

许英才,曾宪伟,罗国富. 2023. 吴忠—灵武地区震源机制一致性参数时空特征及预报效能分析. 中国地震, 39(3):531~542.

吴忠—灵武地区震源机制一致性参数 时空特征及预报效能分析

许英才 曾宪伟 罗国富

宁夏回族自治区地震局, 银川 750001

摘要 通过计算 2003—2021 年吴忠—灵武地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解,利用震源机制解结果和叠加应力场反演方法计算了吴忠—灵武地区的应力张量方差,得到应力张量方差的空间和时序分布特征,分析吴忠—灵武地区 4 次 $M_S \geq 4.0$ 地震和该地区震源机制一致性参数的关系,提取了该地区震源机制一致性参数预测指标,并讨论了其预报效能。结果表明,2003—2021 年吴忠—灵武地区的应力张量方差空间值范围主要介于 0.13~0.22 之间,以 38.1°N 为分界线,呈现南低北高的分区特征,4 次 $M_S \geq 4.0$ 地震均发生在应力张量方差高低值的过渡区域附近,应力张量方差的时序图存在两处显著的“异常”变化,其变化特征为应力张量时序方差持续低于 0.1 且维持 1 年左右,并呈现显著的“V”型变化,该两处“V”型变化之后各自对应了 2012 年永宁 $M_S 4.6$ 和 2021 年灵武 $M_S 4.0$ 地震,即震前其应力张量时序方差均经历了“下降—转折—回升—发震”的变化,回升到发震的时间间隔约为 1 年左右。该地区的预报效能分析结果认为,可以将震源机制一致性参数作为吴忠—灵武地区 $M_S \geq 4.0$ 地震的中长期预测指标。

关键词: 吴忠—灵武地区 震源机制一致性 应力张量方差 预报效能

[文章编号] 1001-4683(2023)03-0531-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

吴忠—灵武地区在构造上位于青藏高原东北缘弧形构造区到银川盆地南部的转换带区域,且地处阿拉善和鄂尔多斯地块之间,具有多重共轭构造的特征,以牛首山断裂为界,其西南侧区域主要为青藏高原东北缘弧形构造区,而东北侧区域主要为拉张型断陷盆地(邓起东等,1999;杨明芝等,2007)。1970 年以来吴忠—灵武地区共发生 $M_S \geq 5.0$ 地震 5 次,分别为 1971 年吴忠 $M_S 5.1$ 、1984 年灵武 $M_S 5.3$ 、1987 年灵武 $M_S 5.5$ 以及 1988 年灵武 $M_S 5.5$ 和 $M_S 5.0$ 地震,截至 2021 年该地区已经 33 年未发生 $M_S 5.0$ 以上的地震。吴忠—灵武地区相关地震活动性研究表明(马禾青等,2006;许英才等,2020),1970 年以来 $M_L \geq 2.0$ 地震活动

[收稿日期] 2022-05-22 [修定日期] 2022-08-15

[项目类别] 宁夏自然科学基金项目(2022AAC03687)、地震科技星火计划项目(XH21040)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(2021010118、2022010104、2023010113)共同资助

[作者简介] 许英才,男,1986 年生,高级工程师,主要从事地震活动性和数字地震学研究。E-mail: xuyingcai007@163.com

曾宪伟,通讯作者,男,1982 年生,高级工程师,主要从事地震精定位和震源机制等研究。

E-mail: zeng_xw@126.com

主要相对集中在吴忠—灵武一带区域(图1),属于鄂尔多斯西缘1970年以来中强地震和中小地震的共同多发区域,而且该地区中强地震发生之前,主震震中周围小震存在较有规律的异常活动现象,譬如地震活动增强、震群活动以及广义前震活动空间和时间的有序性等,因此吴忠—灵武地区中强地震发生前的震中周围小震活动相对发育,且地震增强特征比较明显。

