

陈鑫,张清,何嘉幸,等. 2025. 2023年甘肃积石山 M_s 6.2地震发震断层产状及其动力学探讨. 中国地震, 41(1): 11~19.

2023年甘肃积石山 M_s 6.2地震 发震断层产状及其动力学探讨

陈鑫¹⁾ 张清¹⁾ 何嘉幸¹⁾ 郭培兰¹⁾ 刘白云²⁾

1) 广西壮族自治区地震局, 南宁 530022

2) 甘肃省地震局, 甘肃 730000

摘要 大地震发生后, 断层面产状的迅速确定对地震破裂时空分布模型研究、发震构造及震后地震发生发展趋势判定具有重要参考价值。本文收集 2023 年甘肃积石山 M_s 6.2 地震序列的震源机制解数据, 将全部震源机制节面组合在一起进行模糊聚类分析, 去掉小于设定阈值的噪声节面, 得到两类聚类结果, 发现两组聚类结果中, 走向 312.13°、倾角 56.09° 的第一类中心节面的聚类标准差较小, 为发震断层面。然后, 通过应力场与断层面关系确认发震断层面。根据本次积石山地震序列的断层面解求解了该地区的应力场, 结果表明该地区受到青藏高原的 EN 向推挤, 形成了 SW-NE 向挤压和 SE-NW 向拉张的状态, 表示主应力大小的应力形因子 R 值较大, 解释了该地区呈现逆冲兼走滑的震源机制地震占优势的原因。将求解得到的构造应力场分别作用到聚类得到的两类节面上求解断层面的剪应力, 发现标准差较小的第一类中心节面处于剪应力较大区域。综合其他资料分析, 本研究推测 2023 年甘肃积石山 M_s 6.2 地震发震断层为 NE 倾向, 走向为 312.13°, 倾角为 56.09°。

关键词: 2023年积石山 M_s 6.2地震 聚类分析 震源机制 应力场 发震断层

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0011-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

