

引用格式: 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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023056

Citation: 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. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023056

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

黄少华¹, 万永革^{1,2}, 冯 淦¹, 李 泉¹, 关兆萱¹
HUANG Shaohua¹, WAN Yongge^{1,2}, FENG Gan¹, LI Xiao¹, GUAN Zhaoxuan¹

1. 防灾科技学院地球科学学院, 河北 三河 065201;

2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201
1. School of Geosciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China

Trigger mechanism and dynamic causes of the Taiwan earthquake sequence on September 17, 2022

Abstract: On September 17th and 18th, 2022, two earthquakes struck Taiwan Province of China in Taitung County and Hualien County, respectively, measuring $M_s6.5$ and $M_s6.9$ in magnitude, followed by multiple aftershocks. Both seismic events were situated along the Longitudinal Valley Fault and exhibited a reverse strike-slip mechanism. The geological setting in this area is intricate, as the Longitudinal Valley Fault zone represents a subduction zone where the late Mesozoic Paleo-Pacific plate converges with the East Asian continental margin, resulting in a predominant thrust-type tectonic stress background. However, historical earthquake data in this region have indicated a prevalence of reverse-faulting earthquakes. To address the causes of these reverse strike-slip fault earthquakes and their relationship with the tectonic stress field in the area, we first reconstructed the tectonic stress field by analyzing the focal mechanisms of past earthquakes within the study area. The resulting stress field was characterized by compressive stress oriented with an azimuth of NWW. Subsequently, this stress field was projected onto fault planes with various strike and dip angles. This analysis revealed that certain fault joints experienced more significant relative shear stress and lower relative normal stress, suggesting that these joints were more prone to dislocation, leading to earthquakes of the reverse fault type, reverse strike-slip type, and strike-slip type. Furthermore, the proximity and timing of the two earthquakes within a two-day span prompted an examination of their potential triggering relationship. Researchers calculated the Coulomb rupture stress changes caused by the $M_s6.5$ earthquake on the rupture plane of the $M_s6.9$ earthquake and its sliding direction. Their analysis indicated an increase of approximately 0.02 MPa in Coulomb rupture stress, suggesting that the Taitung $M_s6.5$ earthquake may have triggered the Hualien $M_s6.9$ earthquake. This study holds significant importance for understanding the seismogenic mechanism of the Longitudinal Valley Fault and gaining insights into the geodynamics of the study region.

Keywords: Longitudinal Valley Fault; stress field; stress system; Coulomb failure stress

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42174074, 41674055); 中央高校科研业务费专项 (ZY20215117); 河北省地震动力学重点实验室开放基金项目 (FZ212105)

This research is financially supported by the fund of the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 42174074, 41674055), the Special Fund for Scientific Research of Central Universities (Grant No. ZY20215117), and the Open Fund Project of the Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics (Grant No. FZ212105).

第一作者: 黄少华 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事震源机制、应力场反演等方面的研究工作。E-mail: 1961921173@qq.com

通讯作者: 万永革 (1967—), 男, 研究员, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面研究。E-mail: wanyg217217@vip.sina.com

收稿日期: 2022-07-08; **修回日期:** 2023-06-10; **责任编辑:** 范二平

摘要: 2022年9月17—18日,中国台湾先后发生台东县 $M_s6.5$ 和花莲县 $M_s6.9$ 两次强震及多次余震。两次强震均为逆走滑型地震,且震中都位于台湾纵谷断裂带,该地区构造复杂,为晚中生代古太平洋板块朝东亚陆缘的消减带,具有逆冲型构造应力背景。对纵谷断裂带周围地区历史上发生过的地震进行统计发现,大部分地震为逆断型。为探究该地区此次发生逆走滑型地震的原因及其与构造应力场的关系,首先通过搜集研究区相关的地震震源机制,反演该地区的构造应力场,明确其是以走向为北西西向的压应力为主的应力场;然后将应力场投影到走向、倾角不同的断层面上,发现一些节面上表现出较大的相对剪应力和较小的相对正应力,说明这些节面上具有较强的剪切作用和较小的摩擦力,容易发生错动而产生逆断型、逆走滑型和走滑型的地震。同时,为明确短时间内两次强震间的触发关系,通过计算 $M_s6.5$ 地震在 $M_s6.9$ 地震破裂面和滑动方向上产生的库伦破裂应力变化发现, $M_s6.9$ 地震约在0.02MPa的库伦破裂应力触发下发生。相关结论对研究台湾纵谷带地震的发震机理和地球动力学具有一定的指导意义。

关键词: 纵谷断裂带; 应力场; 应力体系; 库伦破裂应力

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 05-0674-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023056

0 引言

中国台湾位于环太平洋地震带,为欧亚板块、太平洋板块和菲律宾海板块三大板块的交汇处,台湾纵谷断裂带走向近南北,纵谷断裂带的西侧属于欧亚板块,东侧属于菲律宾海板块(吴中海,2019)。菲律宾海板块与欧亚板块发生碰撞且俯冲至琉球岛弧之下,其向北西中国华南大陆运移的相对速率平均为92~94 mm/a (Sella et al., 2002),推动其前缘的吕宋火山弧与欧亚板块大陆边缘发生碰撞,台湾岛大部分地区在西北—东南向挤压应力的作用下以大约8 cm/a的速度消减(Yu et al., 1997)。构造位置的特殊导致弧—陆碰撞带成为西太平洋构造域典型的强震多发地带(吴啸龙等,2019)。历史上曾发生1972年1月25日的台湾火烧岛东海中 $M_s7.6$ 地震;1999年9月台湾中部发生的 $M_s7.7$ 集集地震,造成至少2297人死亡,损失估计达140亿元(雍琦,2017;张庆云,2019;邓志辉,2021)。

2022年9月17—18日发生的地震序列包括两个 $M_s>6$ 的强震,分别为17日台东县的 $M_s6.5$ 地震和18日花莲县的 $M_s6.9$ 地震,并在纵谷断裂带周围发生数个 $M_s>5$ 的地震。通过对历史上纵谷断裂带周边发生的地震类型进行统计后,发现以往大多数地震为逆断型地震。综合多种震源机制得到此次序列中7个 $M_s>5$ 地震的震源机制中心解,发现此次地震序列的震源机制类型有别于该地区的主流震源机制,在此次 $M_s>5$ 的地震中,有4个