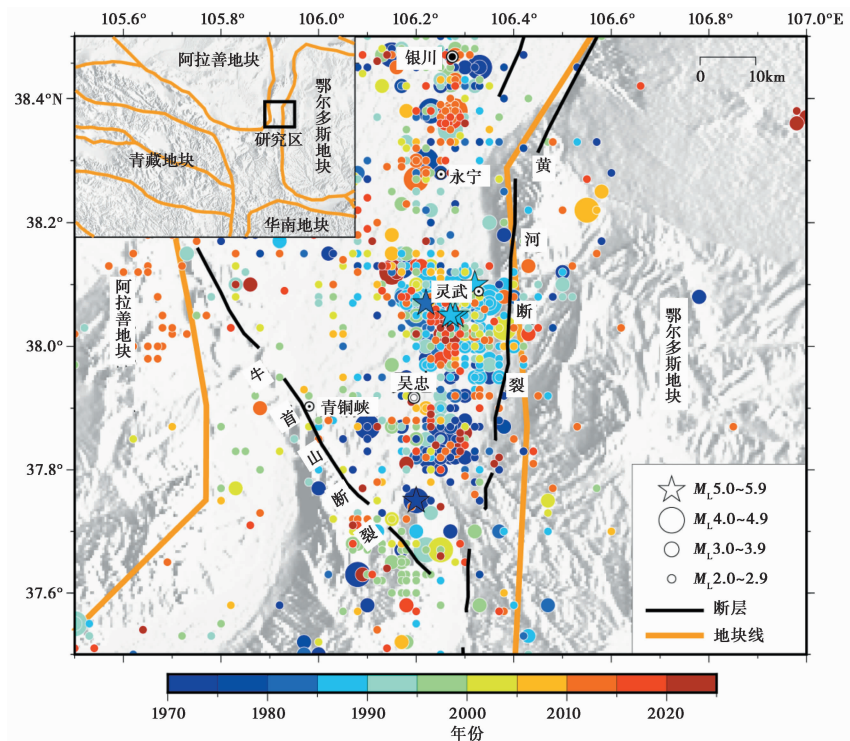


图1 1970—2021年期间吴忠—灵武地区 $M_L \geq 2.0$ 地震分布

构造应力场是影响中强地震发生的主导因素之一,震源机制一致性参数作为衡量区域应力场与地震震源释放应力场一致性程度的定量指标(陈颙,1978),主要是利用中小地震震源机制与背景应力场的偏离程度来描述强震发生前应力场的变化情况,小震震源机制的相对一致往往是地震活动性增强的标志,而震源机制的相对紊乱往往伴随着地震活动的减弱。因此震源机制一致性在了解地震活动性的发展情况方面起着至关重要的作用,其也是定量描述地震活动性的“新参数”。已有研究提出多种表征震源机制一致性参数的研究方法,如P波、S波最大振幅比法(金严等,1976)、断层面参数法(陈颙,1978)、主应力轴夹角差法(刁桂苓等,1994;程万正等,2006;孙丽娜等,2017)、谱振幅相关系数法(Lund et al,2002;崔子健等,2015)、最小空间旋转角法(万永革,2008)、P轴分布集中度法(荣代潞,2014;韩晓明等,2015b)和应力张量 Misfit 角及方差(Michael,1984、1987;Michael et al,1990)等方法,这些方法计算的参量在一定程度上均能表征震源机制的一致性。在国内外震源机制一致性研究进展方面,Michael等(1990)通过应力张量 Misfit 角方法研究1989年洛马谱列塔 $M7.1$ 地震时发现该大震发生前震源区及邻区中小地震的震源机制一致性较好;泽仁志玛等(2010)利

用主应力轴夹角差方法分析了 2001 年秘鲁 M_w 8.4 和 2006 年千岛群岛 M_w 8.3 地震的前震序列,发现这些前震序列的震源机制解一致性参数均表现为显著低值异常;付虹等(2011)根据主应力轴夹角差方法进行研究认为震前 3 年内,滇中的区域应力场更较为接近震源区中小地震的应力场,强震主要发生在一致性参数低值区或其边缘附近;李丽等(2015)基于主应力轴夹角差方法发现 2001 年以来山西 5 次 $M_L \geq 5.0$ 地震震前,震源机制均趋于一致,地震主要位于一致性参数低值或高低值过渡带;韩晓明等(2015a)利用主应力轴夹角差方法发现 2003 年以来河套地震带震源机制一致性参数时序曲线趋势下降,认为应力相对集中;李金等(2015)根据应力张量方差方法研究天山地震带震源机制一致性参数时空特征,认为天山中东段地区中强地震容易发生在应力张量方差低值分布区或其边缘附近;刘方斌等(2018)利用主应力轴夹角差方法研究了山东乳山的地震序列震源机制一致性,分析认为目标地震的震中位置和震源参数一致性空间分布关系吻合较好;刘自凤等(2020)基于应力张量方差方法研究了 2014 年云南 3 次强震前后震源机制一致性时空演化特征,发现这 3 次强震发生前 3 到 5 年内,应力张量方差空间低值区及其应力张量方差时序变化特征大体呈正“V”型变化,其强震基本在正“V”型形成过程中的趋势回升阶段发生。

