关兆萱,万永革,黄少华. 2024. 2023 年山东平原 M5.5 地震对周围区域的应力影响. 中国地震,40(2):378~388.

2023 年山东平原 *M*5.5 地震 对周围区域的应力影响

关兆萱¹⁾ 万永革^{1,2,3)} 黄少华¹⁾

1) 防灾科技学院,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)河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站,河北隆尧 055350

摘要 为深度剖析 2023 年山东平原 M5.5 地震对周围区域的影响,首先结合不同震源机制结 果确定了本次地震的震源机制中心解:节面I走向 124.02°、倾角 72.37°、滑动角-19.54°,节面 II 走 向 220.16°、倾角 71.41°、滑动角-161.36°,该地震的震源机制与当地的应力场较为符合,是在当地构 造应力场作用下的一次正常能量释放,并且节面 II 的相对剪应力和正应力的结果比节面 I 更容易 破裂,再结合该地震断层走向判断节面 II 为本次地震的发震断层面。然后基于本次地震的破裂模 型及均匀弹性半空间模型,计算此次地震对周围地区产生的地表同震位移场及水平应变场,发现 震中北侧和南侧的物质向外涌出,而西侧的物质涌入震中,在发震断层附近呈现明显的走滑机制; 震中南北两侧隆升,西侧沉降; 震中西侧的面应变分布呈现压缩,南北侧呈现伸张。最后计算该地 震在周围主要活动断层上产生的库伦应力变化,结果表明平原 M5.5 地震对沧东断裂北段、 聊城一兰考断裂北段、高唐断裂、徐黑西断裂和埕西一丰二庄断裂的库伦应力变化不明显,对齐 河一广饶断裂西段和临邑断裂的最大应力卸载量达到了千 Pa 量级,对夏口断裂和陵县一阳信断 裂的库伦应力最大增加量达到百 Pa 量级,对沧东断裂中段的库伦应力最大增加量和卸载量均达 到千 Pa 量级,应注意沧东断裂中段库伦应力变化较高区域的地震活动性。

关键词: 山东平原 M5.5 地震 震源机制中心解 库伦应力

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0378-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

СМҮК

据中国地震台网中心测定,2023 年 8 月 6 日 2 时 33 分山东省德州市平原县发生 M5.5 地震,震中位于 37.16°N,116.34°E,震源深度 10km,震中距离平原县城仅 8km。自 1970 年以来,在此次事件 100km 范围内 M3.0 以上地震共发生 8 次,本次地震为近年来发生在首都

[[]收稿日期] 2023-08-28 [修定日期] 2023-10-30

[[]项目类别]中央高校科研业务费专项(ZY20215117)、国家自然科学基金(42174074、41674055)、河北省高等学校自然科学技术项目(ZD2022160)和河北省地震动力学重点实验室开放基金(FZ212105)共同资助

[[]作者简介] 关兆萱, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面研究工作。 E-mail: 15568778655@163.com 万永革, 通讯作者, 男, 1967 年生, 研究员, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面研究工作。 E-mail: wanyg217217@vip.sina.com.cn

圈附近、人口密集区的震级较大的一次地震,引起了社会的广泛关注。

CMYK

2 期

此次地震位于华北平原块体,华北平原块体是被山西断陷带、张家口一渤海断裂带、郯 城一庐江断裂带和秦岭一大别山构造带分割出来的次级块体,但本次地震的发生地不属于 上述明显地震带,震源区周围隐伏断层分布复杂,震中北侧附近发育沧东断裂和徐黑西断 裂,震中南侧发育齐河一广饶断裂、高唐断裂、聊城一兰考断裂,震中东侧发育陵县一阳信断 裂、夏口断裂和临邑断裂(图1),上述断层均为早中更新世断层(徐锡伟等,2016)。因此,确 定本次地震对周围主要断层的应力影响,研究该地震所产生的同震地表位移场,分析未来可 能的发震趋势及危险性,对该地区的地震动力学研究具有意义。



