluated to clarify the promoting effect of this earthquake on the seismic activity and its influence on the stress field of the adjacent area. ［**Methods**］The two possible seismogenic nodes of the main earthquake and its subsequent earthquakes are determined by using the method of "focal mechanism solution". Based on the homogeneous elastic half-space theoretical model, the co-seismic displacement field and areal strain field under seismic action are established. The co-seismic displacement field results of the vertical fault direction of the main shock are analyzed and its sliding characteristics are determined. The CFS variation of the main shock in subsequent seismic events is calculated and its promoting effect on subsequent earthquakes is evaluated. The method of facet clustering is adopted to determine the seismogenic fault plane of the earthquake event. The stress field of the study area is projected onto the seismogenic fault plane and the causes of its occurrence are analyzed. ［**Results**］A co-seismic displacement analysis of the April 3, 2024 M_S 7.3 Hualien earthquake in eastern Taiwan reveals distinct patterns in both horizontal and vertical displacement fields, consistent with a reverse fault mechanism. Based on the focal mechanism solution, this seismic event is identified as a typical reverse fault earthquake, aligning with the tectonic compression between the Eurasian Plate and the Pacific Plate. The horizontal displacement field demonstrates a complex material flow pattern: substantial crustal materials converged towards the seismogenic fault along its southeastern and northwestern flanks, followed by outward migration in northeastern and southwestern directions. This kinematic pattern reflects the

基金项目：国家自然科学基金项目（42174074，41674055，42364005）；中央高校基本科研业务费专项（ZY20240231）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42174074, 41674055, and 42364005) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities (Grant No. ZY20240231).

第一作者：顾培苑（2001—），男，在读硕士，主要从事地震动力学等方面研究。Email：18875698150@163.com

通信作者：万永魁（1989—），男，博士，主要从事地球动力学方面研究。Email：1069839372@qq.com

收稿日期：2024−10−29；**修回日期**：2025−05−19；**录用日期**：2025−05−20；**网络出版日期**：2025−06−12；**责任编辑**：范二平

intense plate convergence where the Pacific Plate subducts westward beneath the Eurasian Plate along the eastern margin of Taiwan Island. Vertical displacement measurements show significant differential movement across the fault. The southeastern block (upper plate) experienced remarkable uplift reaching 48.4 cm, while the northwestern block (lower plate) underwent subsidence of up to 11.4 cm. This vertical displacement configuration, characteristic of thrust faulting, is further confirmed by cross-sectional observations perpendicular to the fault strike. The interface between the upper and lower plates exhibits sharp kinematic contrasts, with the upper plate displaying predominant upward motion components and the lower plate showing downward movements. Along-strike displacement reached approximately 22 cm, significantly exceeding the maximum perpendicular displacement of ～5 cm; this indicates thrust-dominated rupture with minor strike-slip components. The strain field distribution corresponds to a compressive belt parallel to the fault trace near the epicenter, flanked by extensional zones to the immediate east and west. Stress field analysis reveals significant shear stress concentrations (relative shear stress >0.7) and negative normal stresses on the fault planes of three major earthquakes in the sequence, consistent with the compressional regime generated by plate convergence. The westward subduction of the Pacific Plate beneath Taiwan Island creates optimal conditions for thrust faulting along the Longitudinal Valley Fault system, where accumulated shear stress ultimately exceeds the fault strength threshold. Notably, the Coulomb Failure Stress (CFS) calculations demonstrate that the April 3 mainshock significantly promoted subsequent seismic activity. The April 23 M_S 6.3 and M_S 6.2 events occurred in regions where the calculated CFS changes reached 0.020 MPa and 0.3 MPa, respectively, both exceeding the 0.01 MPa threshold for earthquake triggering. This earthquake sequence represents a normal release process of accumulated tectonic stress in the plate convergence zone. The spatial-temporal evolution of co-seismic deformation, strain redistribution, and stress interactions fully aligns with the regional tectonic framework dominated by the ongoing collision between the Eurasian and Pacific Plates. [**Conclusion**] Research shows that the M_S 7.3 earthquake in Hualien, Taiwan, was caused by thrust faults. This earthquake event, along with the two subsequent M_S 6.2 and M_S 6.3 earthquake events that occurred on April 23, 2024, were all normal releases of local stress accumulation. Moreover, the CFS generated by the M_S 7.3 earthquake in Hualien, Taiwan, has a significant impact on the surrounding seismic activities and has an obvious promoting effect on the occurrence of the subsequent two earthquakes. [**Significance**] This study not only evaluates the impact of the M_S 7.3 earthquake in Hualien, Taiwan, on subsequent earthquakes, but also provides a fundamental dataset for geodynamic studies in the region. Strengthening the capacity of earthquake monitoring and forecasting and disaster mitigation promotes the formulation of relevant policies and safeguards people's lives and properties.

Keywords: focal mechanism solution**;** displacement field**;** strain field**;** stress system**;** Coulomb Failure Stress (CFS)**;** M_S 7.3 earthquake in Hualien, Taiwan, China

摘　要：为确定 2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 M_S 7.3 地震的破裂方式及其对周围后续地震事件的触发作用，通过反演发震断层的三维几何结构和滑动特性，解析地震同震位移场及其诱发的地表应变响应，评估主震事件对 2024 年 4 月 23 日发生的 M_S 6.2 地震及 M_S 6.3 地震的库仑应力触发效应，进而阐明该地震对其地震活动的促进作用以及其对邻近区域应力场的影响。利用“震源机制中心解”的方法确定主震及其后续地震的 2 个可能发震节面；基于均匀弹性半空间模型，建立地震作用下的区域同震位移场与地表应变场；分析主震垂直断层走向的位移场结果，确定其滑动特性；计算主震在后续地震事件的库仑破裂应力变化，评估其对后续地震的促进作用；采用节面聚类的方法，确定地震事件的发震断层面；将中国台湾花莲地区应力场投影到地震事件的发震断层面上，分析其发震成因。研究结果表明，水平方向上物质在震中向北东和南西方向流出，南东和北西两侧大量涌入震中，断层南东方向（上盘）出现显著隆升，断层北西方向（下盘）出现明显沉降；垂直方向上断层上盘存在明显向上的运动分量，断层下盘存在明显向下的运动分量；主震对后续地震事件的活动性有促进作用，库仑应力变化均超过 0.01 MPa 阈值；主震及后续地震的产生是当地应力积累后的正常释放。

关键词：震源机制中心解；位移场；应变场；应力体系；库仑破裂应力；中国台湾花莲 M_S 7.3 地震

中图分类号：P315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)04−0690−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024111

0 引言

2024年4月3日，中国台湾东部海岸发生M_S 7.3地震，震中位于纵谷断裂北段（23.81°N、121.74°E），震源深度为12 km（王钦莹等，2024）。此次地震是由于欧亚板块和菲律宾海板块的相互碰撞造成的，菲律宾海板块在台湾岛东部沿着琉球海沟向北西下插到欧亚板块（万永革等，2011a; Jolivet et al., 2018）。近50年来，在此次地震周围50 km之内，已有6次超过7级的地震发生（Wu et al., 2017; 徐龙军等，2024）。1920年在此次地震震源东侧出现的8.2级强震（任枭等，2024），同样与菲律宾海板块和欧亚板块间的俯冲带界面有关。

由于特殊的板块挤压构造，中国台湾东部海岸纵谷断裂区域常有强震发生，在其周边地区也常有中强震发生，近期更是连续发生了多起地震事件（陆东华等，2024）。值得注意的是，除主震发生当日记录到一次M_S 6.0强余震外，时隔仅20 d，又接连发生了M_S 6.3余震和M_S 6.2余震，且这4次强震均分布在长轴为50 km的近南北向椭圆范围内。该区域受板块间相互作用的影响，强震频发，但在不足50 km范围内、如此短的时间里发生多起强震事件却十分罕见。