为逆走滑型,2个为走滑型,均不是该区域的主体逆断型地震。为探究在逆冲型构造应力为主的背景下产生逆走滑型和走滑型地震的原因,使用网格搜索法(Wan et al., 2016)反演地震周围的应力场,将应力场反演结果投影到各种断层上,研究其产生走滑和逆走滑型地震的可能性,分析发生逆走滑型地震是否符合当地的构造应力场特征。研究认为两次 $M_s>6$ 的强震间存在触发关系,通过计算台东县的 $M_s6.5$ 地震在花莲县的 $M_s6.9$ 地震断层面上产生的库伦破裂应力,可判断两者间的触发关系。此外,强震发生后的地表破裂可以分析断层的活动行为和区域危险性(韩帅等,2022),文中通过计算机模拟了此次地震序列中两个 $M_s>6$ 地震共同造成的地表位移场。这些问题的研究有助于明确台湾地区地震的发震机理和地球动力学模型,对台湾地区防震减灾工作具有一定意义。

1 资料和方法

1.1 震源机制中心解

该次地震序列发生后(地震序列位置及周围地形见图1),众多机构和学者迅速使用各自的资料和方法做出其震源机制解。计算所用的资料和方法的不同会使描述同一地震的震源机制解之间具有一定的差异,尽管都是对震源错动的描述,选择任意一种方法都难以保证是最准确的,因此文章综合多种测量结果给出一个中心解来进行后续研究(万永革,2019),此方法已在许多研究中广泛使用(杨彦明等,2021;戴盈磊等,2022;

孔华等, 2023)。

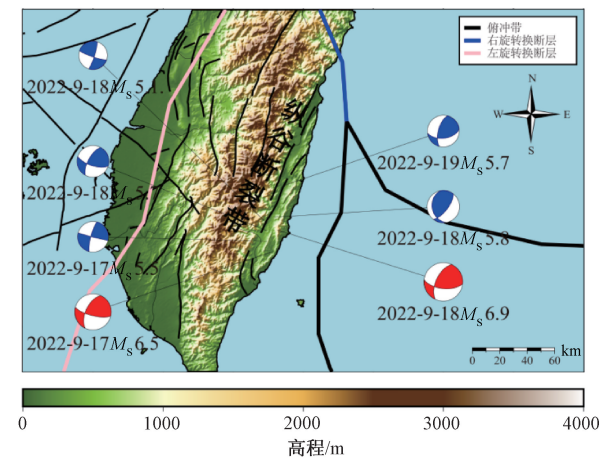


图1 2022年9月17—18日中国台湾地震序列中 $M_s>5$ 的7个地震分布

Fig.1 Distribution of seven earthquakes with $M_s>5$ in the Taiwan earthquake sequence on September 17–18, 2022

首先搜集美国地质调查局 (USGS)、德国亥姆

霍兹波茨坦中心 (GFZ)、法属波利尼西亚探测与地球物理实验室 (CPPT)、法国巴黎地球物理学院 (IPGP)、法国蔚蓝海岸天文台 (OCA) 和全球矩心矩张量项目 (GCMT; <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/tensors.php>) 以及中国地震台网中心 (https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_dzzyjz)、台湾地震科学资料中心 (<https://rmt.earth.sinica.edu.tw/>)、台湾研究院实时矩张量监测系统 (RMT) 和台湾研究院全球实时矩张量监测系统 (GRMT) 等国内外机构给出的此次地震序列的震源机制解。然后计算得出震源机制中心解的具体结果 (表1—表3), 并将 $M_s>6$ 的两次强震中心震源机制解及其不确定性范围绘制成图2。最后根据万永革等 (2022) 对地震震源机制类型的划分原则, 判断出此次 $M_s>6$ 的两次地震类型均为逆走滑型, 其余余震的地震类型见表3, 文中绘图所用软件为 GMT6 及 Matlab。

表1 中国台湾台东县 $M_s6.5$ 地震震源机制中心解结果和标准差

Table 1 Results and standard deviation of the central focal mechanism solution for the $M_s6.5$ earthquake in Taitung County, Taiwan, China

序号	各震源机制解 (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	机构	作为初始解计算出的 中心震源机制解 (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	标准差 (S) / (°)	S 最小的中心解与 各震源机制解的最小 空间旋转角 / (°)
1	202, 63, 13	USGS	205.4, 58.2, 20.8	16.499554	8.38
2	208, 44, 9	CPPT	205.4, 58.2, 20.8	16.499550	19.63
3	199, 76, 15	GFZ	205.4, 58.2, 20.8	16.499544	19.07
4	212, 62, 53	OCA	205.4, 58.2, 20.8	16.499547	29.65
5	214, 50, 26	IPGP	205.4, 58.2, 20.8	16.499576	10.71
6	206, 39, 11	中国地震台网中心	205.4, 58.2, 20.8	16.499550	21.71
7	207, 57, 39	RMT	205.4, 58.2, 20.8	16.499550	17.39
8	197, 74, 10	台湾地震科学资料中心 (P 波结果)	205.4, 58.2, 20.8	16.499543	18.62
9	206, 62, 21	台湾地震科学资料中心 (W 震相结果)	205.4, 58.16, 20.9	16.499525	3.73
10	204, 62, 19	GCMT	205.4, 58.2, 20.8	16.499572	4.19
11	205.0, 55.0, 16.3	GRMT	205.4, 58.2, 20.8	16.499573	5.43

注: 台湾地震科学资料中心的计算结果包括两种, 一种根据地震波的 P 波初动计算, 另一种由地震波 W 震相计算得到

表2 中国台湾花莲县 $M_s6.9$ 地震震源机制中心解结果和标准差

Table 2 Results and standard deviation of the central focal mechanism solution for the $M_s6.9$ earthquake in Hualien County, Taiwan, China

序号	各震源机制解 (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	机构	作为初始解算得的 中心震源机制解 (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	标准差 (S) / (°)	S 最小的中心解 与各震源机制解的 最小空间旋转角 / (°)
1	201, 61, 31	GCMT	205.4, 59.1, 34.3	13.815634	4.40
2	205, 60, 31	CPPT	205.4, 59.1, 34.3	13.815623	3.28
3	204, 54, 31	GFZ	205.4, 59.1, 34.3	13.815624	5.79
4	215, 60, 48	OCA	205.4, 59.1, 34.3	13.815633	12.12
5	200, 52, 30	IPGP	205.4, 59.1, 34.3	13.815634	8.43
6	210, 77, 19	USGS	205.4, 59.1, 34.3	13.815631	25.07
7	207, 40, 26	中国地震台网中心	205.4, 59.1, 34.3	13.815622	21.26
8	206.7, 53.2, 36.5	GRMT	205.4, 59.1, 34.3	13.815642	6.14
9	205.0, 61.3, 46.6	RMT	205.4, 59.1, 34.3	13.815644	12.67
10	199.4, 72.7, 43.4	台湾地震科学资料中心 (W 震相结果)	205.4, 59.1, 34.3	13.815638	18.65