图 1 山东平原 M5.5 地震周围的断裂分布

前人研究表明,通过计算地震在周围断层上引起的库伦破裂应力变化,可以有效地分析 后续该区域的地震活动性和地震发生位置。例如,冯淦等(2021)给出 2021 年青海玛多 M₅7.4 地震在震中附近主要断层面上产生的同震库伦应力变化,分析认为玛多一甘德断裂 中段的地震危险性值得重视;万永革等(2009)通过计算 2008 年汶川大地震对周围断层的 静态库伦应力变化,估计了该区域后续的潜在地震危险性; 靳志同等(2019)研究了 2017 年 九寨沟 M_s7.0 地震对周围主要活动断层的应力影响,并指出虎牙断裂中段的地震危险性较 高; 许鑫等(2022)剖析了 2021 年云南漾濞 Ms6.4 地震对周围断层的影响,发现周围多个断 裂的库仑破裂应力均有千 Pa 量级的增加。

为分析本次平原 M5.5 地震对周围区域的影响,本文首先计算本次地震的震源机制中心 解,以提供精确的数据资料,并确定该区域构造应力场投影到地震断层面上的相对剪应力和 正应力,进而讨论该地震和应力场之间的关系。然后根据 Wells 等(1994)给出的统计公式 获得该地震的破裂模型参数,根据 Okada(1992)给出的弹性半空间模型计算此次地震对周 围地区产生的地表同震位移场和水平应力场,以及对周围主要断层产生的静态库伦破裂应 力变化。

379

40卷

1 震源机制中心解的确定

2023 年 8 月 6 日山东平原 5.5 级地震发生后,中国地震局地球物理研究所等多个机构 和学者计算得到了本次地震的多个震源机制解(表1)。由于使用的方法和数据的不同,这 些震源机制结果具有一定的离散度,这给地震动力学分析或其他应用做出抉择带来了难度。 这些结果都是震源错动方式的一种测量,因此可以根据这些测量得到的不同震源机制结果 给出一个中心解,可以用于分析地震与当地应力场的关系、震后库伦应力变化、地震发生背 景等研究(关兆萱等,2023)。为避免选择不同震源机制的困难,给出一个中心震源机制解, 本文采用万永革(2019)提出的"同一地震多个震源机制中心解的确定"算法进行处理,求得 一个与其他震源机制的最小空间旋转角的平方和最小的结果作为震源机制中心解,为进一 步计算本次地震与构造应力场的关系和破裂模型提供可靠的震源机制解。

序号	震源机制 走向/倾角 /滑动角/(°)	研究机构	作为初始解得到的 震源机制解走向 /倾角/滑动角/(°)	作为初始解 得到的标准差 <i>S/</i> (°)	得到的中心解与其他 震源机制的最小空间 旋转角/(°)
1	225/69/-150	中国地震台网中心	220.14/71.39/-161.36	19.999005	11.00
2	225.7/75.3/-148.9	中国地震局地震预测研究所	220.13/71.39/-161.37	19.999016	12.71
3	224/72/-161	中国地震局地球物理研究所	220.14/71.39/-161.35	19.999000	3.79
4	232/71/-153	中国地震局地球物理研究所	220.14/71.39/-161.35	19.999001	12.09
5	221/71/-148	中国地震局地球物理研究所	220.13/71.39/-161.36	19.999012	13.12
6	220/71/-158	山东省地震局(CAP)	220.14/ 71.39/-161.35	19.999000	3.44
7	210/65/203	山东省地震局(P 波初动)	220.16/71.41/-161.36	19.998967	14.00
8	221/74/-158	全球矩心矩张量(GCMT)	220.13/71.39/-161.36	19.999010	4.13
9	209/35/-174	法属波利尼西亚探测与 地球物理实验室(CPPT)	220.14/71.39/-161.36	19.999004	37.79
10	217/76/-177	德国地球科学研究中心(GFZ)	220.15/71.39/-161.35	19.998999	15.74
11	225/72/-165	美国国家地震信息中心(NEIC)	220.14/71.39/-161.35	19.999000	6.93
12	37/70/-171	美国地质调查局(USGS)	220.13/71.47/-161.34	19.999026	47.28