库仑应力变化是揭示主震对后续地震影响的一种有效方法，通常认为库仑应力变化超过0.01 MPa，则主震触发后续地震提前发生（Harris, 1998）。库仑应力的计算受发震断层和接收断层倾向、倾角及滑动角的影响，如果上述要素其中一项存在差异，即使在相同深度下断层库仑应力变化计算结果也不相同。震源机制解可以获取发震断层和接收断层的走向、倾角及滑动角，但不同机构或学者给出的震源机制解往往存在差异，这给确立断裂深部产状和滑动特征带来困难。万永革（2019）综合国内外不同机构或学者的震源机制解研究成果，采用多数据的联合分析方法，给出了震源机制中心解。该中心解降低了人为和数据偏倚的影响，提高了震源机制解的精度和可信度，为准确计算库仑应力变化奠定了基础。中国台湾东部地区发生的强震，尤其是能获取详细震源参数的地震，可为研究该区域地震间的触发作用及应力场演化提供关键资料。例如，黄少华等（2023）研究了2022年9月17日中国台湾地震序列的触发机制与动力学成因；董非非等（2022）则分析了中国台湾集集地震对福州小震群的动态库仑破裂应力影响。此次M_S 7.3强震的发生，更是为深入探究中国台湾东部地区的应力场特征及其变化提供了宝贵的契机与丰富的数据。

聚焦中国台湾东部地震序列的地球动力学研究，旨在确定2024年4月3日中国台湾花莲M_S 7.3地震的破裂方式及其对周围后续地震事件的触发作用。通过联合分析震源机制解、同震位移场、应变场及库仑破裂应力变化，模拟震源区应力体系，揭示中国台湾东部地震序列的触发机制，分析中国台湾东部地震活动对台湾岛东部断裂带应力场的影响。分析主震对后续地震活动的触发效应，揭示短时间内强震间的关联性，有助于优化灾害应急预案的制定，从而为制定科学防灾策略提供动力学依据，对完善中国台湾东部地区强震发震机制和地球动力学模式具有重要的借鉴意义。

1 2024年4月3日中国台湾花莲地震序列强震的震源机制中心解

1.1 原理

在确定震源机制中心解时，不宜采用合并各震源机制解来求得平均值，而应该考虑多个震源机制解之间的量化差异。采用两两相互垂直、满足右手定则的P、B、T三轴为震源机制解的表达载体。通过对任意2个不同三轴化的震源机制解进行旋转，根据其最后所得旋转量便可以量化地描述任意2个震源机制解之间的区别。从数学意义上讲，这是一个基变换问题，将震源机制解的3个轴向通过三维矩阵表示，即可获得2个震源机制解间的旋转矩阵，然后通过旋转矩阵求出4种不同转动路径下的应力轴夹角，其中夹角最小值代表了不同的震源机制解间的区别，称为最小空间旋转角（万永革，2019）。

1.2 震源机制中心解的计算

收集2024年4月3日中国台湾花莲县M_S 7.3地震现有的震源机制解，相关数据来源见表1。为避免陷入局部极值的困境，选择哪个成果作为初始解成为一个重要问题。将不同的成果分别用作初始解，并反复求取中心解（关兆萱等，2023），并对每一次计算的标准差进行比较（表1）。结果表明，各项

标准差基本相同，差异只限于小数点两位后，中心解稳定。戴盈磊等（2022）建议可将标准差最小的中心解作为最终结果，由此得出：节面Ⅰ的走向、倾角和滑动角分别为 22.55°、58.67°和 78.12°；节面Ⅱ走向、倾角和滑动角分别为 224.58°、33.29°和 108.69°。从表 1 中可知，最小空间旋转角均小于 20°，最小空间旋转角最高为 16.54°、最低为 4.33°，显示不同研究机构及作者的资料集中性较高。根据中国台湾 M_S 7.3 地震震源机制中心解的结果，可以判断此次地震为逆冲型地震（万永革，2022）。

表 1　不同初始解得到的中国台湾花莲县 M_S 7.3 地震相关参数

Table 1　Parameters related to the April 3, M_S 7.3 earthquake in Hualien County, Taiwan, China, obtained by different initial solutions

序号	震源机制解走向/(°)、倾角/(°)、滑动角/(°)	来源	以法属波利尼西亚探测与地球物理实验室的结果作为初始解得到的标准差/(°)	以法属波利尼西亚探测与地球物理实验室的结果作为初始解的中心震源机制解与其他震源机制解的最小空间旋转角/(°)
1	229、28、115	欧洲−地中海地震中心https://www.emsc-csem.org/	9.742806	6.27
2	237、36、119	巴黎地球物理研究所https://www.ipgp.fr/	9.742946	7.55
3	220、23、100	德国地球科学研究中心 https://www.gfz.de/	9.743199	11.48
4	219、34、107	美国地质勘探局https://www.usgs.gov/	9.743203	4.33
5	233、40、122	法属波利尼西亚探测与地球物理实验室https://www.cppt.org/	9.742575	10.62
6	230、38、117	全球矩心矩张量https://www.globalcmt.org/	9.742644	6.88
7	211.3、31.1、86.8	中央研究院地球科学研究所https://www.earth.sinica.edu.tw/ (GRMT)	9.742764	12.95
8	217.2、42.3、89.7	中央研究院地球科学研究所https://www.earth.sinica.edu.tw/ (CMT)	9.742668	16.54
9	228、34、119	张喆 https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280530.html	9.74313	7.73
10	234、41、116	张勇研究组 https://pku-geophysics-source.group/htmls/20240402235808Hualian.html	9.743004	6.43

注：数据来源一列的括号内容为使用的方法

使用相同的方法，分别计算了 2024 年 4 月 23 日台湾 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震的震源机制中心解（表 2），震源位置见图 1。同时，绘制出了这 3 次强震中心震源机制解及空间三维辐射花样（图 2）。

表 2　中国台湾 2024 年 4 月 23 日 M_S 6.3 及 M_S 6.2 地震震源机制中心解结果

Table 2　Focal mechanism solutions for the M_S 6.3 and M_S 6.2 earthquakes in Taiwan on April 23, 2024

震级	节面	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
M_S 6.3	节面Ⅰ	23.45	68.88	86.28
	节面Ⅱ	213.67	21.43	99.53
M_S 6.2	节面Ⅰ	50.50	58.31	96.83
	节面Ⅱ	217.66	32.34	79.10

2　2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 M_S 7.3 地震序列对周围地表及后续强震的影响

2.1　强震在周围产生的位移场及应变场

在已有研究成果的基础上，以 Okada（1992）提出的弹性半空间模型为基础（万永革等，2015），利用美国地质勘探局（United States Geological Survey, USGS）破裂模型，研究 M_S 7.3 强震产生的同震位移场（图 3，图 4）和同震应变场（图 5），从而讨论该地震序列对周围地区物质的运动状态和受力状态的影响（靳志同等，2019）。

水平位移场（图 3）显示，发震断层南东和北西两侧呈现向心汇聚模式，北东和南西方向表现出辐散特征，这客观反映出受菲律宾海板块和欧亚板块的挤压作用导致了地震破裂发生。由发震断层的走向为 23°可知，断层南东方向为上盘，北西方向为下盘。垂直位移场显示，断层南东方向（上盘）出现明显的隆升，断层北西方向（下盘）出现明显的沉降，西北侧表现为沉降（最大 11.4 cm），东南侧表现为大量隆升（最大 48.4cm），这些特征与逆冲断层引起的位移场特点一致。

由于断层深度的位移和浅部的位移可能不一致，垂直剖面上的位移场也能更好地反映断层两侧的运动状态，所以这里计算了垂直于发震断层走向且过震中的剖面 *AA*’上的位移场（图 4）。由图 4 可