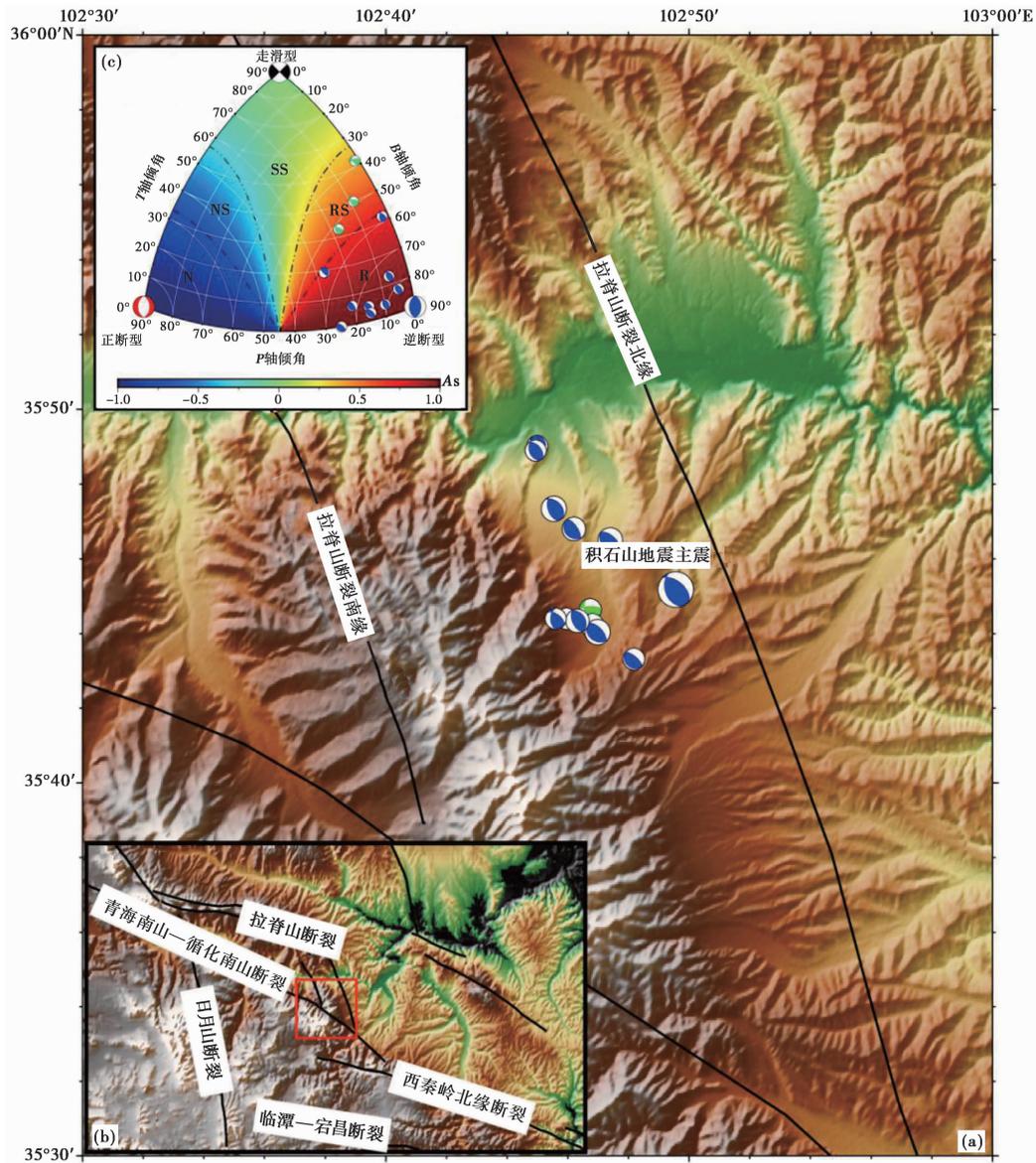
据中国地震台网中心测定, 2023年12月18日23时59分甘肃临夏州积石山县(35.70°N, 102.79°E)发生 M_s 6.2地震, 震源深度10km。震后发生了多次余震, 属于典型的“主震-余震型”地震, 震源区位于中国大陆南北地震带内部的拉脊山断裂带上。由于青藏高原的 EN 向推挤, 使得地壳受到挤压而变形, 在该区域形成了多条 WN-ES 或 SN 走向的交错复杂断裂带, 包括拉脊山断裂带、临潭—宕昌断裂、西秦岭北缘断裂、青海南山—循化南山断裂和日月山断裂等(图1)。与本次地震序列密切相关的拉脊山断裂带包含230km长的北缘断裂和220km长的南缘断裂, 该断裂带为分隔北侧西宁盆地和南侧循化盆地的重要边地质界断裂, 长期地质活动表现为逆冲性质(袁道阳等, 2005)。

大地震发生后, 发震断层面的快速确定对地震震后地震发生发展趋势判定极为重要。

[收稿日期] 2024-06-14 [修定日期] 2024-08-20

[项目类别] 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401086)资助

[作者简介] 陈鑫, 男, 1979年生, 工程师, 主要从事地震监测研究工作。E-mail: 68213744@qq.com



注：震源机制解用下半球投影海滩球表示，颜色填充的卦限为压缩区域，其中，蓝色表示逆断型，绿色表示逆走滑型，断裂用黑色线条表示，红色的框线为积石山地震震源区；(a)为本次地震序列的震源机制分类；(b)为研究区域的位置；(c)为研究区域的震源机制分布。

图 1 积石山地震震源区的地质构造背景

地震发生后，很多学者对该地震的区域地质背景、断层滑动等进行了多方面的研究。在区域构造方面，田勤俭等(2024)认为积石山北缘和南缘断裂是相向的，而陆诗铭等(2024)则认为积石山北缘和南缘断裂是同向的；针对该地震究竟发生在哪条断裂上，田勤俭等(2024)、张军龙等(2024)、杨攀新等(2024)、陆诗铭等(2024)均认为拉脊山北缘断裂南延段是积石山 $M_s 6.2$ 地震的发震断层，而方楠等(2024)采用地震波和 InSAR 数据确定倾向 EN 的断裂为发震断层面。刘振江等(2024)和杨九元等(2024)采用 InSAR 资料分别求解了该地震的