表 1 各研究机构给出的平原 M5.5 地震震源机制及作为初始解得到的震源机制中心解和标准差

分别将各个震源机制作为初始解得到中心震源机制,以标准差最小的解作为最终结果。 发现将山东省地震局(P波初动)给出的震源机制作为初始解,得到的震源机制的标准差最 小,本研究以此(节面 I 走向 124.02°、倾角 72.37°、滑动角-19.54°;节面 II 走向 220.16°、倾 角 71.41°、滑动角-161.36°)作为最终结果(图 2)。从表1可以看出,该地震震源机制解距中 心解的空间旋转角最大达 47.28°,最小空间旋转角为 3.44°,这些数据表明不同机构和学者 得到的震源机制解相对集中。根据平原 M5.5 地震震源机制中心解的结果,可以判断此次地 震为走滑型地震。

2 应力场与平原 M5.5 地震的关系

Wan(2010)根据中国地壳应力数据库和哈佛大学矩心矩张量目录,计算了中国现代构

380



注:(a)中的黑色弧线表示中心震源机制的两个节面,绿色弧线覆盖区域为其不确定范围;红色、蓝色和黄色 的圆点表示中心震源机制解的 P 轴、T 轴和 B 轴,其周围对应颜色的封闭曲线表示其不确定性范围;绿 色和黑色的圆点表示各研究机构得到的震源机制 P 轴和 T 轴的投影;紫色弧线表示各研究机构得到的 震源机制节面;(b)中的压缩区域和膨胀区域分别用蓝色和红色表示(万永革等,2011)。

图 2 山东平原 M5.5 地震的震源机制中心解(a) 及空间三维辐射花样(b)

造应力场,得到平原 M5.5 地震震源区(图1)主压应力轴走向和倾伏角分别为 255°和 4°,主 张应力轴走向和倾伏角分别为 163°和 24°,相对应力大小 R 值为 0.55。为分析该区域构造 应力场与本次地震的关系,本文根据万永革(2020)在不同应力体系下模拟计算所产生震源 机制及其相对剪应力和相对正应力的方法,得到该地区构造应力场在不同几何形态的断层 上产生的相对剪应力、相对正应力和震源机制类型,并将其作用在平原 M5.5 地震震源机制 中心解的断层面上(图 3)。

平原 M5.5 地震震源机制中心解节面 I 相对剪应力和相对正应力分别为 0.773(最大为 1)和-0.305,剪应力滑动角为 0.8°,与观测滑动角相差 20.34°;节面 II 相对剪应力和相对正 应力分别为 0.885 和 0.433,剪应力滑动角为 163.6°,与观测滑动角相差 35.04°。显然,此次 地震的震源机制中心解的两个节面均处于剪应力较大区域,剪应力滑动角与对应节面的观 测滑动角相差不大,这表明平原 M5.5 地震是在背景构造应力场作用下发生的一次走滑型地 震。

另外,在节面Ⅱ上的相对剪应力大于I节面,且节面Ⅱ上的相对正应力为正,而节面Ⅰ 的相对正应力为负,从应力作用在两个节面的情形来看,节面Ⅱ有利于断层滑动,再考虑到 断层走向为 EN-SW(戴丹青等,2023;张雅茜等,2023),由此可以判断中心震源机制的节面 Ⅱ为发震断层面。

3 平原 M5.5 地震对邻区的影响

3.1 计算方法

地震是由地下深处岩石的错动和内部破裂产生的,在地震前后的弹性能释放过程中,可以把地球介质一阶近似为半无限空间内均匀各向同性完全弹性体(靳志同,2021),通过地震的破裂模型参数可计算出弹性体内部产生的位移场和应变场。本文根据 Okada(1992)给出的弹性半空间模型,计算平原 M5.5 地震所产生的静态库伦破裂应力。