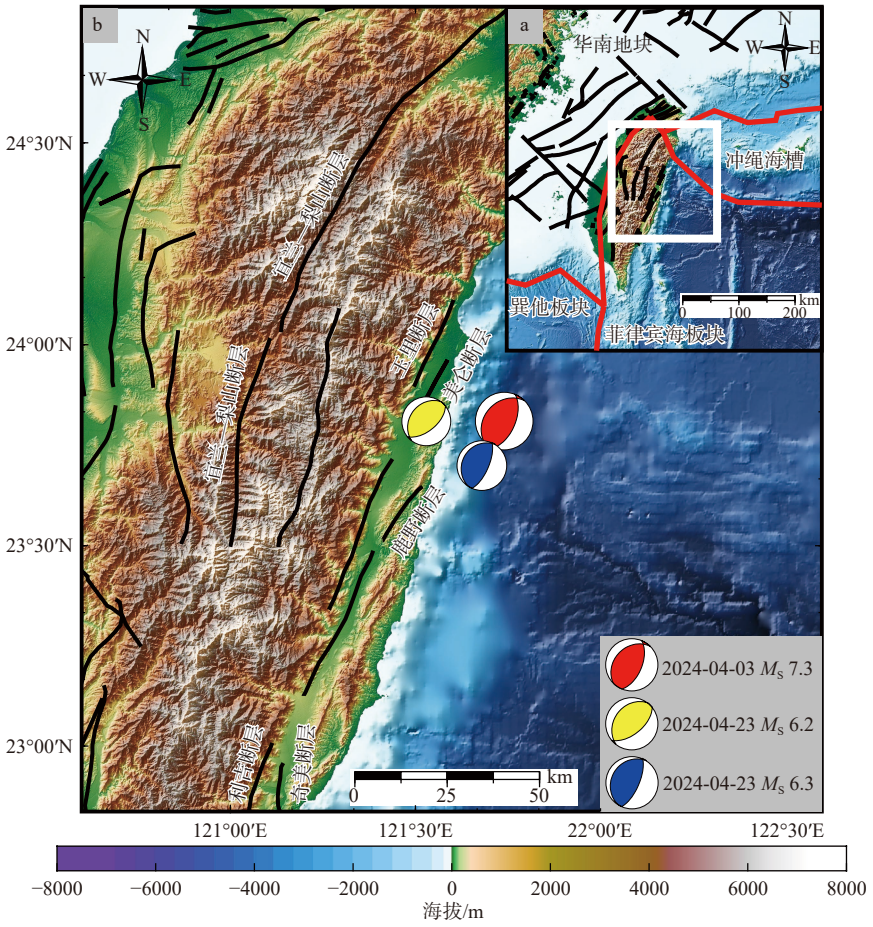


图 a 中白色方框表示图 1b 范围，黑色线条表示断层，红色线条表示小板块边界，其中华南地块、巽他板块属于欧亚板块，菲律宾海板块属于太平洋板块；图 b 中黑色线条表示断层，红色沙滩球是此次中国台湾 M_S 7.3 地震，蓝色及黄色沙滩球表示该区域 2024 年 4 月 23 日的后续地震 (https://www.globalcmt.org)

a—中国台湾地区构造概况图；b—中国台湾东部花莲地区地震分布和构造概况图（据方成勇等，2024；胡晓斌，2024；Li et al., 2025 修改）

图 1 中国台湾花莲地区地质构造背景

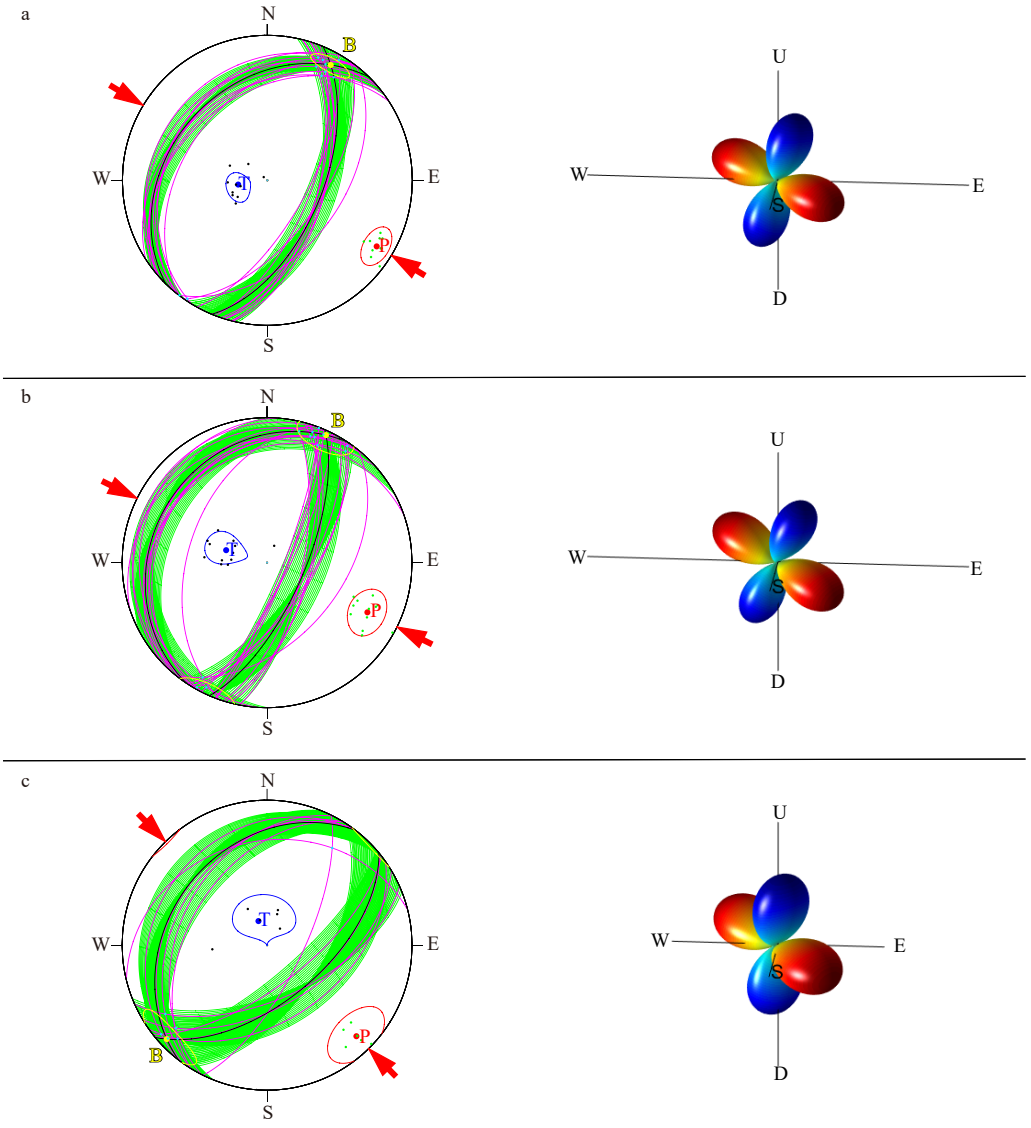
Fig. 1 Geological tectonic background of the Hualien area, Taiwan, China

(a) Tectonic setting map of Taiwan, China; (b) Seismicity and tectonic framework of the Hualien area, eastern Taiwan (revised after Fang et al., 2024; Hu, 2024; Li et al., 2025)

In Fig.1a, the white box represent the range of Fig.1b, the black lines indicate faults, and the red lines represent the boundaries of small plates. Among them, the Yangtze River Plate and the Sumatra Plate belong to the Eurasian Plate, the Philippine Sea Plate belongs to the Pacific Plate. Black lines in Fig.1b denote faults, red beach ball is the Chinese Taiwan M_S 7.3 earthquake, blue and yellow beach ball indicate subsequent earthquakes in the same region on April 23, 2024 (https://www.globalcmt.org)

以看出，断层的上盘与下盘之间的界面清晰可辨，上、下盘物质在空间上的运动显著不同。从断层两侧物质在剖面上的位移可以看出，下盘存在明显向下的运动分量，上盘存在明显向上的运动分量，两盘的相对运动形成了逆冲断层构造样式，与花莲地震序列产生的地表的同震位移场相对应（图 3）；从断层两侧物质垂直剖面的位移可以看出，断层下盘区域的物质主要沿垂直于剖面的方向向外运动，而上盘区域的物质则主要沿垂直于剖面的方向向内运动。此外，垂直于剖面的位移相对较小，最大值和最小值的绝对值均约为 5 cm，而沿剖面的位移最大约为 22 cm，即沿剖面的位移远大于垂直于剖面的位移，这恰恰说明发震断层的此次破裂主要是以逆冲为主，且具有一定的走滑分量。

除上述特征之外，剖面 *AA*’上的位移场还表现出与经典逆断层产生的运动特征不同的地方（图 4）。如断层下盘的垂直向下位移分量随着远离剖面而逐渐衰减，且位移矢量箭头随深度增加呈现整体逆



