

王晓山,陈婷,冯向东,等. 邢台地震序列的应力释放调整过程[J]. 华北地震科学, 2017, 35(1): 17-23.

邢台地震序列的应力释放调整过程

王晓山¹, 陈 婷¹, 冯向东¹, 刘双庆²

(1. 河北省地震局, 石家庄 050021; 2. 天津市地震局, 天津 300201)

摘要:利用邢台地震序列震源机制解反演邢台老震区分时段应力场,并对震源机制和应力场结果进行分析。研究结果显示:邢台老震区的震源错动类型以走滑类型为主,遍布整个震源区;序列整体和 3 个时段的应力场反演结果基本一致,且与华北地区其他强震的应力方向相同,表明邢台地震的发生受华北区域构造应力场控制;应力场反演得到的邢台地震序列现今的摩擦系数显示处于拜尔利摩擦系数的范围,区域应力方向有利于断层活动,而地震活动频度和强度偏低,推断目前震源区处于某种平衡状态,需要进一步研究震源区深浅应力状态的耦合关系。

关键词:邢台地震序列;震源机制解;应力场反演;摩擦系数

中图分类号:P315.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-1375(2017)01-0017-07

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2017.01.003

0 引言

邢台地震序列最早从 1965 年 7 月开始,至今已经活动了 50 多年,序列集中分布在华北平原中部 NE 向的束鹿断陷及其附近,呈椭圆形分布^[1]。邢台震群序列发生后的 50 年中,众多科研人员从发震构造、孕震机理、地球动力学等方面开展了大量研究工作,具体包括地震活动性、震源机制解、形变观测、震害调查等^[2],取得了很多在中国地震科学研究领域具有开创性的成果。

以往对邢台序列应力场变化的研究主要基于地震活动的时空特征、震源机制解和库伦应力变化等。王泽皋^[3]将邢台余震区余震频度作为监视区域构造应力场增减情况的反映;胡小幸和林邦慧^[4]给出了一系列反映邢台地震序列应力场调整及地震构造的震源位置立体图像;李钦祖等^[5]使用红山地震台附近邢台序列的小震资料给出了红山地震台所在区域应力场;何志桐和谢挺^[6]通过序列中强余震的空间分布特征结合震源机制解推测了地震前震源区的应变图像,讨论了强地震的迁移和互相触发的关系;刁桂苓^[7]分析了 1966—1984 年 22 个时段小震初动综合断层解,所得平均应力轴与 6 级以上地震的震源机制解结果一致;刁桂苓和王泽皋^[8]对邢台地震群中子序列的震源机制解进行分析,发现序列后期

发生的子序列受构造应力场的制约越来越强,而震源区的调整作用逐步降低;姚殿义^[9]认为 1985 年 11 月 30 日的任县 5.3 级地震可能是邢台地震区长期活动的背景上震源应力场调整的又一事件,提出零轴的“陡直—倾斜—陡直”现象是邢台强余震应力场演变的特征之一;张宏志等^[10]分析了 2002—2006 年邢台地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解,震源机制解应力轴的优势取向和节面占优的走向与序列早期是一致的,接近半数的震源机制解与构造应力场相比,产生偏转、反向或者倾向滑动,表明当地的应力状态有别于序列早期;陈连旺等^[11]利用三维粘弹性有限元模型,研究了 1966 年 3 月 22 日邢台 7.2 级地震所引起的库仑破裂应力的震时变化以及百年时间尺度流变效应的动态演化图象及其特征。震源机制解是研究构造应力场的基础资料,前人对邢台序列应力场变化特征的研究主要集中在序列早期较强余震或综合断层解、近期中小地震的聚类分析或单个地震的震源机制解变化上,本文将收集邢台地震序列已有的震源机制解,对 50 年来整个序列的应力释放调整过程进行分析。