MYK

382

СМҮК



图 3 平原 M5.5 地震在区域构造应力场中的相对剪应力(a)和相对正应力(b)

活动断层面上库伦破裂应力的变化会受到剪应力、正应力和摩擦系数的共同影响,因此 可以表示为

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

式中, $\Delta \sigma_f$ 为库伦破裂应力变化, $\Delta \sigma_f > 0$ 且超过 10000Pa 的阈值时,对断层的破裂有触发作用, $\Delta \sigma_f < 0$ 时则抑制断层的破裂; $\Delta \tau$ 为断层面滑动方向上的剪切应力变化; $\Delta \sigma_n$ 为断层面上的正应力变化; μ '为视摩擦系数,由于地下介质可能含有孔隙流体,因此基于孔隙流体和断

40 卷

层面上的介质特性,μ'一般取 0.2~0.8,本研究参照前人的研究(King et al, 1994; Harris, 1998),取 0.4。

计算平原 M5.5 地震对邻区的影响还需要获得地震破裂的模型,本研究采用中国地震台 网中心提供的震源深度 10km,采用上述根据震源机制中心解两个节面上所受的应力情况和 断层走向判断的节面 II 为接收断层面的结果,并根据 Wells 等(1994)给出的统计公式估计 了走滑型地震断层面大小和滑动量,即

$$\begin{cases} L = 10^{0.62 \times M - 2.57} \\ W = 10^{0.27 \times M - 0.76} \\ U = 100 \times \left(\frac{(M + 6.033) \times 1.5}{L \times W \times 3 \times 10^{16}} \right) \end{cases}$$
(2)

式中, *L* 为断层走向尺度, *W* 为断层倾向尺度, *M* 为地震震级, *U* 为滑动量。计算得到断层面的长度为 6.9km, 宽度为 5.3km, 滑动量为 18.1cm, 然后根据得到的破裂模型计算平原 *M*5.5 地震在震源深度 10km 处对周围地区产生的地表同震位移场和水平应变场, 以及对周围主要断层面上产生的库伦破裂应力变化。

3.2 对周围产生的位移场与应变场

为了解平原 M5.5 地震对周围地区的影响,根据本次地震的破裂模型,计算了平原 M5.5 地震对周围地区产生的地表同震位移场及水应变场(图4)。

从图 4(a)可以看出,此次地震近处的位移场具有以下初步特征:从地表的水平位移场 来看,震中北侧和南侧的物质向外涌出,而西侧的物质涌入震中,在发震断层附近呈现明显 的走滑机制;与水平位移场相对应,垂直位移场在震中北侧和南侧表现为隆升,而西部表现 为沉降,与走滑型震源机制表现的位移场的模式相一致。

计算得到平原 M5.5 地震在震源破裂处产生的应力场在水平面的投影结果,如图4(b) 所示,可以看出面应变的分布在震中附近西侧呈现压缩,而在震中北侧和南侧呈现伸张,并 随着远离断层面而逐渐减小。

3.3 主要断层面上产生的同震库伦应力变化

在计算库伦应力变化时,需要获取断层的几何形状和滑动性质的数据。在本文的计算中,沧东断裂的几何性质采用高战武等(2000)的断层数据;聊城一兰考断裂北段的断层几 何形状和滑动特征采用师涵博等(2022)计算得到的断层数据;齐河一广饶断裂西段采用董 培育等(2020)的数据;埕西一羊二庄断裂南段采用缪欢等(2022)的数据;金宠(2007)认为 徐黑西断裂的力学性质应该与沧东断裂相似,因此徐黑西断裂南段的断层数据采用沧东断 层北段的数据,其余断层数据均为山东省地震局实地测量得到^①。根据 Wan 等(2016)给出 的应力张量在震源机制断层面上的剪切应力方向与断层走向夹角的计算公式,使用 Wan (2010)研究得到的该区域应力场参数,计算得到各个断层的滑动角数据(表2)。

由图 5 可见,本次平原 M5.5 地震周围的多个断裂均有不同程度的库伦应力增加,陵 县一阳信断裂库伦应力最大增加量达 157Pa,夏口断裂库伦应力最大增加量达 404Pa,沧东 断裂中段的库伦应力变化复杂,其最大库伦应力增加量为 1179Pa,最大应力卸载量达到

2 期

① 崔华伟,私人通讯.