图中 N、S、W、E 表示地理方位北南西东，U、D 表示上、下；黑色弧线代表了中心震源机制解的 2 个节面，而绿色弧线所占的面积则是其不确定区间；红、蓝、黄 3 个点代表了中心震源机制解的 P、T、B 轴，其外围相应色彩所组成的闭合曲线表明其不确定范围；绿点、黑点分别代表了由以往获得的震源机制解在 P、T 轴上的投影；紫弧代表了以往所获得的震源机制解节面；压缩区为蓝色，膨胀区为红色（万永革等，2011b; 李佺洪和万永革，2024）

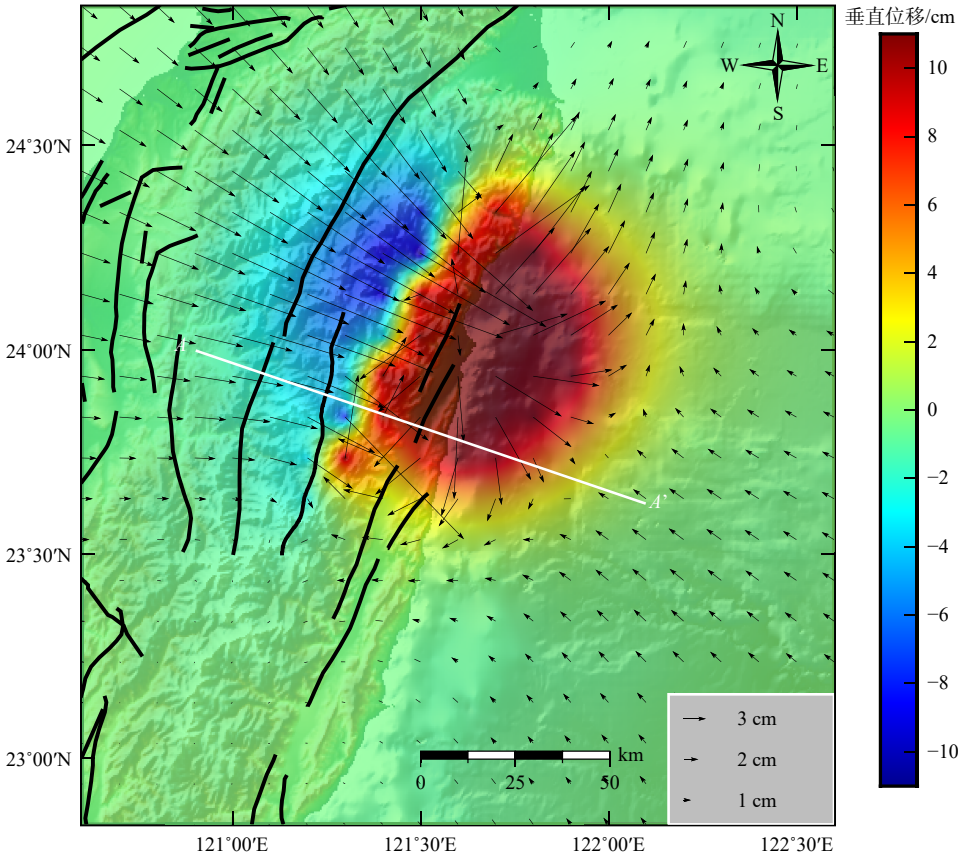
a—M_S 7.3 地震的中心震源机制解及空间三维辐射花样；b—M_S 6.3 地震的中心震源机制解及空间三维辐射花样；c—M_S 6.2 地震的中心震源机制解及空间三维辐射花样

图 2　中国台湾花莲 M_S 7.3 地震、M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震的中心震源机制解及空间三维辐射花样

Fig. 2　Focal mechanism solutions and 3-D radiation patterns for the M_S 7.3, M_S 6.3, and M_S 6.2 earthquakes in Hualien, Taiwan, China

(a) Focal mechanism solution and 3-D radiation pattern for the M_S 7.3 earthquake; (b) Focal mechanism solution and 3-D radiation pattern for the M_S 6.3 earthquake; (c) Focal mechanism solution and 3-D radiation pattern for the M_S 6.2 earthquake

In the figure, N, S, W, and E represent the geographical cardinal directions of north, south, west, and east, while U and D represent upward and downward orientations respectively. The black arcs represent the two nodal planes of the focal mechanism solution, while the areas occupied by the green arcs are their uncertainty intervals; the red, blue, and yellow dots represent the P, T, and B axes of the focal mechanism solution, and the closed curves formed by the corresponding colors of its periphery indicate its uncertainty range; the green and black dots represent the projections of the focal mechanism solution obtained by each research institution or individual on the P and T axes, respectively; the violet arcs represent the nodal plane of the focal mechanism solution obtained by each research institution or individual; the compression zone is blue and the expansion zone is red (Wan et al., 2011b; Li and Wan, 2024)



图中箭头代表此次地震所产生的水平位移，其量值与图例箭头长度按比例对应；黑色线条表示断层，主要断层名称同图 1；图中白色直线 *AA*’ 表示近垂直断层走向的过 2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 M_S 7.3 地震震源剖面与地表的交线；垂直位移中上升为正

图 3 花莲地震序列产生的同震位移场

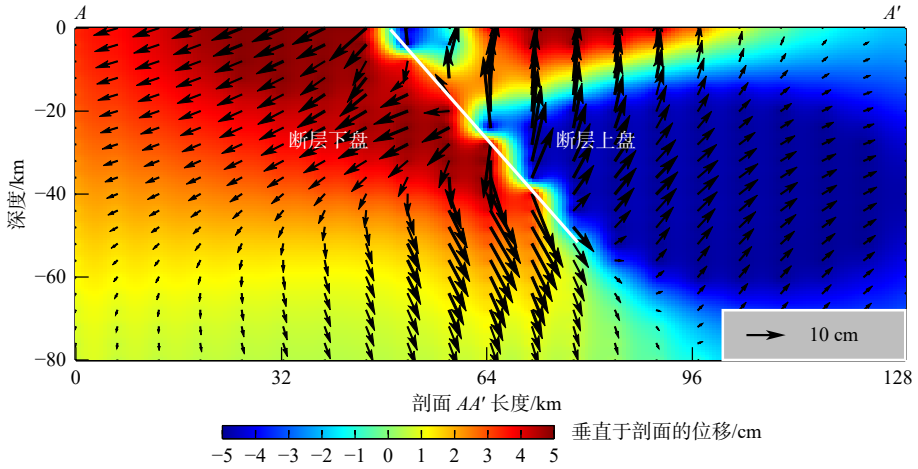
Fig. 3 Co-seismic displacement field generated by the Hualien earthquake sequence

The arrows in the figure represent the horizontal displacement caused by this earthquake, and their values correspond proportionally to the lengths of the arrows in the legend; the colors represent the vertical displacements, and the rise is positive; the black lines represent the faults, and the names of the major faults are the same as in Fig1; the white straight line *AA*’ in the figure represents a near-vertical fault-trending over the intersection of the source profile and the surface of the April 3, 2024, Hualien, Taiwan, China, M_S 7.3 earthquake

时针旋转趋势；断层上盘的垂直向上位移分量也随着远离剖面而逐步减小，其位移矢量箭头随深度增加表现出整体顺时针旋转趋势。已有研究（Ziwu et al., 2020; Wang et al., 2025）表明菲律宾海板块以西北向运动方式向欧亚板块下方俯冲，在此过程中，板块间的强烈挤压作用导致上覆板块发生显著变形，浅层位移矢量发生偏转；而深层物质受板块俯冲拖拽效应影响，导致位移矢量方向随深度逐渐调整。因此研究认为位移矢量箭头随深度的变化特征可能与欧亚板块和菲律宾海板块之间的逆断层活动机制密切相关，这种浅部挤压与深部拖拽的耦合作用机制，最终导致断层周围的位移场在垂直方向上呈现出复杂的空间分布格局。花莲地震序列产生的应变情况如图 5 所示，在震中附近呈现与断层平行的压缩条带，而紧挨震中压缩条带近东侧和西侧由于板块挤压产生的物质涌入致其呈现拉张状态，随着与震中之间距离的增大，应变逐渐呈现平衡状态。在面应变为负的区域内，物质的运动方向（图 3）与主压应变大体一致，而面应变为正的区域内，物质的运动方向（图 3）与主张应变大体一致。