1 序列特征与构造背景

根据《邢台地震目录》和《邢台地震目录(续编)》,选取地震定位精度为 I 类或 II 类的地震,并补

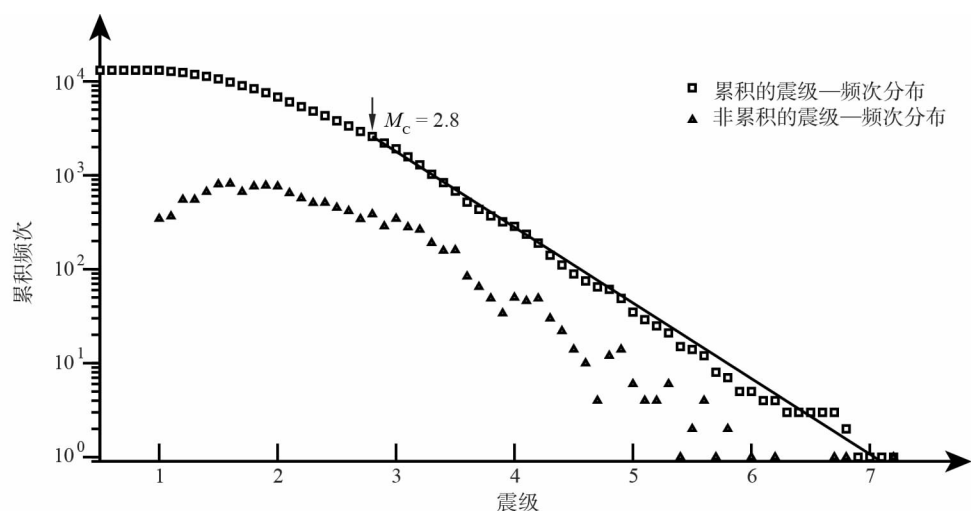
收稿日期:2016-12-08

基金项目:河北省地震局地震科技星火计划重点项目“晋冀蒙交界地区典型盆地孕震动力学模型构建”(DZ20160621076)

作者简介:王晓山(1980—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事数字地震学和中长期预测工作. E-mail: wxs@eq-he. ac. cn

充中国地震台网中心 1985 年 1 月 1 日至 2016 年 10 月 31 日的小震目录, 共计选取 $M_L 1.0$ 以上地震 13 130 次。使用 ZMAP 软件^[12] 中的“最大曲率”(maximum curvature)法与拟合度分别为 90% 和 95% 的拟合优度检验(goodness-of-fittest)法的最佳组合得出邢台地震序列的最小完整性震级为 $M_L 2.8$ (图 1)。从地震序列 $M-t$ ($M_L \geq 2.8$) 图(图 2)可以看出, 序列时间轴上有明显的“密集—平静”特

征, 整个余震序列衰减有起伏。序列早期大小地震都很多, 活动的频度和强度水平是逐步下降的, 1981 年 11 月 9 日的 5.8 级地震是邢台老震区总能量释放衰减中形成的一次新的起伏, 属于震源区长期活动的一部分。之后在 1985 年和 1990 年均出现余震的密集活跃, 但强度和频度与早期相比大幅降低, 最近的一次密集活动在 2002 年 4 月 22 日隆尧 4.7 级地震前后, 持续大概 2 年左右的时间。