表 3 5 次 $M_s < 6$ 的地震震源机制中心解汇总表

Table 3 Table of central focal mechanism solution of the five earthquakes with $M_s < 6$

序号 (震级/ M_s)	发震时刻 (北京时间)		中心解参数		地震类型
	日期	时分	节面 I / (走向, 倾角, 滑动角) / ($^{\circ}$)	节面 II / (走向, 倾角, 滑动角) / ($^{\circ}$)	
1 (5.5)	2022-9-17	22 : 45	104.4, 88.1, 168.8	194.7, 78.8, 1.9	走滑型
2 (5.7)	2022-9-18	13 : 19	208.6, 66.1, 24.9	108.0, 67.3, 154.0	逆走滑型
3 (5.1)	2022-9-18	14 : 32	200.3, 80.7, 9.19	108.8, 80.9, 170.6	走滑型
4 (5.8)	2022-9-18	17 : 39	169.9, 31.1, 46.9	37.4, 67.9, 112.4	逆断型
5 (5.7)	2022-9-19	10 : 07	195.0, 63.8, 43.0	82.6, 52.3, 146.1	逆走滑型

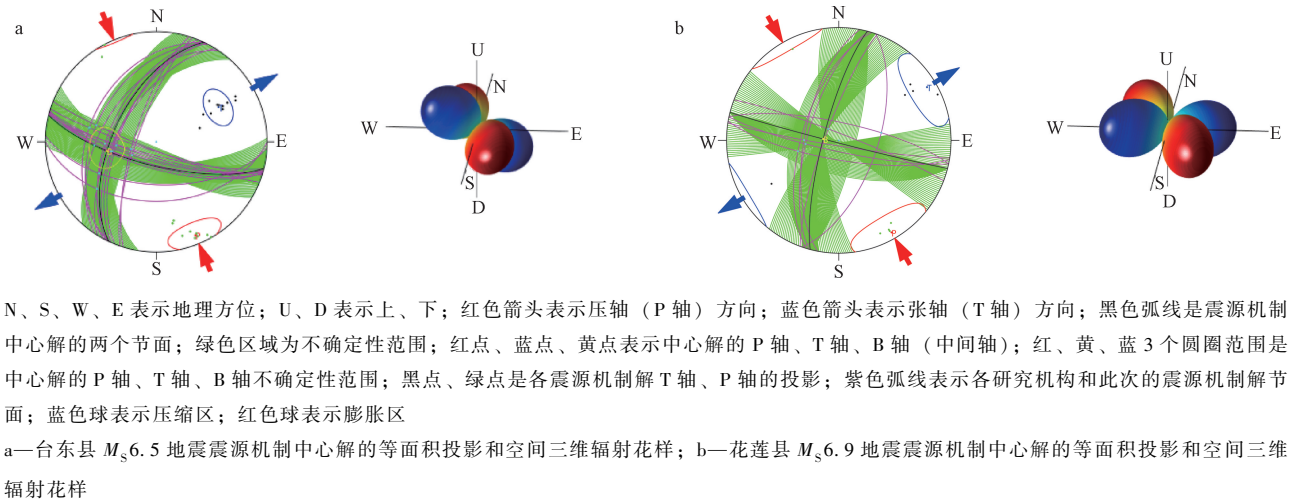


图 2 2022 年 9 月 17—18 日中国台湾两次强震的地震震源机制中心解计算结果

Fig. 2 The central focal mechanism solutions for two strong earthquakes in Taiwan on September 17–18, 2022

(a) The equal-area projection and three-dimensional radiation pattern of the central focal mechanism solution for the $M_{\text{s}}6.5$ earthquake in Taitung County; (b) The equal-area projection and three-dimensional radiation pattern of the central focal mechanism solution for the $M_{\text{s}}6.9$ earthquake in Hualien County

N, S, W, E represent geographical directions; U, D represent up and down; red arrows indicate the principal (P-axis) direction; blue arrows indicate the tensional (T-axis) direction; the black arcs represent the two fault planes of the central focal mechanism solution; the green area represents the uncertainty region; red dots, blue dots, and yellow dots represent the central solution's P-axis, T-axis, and B-axis (intermediate axis); the red, yellow, and blue circles represent the uncertainty regions of the central solution's P-axis, T-axis, and B-axis; black dots and green dots are the projections of the T-axis and P-axis for each seismic source mechanism solution; purple arcs represent the fault planes of different research institutions and the current mechanism solution; blue spheres represent compression zones; red spheres represent expansion zones.

1.2 反演应力场的资料与方法

震源机制数据来自 GCMT 目录，选择纵谷断裂带周围（120.6—121.6°E，22.8—23.8°N）为研究区，收集 1978—2019 年间 72 个 $M_s > 4$ 地震的震源机制解，震源深度最深达 69 km。因为地震断层错动会导致地表变形，其中，逆断层会造成总体地表的隆升，此时地震错动的面应变值 > 0 ，表示地震造成水平面的膨胀；正断层造成总体地表的沉降，此时地震错动的面应变值 < 0 ，表示地震造成水平面的压缩；走滑断层基本不造成地表隆升或沉降，面应变值为 0。万永革（2022）提出根据相对面应变值 (A_s) 可对这些震源机制解进行

类型划分，该方法中相对面应变值通过地震矩张量求得，计算时不需要考虑地震破裂大小，相对面应变最大值为 1 时，对应的震源机制为完全逆断型，最小值为 -1 时，对应的震源机制为完全正断型，而当相对面应变值为 0 时，表示震源机制为单一走滑型，按照 $-1 \leq A_s < -0.7$ 、 $-0.7 \leq A_s < -0.3$ 、 $-0.3 \leq A_s \leq 0.3$ 、 $0.3 < A_s \leq 0.7$ 、 $0.7 < A_s \leq 1$ 的相对面应变值区间依次将震源机制类型划分为正断型、正走滑型、走滑型、逆走滑型和逆断型，此划分方法能避免出现不确定型震源机制的情况。此次研究最终得到正断型地震 7 个（9.72%），平均震级为 M_s 5.03，平均深度为 27.02 km；正