东北倾断裂和西南倾断裂断层面的滑动分布,发现用 InSAR 资料难以确定哪个倾向的断层发生破裂。在远震破裂中只能通过假定来得到地震的破裂分布,如王安简等(2024)、罗艳等(2024)采用假定远震波形按照西南倾的断层面上破裂,求得了地震的破裂分布。另外,由于不确定震源机制的哪个节面是发震断层面,在计算对后续地震的影响时,周明月等(2024)采用倾向 WS 的节面来计算该地震主震对周围的库伦破裂应力影响,这种选取具有较大的任意性。

万永革(2024)提出了断裂带上震源机制节面法向空间模糊聚类方法,并将其应用于 2021 年漾濞地震序列中,通过估计得到了与地震集聚分布基本一致的两条断裂带的几何形状,表明这种方法可用于估计断层面产状。沈千贺等(2024)采用该方法对 2021 年发生的玛多地震序列的节面进行聚类分析,得到了该地震序列发震断裂的几何参数。关兆萱等(2024)使用该方法计算得到了 2024 年乌什地震序列的发震断裂参数。该方法的提出为判定本次积石山地震为西南倾向或东北倾向提供了新的思路。

本研究首先采用主震及其余震序列的震源机制数据进行模糊聚类分析,以推测 2023 年积石山地震发震断层面的基本产状。然后,为了进一步确定发震断层面滑动特性,并分析本次地震孕育和发生的力学背景,采用该地震序列的震源机制解估计震源及邻区的构造应力场,在此基础上讨论积石山地震与应力场之间的关系以确定发震断层面。

1 震源机制节面聚类

为计算发震断层面的几何形态,收集 Yang 等(2024)给出的主震发生至 12 月 22 日积石山地震序列的震源机制解,对于主震,采用王润妍等(2024)根据多个震源机制中心解求解算法(万永革,2019)处理得到的震源机制中心解的两个节面结果,而对于余震震源机制,全部采用 Yang 等(2024)提供的震源机制(表 1)。为展示该地震序列的震源机制类型,采用万永革(2024)提出的依据震源机制水平应变化的面应变(A_s)(Amelung et al,1997)作为划分震

表 1 2024 年积石山地震序列的主震及余震震源机制解

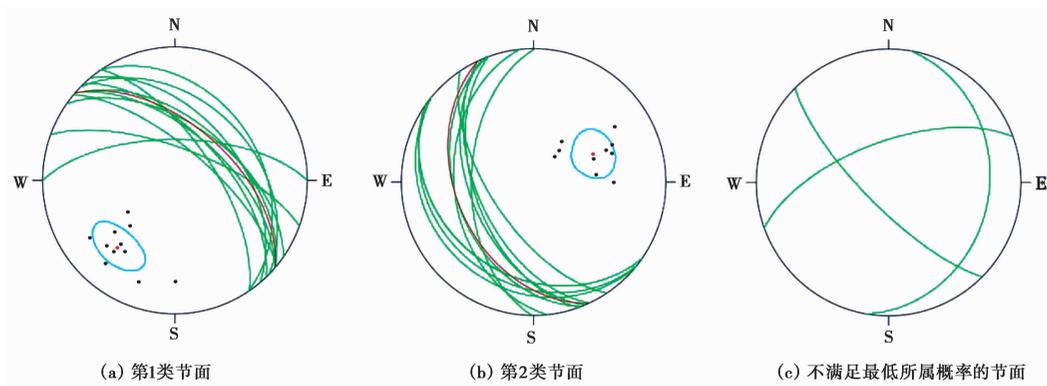
序号	发震日期	发震时刻 (北京时间)	北纬 /(°)	东经 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	震级	A_s	类型
1	2023-12-18	23:59:30	35.753	102.826	159.08	40.57	112.46	6.2	0.935	逆断
2	2023-12-19	00:24:49	35.734	102.783	125.00	30.00	80.00	4.2	0.990	逆断
3	2023-12-19	00:36:18	35.789	102.759	160.00	53.00	106.00	4.2	0.949	逆断
4	2023-12-19	00:43:12	35.780	102.770	326.00	66.00	97.00	3.9	0.978	逆断
5	2023-12-19	00:56:51	35.737	102.780	290.00	70.00	55.00	3.9	0.610	逆走滑
6	2023-12-19	00:59:39	35.739	102.772	155.00	55.00	95.00	3.9	0.994	逆断
7	2023-12-19	00:59:11	35.740	102.760	305.00	55.00	50.00	3.5	0.722	逆断
8	2023-12-19	01:10:31	35.740	102.766	250.00	65.00	30.00	3.5	0.383	逆走滑
9	2023-12-19	01:20:12	35.817	102.750	135.00	75.00	70.00	3.5	0.734	逆断
10	2023-12-19	02:10:06	35.815	102.749	320.00	50.00	80.00	3.5	0.982	逆断
11	2023-12-20	00:32:52	35.744	102.779	270.00	65.00	45.00	3.7	0.560	逆走滑
12	2023-12-21	04:02:13	35.775	102.790	311.00	60.00	93.00	4.1	0.997	逆断
13	2023-12-22	14:43:13	35.722	102.803	310.00	70.00	90.00	3.6	1.000	逆断