注: 分别给出了累积和非累积的震级—频度分布以及相应的理论拟合结果, 箭头标出 M_c 的位置

图 1 邢台地震序列目录最小完整性震级 M_c 分析

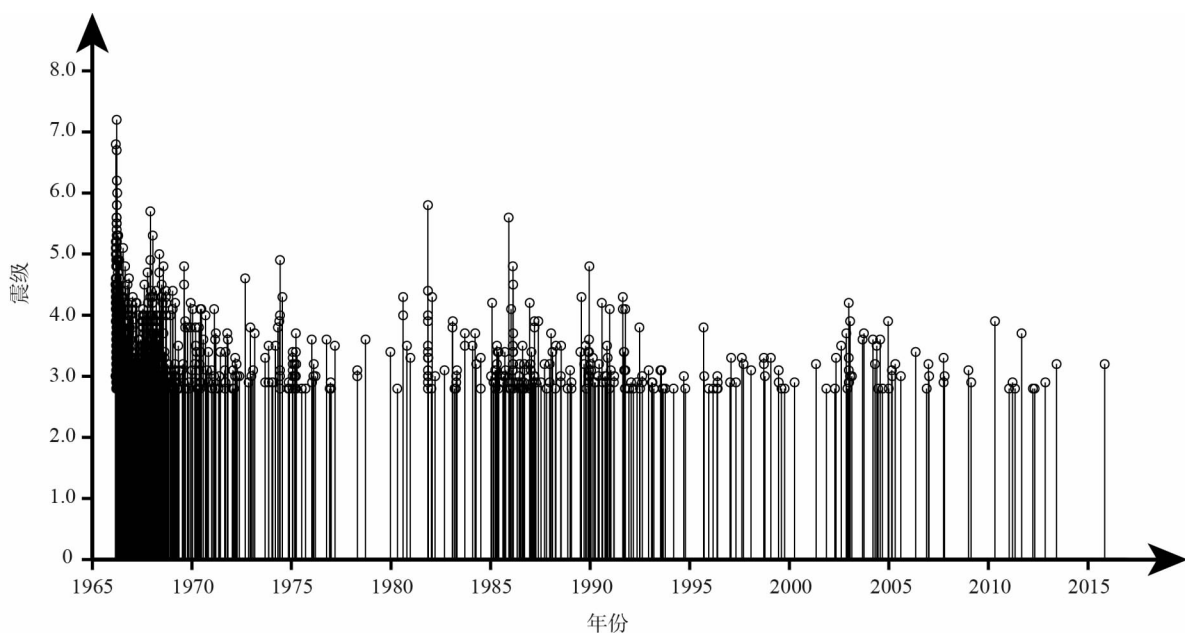


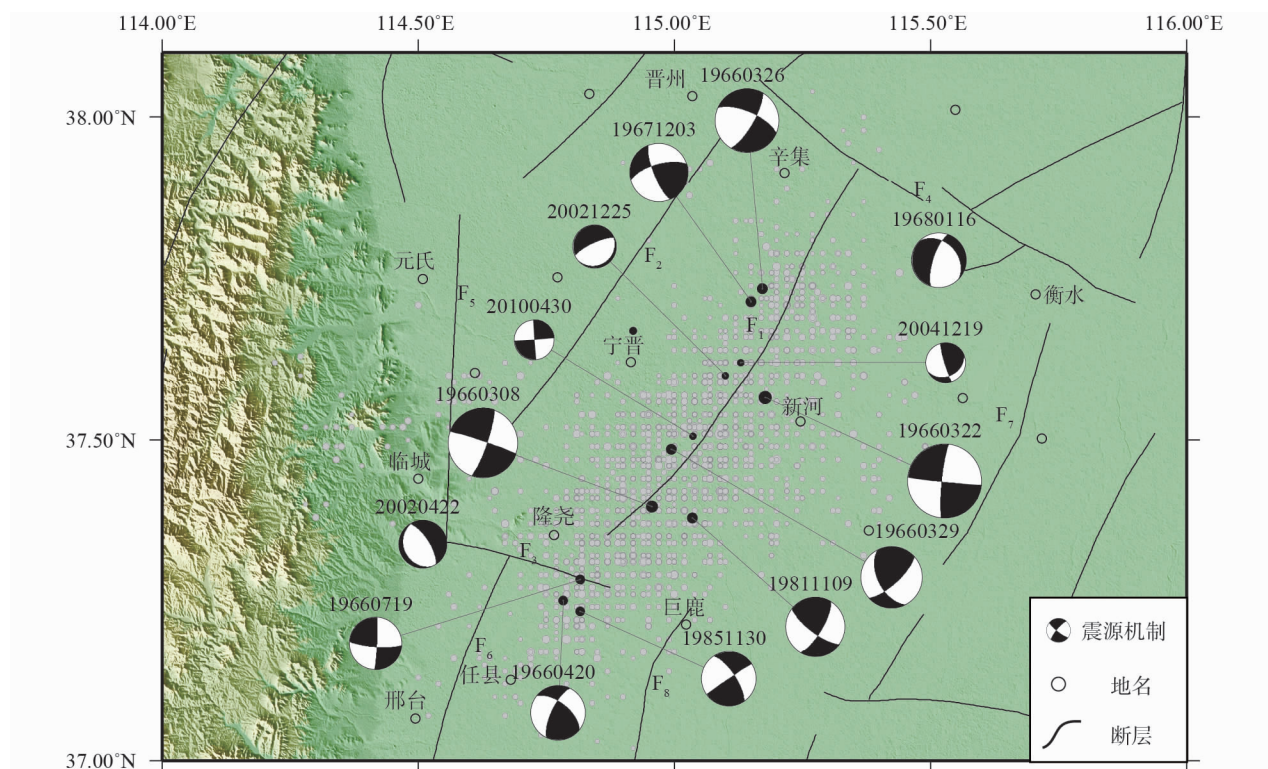
图 2 邢台地震序列 $M-t$ 图

邢台强震群发生在华北平原中部的束鹿断陷及其附近, 新生代早期华北平原经历了强烈的伸展裂

陷作用, 形成了一系列 NNE 走向断陷盆地; 上新世以来裂陷作用减弱, 开始整体下沉, 并在 NNE 向断

陷盆地的边缘形成右旋走滑断裂^[13]。束鹿断陷盆地位于冀中凹陷南部,是一个 NNE 向单边断陷,由中生代部分断陷在新生代进一步发展而成,盆地总体呈长条形,长约 70 km,宽 14~20 km,盆地东部以新河断裂与新河凸起连接;盆地西缘的宁晋凸起呈斜坡状延伸至盆地之下;北部以 NW 向深县断裂