走滑型地震 4 个 (5.56%), 平均震级为 M_s 4.95, 平均深度 27.48 km; 走滑型地震 13 个 (18.06%), 平均震级为 M_s 5.35, 平均深度 19.08 km; 逆走滑型地震 6 个 (8.33%), 平均震级为 M_s 5.5, 平均深度 19.5 km; 逆断型地震 42 个 (8.33%), 平均震级为 M_s 5.57, 平均深度 21.42 km; 可见研究区内历史上发生的地震类型

以逆断型为主, 走滑型次之 (图 3)。进一步分析研究区内的地震类型及地震位置分布发现, 历史上发生的一部分正断型和正走滑型地震不是均匀分散在研究区内, 而是聚集在研究区中南部 (图 3a), 为避免误差, 在反演区域整体的应力场时, 去除这两种类型的异常数据, 使用剩余的 61 个数据进行研究区应力场反演。

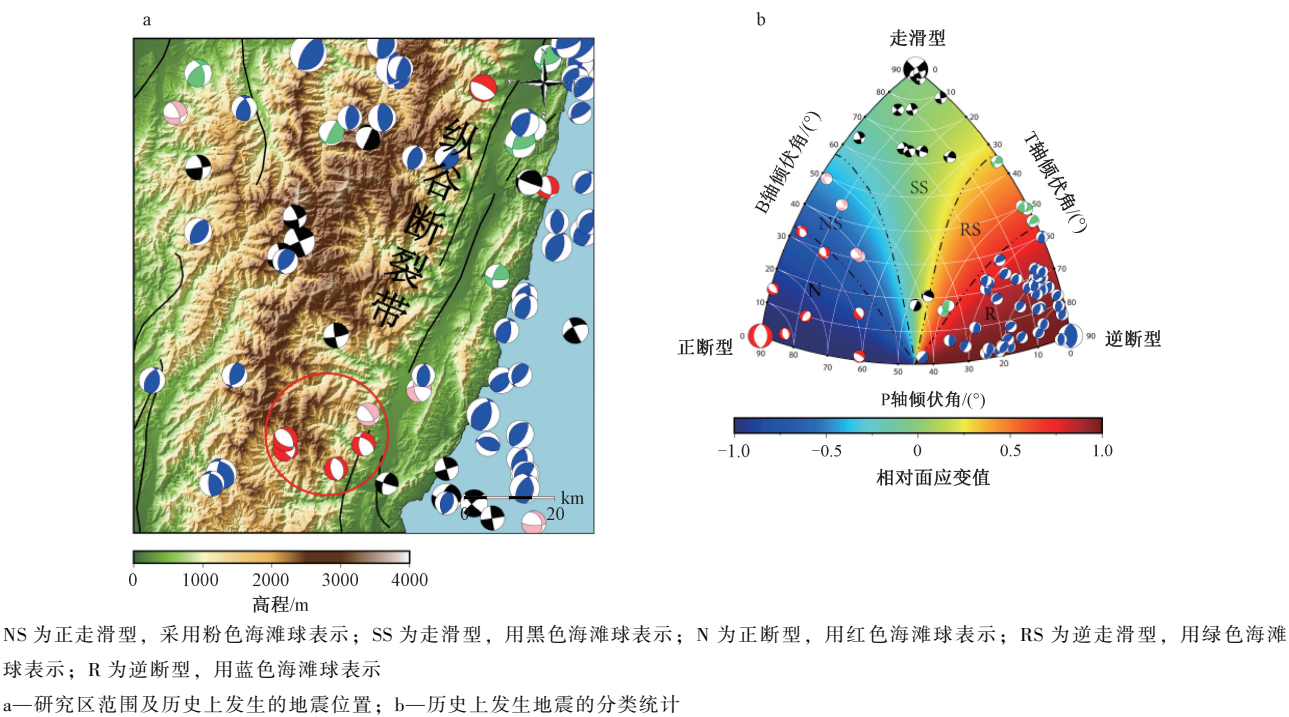


图 3 研究区 1978—2019 年间发生地震的类型分类

Fig. 3 Classification of earthquake types occurred in the study area between 1978 and 2019
(a) Location of historical earthquakes within the study area; (b) Classification of historical earthquakes

NS stands for normal slip, represented by pink beach balls; SS stands for strike-slip, represented by black beach balls; N stands for normal fault, represented by red beach balls; RS stands for reverse slip, represented by green beach balls; R stands for reverse fault, represented by blue beach balls.

使用震源机制数据求解应力场在地质学、地质学等领域具有广泛应用, 如许鑫等 (2022) 利用此方法得到的安徽霍山地区应力场来研究断层滑动性质; 丰成君等 (2022) 通过震源机制得到南迦巴瓦地区的地应力, 并对其进行了构造稳定性的探讨等。此次利用震源机制反演应力场时使用网格搜索法, 即在应力场的模型空间中找到与实际地震数据最符合的应力模型作为结果输出。在 Wan 的震源机制解反演应力场程序中, 因为有 4 个待求参数, 所以需要至少 4 个地震事件参与反演。

参考相关研究 (冯淦等, 2021; 余海琳等, 2021; 万永革等, 2022), 在反演过程中将搜索步

长设为 1° , 将应力型因子 R 值的搜索步长设为 0.1, 置信度设为 90%。地震产生的观测资料其精度往往与震级有关, 震级越高的地震震源机制应该越准确, 在反演应力场前, 根据震级对震源机制解数据赋予对应的权重, 将震级最大的地震震源机制解权重设为 10, 震级最小的地震震源机制解权重设为 1。同时考虑到随着震级增大, 地震能量呈指数增长, 参考已有方法 (Shen et al., 1996; 黄骥超, 2015), 对震源机制数据赋予权重的计算公式如下:

$$W = e^{r/D^2} \quad (1)$$

W 为地震震源机制所占权重; D 为震级衰减系数; e 为自然常数; r 为震级相对大小, 由地震震

级减去统计地震数据中最小的震级求得:

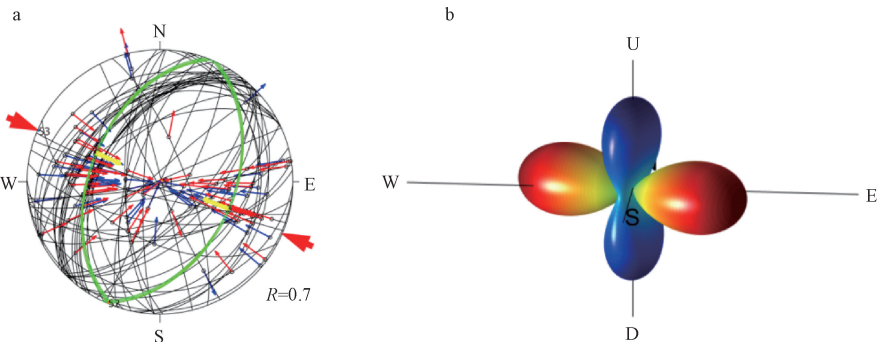
$$r = M_s - (M_s)_{\min}$$

(2)