注:主震(序号 1)采用中国地震台网中心给出的地震面波震级 M_s ,其余采用 Yang 等(2024)提供的矩震级 M_w 。

源机制类型的标准进行分类,得到积石山地震序列中未出现正断型、正走滑和走滑型地震,逆断型地震有 10 个,占总体数量的 76.9%,逆走滑型地震有 3 个,占总体数量的 23.1%,由此判断该区域整体以逆断型为主(图 1(a))。

发生地震的破裂面通常与断裂带的形状相近。在一条地震破裂带发生的地震,其震源机制节面一般在发震断层附近聚集。通过求解震源机制节面的聚类中心,可以得到断裂带的几何形状。基于空间点聚类算法有 OPTICS(Ankerst et al, 1999), DBSCAN(Ester et al, 1996)和 DENCLUE(Hinneburg et al, 2003),万永革(2022)提出了将 DBSCAN 算法应用于震源机制节面的聚类分析的方法,该方法首先将两个节面法向的角度作为两个节面之间的距离,并将地震序列全部震源机制节面的集合作为一个整体数据集,根据节面之间的距离对全部节面进行聚类,找到节面密度足够高的类作为聚类结果(将较为分散的节面数据视为噪声),进而统计这些类中心所对应的节面走向和倾角,这就给出了一种根据断裂带整体震源机制的节面进行聚类确定断裂带几何产状的算法,算法的详细原理见万永革(2022)。该算法能够根据密度较高的节面法线方向指向划分为一类聚类,并筛除干扰噪声节面数据,因此可以基于本次地震序列全部震源机制解数据,采用震源机制节面法向聚类方法给出两类节面,并选择其中一类作为可能的破裂面。

通过对积石山地震序列的震源机制节面法向进行聚类分析,得到两类聚类中心:第一类节面数 10 个,其中心节面法向的走向为 222.13° ,倾伏角为 33.91° ,标准差为 14.11° 。得到的中心节面走向为 312.13° ,在法向标准差为 14.11° 的误差范围为 $301.65^\circ \sim 322.61^\circ$;倾角为 56.09° ,在法向标准差为 14.11° 的误差范围为 $43.90^\circ \sim 68.27^\circ$ 。第二类节面数为 11 个,其中心节面法向的走向为 65.54° ,倾伏角为 49.01° ,标准差为 16.21° 。其中心节面的走向为 155.54° ,在法向标准差为 16.21° 的误差范围为 $132.41^\circ \sim 178.66^\circ$;倾角为 40.99° ,在法向标准差为 16.21° 的误差范围为 $28.48^\circ \sim 51.26^\circ$ 。噪声节面数据个数为 5 个,在全空间分布且较为随机(图 2)。由于第一类中心节面聚类结果标准差较小,因此推测其可能为本次地震的发震断层面。