对于吴忠—灵武地区震源机制一致性参数的相关研究并不多,前人结果主要还是侧重于鄂尔多斯西缘较大区域范围的构造应力场研究,其中在吴忠—灵武地区 P 波初动结果(薛宏运等,1984)显示,震源机制类型主要为正断兼走滑类型,平均 P 轴方位 60° 、倾伏角 40° , T 轴方位 170° 、倾伏角 26° ;系统聚类、格点尝试法和应力场反演结果显示(范俊喜等,2003;Wan,2010;王晓山等,2015;曾宪伟等,2013、2015;郭祥云等,2017),该区域地震类型主要为走滑型,其震源机制的 P 轴优势方位主要为 NE 向,区域应力场的主压应力轴走向主要介于 $48^\circ \sim 52^\circ$ 之间,震源区产生的构造变形主要为 NE 向发生压缩, NW 向发生相对扩张,表明研究区主压应力场方向以 NE-SW 向为主。

综合来看,吴忠—灵武地区震源机制一致性参数成果十分稀少且侧重于部分时期震源机制的计算和构造应力场的研究,震源机制结果数量也不多,而对该地区震源机制一致性参数的深入研究工作几乎未开展,为此本研究在吴忠—灵武地区已有震源机制解结果(曾宪伟等,2015;许英才等,2022b、2022c)基础上,拟通过多种方法计算 2003—2021 年大量 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解,然后基于 ZMAP 程序(Wiemer,2001)集成的叠加应力场(SS1)反演方法(Michael,1984,1987;Michael et al,1990)来反演一致性参数的空间分布和时间分布,通过应力张量方差时空分布重点分析和讨论一致性参数空间分布和其时序变化特征,研究结果不仅填补吴忠—灵武地区震源机制一致性参数研究方面的空缺,而且也为该地区震源机制一致性参数时空预测指标的建立奠定基础,进一步为震情跟踪工作提供一定的参考依据。

1 吴忠—灵武地区中小地震的震源机制解

震源机制一致性参数计算的前提是需要大量的震源机制解结果资料,本研究的震源机制数据主要由两部分构成:第一部分的震源机制结果为曾宪伟等(2015)计算的银川盆地南部 2003—2009 年的 13 个 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解以及许英才等(2022b、2022c)计算的 2021 年 5 个 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制,共 18 个;第二部分为 2003—2021 年其余的 $M_L \geq 2.0$