384



注:(a)中箭头代表此次地震所产生的水平位移,垂直位移上升为正;(b)中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,水平面应变拉张为正。

图 4 平原 M5.5 地震 10km 深度产生的同震位移场(a)及水平主应变和面应变场(b)

1485Pa。沧东断裂南段最大应力卸载量为231Pa,齐河一广饶断裂西段最大应力卸载量为 1187Pa,临邑断裂最大应力卸载量为1837Pa,沧东断裂北段、聊城一兰考断裂北段、高唐断 裂、徐黑西断裂和埕西一羊二庄断裂的库伦应力变化并不明显,可见本次地震对这几条断裂 带影响较弱。

通过计算平原 M5.5 地震在周围断裂上产生的库伦应力可知,离震源处较近的沧东断裂 多处均有不同程度的应力卸载,因此本次地震的发震构造可能是隐伏的沧东断裂。本次地 震对周围主要断裂带的影响较小,库伦破裂应力均未达到触发的阈值(10000Pa),但阈值仅

40 卷

MYK

表 2	本研究所用的地质断层参数及库仑破裂应力变化						
断层名称	分段数	倾角/(°)	倾向	性质	滑动角/(°)	库伦应力/Pa	平均库伦应力/Pa
沧东断裂北段	2	35	SE	走滑	-126	14~28	21
沧东断裂中段	5	65	SE	正走滑	169	-1485~1179	-117
沧东断裂南段	5	65	SE	正走滑	169	-231~-2	-70
聊城—兰考断裂北段	3	84	NW	逆走滑	56	-50~-5	-21
齐河一广饶断裂西段	7	80	NW	正断	270	-1187~26	-56
高唐断裂	5	45	SE	走滑	-173	-10~72	15
陵县一阳信断裂	8	70	NW	走滑	163	-58~157	2
夏口断裂	4	60	NW	走滑	-162	18~404	187
临邑断裂	4	80	SW	走滑	-19	-1837~77	-456
徐黑西断裂南段	3	35	SE	走滑	170	10~49	22
埕西一羊二庄断裂南段	2	50	NW	正断	-141	3~4	3



注: 库伦应力变化表示在断层所在的位置,填充在断层上的颜色表示投影在相应地震破裂面上的库伦破裂应 力变化,红色表示增加,蓝色表示减少。

图 5 平原 M5.5 地震 10km 深度处对周围主要断裂产生的库伦破裂应力

是前人根据经验给出的临界触发值,Ziv等(2000)通过计算地震受到的累积静态应力变化, 发现对于小于10000Pa的库伦应力变化,累积应力变化也有可能会增加,进而影响地区的地 震活动性。因此,本研究所得到的结果对该地区的危险性分析具有一定的参考意义,特别是 对于库伦应力增加较多的沧东断裂中段,应注意沧东断裂中段库伦应力变化较高区域的地 震活动性。

4 结论与讨论

结合不同研究机构给出的山东平原 M5.5 地震的震源机制,得到该地震的震源机制中心 解,然后根据本次地震的破裂模型计算了均匀弹性半空间下平原 M5.5 地震产生的库伦破裂 应力变化对周围主要断层的影响,以及产生的位移场与应变场,得到以下初步认识:

(1)震源机制中心解的结果为:节面 I 走向 124.02°、倾角 72.37°、滑动角-19.54°,节面
Ⅲ 走向 220.16°、倾角 71.41°、滑动角-161.36°,此次地震为一次走滑型地震。