与深县凹陷相连;南部以 NW 向隆尧断裂与巨鹿凹陷相连^[1](图 3)。邢台强震序列震中分布总体呈 NE 向,与新河断裂走向基本一致,该区地裂缝比较发育,地裂缝密集区域同地震重破坏区空间分布较为一致^[14]。



F₁: 新河断裂; F₂: 晋县断裂; F₃: 隆尧断裂; F₄: 衡水断裂; F₅: 元氏断裂; F₆: 邯郸断裂; F₇: 明化镇断裂; F₈: 鸡泽断裂

图 3 邢台地震序列的构造背景及震中、震源机制解分布

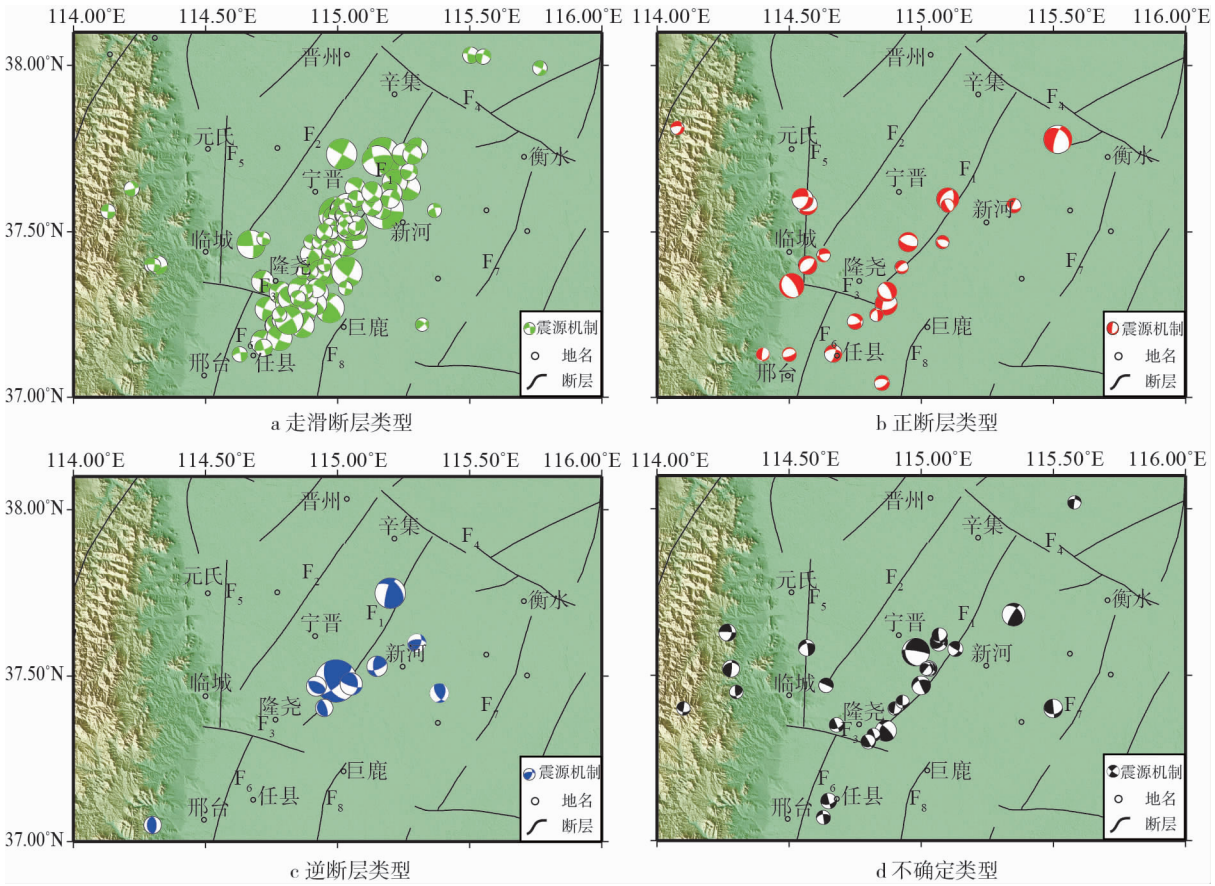
2 应力场基本特征

收集已发表的邢台地震序列震源机制解,补充近年来笔者反演的震源机制解,共得到 167 个震源机制解,表 1 仅列出 $M_L \geq 3.9$ 地震的震源机制解,其中震中位置使用 EHB 目录^[19]提供的参数。根据 Zoback^[20]研究全球应力场时的分类标准,对邢台地震序列震源机制解进行分类,走滑断层型(表 1 中错动类型 3)地震为 105 个,占 62.9%;具有一定走滑分量的正断层和正断层类型(表 1 中错动类型 1 和 2)为 24 次,占 14.4%;具有一定走滑分量的逆断层和逆断层(表 1 中错动类型 4 和 5)为 9 个,占 5.4%,无法确定型(表 1 中错动类型 6)为 29 个,占 17.3%。震源机制解错动类型以走滑型为主,兼有一定数量的正断层类型;逆冲类型地震较少,属于应力场调整过程的事件;不确定类型主要以近年来的小

震为主。由图 4 可见走滑类型(图 4a)的震源机制遍布整个震源区,尤其以新河以北段优势最为明显,正断层类型(图 4b)主要集中在震源区南段,新河断裂、隆尧断裂、晋县断裂和元氏断裂的交汇部位这类地震活动较多;逆断层类型(图 4c)主要围绕序列早期的 1966 年 3 月 29 日 6.0 级地震震源区活动;不确定类型(图 4d)的空间分布大致与正断层类型的分布重叠。图 5 给出了震源机制解类型随时间的动态变化,可以看出序列早期以走滑类型为主;在 1980—2001 年这段时间资料数量较少,但 2 次 5.0 级以上地震都以走滑类型为主,其余小震为不确定类型;2002 年以来,随着数字地震台网的布设,使震源机制解数量大幅增加,震源错动类型仍以走滑类型为主,正断层类型和不确定类型相伴发生,逆冲类型随机发生。

表 1 邢台地震序列 $M_L \geq 3.9$ 地震震源机制解

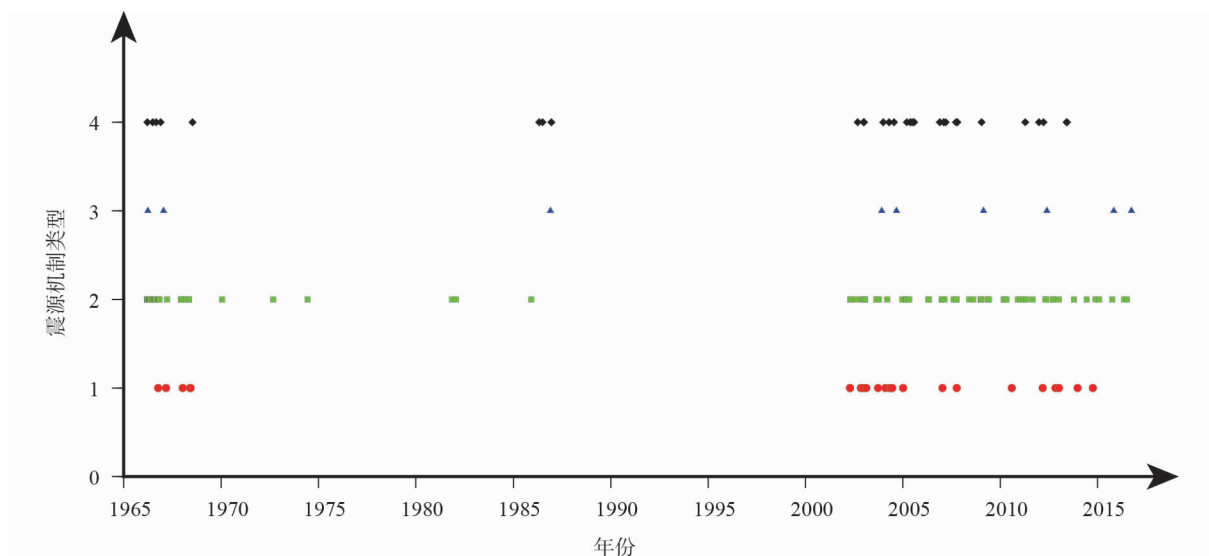
发震日期	发震时间	纬度/ (°)	经度/ (°)	震级	深度/ km	节面			P 轴		T 轴		错动 类型	来源