地震的震源机制解,其中 $2.0 \leq M_L \leq 2.7$ 地震震源机制采用基于 P 波初动联合振幅比的 Snoko 方法 (Snoko et al, 1984; Snoko, 2003) 计算, $2.8 \leq M_L \leq 3.5$ 地震的震源机制采用基于 P 波初动联合振幅比的 HASH 方法 (Hardebeck et al, 2002) 计算, $M_L \geq 3.6$ 地震则采用波形拟合反演的 gCAP 方法 (Zhu et al, 1996, 2013) 计算,本研究通过 Snoko、HASH 及 gCAP 方法实际可计算地震共为 86 个。最终得到了吴忠—灵武地区共 104 个可计算地震的震源机制结果。在本研究所使用的这 3 种方法里,Snoko 方法和 HASH 方法作为 P 波初动联合振幅比方法,其原理都是采用了 P 波初动、S 波和 P 波振幅的信息,更适合计算中小地震震源机制解 (杜航等, 2022),其中 HASH 方法的 S/P 振幅比有较好的节面约束能力 (Kilb et al, 2006; 许英才等, 2022a),波形拟合反演的 gCAP 方法充分利用了波形记录,波形分成体波和面波部分,然后和理论地震图进行滑动拟合,从而获得拟合误差函数的最优解,该方法对速度模型依赖不高,且对使用台站数量要求相对较低 (张广伟等, 2015),这三种方法也是目前常见的相对稳定可靠的方法,本研究针对不同震级大小和信噪比的地震,较为合理、科学和全面地利用了这 3 种不同计算方法统筹兼顾,为此本研究基于 3 种方法的震源机制解分析震源机制一致性是相对可靠的。在这些得出的结果中,其震级范围在 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 之间地震的震源机制结果相对集中,可计算地震震源机制所在震中位置大体在吴忠—灵武和银川—永宁一带相对集中 (图 2(a)、3(a)),根据早期震源机制类型的划分标准 (Zoback, 1992) 将这些地震震源机制结果进行分类,分类结果 (图 2(b)、3(b)) 表明该地区走滑型 (SS)、正断型 (NF)、不确定型 (U)、正走滑型 (NS)、逆走滑型 (TS) 和逆断型 (TF) 地震分别占总体数的 56.73%、12.50%、12.50%、7.69%、7.69% 和 2.89%。根据万永革 (2022) 提出的水平应变花面应变的震源机制分类方法将这些地震在球形三角形中进行分类 (图 4(a)),结果统计显示吴忠—灵武地区走滑型 (SS)、正断型 (N)、正走滑型 (NS)、逆走滑型 (RS) 及逆断型 (R) 地震分别占总数的 65.05%、12.62%、10.67%、5.83% 和 5.83%。上述两种不同震源机制分类方法均表明研究区主要以走滑型地震为主,其次为正断型。P、T 轴方位及倾伏角的玫瑰图显示 (图 4(b)),P 轴优势方位主要为 NE 向,倾伏角范围主要在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 之间,T 轴优势方位为 NW 向,倾伏角范围主要为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间。该结果与银川盆地的区域构造应力环境基本一致 (郭祥云等, 2017; Wan, 2010),说明这些地震的发生主要受区域构造应力场控制。