(2)平原 M5.5 地震的两个节面在震前基本均处于最大剪应力加载状态,剪应力滑动角 也与对应节面的观测滑动角比较接近,由此可见,本次地震是在背景构造应力场作用下,沿 应力场最大剪应力平面进行的正常能量释放。根据节面 II 在应力场作用下的相对剪应力和 正应力,再结合地震断层走向判断节面 II 为发震断层面。

(3) 此次地震震中北侧和南侧的物质向外涌出,而西侧的物质涌入震中,在发震断层附 近呈现明显的走滑机制。与水平位移场相对应,垂直位移场在震中北侧和南侧表现为隆升, 而西部表现为沉降,与走滑型震源机制表现的位移场模式相一致。而面应变的分布在震中 西侧呈现压缩,在震中北侧和南侧呈现伸张。

(4)本次地震对沧东断裂北段、聊城一兰考断裂北段、高唐断裂、徐黑西断裂和埕西一羊 二庄断裂的库伦应力变化不明显,对夏口断裂和陵县一阳信断裂的库伦应力最大增加量达 到百 Pa 量级,对沧东断裂中段的库伦应力最大增加量达到千 Pa 量级,应注意沧东断裂中段 库伦应力变化较高区域的地震活动性。

本文在使用一级近似来估算地震对周围断层活动影响时,采用的是比较简单的弹性半空间位错模型,但库伦破裂应力变化会受到地球内部的三维不均匀结构和地球的粘弹性松弛效应的影响(万永革等,2007、2008; Deng et al,1998)。然而需要说明的是,粘弹性松弛效应在震后数年时间内的影响是可以忽略不计的(万永革等,2008)。另外,地震发生后所产生的大量余震也会对周围断层产生一定的影响(万永革等,2005),但由于目前还没有可以利用的大量余震的震源破裂数据,并且本次地震产生的余震震级较小,所产生的应力变化并不会改变本研究结果的空间模式,因此本研究未对其进行考虑,而是在一级近似下计算了平原*M*5.5 地震对周围主要断层影响,研究结果对该地区的地震危险性评估具有一定参考意义。

致谢:中国地震局地球物理研究所韩立波研究员、蒋长胜研究员、郭祥云高级工程师、张喆助理研究员 以及山东省地震局曲均浩正高级工程师提供了此次地震的震源机制数据,山东省地震局崔华伟工程师提供 了地震周围活动断层的产状数据,本文图件采用 GMT 软件(Wessel et al, 2019)和 MATLAB 软件绘制,在此 一并表示感谢。

参考文献

戴丹青,席楠. 2023. 2023 年 8 月 6 日山东平原 M5.5 地震破裂过程快速反演. 中国地震, 39(3):689~694.

董培育,任天翔,王志辉. 2020. 华北历史强震对济南市新旧动能转换先行区断裂活动性影响的数值分析. 大地测量与地 球动力学,40(10):1055~1061.

冯淦,万永革,许鑫,等. 2021. 2021 年青海玛多 M_s7.4 地震对周围地区的应力影响. 地球物理学报,**64**(12):4562~4571. 高战武,徐杰,宋长青. 2000. 华北沧东断裂的构造特征. 地震地质,**22**(4):395~404.

386

MYK

2 期

关兆萱,邓森,刘敬光,等. 2023. 2023 年土耳其双强震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析. 防灾科技学院学报,25(2):23~32.

金宠. 2007. 黄骅坳陷和济阳坳陷中生界构造特征、演化及动力机制. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学.

靳志同. 2021. 精细结构对地震产生的(准)静态应力场的影响. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地球物理研究所.

- 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. 地球物理学报,62(4): 1282~1299.
- 缪欢,王延斌,何川,等. 2022. 渤海湾盆地埕北断阶带断裂发育特征及其控藏作用. 岩性油气藏,34(2):105~115.
- 师涵博,万永革,张元生.2022.聊城一兰考断裂带中段及邻区的震源机制与应力场特征分析.地震工程学报,44(6): 1478~1488.
- 万永革,沈正康,兰从欣. 2005. 兰德斯地震断层面及其附近余震产生的位移场研究. 地震学报,27(2):139~146.
- 万永革,沈正康,曾跃华,等. 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 29(2): 115~129.