注:绿色弧线和红色弧线分别表示震源机制节面和聚类中心节面。震源机制节面的极点和用聚类中心的极点分别用黑点和红点表示,聚类中心极点周围的蓝绿色椭圆表示聚类中心的置信区间。

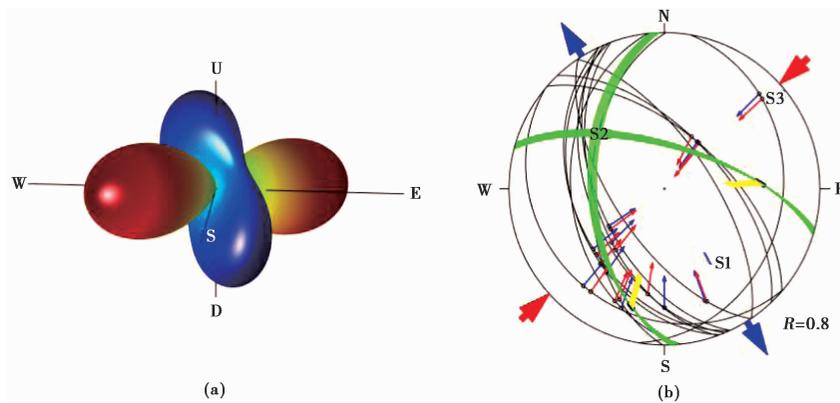
图 2 2024 年积石山地震序列震源机制解聚类结果

2 积石山地震震源区的构造应力场

采用表 1 中的积石山地震序列的震源机制, 根据震源机制精细网格搜索求解应力场的方法 (Wan et al, 2016; 万永革等, 2023), 求得该区域的地壳应力场, 结果见表 2 和图 3, 该结果与卜玉菲等 (2013) 得到的该地区的地壳应力场参数相差不大, 验证了本次反演的准确性。

表 2 应力场反演结果及与卜玉菲等 (2013) 结果对比

	主压应力轴		主张应力轴		R 值
	走向/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	
本文结果	47.78 (47.44~48.43)	9.62 (8.99~9.92)	148.04 (147.54~148.54)	46.39 (44.39~50.39)	0.8
卜玉菲等(2013)结果	26	11	132	55	0.9



注: (a) 积石山 $M_s6.2$ 地震震源区应力场三维表示图, 压缩区用红色表达, 膨胀区蓝色用蓝色表达; (b) 应力场反演结果及数据拟合情况的下半球施密特投影图, 张应力轴和压应力轴的水平最佳方向分别用蓝色大箭头和红色大箭头表示; 蓝色小箭头和红色小箭头分别表示“可能断面”的观测滑动方向和理论滑动方向; 绿色断层面覆盖的范围表示置信水平为 95% 的应力场最大剪应力平面范围; 黄色箭头表示最大剪应力节面的滑动方向; 黑色弧线表示节面的施密特投影。