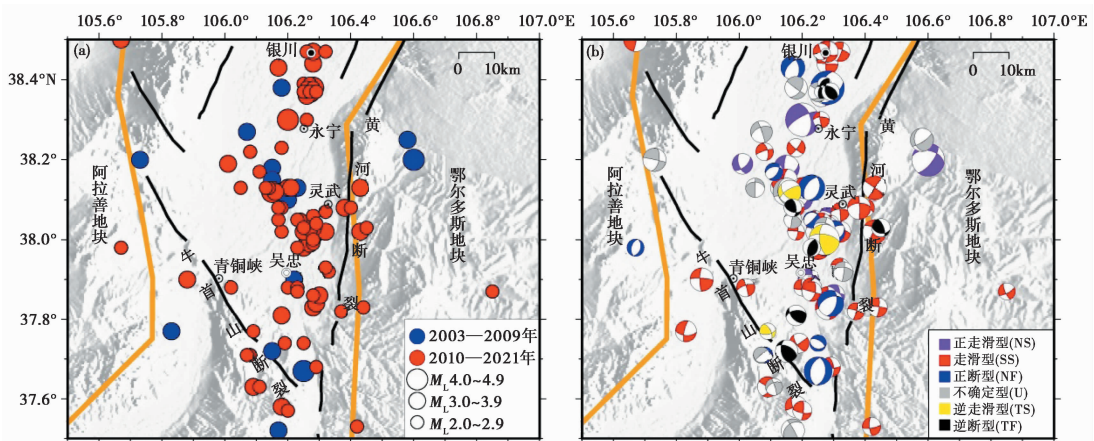
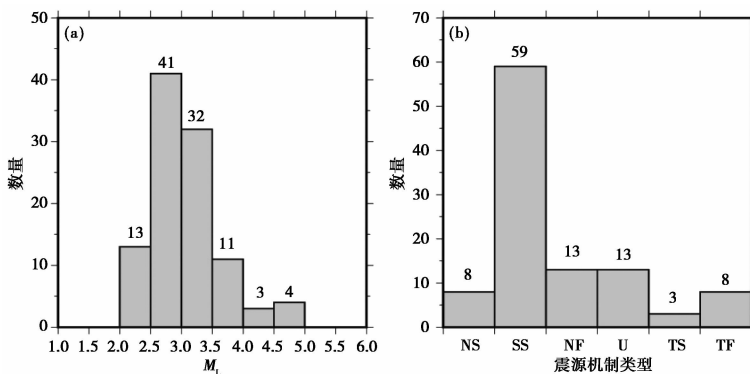
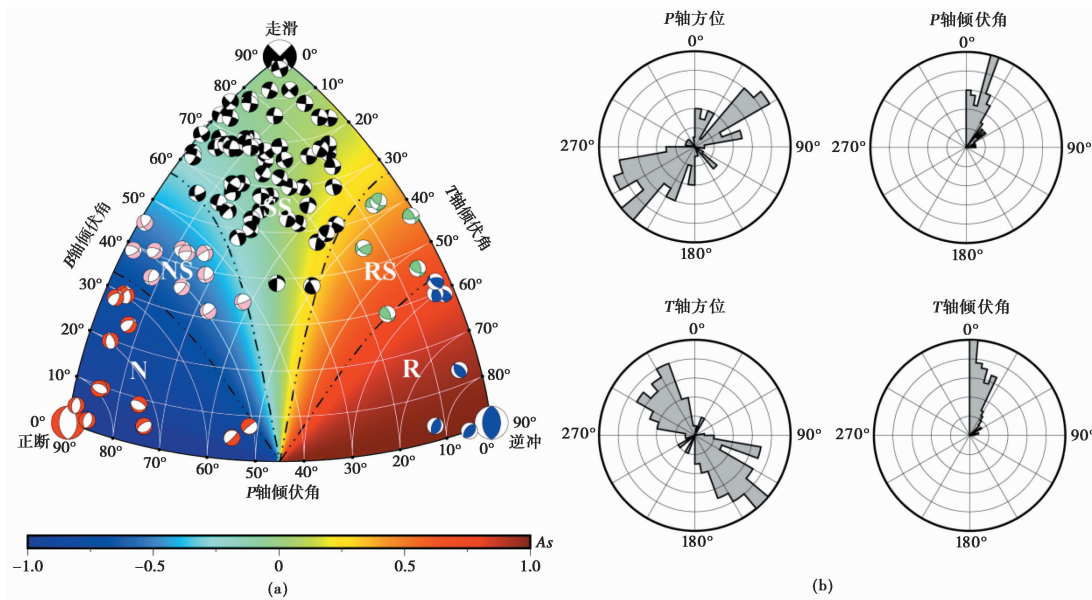


图 2 吴忠—灵武地区可计算的地震震中(a)和震源机制类型统计(b)



注：NS：正走滑型；SS：走滑型；NF：正断型；U：不确定型；TS：逆走滑型；TF：逆断型。

图 3 吴忠—灵武地区震源机制类型 (a) 及各个中小地震的震级档统计 (b)