2.2 M_S 7.3 地震对 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震的触发作用

距中国台湾 M_S 7.3 地震发生后的 20 d，该地区又发生了 M_S 6.3 地震和 M_S 6.2 地震 2 次强震。为探讨中国台湾花莲 M_S 7.3 强震与 M_S 6.3 地震、M_S 6.2 地震之间的联系，使用（万永革等，2010）给出的方法，以 M_S 6.3 地震和 M_S 6.2 地震为研究对象，计算



图中箭头表示此次地震在剖面 *AA*’不同深度产生的位移，其量值与图例箭头长度按比例对应；位移垂直于剖面向外为正；白色线条表示有限断层在剖面 *AA*’上的投影

图 4　花莲地震序列产生的垂直断层走向的剖面 *AA*’上的位移场（剖面位置见图 3）

Fig. 4　Displacement field on the vertical fault-trending profile *AA*’ produced by the Hualien earthquake sequence (the section position is shown in Fig.3)

The arrows in the figure represent the displacements produced by this earthquake at different depths of the *AA*’ section, and their values correspond proportionally to the lengths of the arrows in the legend; the colors represent the displacements perpendicular to the profile, outward is positive; the white lines represent the projections of the finite faults on the profile *AA*’.

了 M_S 7.3 地震在其地震节面上的库伦破裂应力变化（Jaeger et al., 2007），这种变化可以有效反映 M_S 7.3 地震对后续地震产生的影响。库仑破裂应力变化（$\Delta\sigma_f$）的表达式如下：

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n \tag{1}$$

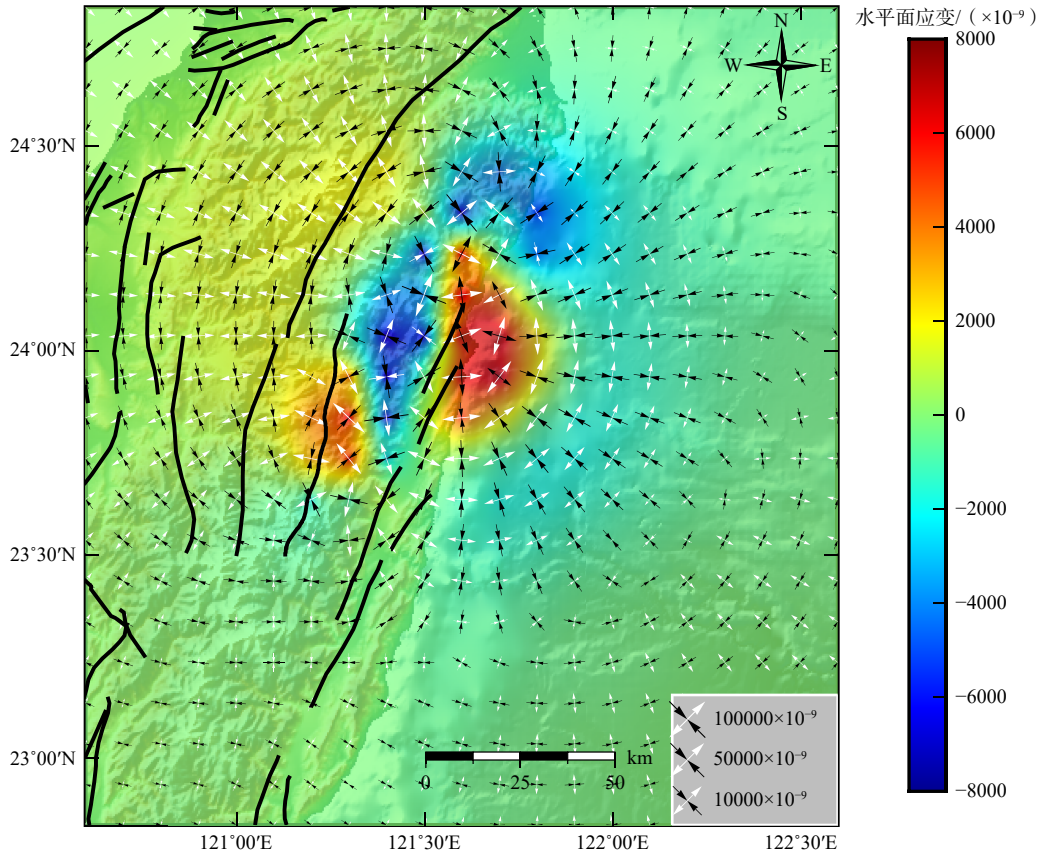
式中，μ'—视摩擦系数；$\Delta\tau$—剪应力变化；$\Delta\sigma_n$—法向应力的变化。

文中视摩擦系数为 0.2～0.8，延续已有经验（King et al., 1994; Harris, 1998; 万永革等，2010），在考虑到地下介质可能含有孔隙流体和断层面介质特性的基础上，取值为 0.4；如果因地震而产生的剪应力变化与所接收的断层面的滑移方向相同，其为正值；法向应力的变化为正值时，表示为拉张。

此次采用 M_S 7.3 地震的 USGS 资料作为破裂模型，模型的子断层共 225 个，长和宽均为 7 km，走向和倾角统一分别为 26°和 58°。在采用 USGS 的破裂模型的同时，结合上文给出的中国台湾 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震的震源机制中心解，以其节面 I 作为此次触发作用研究的接收断层面（李瑶等，2017; 靳志同等，2019; 李振月等，2020）。在 M_S 6.2 地震受触发作用的计算中，考虑到了先于其发生的 M_S 6.3 地震影响，在计算过程中，除了 USGS 的 M_S 7.3 地震破裂模型外，还加入了利用 Wells and Coppersmith（1994）给出的统计公式计算得出的 M_S 6.3 地震模型。设置接收断层的深度为 10 km，与 M_S 6.3 地震、M_S 6.2 地震的震源深度相等。计算出 M_S 7.3 地震在断层面及滑动方向上对震后仅 20 d 发生的 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震产生的库仑破裂应力变化，结果见图 6。地震断层面处于应力卸载的位置，由于主震的破裂，该处地壳应力得到释放，应力向其他地方传递，震源处需要较长时间的构造应力积累才可能聚集到再次发生地震的应力阈值。2024 年 4 月 23 日 2 次 6 级以上地震均处于触发区内，且处于库仑应力变化的高值区。2 次地震处的库仑应力变化均超过 Stein et al.（1992）提出的作为判断地震是否可能被触发的经验性阈值 0.01 MPa，其中最大值为 M_S 6.2 地震引发的 0.30 MPa，M_S 6.3 地震引发的库仑应力变化较小，也达到了 0.02 MPa，这说明 M_S 7.3 地震的破裂影响了该地区的地震活动性。

3　区域构造应力与中国台湾地震发生的关系

基于 GCMT 收录的中国台湾花莲地区 1976 年 1 月 1 日以来 172 条震源机制解数据，在聚类数为



黑色箭头和白色箭头分别表示水平主压应变和水平主张应变；色标表示水平面应变，拉张为正；黑色线条表示断层，主要断层名称同图 1

图 5 花莲地震序列产生的水平主应变和面应变场

Fig. 5 Horizontal principal and areal strain fields generated by the Hualien earthquake sequence

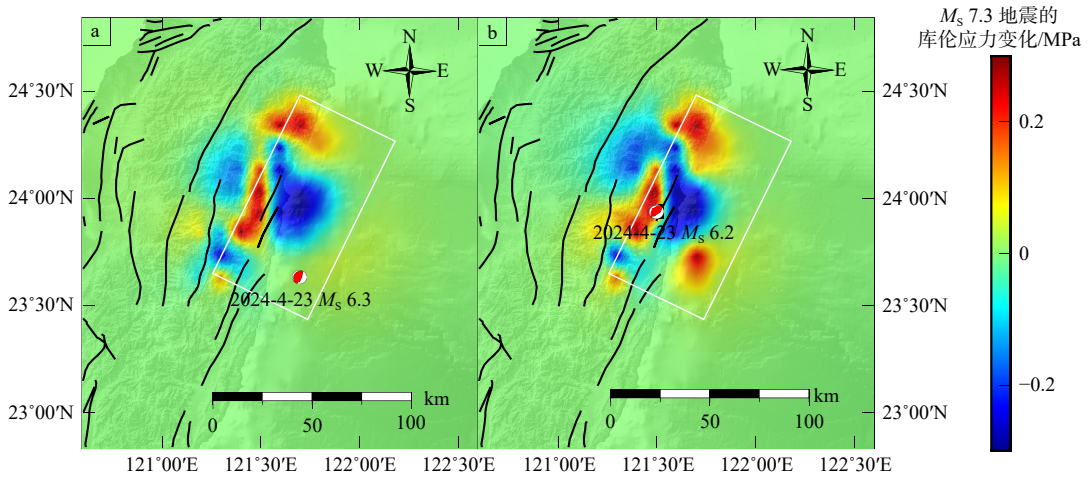
Black arrows and white arrows indicate horizontal principal compressive strain and horizontal assertion strain (in units of 10^{-9}); the background color indicates the horizontal areal strain, which is positive in tension; black lines indicate faults, and the names of major faults are the same as those in Fig.1.