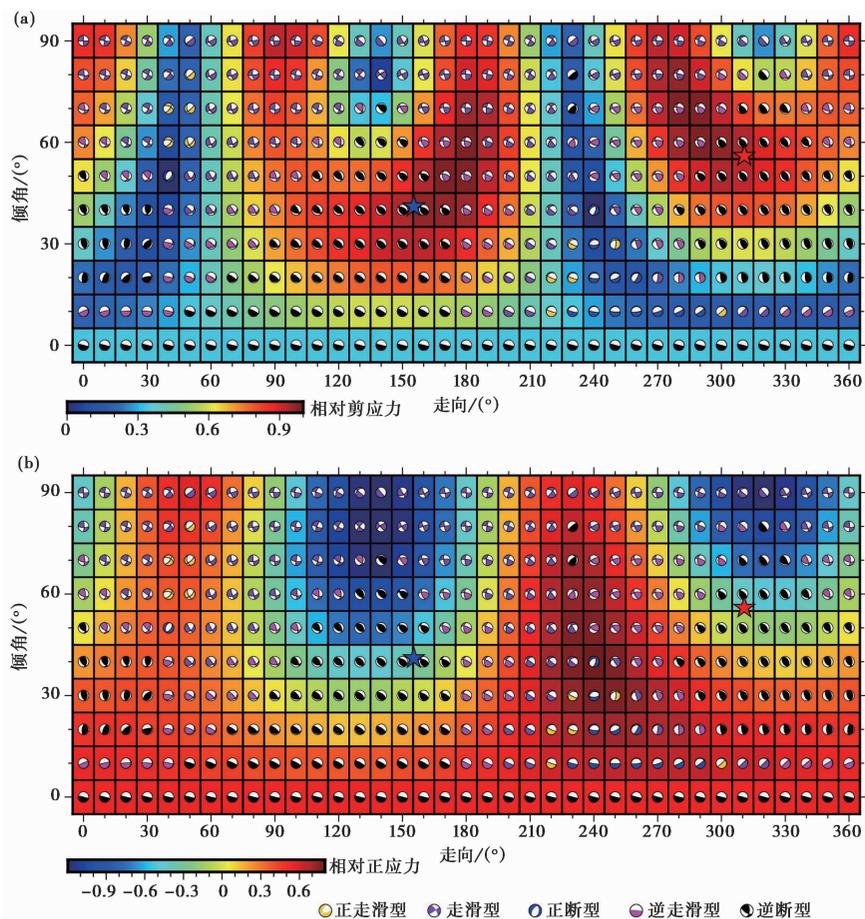
图 3 积石山 $M_s6.2$ 地震周围应力场的三维应力表示 (a) 及断层面数据和应力预测对应情况 (b)

另外, 本次应力场反演采用积石山 $M_s6.2$ 地震序列的震源机制结果, 更适用于解释本次地震序列。结果表明, 该地区受到青藏高原的北向推挤, 在临夏盆地形成了 NE-SW 向挤压和 SE-NW 向拉张的状态, R 值较大, 表明挤压应力较大, 而拉张轴和中间轴均表现为拉张应力, 只不过拉张轴的拉张应力较中间轴大一些, 这与该地区呈现很多逆冲兼走滑的震源机制地震是一致的。

3 震源区的应力场及其与两类中心节面的关系

为分析震源区应力场与 2023 年积石山 $M_s6.2$ 地震的关系, 本文基于构造应力场在遍历走向和倾角方位分布的断层面上产生的震源机制节面, 以及计算其在节面上产生相对正应力和相对剪应力的方法 (万永革, 2020; 杨成等, 2023), 利用上节得到的该地区的地壳应力

场参数,计算其在不同走向和倾角的断层上产生的相对正应力和剪应力及其震源机制类型,将其作用于积石山地震序列聚类得到的两类节面上(图4),计算得到在积石山地震的两个节面上产生的相对剪应力与相对正应力,相对剪应力越大表明剪切作用越强;相对正应力拉胀为正,挤压为负。



注:蓝色五角星代表第一类节面,红色五角星代表第二类节面。

图4 震源区构造应力场在两类中心节面上产生的相对剪应力(a)和相对正应力(b)

计算得到第一类中心节面(走向 312.13° , 倾角 56.09°)上的相对剪应力和正应力为 0.964 和 -0.306 ; 第二类中心节面(走向 155.54° , 倾角 40.99°)上的相对剪应力和正应力为 0.944 和 -0.334 。显然,本次地震的两类中心节面基本都处于剪应力较大区域,表明本次地震是在构造应力场作用下的一次正常应力释放。第一类中心节面的相对剪应力大于第二类中心节面,并且第一类节面的正应力大于第二类节面的正应力(挤压为负,即第一类节面的挤压力更小),这表明第一类中心节面更容易在应力场作用下发生滑动,其为发震断层面的概率更大。

4 结论与讨论

基于震源机制解数据,对 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 $M_s6.2$ 的地震进行了发震断层分析和动力学探讨。通过对积石山地震序列的震源机制节面数据进行聚类分析,确定了该地震序列发震断层的几何形态,发现第一类中心节面计算得到的标准差小于第二类中心节面,这表明第一类中心节面为发震断层的可能性较大。同时,求解该区域的构造应力场,将应力场数据投影到两类中心节面上,发现本地震序列的两类中心节面都处于剪应力较大区域,但标准差小的第一类中心节面的剪应力大于第二类中心节面,且其正应力大于第二类中心节面,这表明第一类中心节面更容易在应力场的作用下发生错动。