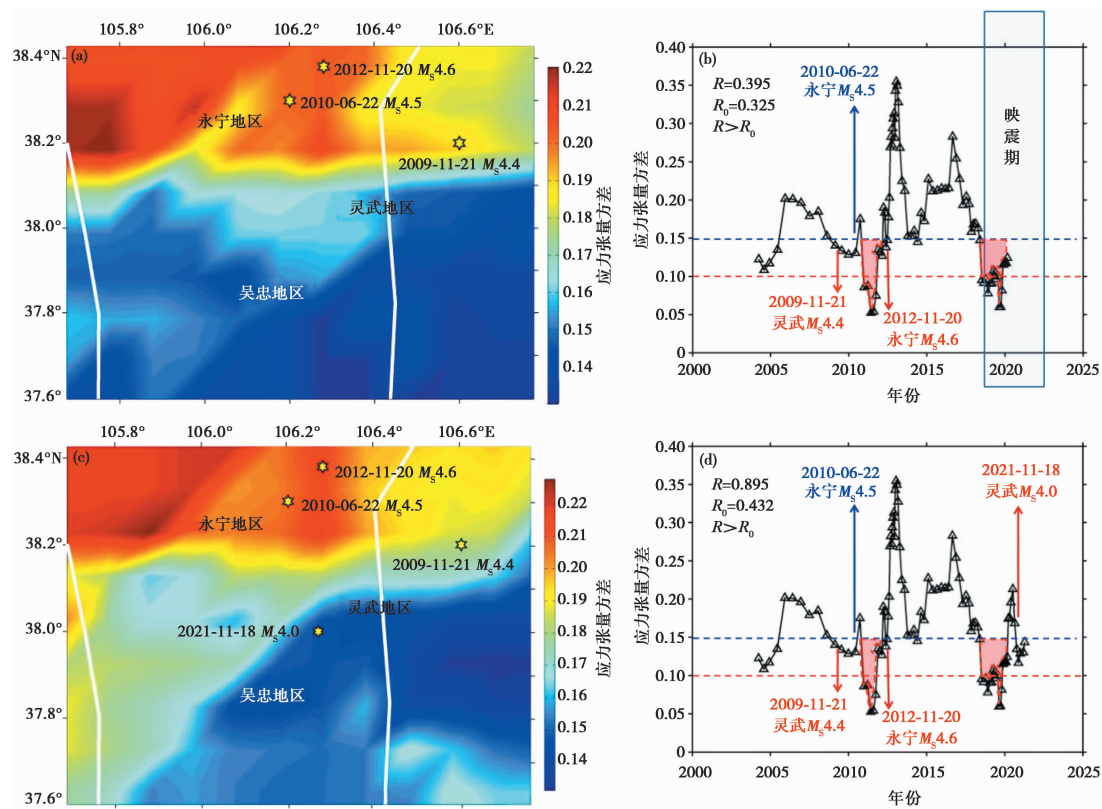
注： A_s ：相对面应变；SS：走滑型；N：正断型；R：逆断型；NS：正走滑型；RS：逆走滑型。

图 4 吴忠—灵武地区震源机制球形三角形示意图 (a) 及震源机制 P 轴、 T 轴方位角及倾伏角 (b)

2 震源机制一致性参数时空特征

将上述 2003—2021 年所有震源机制的结果作为输入，然后将吴忠—灵武地区按照 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 进行网格化，基于 ZMAP 程序集成的叠加应力场方法 (SSI) (Michael, 1984、1987; Michael et al, 1990; Wiemer, 2001) 反演研究区整个时期 (2003—2021 年) 每个网格节点的应力张量方差 (即震源机制一致性参数) 时，选取每个网格至少 15 个地震的震源机制解计算应力张量的空间方差，与此同时选取窗长 10 个地震、步长 1 个地震计算应力张量的时序方差。一些学者 (Michael et al, 1990; Lu et al, 1997; 李金等, 2015; 刘自凤等, 2020) 研究认为当方差小于等于 0.2，其值越低表明震源区的应力场越均匀；而当方差小于等于 0.1 可能存在发

震的危险,鉴于此,本研究取方差低于0.15的范围认为可能存在异常(如图5蓝、红虚线所示)。结果显示(图5(a)、(b)),应力张量空间方差范围在0.13~0.22之间,以38.1°N为界,南北两侧的应力张量空间方差具有明显的分区特征,北侧区域的应力张量空间方差范围为0.16~0.22之间;而南侧区域的应力张量空间方差介于0.13~0.16之间。2003年1月1日至2021年11月17日吴忠—灵武地区发生 M_s 4.0以上地震共3次,震级范围 M_s 4.4~4.6,无 M_s 5.0以上地震发生,该3次地震主要发生在毗邻38.1°为分界线的偏北侧区域(图5(a)),即震源机制一致性参数空间相对高低值的过渡区域。2003年1月1日—2021年11月17日的应力张量方差时序图存在两处显著的变化(图5(b)),其变化特征为应力张量时序方差持续低于0.1且维持1年左右,并呈现“V”型变化,其中一处变化对应了2012年11月20日永宁 M_s 4.6地震,即该地震发生前应力张量方差经历了“下降—转折—回升—发震”的变化特点,其“V”型特征显著;另一处类似的显著“V”型变化主要为2020—2021年期间,对应2021年11月18日灵武 M_s 4.0地震。