2 的情况下，采用万永革（2022）提出的聚类方法，得出以下震源机制解节面聚类结果（图 7）：第 1 类中的节面个数为 39，第 1 类节面法向轴的标准差为 7.15°，断层面走向为 226.37°、误差范围为 217.24°～239.08°，倾角为 26.02°、误差范围为 31.77°～21.62°，断层面法向的走向为 136.37°，倾伏角为 63.98°；第 2 类中的节面个数为 14，第 2 类节面法向轴的标准差为 6.05°，断层面走向为 51.87°、误差范围为 47.39°～56.35°，倾角为 64.54°、误差范围为 58.73°～68.87°，断层面法向的走向为 321.87°，倾伏角为 25.46°。

由结果可知，第 1 类节面的标准差（7.15°）大于第 2 类节面的标准差（6.05°）。另外，USGS 选择的最优震源机制解走向和倾角为 26°和 58°，这与得到的震源机制中心解的节面 I 资料更加接近，因此选择节面 I 数据进行分析。

为探讨此次地震与区域构造应力场之间的联系，通过参考已有研究成果（黄少华等，2023）选择以下中国台湾花莲 M_S 7.3 地震附近应力场数据：压轴与张轴的走向和倾伏角分别为 293.02°和 1°、68°和 88.59°，应力形因子（R）为 0.6。为了计算断层在这种应力下的滑动方向，利用万永革（2020）提出的模拟方法对该问题进行研究。通过计算揭示不同断层面在该应力张量分布状态下的相对剪应力（RSS）与相对正应力（RNS）的分布规律，并且在此基础上，利用最大剪应力，把正、剪应力进行归一化处理，得出一个相对剪应力和相对正应力的统一表示。

应力张量是对称张量，有 6 个独立参数。考虑应力球张量为 0，应力张量独立参数变为 5 个，采用 3 个主应力的比例关系归一化应力大小（万永革，2020）：



白色方框表示主震的发震断层位置；黑色线条表示断层，主要断层名称同图 1；红色沙滩球分别表示 2024 年 4 月 23 日发生的台湾 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震

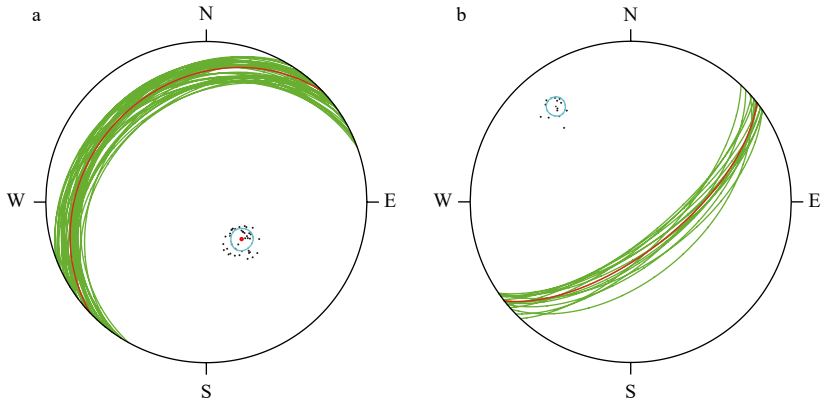
a—M_S 7.3 地震在 M_S 6.3 地震节面上产生的库仑应力变化；b—M_S 7.3 地震在 M_S 6.2 地震节面上产生的库仑应力变化

图 6　10 km 深度处中国台湾东部海岸 M_S 7.3 地震的库仑应力变化及其对后续 M_S 6.3 地震及 M_S 6.2 地震的触发作用

Fig. 6　CFS changes of the M_S 7.3 earthquake off the east coast of Taiwan at 10 km depth and its triggering effect on the M_S 6.3 and M_S 6.2 earthquakes in Taiwan

(a) The CFS changes generated by the M_S 7.3 earthquake on the M_S 6.3 earthquake nodal plane; (b) The CFS changes generated by the M_S 7.3 earthquake on the M_S 6.2 earthquake nodal plane

The white box indicates the location of the fault where the main shock occurred; the black lines represent faults; the names of the main faults are the same as in Fig.1; the red beach balls respectively represent the M_S 6.3 and M_S 6.2 earthquakes that occurred in Taiwan on April 23, 2024.



图中 N、S、W、E 表示地理方位北南西东；绿色弧线表示震源机制解节面；红色弧线表示聚类中心节面；黑点表示震源机制解节面的极点位置；红点表示聚类中心的极点位置；聚类中心极点周围的蓝绿色椭圆为聚类中心的置信区间

a—第 1 类节面聚类结果；b—第 2 类节面聚类结果

图 7　中国台湾花莲地区地震事件震源机制解节面聚类结果

Fig. 7　Clustering result of nodal planes from focal mechanism solutions for earthquake events in the Hualien area, Taiwan, China

(a) Clustering results of Nodal plane type 1; (b) Clustering results of Nodal plane type 2

In the figure, N, S, W, and E represent the geographical cardinal directions of north, south, west, and east. The green arc represents the focal mechanism facet. The red arc represents the central facet of the cluster. The black dots indicate the pole positions of the focal mechanism interfaces. The red dots indicate the pole positions of the cluster centers. The blue-green ellipses around the cluster center poles represent the confidence intervals of the cluster centers.

$$R=\frac{S_2-S_3}{S_1-S_3} \tag{2}$$

式中，S_1、S_2和S_3—主轴坐标系下的3个本征值，分别是主张应力、中间应力和主压应力大小。R—应力形因子，表示相对应力大小。

若已知震源机制解1个节面的走向与倾角时，可将其转换为北东下坐标系（北为x轴、东为y轴、下为z轴）中的断层几何参数（万永革等，2000）：

$$\boldsymbol{l}=(\cos\varphi,\sin\varphi,0) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{m}=(\sin\varphi\cos\delta,-\cos\varphi\cos\delta,-\sin\delta) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{n}=(\sin\varphi\sin\delta,-\cos\varphi\sin\delta,\cos\delta) \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{m}$—倾向反方向；$\boldsymbol{l}$—断层走向；$\boldsymbol{n}$—断层面的法向；φ—走向；δ—倾角。

沿节面剪切方向和倾向方向上的剪应力可采用下式计算：

$$T_1=\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{l})S_1+\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{l})S_2+\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{l})S_3 \tag{6}$$

$$T_2=\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{m})S_1+\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{m})S_2+\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{m})S_3 \tag{7}$$

式中，T_1—沿走向的剪应力；T_2—沿倾向反方向的剪应力；$\boldsymbol{T}$—拉张主应力；$\boldsymbol{B}$—中间主应力；$\boldsymbol{P}$—压缩主应力；其他变量含义同上。

震源机制解节面的正应力为：

$$T_{\mathrm{n}}=\cos^2(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})S_1+\cos^2(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})S_2+\cos^2(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})S_3 \tag{8}$$