						走向/ (°)	倾角/ (°)	离源角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)	方位/ (°)	倾角/ (°)		
1966-03-08	05:29:15.70	37.396	114.957	6.8	10	19	81	−177	243	8	334	4	3	[15]
1966-03-22	16:19:32.56	37.566	115.178	7.2	9	186	83	−178	51	6	141	4	3	[15]
1966-03-26	23:19:01.39	37.735	115.172	6.2	15	30	74	−157	253	27	161	4	3	[16]
1966-03-29	14:12:04.77	37.486	114.994	6.0	25	48	72	141	104	12	3	40	4	[17]
1966-04-20	22:31:15.00	37.250	114.783	5.3	15	308	60	23	259	6	164	37	3	[6]
1966-07-19	08:56:00.00	37.283	114.817	5.1	15	3	86	169	54	4	313	10	3	①
1967-12-03	04:05:54.94	37.715	115.150	5.7	25	158	75	157	208	5	115	27	3	[17]
1968-01-16	03:34:00.40	37.779	115.517	5.3	20	198	72	−60	144	53	265	21	1	[17]
1981-11-09	02:01:04.94	37.379	115.036	5.8	20	31	72	162	258	0	349	25	3	[18]
1985-11-30	22:38:26.00	37.233	114.817	5.3	14	236	89	161	283	12	190	14	3	[9]
2002-04-22	01:34:39.73	37.338	114.509	4.7	10	156	21	−82	231	66	59	24	1	本文
2002-12-25	18:29:00.00	37.600	115.100	4.2	10	15	48	−107	217	77	117	2	1	本文
2004-12-19	17:27:00.00	37.620	115.130	3.9	10	32	63	168	258	11	353	27	3	本文
2010-04-30	02:36:31.00	37.506	115.037	3.9	11	190	86	174	235	1	145	7	3	本文