震源机制节面聚类 and 应力场体系分析均表明第一类中心节面(走向 312.13° , 倾角 56.09°)为发震断层的可能性较大。同时,王世广等(2024)对本次地震震后 10 天的地震序列进行重新精确定位,根据重定位余震的展布方向,认为发震断层面的节面走向为 302° , 倾角为 58° ; 方楠等(2024)采用 InSAR 和地震波数据联合反演,得到该地震断层面的走向为 325° , 倾角为 32° ; 刘振江等(2024)和 杨九元等(2024)分别单独采用 InSAR 数据推测该地震发生在一条 NNW 走向的东倾逆冲盲断层。上述结果与本文估计的发震断层产状相近,验证了本文得到的结果。

震源机制是区域应力场作用在断层面上造成的突然错动,同一应力场导致的剪应力最大的断层面(或节面)应该是单一的。但余震破裂断层面不一定是剪应力最大的节面,而是最大剪应力节面附近的一系列断层面,这也是本研究采用震源机制求取一条断裂带的原因。本研究的一个主要问题是针对积石山地震断层面产状模糊问题,故本文先搜集整理震源机制类型,采用节面聚类求解断层面产状方法估计断层面,然后求解应力场,通过分析应力场在主震断层面上剪应力的方式进行研究。而先根据本地区的震源机制求解应力场,然后再聚类震源机制节面得到主震断层面产状进行分析,也是一种可行的方案,这可根据研究的重点问题而定。

致谢: 本文所有图件均采用 GMT6 软件(Wessel et al, 2019)和 MATLAB 软件计算绘制而成,审者为本文提出建设性修改意见,特此致谢!

参考文献

- 卜玉菲,万永革,张元生. 2013. 甘肃及邻近地区的构造应力场. 地震地质, **35**(4): 833~841.
- 方楠,孙凯,黄传超,等.(2024-03-26)[2024-03-27]. 联合 InSAR 和地震波数据反演甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震震源时空破裂过程. 武汉大学学报(信息科学版), 1~13, <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240036>.
- 关兆莹,万永革,周明月,等. 2024. 2024 年新疆乌什 $M_s7.1$ 地震发震断层产状及其动力学探讨. 地震, **44**(2): 1~11.
- 刘振江,韩炳权,能懿菡,等.(2024-01-11)[2024-03-12]. InSAR 观测约束下的 2023 年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布. 武汉大学学报(信息科学版), 1~13, <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240008>.
- 陆诗铭,吴中海,李智超. 2024. 2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山 6.2 级地震的控震构造及特征. 地震科学进展, **54**(1): 86~93.
- 罗艳,朱音杰,高原. 2024. 区域地震记录揭示的 2023 年甘肃积石山 6.2 级地震震源破裂过程. 地震, **44**(1): 189~194.
- 沈千贺,万永革. 2024. 采用 2021 年青海玛多地震序列震源机制节面聚类确定发震断裂几何形态. 地震工程学报, **46**(1): 241~250.