万永革,沈正康,曾跃华,等. 2008. 唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究. 地震学报,30(6):581~593.

- 万永革,沈正康,盛书中,等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报,31(2):128~139.
- 万永革,盛书中,许雅儒,等. 2011. 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. 地球物理学报,54 (4):994~1001.
- 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. 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.

徐锡伟,韩竹军,杨晓平,等. 2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京: 地震出版社.

许鑫,万永革,李振月,等. 2022. 2021年云南漾濞 M_s6.4 地震序列静态应力触发研究. 地震工程学报,44(4):970~979.

张雅茜,戴丹青,杨志高,等. 2023. 2023 年 8 月 6 日山东平原 5.5 级地震震源参数初步分析.中国地震,39(4):902~912.

Deng J S, Gurnis M, Kanamori H, et al. 1998. Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake. Science, **282**(5394):1689~1692.

Harris R A. 1998. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. J Geophys Res, 103(B10):24347~24358.

King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. Bull Seismol Soc Am, 84(3):935~953.

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

Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China. Earthq Sci, 23(4): 377~386.

- 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.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull Seismol Soc Am, 84(4):974~1002.

Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al. 2019. The Generic Mapping Tools version 6. Geochem Geophys Geosyst, 20(11):5556~5564.

Ziv A, Rubin A M. 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight?. J Geophys Res Solid Earth, 105(B6):13631~13642.

387

The Stress Effect of the M5.5 Earthquake on the Surrounding Area in Shandong Pingyuan in 2023

Guan Zhaoxuan¹⁾, Wan Yongge^{1,2,3)}, Huang Shaohua¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

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

 Hebei Hongshan Thick Sediment and Earthquake Disaster National Field Observation and Research Station, Longyao 055350, Hebei, China

In order to comprehensively analyze the impact of the 2023 Pingyuan, Shandong, M5.5 Abstract earthquake on the surrounding area, we first determined the central focal mechanism of the earthquake based on different focal mechanism results:nodal plane I:strike 124.02°, dip 72.37°, slip -19.54°; nodal plane Ⅱ: strike 220.16°, dip 71.41°, slip -161.36°. The earthquake's focal mechanism aligns with the local stress field, indicating a normal energy release under the local tectonic stress field. Moreover, the relative shear stress and normal stress on nodal plane II exceed those on nodal plane I. Considering the NE-SW orientation of the active faults around the epicenter, it is inferred that nodal plane II is the seismogenic fault. Subsequently, based on the rupture model of the earthquake and a homogeneous elastic half-space model, we calculated the surface co-seismic displacement field, horizontal principal strain, and areal strain generated by the earthquake in the surrounding area. Our observations reveal that material to the north and south of the epicenter experienced uplift, while material to the west side subsided, indicating a distinct strike-slip mechanism close to the seismogenic fault. Compressional areal strain distribution was evident on the west side of the epicenter, whereas extensional strain distribution prevailed on the north and south sides. Finally, we computed the Coulomb stress changes on the main active faults around the earthquake. The results indicate insignificant Coulomb stress changes on the northern segment of the Cangdong fault, Liaocheng-Lankao fault's northern segment, the Gaotang fault, the Xuheixi fault, and the Chengxi-Fengerzhuang fault. However, the Coulomb stress unloading amount reached a significant magnitude of 1,000 Pa on the western section of the Qihe-Guangrao fault and the Linyi fault. The Xiakou Fault and the Lingxian-Yangxin fault exhibited the most significant increase in Coulomb stress, with a magnitude of 100 Pa, while the middle section of the Cangdong fault experienced both a maximum increase and reduction in Coulomb stress, reaching a high magnitude of 1,000 Pa. The area with substantial Coulomb stress modification in the middle section of the Cangdong fault warrants special attention regarding seismic activity.

Keywords: Shandong Pingyuan M5.5 earthquake; Central focal mechanism; Coulomb failure stress