注: F_1 新河断裂; F_2 晋县断裂; F_3 隆尧断裂; F_4 衡水断裂; F_5 元氏断裂; F_6 邯郸断裂; F_7 明化镇断裂; F_8 鸡泽断裂

图 4 邢台地震序列震源机制解类型空间分布

①王泽皋, 2016. 私人通讯



注：红色圆圈：正断层；绿色正方形：走滑类型；蓝色三角形：逆断层；黑色菱形表：不确定类型

图5 邢台地震序列震源机制解类型时间分布

使用 STRESSINVERSE 软件^[21]对整个序列的震源机制解进行应力场反演,得到 3 个应力主轴的方向(图 6a)。邢台地震序列所在区域的最大主压应力方向为 68.0° ,最小主应力方向为 336.7° ,中等主应力轴的倾伏角 76.7° ,呈走向滑动的应力状态,相对应力大小 $R=0.66$,摩擦系数为 0.80。将序列按照时间分成早期(1966—1968 年)、中期(1970—1986 年)和晚期(2002 年—现今)3 个时段分别反演应力场。早期(图 6b)震源区最大主压应力方向为 251.1° ,最小主应力方向为 161.0° ,中等主应力轴的倾伏角 87.2° ,呈走向滑动的应力状态,相对应力大小 $R=0.72$,摩擦系数为 0.50;中期(图 6c)震源区最大主压应力方向为 78.6° ,最小主应力方向为 183.5° ,中等主应力轴的倾伏角 46.3° ,呈走向滑动

的应力状态,相对应力大小 $R=0.74$,摩擦系数为 0.70;晚期(图 6d)震源区最大主压应力方向为 65.7° ,最小主应力方向为 330.2° ,中等主应力轴的倾伏角 63.2° ,呈走向滑动的应力状态,相对应力大小 $R=0.56$,摩擦系数为 0.90。邢台序列整体的最大主压应力方向与早期、中期、晚期 3 个时段的最大主压应力方向基本一致,应力状态都为走向滑动类型,只是由于序列中期的震源机制解数量太少且小震的求解质量不高,导致反演得到的置信区间比较离散,建议作为参考。序列整体的摩擦系数和中期、晚期的摩擦系数都在 0.6~1.0 之间,与拜尔利准则^[22]限定的断层摩擦系数区间接近,序列早期的摩擦系数低于这个区间,不符合拜尔利准则,可以认为断层的强度很低。