- 田勤俭,程理. 2024. 积石山地震之地震构造讨论. 防灾博览,(1):10~15.
- 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. 地球物理学报, **65**(2):637~648.
- 万永革. 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定. 地球物理学报, **62**(12):4718~4728.
- 万永革. 2024. 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. 地球科学, **49**(7):2675~2684.
- 万永革. 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究. 地球物理学报, **63**(6):2281~2296.
- 万永革,王昱茹,靳志同. 2023. 2021 年云南漾濞 6.4 级地震震源区地壳应力不均匀性研究. 地震地质, **45**(4):1025~1040.
- 王安简,高原. 2024. 利用远场记录反演 2023 年甘肃积石山 $M_6.2$ 地震破裂过程. 地震, **44**(1):195~203.
- 王润妍,万永革,宋泽尧,等. 2024. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源机制及其对周围区域的应力影响. 地震, **44**(1):175~184.
- 王世广,胥广银,李帅,等.(2024-01-25). 2023 年甘肃积石山 $M_5.6.2$ 地震序列及发震构造分析. 地震学报, **46**(6):953~968.
- 杨成,万永革. 2023. 门源地区应力场与发震断层研究. 地震, **43**(3):77~90.
- 杨九元,温扬茂,许才军.(2024-01-11)[2024-03-18]. InSAR 观测揭示的 2023 年甘肃积石山 $M_5.6.2$ 地震发震构造. 武汉大学学报(信息科学版),1~11, <https://doi.org/10.13203/j.whugis.20230501>.
- 杨攀新,熊仁伟,胡朝忠,等. 2024. 2023 年甘肃积石山 6.2 级地震发震构造浅析. 地震, **44**(1):153~159.
- 袁道阳,张培震,雷中生,等. 2005. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究. 中国地震, **21**(1):93~102.
- 张军龙,徐岳仁,李文巧,等. 2024. 中强地震发震构造标志浅析——以 2023 年积石山 $M_5.6.2$ 地震为例. 地震, **44**(1):226~234.
- 周明月,万永革,关兆萱,等. 2024. 2023 年甘肃积石山 $M_5.6.2$ 地震对周围断层的应力影响及对余震的触发作用. 地震工程学报, **46**(4):942~948,964.
- Amelung F, King G. 1997. Large-scale tectonic deformation inferred from small earthquakes. *Nature*, **386**(6626):702~705.
- Ankerst M, Breunig M M, Kriegel H P, et al. 1999. OPTICS: ordering points to identify the clustering structure. *ACM SIGMOD Rec*, **28**(2):49~60.
- Ester M, Kriegel H P, Sander J, et al. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland, OR: AAAI Press, 226~231.
- Hinneburg A, Keim D A. 2003. A general approach to clustering in large databases with noise. *Knowl Inf Syst*, **5**(4):387~415.
- 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.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al. 2019. The generic mapping tools version 6. *Geochem Geophys Geosyst*, **20**(11):5556~5564.
- Yang Z G, Liu J, Zhang Y Y, et al. 2024. Rapid report of source parameters of 2023 $M_6.2$ Jishishan, Gansu earthquake sequence. *Earth Planet Phys*, **8**(2):436~443.

Seismogenic Fault Occurrence and Geodynamic Discussion of the 2023 Jishishan $M_s6.2$ Earthquake, Gansu, China

Chen Xin¹⁾, Zhang Qing¹⁾, He Jiaying¹⁾, Guo Peilan¹⁾, Liu Baiyun²⁾

1) Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China

2) Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China

Abstract The rapid determination of the seismogenic fault occurrence following a large earthquake is crucial for constructing seismic rupture models, understanding seismogenic structures, and estimating post-earthquake seismic activity. In this study, focal mechanism data from the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake sequence in Gansu, China, were collected and analyzed through nodal plane clustering. After removing noise points above the threshold, two clusters were identified. The cluster with a strike of 312.13° and a dip of 56.09° exhibited a smaller standard deviation and is considered the likely seismogenic fault occurrence of the $M_s6.2$ earthquake. To further verify this potential fault, the relationship between the fault occurrence and the stress field was analyzed. The stress field in the source region, derived from the focal mechanisms of this earthquake sequence, reveals NE-SW compression and NW-SE extension due to the pushing of the Tibetan Plateau. The high stress ratio is attributed to the dominance of thrust with a strike-slip component in the focal mechanisms. When the stress field was projected onto the two nodal plane centroids from the clustering analysis, it was found that the cluster with the smaller standard error experienced larger shear stress, with normal stress also supporting its rupture. Based on this comprehensive analysis, we conclude that the seismogenic fault of the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake is a north-west dipping fault with a low dip angle, having a strike of 312.13° and a dip of 56.09° .

Keywords: The 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake; Clustering method; Focal mechanism; Stress field; Seismogenic faults