2 区域应力场反演结果

使用 61 个历史地震震源机制数据反演的研究区应力场结果显示 (图 4), 主压应力轴的走向角和倾角分别为 293.02° 和 1.00° , 置信范围分别为 $293.00^\circ \sim 293.05^\circ$ 和 $0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ 。中间轴走向角为 203.00° , 倾角为 1.00° , 置信范围分别是 $202.5^\circ \sim 203.5^\circ$ 和 $0^\circ \sim 3.0^\circ$, 主张应力轴走向角为 68.00° , 倾角为 88.59° , 置信范围分别为 $67.50^\circ \sim 68.50^\circ$ 和 $87.59^\circ \sim 90.59^\circ$ 。该结果与万永革等 (2010) 使用 P 波初动得到的台湾地区的应力场结果相近; Wu

et al. (2008) 对台湾地区应力场的研究中指出, 应力场主压应力轴方向为南东东—北西西向, 台湾东部主压应力轴呈扇形向南北散开, 其在纵谷断裂附近的研究结果与此次研究区应力场反演结果接近。研究区应力场反演结果中 R 值为 0.7, 说明应力场以压应力为主。李锡堤 (1986) 使用断层面的滑动方向数据反演台湾应力场, 其结果表明台湾地区的压应力主要存在于台湾中南部。Rau and Wu (1998) 利用 97 个小震震源机制资料 ($2.7 \leq M_L \leq 5.7$) 得到的台湾全区的主压应力方位角为 289° , 与此次反演结果极为接近 (主压应力轴走向角为 293.02°); Yeh et al. (1991) 通过震源机制也得到了相近的台湾地区应力结果, 基本符合菲律宾海板块挤压欧亚板块的构造活动背景。



N、S、W、E 表示地理方位; U、D 表示上、下; 黑色弧线对应震源机制解的各个节面; 红色大箭头表示主压应力轴的最优方向; 红色小箭头代表断层理论滑动方向; 蓝色小箭头代表观测滑动方向; 绿色弧线覆盖区域是 90% 置信度下应力场的最大剪应力节面; 黄色小箭头则为该节面的最大剪应力方向; 红黄色球表示挤压, 蓝色球表示拉张
a—研究区应力场反演结果; b—三维应力图

图 4 研究区反演应力状态

Fig. 4 Inferred stress state in the study area

(a) Result of stress field inversion in the study area; (b) Chart displaying the three-dimensional stress distribution

N, S, W, E represent geographical directions; U, D indicate up and down; black curves represent various fault planes corresponding to earthquake focal mechanism; red large arrows indicate the optimal direction of the principal stress axis; red small arrows represent the theoretical slip direction of faults; blue small arrows indicate the observed slip direction; green curves represent the maximum shear stress planes of the stress field at a 90% confidence level; yellow small arrows represent the maximum shear stress direction on that plane; red and yellow spheres represent compression, while blue spheres represent tension.

综合研究区应力场反演结果和历史地震震源机制分类结果进行分析, 发现主压应力轴走向与研究区一系列断层走向近乎垂直, 在应力作用下断层破裂容易产生逆断型地震, 这符合该地区地震类型以逆断型为主的实际情况。通过统计地震震源深度发现, 逆走滑型地震的发震深度较浅, 包括此次 $M_s > 6$ 的两次逆走滑型地震, 综合各机构给出的震源深度求取平均值, 得到 $M_s 6.5$ 地震震源深度为 11 km, $M_s 6.9$ 地震震源深度为 15.6 km, 均低于逆断型地震震源的平均深度 21.42 km。逆走滑型地震与逆断型地震相比, 地震断层错动增

加了走滑分量, 由此推断走滑分量的产生或许与研究区浅部复杂的地质构造有关, 该地区浅部应力场与整体应力场存在差异。万永革等 (2011) 得到的台湾地区三维应力场证实, 台湾地区深部应力场主压应力轴走向和倾角与浅部应力场不同, 研究区内由深到浅主压应力轴走向从近东西向转变为西北—东南向, 主压应力轴在深部与周围断层走向近乎垂直, 在浅部主压应力轴走向与周围断层走向具有一定的角度。在浅部应力场作用下断层上的错动会产生走滑分量, 进而发生走滑型地震或逆走滑型地震。

3 应力体系模拟

通过应力体系模拟方法（万永革，2020），基于研究区应力场反演结果计算震源机制中心解节面上的相对剪应力和相对正应力的 大小 。因为计算出的应力场结果只有4个独立参数，即3个应力主轴方向和表示3个主应力相对大小的 R 值，没

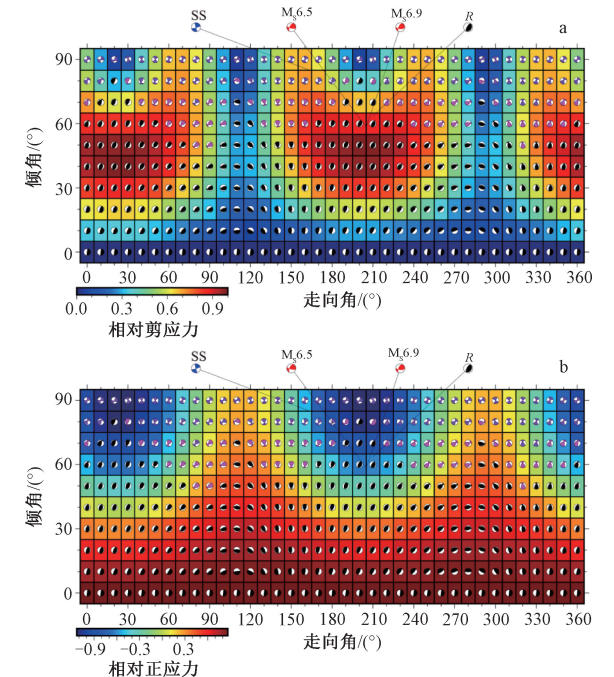
有主应力值的绝对大小，为方便比较，用最大剪应力对节面上算得的正应力和剪应力进行归一化，由此得到相对正应力和相对剪应力。其中相对正应力在一定程度上能反应节面间摩擦力的大小，相对剪应力能反应剪切作用的强弱。此次计算出的历史上逆断型和走滑型地震的总体震源机制解以及这两个总体震源机制解断层面上的相对剪应力和相对正应力见表4。