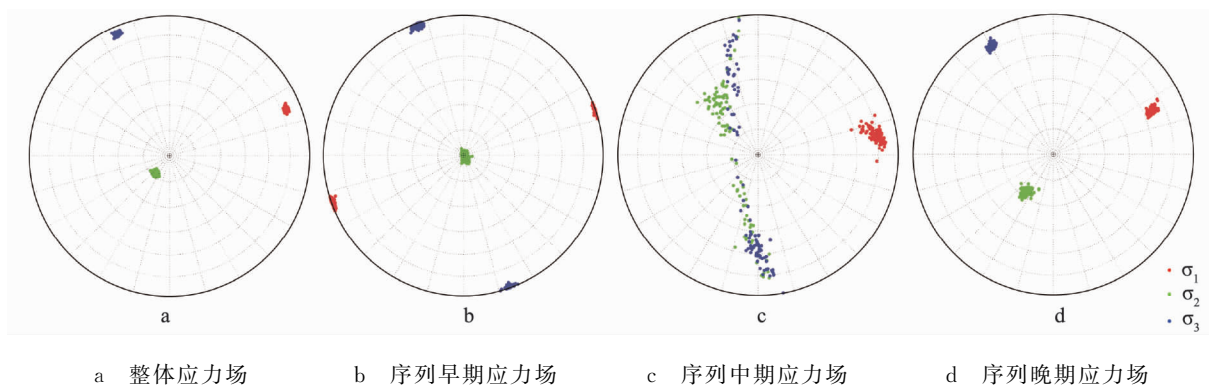


图6 邢台地震序列应力场

3 讨论与结论

本文收集了邢台地震序列 50 多年来的震源机制解,对其进行震源错动类型分析,发现震源机制解以走滑型为主,与序列中强地震的错动类型基本一致,走滑类型的震源机制遍布整个震源区,尤其以新河以北段优势最为明显。正断层类型地震主要集中在震源区南段新河断裂、隆尧断裂、晋县断裂和元氏断裂的交汇部位;不确定类型的空间分布大致与正断层类型的分布重叠,逆冲类型地震较少,这 2 类地震都属于应力场调整过程的事件,不同来源的动力作用使主应力场方向倾斜偏离了水平面和垂直面而引起变形。

邢台地震序列整体的最大主压应力方向与早期、中期、晚期 3 个时段的最大主压应力方向基本一致,应力状态都为走向滑动类型。邢台地震序列的应力场特征,既保持了自身的稳定性,又与其后发生在华北地区的河间、渤海、海城、唐山等地震的应力方向相同^[23],表明这些大震都是在华北地区统一的构造应力场作用下,存在某种内在的动力学联系。邢台地震不是孤立的事件,而是大范围构造应力集中、释放的一部分,1966—1976 年华北一系列强震发生的先后顺序是由当地介质和应力条件所决定。目前距邢台地震发生已经 50 年,现今中小地震震源机制仍然受华北地区构造应力场的制约,可以认为近年邢台老震区仍然存在继承性活动。现今地震震

级不高,只是反映出邢台震源区的震源断层仍在持续活动,震源断层并没有愈合。姚殿义^[9]曾指出 1985 年 11 月 30 日的任县 5.3 级地震很可能是整个邢台地震过程中第 3 个阶段出现的一次强余震,而目前邢台老震区的应力状态可能处于地震过程中第 3 阶段向第 4 阶段过渡期间或者已经进入第 4 阶段的初期,处于某种平衡态。

由应力场反演得到的结果显示,邢台地震序列整体和中期、晚期 2 个时段的摩擦系数都处于拜尔利摩擦系数的范围,而序列早期的摩擦系数较低,表明地震成核过程伴随断层的低速滑动,地震成核后断层滑动由低速进入高速阶段,断层摩擦系数由高变低,应变能的消耗使得断层滑动由高速重新变为低速。Zoback 和 Healy^[24]对位移较小的活动断层区域浅部应力进行了实测,结果表明在静水压力条件下,现今的构造环境有利于这些断层再次活动,而且断层区域的摩擦系数为 0.6~1.0 之间,Townend 和 Zoback^[25]认为板内地壳处于破裂平衡状态,地壳应变能的释放通过活断层的活动实现。区域应力方向有利于断层活动,拜尔利准则限定了大部分处于极限平衡状态的断层摩擦系数。邢台地震的发生与地壳浅部的伸展构造无关,震时震源错动与地表的构造变形具有上下一致的耦合关系^[26],本文只求出地壳深部的摩擦系数,需要增加浅部的地应力测量数据,来共同探讨邢台震源区深部、浅部应力状态的耦合关系。

参考文献:

- [1] 河北省地震局. 一九六六年邢台地震[M]. 北京:地震出版社,1986.
- [2] 刁桂苓,李钦祖. 邢台地震的科学研究[J]. 华北地震科学,2006,24(2):24-29.
- [3] 王泽泉. 邢台余震频度增高及以后发生的华北强震[J]. 地震学报,1979,1(2):150-153.
- [4] 胡小幸,林邦慧. 邢台地震空间分布随时间变化的立体图象与地震发生过程[J]. 地震学报,1989,11(1):1-11.
- [5] 李钦祖,王泽泉,贾云年,等. 由单台小地震资料所得两个区域的应力场[J]. 地球物理学报,1973,16(1):49-61.
- [6] 何志桐,谢挺. 邢台地震系列的空间分布、构造应力场及其发生过程的探讨[J]. 地球物理学报,1977,20(2):131-142.
- [7] 刁桂苓,姚殿义,王泽泉. 震源机制[C]//河北省地震局. 一九六六年邢台地震. 北京:地震出版社,1986:58-68.
- [8] 刁桂苓,王泽泉. 邢台地震群中的子序列[J]. 地震学报,1988,10(2):137-145.
- [9] 姚殿义. 任县 5.3 级地震机制解与邢台震区应力场演变特征[J]. 东北地震研究,1990,6(4):67-72.
- [10] 张宏志,刁桂苓,赵英萍,等. 邢台地区近年的震源机制[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(6):91-95.
- [11] 陈连旺,陆远忠,刘杰,等. 1966 年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟[J]. 地震学报,2001,23(5):480-491.
- [12] Wiemer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seismological Research Letters, 2001, 72(3): 373-382.
- [13] Liu M, Yang Y Q, Shen Z K, et al. Active tectonics and intracontinental earthquakes in China: the kinematics and geodynamics[J]. In Stein Seth and Stéphane Mazzotti ed. Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues. Geological Society of America Special Papers, 2007, 425: 299-318. doi: 10.1130/2007.2425(19).
- [14] 曹建玲,白淑芳,姜正义. 隆尧地裂缝形变特征及成因分析[J]. 华北地震科学,2015,33(2):13-19,29.
- [15] 许忠淮,汪素云,高阿甲,等. 我国部分早期震源机制解答的重新测定[J]. 地震地磁观测与研究,1994,15(5):1-9.
- [16] Chung W Y, Cipar J J. Source modeling of the Hsingtai, China earthquakes of March 1966[J]. Physics of the Earth and Planetary Interi-

- ors, 1983, 33(2): 111-125.
- [17] 张诚, 曹新玲, 曲克信, 等. 中国地震震源机制[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990.
- [18] Ekström G, Nettles M, Dziewoński A M. The global CMT project 2004-2010: centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200-201: 1-9.
- [19] International Seismological Centre. ISC-EHB Bulletin[EB/OL]. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2016. <http://www.isc.ac.uk>.
- [20] Zoback M L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B8): 11703-11728.
- [21] Vavryčuk V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(1): 69-77.
- [22] Byerlee J D. Friction of rock[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4/5): 615-626.
- [23] 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. *地震学报*, 1982, 4(1): 55-61.
- [24] Zoback M D, Healy J H. Friction, faulting and in situ stress[J]. *Annals of Geophysics*, 1984, 2(6): 689-698.
- [25] Townend J, Zoback M D. How faulting keeps the crust strong[J]. *Geology*, 2000, 28(5): 399-402.
- [26] 徐锡伟, 于贵华, 王峰. 1966 年邢台地震群的发震构造模型—新生断层形成? 先存活断层摩擦粘滑? [J]. *中国地震*, 2000, 16(4): 364-378.

Stress Releasing and Adjusting Progress of Xingtai Earthquake Sequence

WANG Xiao-shan¹, CHEN Ting¹, FENG Xiang-dong¹, LIU Shuang-qing²

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, Chian)

Abstract: In the study, the stress fields of Xingtai earthquake region in different periods is inversed on basis of focal mechnism solutions of the Xingtai earthquake sequence, the analysis of the ocal mechnism solutions and the stress field shows that the earthquake source faults of the Xingtai earthquake sequence are mainly of strike-slip type faults and spread all over the Xingtai earthquake source region. Stress field inversed using the whole sequence are basically consistent with the stress field that inversed using focal mechanism solutions in 3 periods and also consistent with the stress field direction of other strong earthquakes in North China area, which indicates that the occurrence of Xingtai earthquake is in the control of the tectonic stress field of North China. Friction coefficient of the Xingtai earthquake sequence inversed in the stress fields are within the limits of the? Byerlee's law, regional stress field direction is beneficial to fault activity and the frequency and active intensity of earthquake are relatively low which indicate that, the earthquake source region are in a kind of balance and further study on coupling of stress fields statement of deep crust and that of shallow crust is need.

Key words: Xingtai earthquake sequence; focal mechanism solution; stress field inversing; friction coefficient