式中，T_{n}—正应力；其他变量含义同上。

剪应力方向与节面走向的夹角γ可由下式估计：

$$\gamma=\tan^{-1}\frac{T_2}{T_1} \tag{9}$$

式中，γ—剪滑角；其他变量含义同上。

这就是在给定应力张量情况下计算的震源机制解1个节面的滑动角。上面只是给出了剪应力的方向，其大小可以表示为：

$$\tau=\sqrt{T_1^2+T_2^2} \tag{10}$$

式中，τ—剪应力大小；其他变量含义同上。

鉴于应力值的相对性特征，采用归一化处理方法以实现应力参数的统一比较。具体而言，将公式（8）确定的震源机制解节面正应力与公式（10）获得的剪应力，均以最大剪应力[(S_1−S_3)/2]为基准进行归一化处理，最终分别得到相对剪应力和相对正应力（表3），也可简称为剪应力和正应力。

表3 震源机制中心解确定的断层面上的相对剪应力和相对正应力统计表

Table 3 Table of relative shear stress and relative normal stress on fault planes of the central focal mechanism

震级	节面Ⅰ上的相对剪应力/相对正应力
M_{S} 7.3	0.872/−0.557
M_{S} 6.3	0.646/−0.830
M_{S} 6.2	0.882/−0.352

3次地震相对剪应力值都相对较大，最高值甚至达到近0.9，位于图8a中的近红色数值区域；相对正应力值则均为负值，位于图8b中的近蓝色数值区域。这表明3次地震都是因中国台湾花莲地区震前应力场对断层面的直接影响所致。菲律宾海板块向北西插入了欧亚板块之下，使得断层面呈现压应力状态，较大的剪应力导致纵谷断裂发生逆冲错动，3次地震的产生是当地应力积累后的正常释放，符合中国台湾花莲地区的构造应力背景。

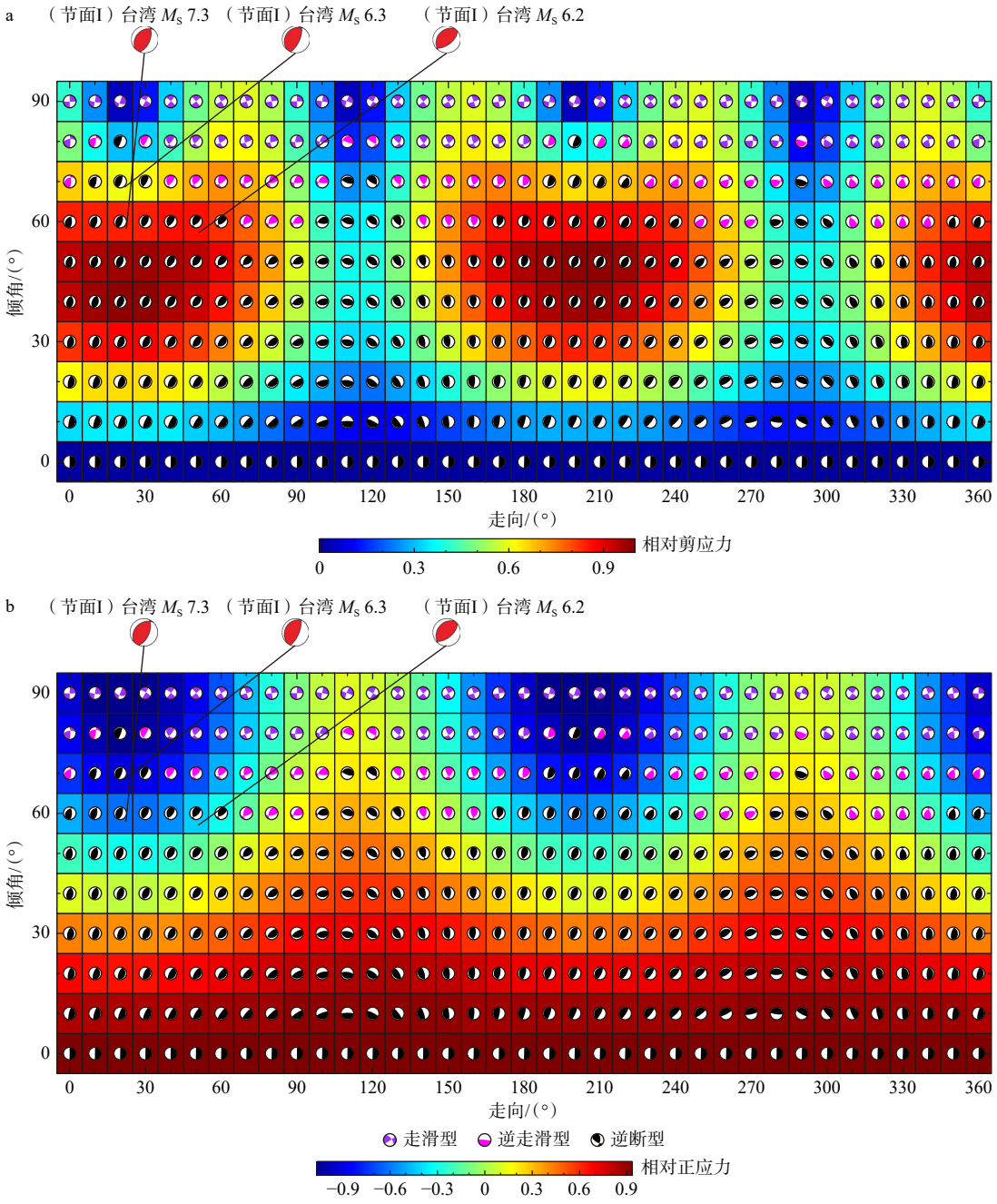
4 结论

（1）2024年4月3日中国台湾花莲M_{S} 7.3地震震源机制中心解的分析表明，该次地震属于逆断型地震，与同震位移场特性一致。

（2）同震观测揭示，中国台湾花莲M_{S} 7.3地震由菲律宾海板块与欧亚板块挤压作用引发。断层上盘显著隆升，下盘沉降。断层垂直剖面显示清晰的逆冲运动，且破裂以逆冲为主，兼有少量走滑分量。应变场表现为震中呈压缩条带及其两侧拉张，物质运动方向与主应变方向一致。

（3）2024年4月23日中国台湾M_{S}6.3地震与M_{S}6.2地震节面上产生的库仑破裂应力变化（0.02 MPa、0.30 MPa）均大于0.01 MPa临界值，表明2024年4月3日中国台湾东部海岸M_{S} 7.3地震对这2次地震事件的活动性具有明显的促进作用。

（4）构造应力场在3次地震断层面上产生的相对剪应力值都相对较大，相对正应力值则均为负值，这是由欧亚板块与菲律宾海板块间挤压产生的逆冲断裂作用所致。菲律宾海板块自台湾岛以东向北西插入欧亚板块之下，使得断层面呈现压应力状态，较大的剪应力导致纵谷断裂发生逆冲错动。这些地震的产生是当地应力积累后的正常释放，符合中国台湾花莲地区的构造应力背景。



红色大沙滩球为应力场在对应走向和倾角的断层上的震源机制解

a—节面上的相对剪应力；b—节面上的相对正应力

图 8　区域构造应力场在震源机制中心解断层面上的相对应力

Fig. 8　Relative stress on fault planes of focal mechanism solutions within the regional tectonic stress field

(a) Relative shear stress on the fault plane; (b) Relative normal stress on the fault plane

Red big beach balls are the focal mechanism solution of the stress field on the corresponding strike and dip, and the background color indicates the magnitude of the relative shear or normal stresses on the corresponding faults.

References

DAI Y L, WAN Y G, KONG X X, et al., 2022. Central focal mechanism of the Dengta, Liaoning *M*5.1 earthquake in 2013 and the analysis of its surrounding tectonic stress field[J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 570-580. (in Chinese with English abstract)

DONG F F, YUAN L W, DENG H, 2022. Dynamic coulomb failure stress analysis of Fuzhou small earthquake swarm caused by Chi-Chi earthquake in Taiwan province[J]. South China Journal of Seismology, 42(4):

54-59. (in Chinese with English abstract)

FANG C Y, FAN X M, WANG X, et al. , 2024. Assessment of geological hazards triggered by the 2024 M_w 7.4 earthquake in Hualien, Taiwan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 654-663, 672. (in Chinese with English abstract)

GUAN Z X, WAN Y G, HUANG S H, et al., 2023. Study on the triggering mechanism and earthquake dynamics of the 2022 Michoacan M_w7.6 earthquake sequence in Mexico[J]. Earthquake Research in China, 39(3): 584-595. (in Chinese with English abstract)

HARRIS R A, 1998. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10): 24347-24358.