表4 应力张量在各类型地震的总体震源机制节面上的相对剪应力和相对正应力统计表

Table 4 Relative shear stress and relative normal stress of stress tensor on the focal mechanism nodal plane of each type of earthquake focal mechanism

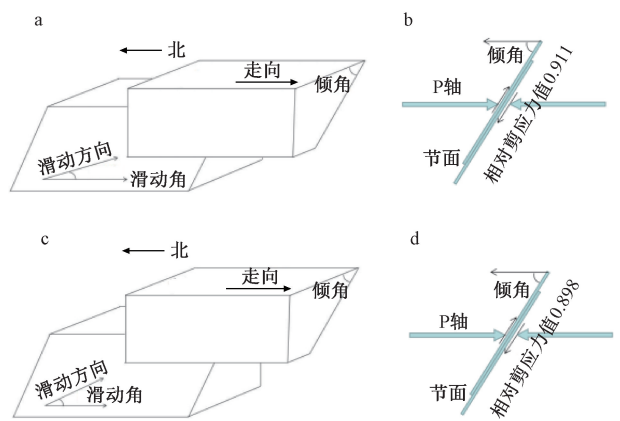
	总体震源机制节面Ⅰ (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	总体震源机制节面Ⅱ (走向, 倾角, 滑动角) / (°)	应力张量在节面Ⅰ上的 相对剪应力/相对正应力	应力张量在节面Ⅱ上的 相对剪应力/相对正应力
走滑型	163.51, 85.24, 6.27	72.99, 83.76, 175.21	0.700/-0.551	0.698/-0.302
逆走滑型	200.15, 56.94, 45.60	81.03, 53.22, 137.07	0.929/-0.503	0.706/0.220
逆断型	210.02, 63.68, 88.42	33.58, 26.36, 93.19	0.819/-0.697	0.806/0.455

逆断型和走滑型地震的总体震源机制解节面和此次 $M_s>6$ 地震中心解节面上的相对剪应力和相对正应力结果如图5所示，此次 $M_s>6$ 地震的推测断层与应力场的关系如图6所示。此次台湾 $M_s6.5$ 地震节面上的相对剪应力和相对正应力值分别为0.911和-0.544； $M_s6.9$ 地震节面上的相对剪应力和相对正应力值分别为0.898和-0.572，两次地震节面上的相对剪应力都比较大，同时相对正应力都为负值，说明这两次地震是研究区震前应力场直接作用在节面上产生的错动，北西西走向的压应力挤压纵谷断裂带，导致其发生逆冲兼走滑的错动，是当地应力积累后的正常释放。对于逆断型地震和走滑型地震的总体震源机制解，其两个节面上都有相对剪应力较大而相对正应力较小的特点，因为节面Ⅰ与纵谷断裂带走向较为接近，选择其节面Ⅰ上的结果进行分析，其中，走滑型及逆断型地震的相对剪应力值都在0.7以上，位于红色背景区域（图5a）；相对正应力值都为负值，位于浅蓝色区域（图5b），这表明在研究区应力状态下逆断型地震和走滑型地震都较易发生，并且逆断型地震更容易发生，这与统计的历史上发生的地震类型占比是符合的，随着震源深度由深到浅，地震类型由逆断型为主转变为以走滑型为主，逆走滑型地震处于二者的中间状态，伴随着走滑型地震和逆断型地震发生，逆走滑型地震的发生同样符合研究区的构造应力背景。



黑色沙滩球表示逆断型地震；粉色沙滩球表示逆走滑型地震；紫色沙滩球表示走滑型地震；SS标记走滑型总体震源机制解位置；R标记逆断型总体震源机制解位置；红色沙滩球标记此次 $M_s>6$ 地震位置
a—节面上的相对剪应力；b—节面上的相对正应力

图5 研究区应力场在各种节面上的相对应力
Fig. 5 Relative stress on each plane in the Study Area
(a) Relative shear stress on each plane; (b) Relative normal stress on each plane
Black beach balls represent reverse fault earthquakes; pink beach balls represent reverse slip earthquakes; purple beach balls represent strike-slip earthquakes; SS marks the location of overall strike-slip focal mechanism solutions; R marks the location of overall reverse fault focal mechanism solutions; red beach balls mark the locations of earthquakes with $M_s>6$.



a—台湾 $M_s6.5$ 地震断层运动方式; b—台湾 $M_s6.5$ 地震断层与应力场关系; c—台湾 $M_s6.9$ 地震断层运动方式; d—台湾 $M_s6.9$ 地震断层与应力场关系

图 6 2022 年 9 月 17—18 日中国台湾两次 $M_s > 6$ 地震的推测断层状态

Fig. 6 Inferred fault status of two earthquakes with $M_s > 6$ in Taiwan on September 17-18, 2022

(a) Fault movement type of the Taiwan $M_s6.5$ earthquake; (b) Relationship between the Taiwan $M_s6.5$ earthquake fault and the stress field; (c) Fault movement type of the Taiwan $M_s6.9$ earthquake; (d) Relationship between the Taiwan $M_s6.9$ earthquake fault and the stress field

4 地震间触发作用与地震产生的地表位移

4.1 台东县 $M_s6.5$ 地震对花莲县 $M_s6.9$ 地震的触发作用

此次计算台东县 $M_s6.5$ 地震对花莲县 $M_s6.9$ 地震节面上的库伦破裂应力时, 将花莲县 $M_s6.9$ 地震的中心震源机制解作为接收断层面, 根据台湾地震科学资料中心提供的结果将震源深度设置为 7 km, 参考以往研究 (Stein et al., 1992; King et al., 1994; Wu et al., 2008) 取视摩擦系数为 0.4, 结果如图 7。花莲县 $M_s6.9$ 地震在该位置接收断层面上的剪应力为 0.042 MPa, 正应力为 0.004 MPa, 库伦破裂应力为 0.02 MPa, 一般认为库伦破裂应力的触发阈值为 0.01 MPa (万永革等, 2017), 由此推断台东县 $M_s6.5$ 地震对花莲县 $M_s6.9$ 地震具有明显的促进作用。

4.2 地表位移场

基于弹性半空间模型 (Okada, 1992) 和 Wells and Coppersmith (1994) 给出的统计公式,

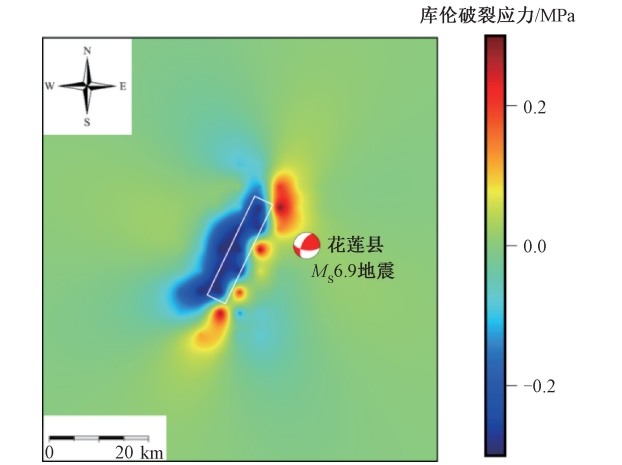


图 7 台东县 $M_s6.5$ 地震在花莲县 $M_s6.9$ 地震节面上产生的库伦破裂应力变化

Fig. 7 Coulomb failure stress changes generated on the fault plane of the Taitung $M_s6.5$ earthquake by the Hualien $M_s6.9$ Earthquake

估算台东县 $M_s6.5$ 地震断层面的大小和滑动量, 得到断层面长度为 28.84 km, 宽度为 9.89 km, 滑动量为 73.68 cm。同时结合张勇提供的中国台湾花莲县 $M_s6.9$ 地震的破裂模型, 计算地表同震位移场 (图 8)。结果可以看出, 地表位移基本呈四象限分布, 最大水平位移方向与纵谷断裂带走向一致, 地表水平位移整体大于垂直位移, 属于逆走滑型地震位移场的特征, 符合纵谷断裂带上发生逆走滑型错动的实际情况。

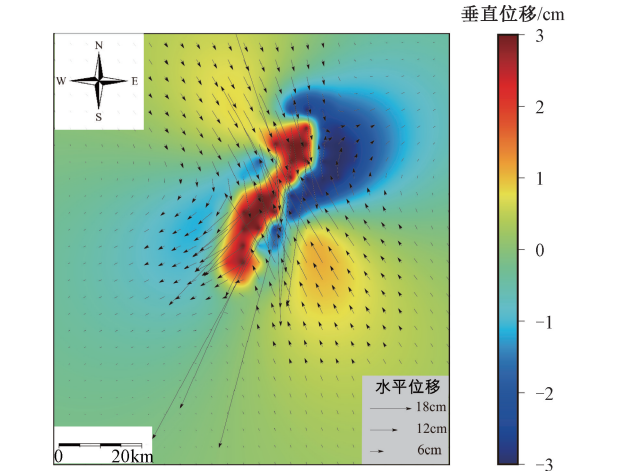


图 8 2022 年 9 月 17—18 日中国台湾两次 $M_s > 6$ 地震共同产生的同震位移场

Fig. 8 The coseismic displacement field generated by two earthquakes with $M_s > 6$ in Taiwan, China on September 17-18, 2022

5 结论

基于台湾纵谷断裂带周围地区历史地震震源机制数据的统计与分类,使用网格搜索法反演纵谷断裂带周围的应力场并进行应力体系的模拟,同时计算台东县 $M_s6.5$ 地震对花莲县 $M_s6.9$ 地震的库伦破裂应力以及两次地震造成的地表位移,得出以下结论:

(1) 2022 年 9 月 17 日中国台湾地震序列中两次 $M_s>6$ 地震震源机制中心解表明其为逆走滑型地震,其中台东县 $M_s6.5$ 地震的走滑分量较大;其他 $M_s>5$ 的余震类型中包含 2 个逆走滑型,2 个走滑型和 1 个逆断型。而统计研究区历史上 72 次地震震源机制解发现,研究区地震以逆断型地震为主。两次 $M_s>6$ 逆走滑型地震的震源深度较浅,分别为 11 km 和 15.6 km;历史地震统计中逆走滑型地震的震源深度也较浅,6 个逆走滑型地震中有 4 次地震震源深度小于 18 km,由此判断逆走滑型地震的发生与研究区浅部复杂的地质构造有关。

(2) 台湾纵谷断裂带及其周围地区的应力场结果显示,主压应力轴走向角为 293.02° ,倾角为 1.00° ;中间轴走向角 203.00° ,倾角为 1.00° ;主张应力轴的走向角为 68.00° ,倾角 88.59° ; R 值为 0.7,属于低倾角的主压应力场。北西西走向的主压应力轴与纵谷断裂带等周围一系列南南东走向的断层近乎垂直,符合该地区地震类型以逆断型为主的情况;而研究区的走滑型地震及逆走滑型地震所产生的走滑分量是浅部应力场作用的结果,其主压应力轴走向与周围断层走向不再垂直,因而容易产生走滑分量。地震动力来源于菲律宾海板块相对于欧亚板块向西北方向与欧亚板块俯冲碰撞时造成的整体北西西向的压应力;由于研究区浅部地质构造复杂,因此其应力场存在一些差异。

(3) 应力体系模拟的结果显示,台湾两次 $M_s>6$ 地震是在当前应力作用下应力积累后的正常释放。研究区在当前应力场下走滑型、逆走滑型及逆断型地震都易于发生,主要的应力作用触发逆断型地震,局部浅部的应力作用触发走滑型地震和逆走滑型地震,作为中间类型的逆走滑型地震发生频次少,但符合研究区的应力背景。

(4) 台东县 $M_s6.5$ 地震的库伦破裂应力在花

莲县 $M_s6.9$ 地震的断层节面上产生超过阈值的变化,由此认为台东县 $M_s6.5$ 地震对 2022 年 9 月 18 日的花莲县 $M_s6.9$ 地震具有触发作用。同时计算得出的地表位移场符合逆走滑型地震产生的位移场特征。

致谢: 文中使用的地震破裂模型由中国地震局地球物理研究所张勇教授提供;论文的撰写得到了黄骥超、许鑫的帮助,在此一并表示感谢!