HU X B, 2024. Inversion for the slip distribution of the 2022 Taiwan M_W6.9 earthquake based on GPS displacements[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 44(2): 173-176. (in Chinese with English abstract)

HUANG S H, WAN Y G, FENG G, et al., 2023. Trigger mechanism and dynamic causes of the Taiwan earthquake sequence on September 17, 2022[J]. Journal of Geomechanics, 29(5): 674-684. (in Chinese with English abstract)

JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W, 2007. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing Ltd: 488.

JIN Z T, WAN Y G, LIU Z C, et al., 2019. The static stress triggering influences of the 2017 M_s7.0 Jiuzhaigou earthquake on neighboring areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(4): 1282-1299. (in Chinese with English abstract)

JOLIVET L, FACCENNA C, BECKER T, et al., 2018. Mantle flow and deforming continents: from India–Asia convergence to Pacific subduction[J]. Tectonics, 37(9): 2887-2914.

KING G C P, STEIN R S, LIN J, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(3): 935-953.

LI H W, XU Z G, WANG Z C, et al., 2025. Uncertainty quantification in probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA): a case study in South China Sea[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 19(2): 2450032.

LI Q H, WAN Y G, 2024, Geometry of seismogenic faults determination of the 2021 Maduo earthquake sequence by fuzzy clustering algorithm[J]. Earth Science, 49(9): 3363-3376. (in Chinese with English abstract)

LI Y, WAN Y G, JIN Z T, et al., 2017. The study of static stress variation of the M_W6.3 Jinghe earthquake[J]. Earthquake Research in China, 33(4): 671-681. (in Chinese with English abstract)

LI Z Y, WAN Y G, JIN Z T, et al., 2020. The static Coulomb stress influence of the Mainling M6.9 earthquake in Tibet on November 18, 2017 to the subsequent earthquakes[J]. Seismology and Geology, 42(5): 1091-1108. (in Chinese with English abstract)

LU D H, CHEN K, WEI J T, 2024. Preliminary study on shallow seismic activity model in Taiwan region[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 19(3): 494-503. (in Chinese with English abstract)

OKADA Y, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2): 1018-1040.

REN X, JI Y D, CHEN J L, et al., 2024. Determination of source parameters of M_S7.3 earthquake near coast of Hualien, Taiwan, China, April 3, 2024[J]. Earthquake Research in China, 40(4): 775-786. (in Chinese with English abstract)

STEIN R S, KING G C P, LIN J, 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 Magnitude = 7.4 landers earthquake[J]. Science, 258(5086): 1328-1332.

WAN Y G, WU Z L, ZHOU G W, et al., 2000. How to get rake angle of the earthquake fault from known strike and dip of the two nodal planes[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 21(5): 26-30. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHEN Z K, SHENG S Z, et al., 2010. The mechanical effects of the 2008 M_s7.3 Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(2): 280-289. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, WU Y M, SHENG S Z, et al., 2011a. Preliminary result of Taiwan 3-D stress field from P wave polarity data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(11): 2809-2818. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHENG S Z, XU Y R, et al., 2011b. Effect of stress ratio and friction coefficient on composite P wave radiation patterns[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(4): 994-1001. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHENG S Z, LI X, et al., 2015. Stress influence of the 2015 Nepal earthquake sequence on Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4277-4286. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(12): 4718-4728. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2020. Simulation on relationship between stress regimes and focal mechanisms of earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(6): 2281-2296. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2022. Method of active fault geometry determination by clustering nodal planes of focal mechanisms occurred on the fault belt and its application to the 2021 Yangbi earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(2): 637-648. (in Chinese with English abstract)

WANG Q Y, CHEN K, WANG Y Z, et al., 2024. Quick output parameters related to the 3 April 2024 M7.3 earthquake in the sea area of Hualien County, Taiwan Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54(4): 286-291. (in Chinese with English abstract)

WANG X Y, ZHAO M H, HE X B, et al., 2025. Seismic imaging revealing the processes from subduction to arc-continental collision in the northeastern South China Sea[J]. Tectonophysics, 902: 230684.

WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

WU W N, YEN Y T, HSU Y J, et al., 2017. Spatial variation of seismogenic depths of crustal earthquakes in the Taiwan region: implications for seismic hazard assessment[J]. Tectonophysics, 708: 81-95.

XU L J, LÜ M, ZHANG H, et al., 2024. Relative motions between cross-fault sites resultd from the 1999 M_W7.6 Taiwan Chi-Chi earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 46(3): 425-441. (in Chinese with English abstract)

ZIWU F D, DOSER D I, SCHINAGEL S M, 2020. A geophysical study of

the Castle Mountain Fault, southcentral Alaska[J]. Tectonophysics, 789: 228567.

附中文参考文献

戴盈磊，万永革，孔祥雪，等，2022. 2013 年辽宁灯塔 *M*5.1 地震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析[J]. 地震研究，45(4)：570-580.

董非非，袁丽文，邓辉，2022. 台湾集集地震对福州小震群的动态库仑破裂应力分析[J]. 华南地震，42(4)：54-59.

方成勇，范宣梅，王欣，等，2024. 2024 年台湾花莲 7.4 级地震诱发地质灾害应急评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，51(4)：654-663，672.

关兆萱，万永革，黄少华，等，2023. 2022 年墨西哥米却肯州 7.6 级地震序列的触发关系及发震动力学探讨[J]. 中国地震，39(3)：584-595.

胡晓斌，2024. GPS 约束下的 2022 年台湾 M_W6.9 地震破裂滑动分布[J]. 大地测量与地球动力学，44(2)：173-176.

黄少华，万永革，冯淦，等，2023. 2022 年 9 月 17 日中国台湾地震序列的触发机制及其动力学成因[J]. 地质力学学报，29(5)：674-684.

靳志同，万永革，刘兆才，等，2019. 2017 年九寨沟 *M*s7.0 地震对周围地区的静态应力影响[J]. 地球物理学报，62(4)：1282-1299.

李佺洪，万永革，2024. 采用模糊聚类算法确定 2021 年玛多地震序列的断层结构[J]. 地球科学，49(9)：3363-3376.

李瑶，万永革，靳志同，等，2017. 新疆精河 M_W6.3 地震产生的静态应力变化研究[J]. 中国地震，33(4)：671-681.

李振月，万永革，靳志同，等，2020. 2017 年 11 月 18 日西藏米林 *M*6.9 地震对后续地震的静态库伦应力的影响[J]. 地震地质，42(5)：1091-1108.

陆东华，陈鲲，魏佳彤，2024. 台湾地区浅层地震活动性模型初步研究[J]. 震灾防御技术，19(3)：494-503.

任枭，姬运达，陈经纶，等，2024. 2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲海域 M_S7.3 地震震源参数测定[J]. 中国地震，40(4)：775-786.

万永革，吴忠良，周公威，等，2000. 根据震源的两个节面的走向角和倾角求滑动角[J]. 地震地磁观测与研究，21(5)：26-30.

万永革，沈正康，盛书中，等，2010. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报，53(2)：280-289.

万永革，吴逸民，盛书中，等，2011a. P 波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果[J]. 地球物理学报，54(11)：2809-2818.

万永革，盛书中，许雅儒，等，2011b. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报，54(4)：994-1001.

万永革，盛书中，李祥，等，2015. 2015 年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响[J]. 地球物理学报，58(11)：4277-4286.

万永革，2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. 地球物理学报，62(12)：4718-4728.

万永革，2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. 地球物理学报，63(6)：2281-2296.

万永革，2022. 断裂带震源机制节面聚类确定断裂带产状方法及在 2021 年漾濞地震序列中的应用[J]. 地球物理学报，65(2)：637-648.

王钦莹，陈鲲，王永哲，等，2024. 2024 年 4 月 3 日台湾省花莲县海域 7.3 级地震的快速产出参数[J]. 地震科学进展，54(4)：286-291.

徐龙军，吕淼，张恒，等，2024. 1999 年台湾集集 M_W7.6 地震跨断层场地相对运动[J]. 地震学报，46(3)：425-441.