References

- DAI Y L, WAN Y G, KONG X X, et al., 2022. Central focal mechanism of the Dengta, Liaoning $M5.1$ 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)
- DENG Z H, 2021. Study on coseismic displacement identification based on near-fault strong motion data [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (6): 919-937. (in Chinese with English abstract)
- FENG G, WAN Y G, XU X, et al., 2021. Static stress influence of the 2021 $M_s7.4$ Madoi, Qinghai earthquake on neighboring areas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64 (12): 4562-4571. (in Chinese with English abstract)
- HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan $M_s6.9$ earthquake, Qinghai, China: implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (2): 155-168. (in Chinese with English abstract)
- HUANG J C, 2015. Research on the method and application of tectonic stress field inversion based on the seismic observations [D]. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- KONG H, WAN Y G, LV Y, 2023. Seismogenic structure and slip property of the Aketao $M_w6.6$ earthquake [J]. *Science Technology and Engineering*, 23 (7): 2734-2742. (in Chinese with English abstract)
- LI X D, 1986. Crustal stress analysis and the effects of arc-continent collision on north part of Taiwan region [D]. Taipei, China: Institute of Geosciences, National Taiwan University. (in Chinese)
- 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.

RAU R J, WU F T, 1998. Active tectonics of Taiwan orogeny from focal mechanisms of small-to-moderate-sized earthquakes [J]. TAO, 9 (4): 755-778.

SELLA G F, DIXON T H, MAO A L, 2002. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107 (B4): 2081.

SHEN Z K, JACKSON D D, GE B X, 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101 (B12): 27957-27980.

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, SHEN Z K, SHENG S Z, et al., 2010. The mechanical effects of the 2008 M_s 7.3 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., 2011. 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, 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]. Journal of Earth Science, 27 (5): 777-785.

WAN Y G, JIN Z T, CUI H W, et al., 2017. The displacement and stress field generated by the collapse in Pingyi county, Shangdong province, on December 25, 2015 [J]. Seismology and Geology, 39 (1): 81-91. (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. Focal mechanism classification based on areal strain of the horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of the earthquake sequence [J/OL]. Earth Science, 1-16 [2022-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html>. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, XU X, HUANG S H, et al., 2022. Focal mechanisms and stress field of the 2022 Menyuan, Qinghai M_s 6.9 earthquake sequence determined by P-wave polarity data [J]. China Earthquake Engineering Journal, 44 (3): 670-679, 690. (in Chinese with English abstract)

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 X L, YANG Z Q, GONG Y, 2019. Present-day crustal deformation in arc-continent collision zone of the southeastern Eurasia plate [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (2): 240-245, 253. (in Chinese with English abstract)

WU Y M, CHANG C H, ZHAO L, et al., 2008. A comprehensive relocation of earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005 [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98 (3): 1471-1481.

WU Z H, 2019. The definition and classification of active faults: history, current status and progress [J]. Acta Geoscientica Sinica, 40 (5): 661-697. (in Chinese with English abstract)

XU X, WAN Y G, FENG G, et al., 2022. Study on three seismic fault segments and their sliding properties revealed by clustered seismic events in Huoshan area, Anhui province [J]. Chinese Journal of Geophysics, 65 (5): 1688-1700. (in Chinese with English abstract)

YANG Y M, HUANG S Y, DAI Y, 2021. Quick fault-plane identification and seismogenic structure of the 2020 Yutian M_s 6.4 earthquake, Xinjiang [J]. Earthquake, 41 (2): 29-46. (in Chinese with English abstract)

YEH Y H, BARRIER E, LIN C H, et al., 1991. Stress tensor analysis in the Taiwan area from focal mechanisms of earthquakes [J]. Tectonophysics, 200 (1-3): 267-280.

YONG Q, 2017. Research on characteristics of inversion for earthquake fault slip constrained by InSAR and GPS geodetic deformation data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

YU H L, WAN Y G, HUANG S H, et al., 2021. Study on focal mechanism solution and stress field of the 2021 Yangbi, Yunnan M_s 6.4 earthquake sequence using P-wave first motion data [J]. Journal of Seismological Research, 44 (3): 338-347. (in Chinese with English abstract)

YU S B, CHEN H Y, KUO L C, 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area [J]. Tectonophysics, 274 (1-3): 41-59.

ZHANG Q Y, 2019. Research and application of key technologies for InSAR coseismic deformation extraction [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

戴盈磊，万永革，孔祥雪，等，2022. 2013 年辽宁灯塔 $M5.1$ 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.

邓志辉，2021. 基于近断层强震动数据的同震位移识别研究 [D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所.

丰成君，李滨，李惠，等，2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 919-937.

冯淦，万永革，许鑫，等，2021. 2021 年青海玛多 M_s 7.4 地震对周围地区的应力影响 [J]. 地球物理学报, 64 (12): 4562-4571.

韩帅，吴中海，高扬，等，2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 M_s 6.9 地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 155-168.

黄骥超，2015. 基于地震观测资料的构造应力场反演方法与应用研

究 [D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.

孔华, 万永革, 吕彦, 2023. 阿克陶 M_w 6.6 地震的发震构造及滑动特征 [J]. 科学技术与工程, 23 (7): 2734-2742.

李锡堤, 1986. 大地应力分析与弧陆碰撞对于台湾北部古应力场变迁之影响 [D]. 台北: 国立台湾大学地质研究所.

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, 2011. 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, 靳志同, 崔华伟, 等, 2017. 2015 年 12 月 25 日山东平邑塌陷事件产生的位移场与应力场 [J]. 地震地质, 39 (1): 81-91.

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. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析 [J/OL]. 地球科学, 1-16 [2022-09-05]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.](http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html)

1532.014.html.

万永革, 许鑫, 黄少华, 等, 2022. P 波极性资料确定的 2022 青海门源 M_s 6.9 地震序列震源机制及应力场 [J]. 地震工程学报, 44 (3): 670-679, 690.

吴啸龙, 杨志强, 龚云, 2019. 欧亚大陆东南缘弧-陆碰撞带现今地壳水平变形特征研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 44 (2): 240-245, 253.

吴中海, 2019. 活断层的定义与分类: 历史、现状和进展 [J]. 地球学报, 40 (5): 661-697.

许鑫, 万永革, 冯淦, 等, 2022. 安徽霍山地区丛集地震事件揭示的三条地震断面及其滑动性质研究 [J]. 地球物理学报, 65 (5): 1688-1700.

杨彦明, 黄世源, 戴勇, 等, 2021. 2020 年新疆于田 M_s 6.4 地震断层面快速测定及发震构造研究 [J]. 地震, 41 (2): 29-46.

雍琦, 2017. InSAR 和 GPS 大地测量形变数据反演地震断层滑动的影响特征研究 [D]. 成都: 西南交通大学.

余海琳, 万永革, 黄少华, 等, 2021. 利用 P 波初动数据研究 2021 年云南漾濞 M_s 6.4 地震序列震源机制解及应力场 [J]. 地震研究, 44 (3): 338-347.

张庆云, 2019. InSAR 同震形变提取关键技术研究及其应用 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.