注:白色线为地块线。

图5 吴忠—灵武地区2003年1月1日—2021年11月17日时间段的应力张量空间方差分布(a)及其期间方差时序曲线(b)和2003年1月1日—2021年12月31日时间段的应力张量空间方差分布(c)及其期间方差时序曲线(d)

2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s4.0$ 地震之后,2003 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日的反演结果表明(图 5(c)、(d)),应力张量空间方差范围在 0.13~0.23 之间,最大值略高于 2003 年 1 月 1 日—2021 年 11 月 17 日期间应力张量空间方差的最大值,而最小值基本没有变化。与 2003 年 1 月 1 日—2021 年 11 月 17 日的应力张量方差空间分布(图 5(a))相比,图 5(c) 显示 2003 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日期间的应力张量空间方差主要在灵武 $M_s4.0$ 地震震中西南侧区域略有上升。2003 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日吴忠—灵武地区发生 $M_s4.0$ 以上地震共 4 次,震级范围 $M_s4.0 \sim 4.6$,无 $M_s5.0$ 以上地震发生,该 4 次地震主要发生在毗邻 38.1 度为分界线的两侧区域,即仍为震源机制一致性参数空间相对高低值的过渡区域。2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s4.0$ 地震正好发生在应力张量方差高低值的过渡带且略偏低值的区域,应力张量方差时序图(图 5(d))显示 11 月 18 日灵武 $M_s4.0$ 地震之后的时序方差变化范围主要在 0.1~0.15 之间。

3 震源机制一致性预报效能评价

震源机制一致性参数预测指标的建立首先需要通过对该观测方法预测的空间范围、时间范围、震级强度范围以及异常均作出较为明确的定义,通过上述震源机制一致性参数时空特征和已往震例,梳理的时空强范围及异常定义如下:

- (1)资料空间范围为吴忠—灵武地区(105.5°E~107°E;37.5°N~38.5°N);
- (2)资料时间范围为 2003—2021 年;
- (3)资料异常定义为应力张量空间方差低于 0.22,时序方差低于 0.1 且持续 1 年左右,呈现“V”型变化。

其预测规则为:①预测时间:1 年;②预测地点:震源机制一致性参数较好区域的内部或高低值的过渡区域;③预测震级: $M_s \geq 4.0$ 。基于上述内容,通过计算其预报效能的 R 值,根据上述定义,整个资料的时间段为 2003—2021 年,符合定义的“异常”共 2 次。

2021 年 11 月 18 日之前的时间段发生 $M_s4.0$ 以上地震共 3 次(总时间段截至 2021 年 11 月 17 日),其中报对地震 1 次,漏报地震 2 次,根据 R 值计算公式($R = \text{报对的地震次数} / \text{应预报的地震总次数} - \text{预报占用时间} / \text{预报研究总时间}$)(国家地震局科技监测司,1990),则吴忠—灵武地区震源机制一致性参数预报效能的 R 值计算如下: $R = c - b = 0.500 - 0.105 = 0.395 > R_0 = 0.325$,该结果理论上具有一定的预报效能(表 1)。

表 1 2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s4.0$ 地震之前的震源机制一致性参数预测指标和地震预报效能

分析方法	异常判定标准	预测三要素			预报效能	地震概况(M_s)
		时间	地点	强度		
叠加应力场(SSI)的应力张量方差	空间方差小于 0.22; 时序张量方差小于 0.1、维持 1 年且呈“V”型变化	1 年左右	吴忠—灵武地区	$M_s \geq 4.0$	$R = 0.395$ $R_0 = 0.325$ $R > R_0$	报准地震(1 次): 2012 年 11 月 20 日永宁 4.6 级地震。 漏报地震(2 次): 2009 年 11 月 21 日灵武 4.4 级地震; 2010 年 6 月 22 日永宁 4.5 级地震。

加入2021年11月18日灵武 $M_s4.0$ 地震之后的时间段(总时间段截至2021年12月31日),则期间发生 $M_s4.0$ 以上地震共4次,其中报对地震2次,漏报地震2次,根据 R 值计算公式,吴忠—灵武地区震源机制一致性参数预报效能的 R 值计算如下: $R=c-b=1.000-0.105=0.895>R_0=0.432$,由于报对了2021年11月18日灵武 $M_s4.0$ 地震,使得报对次数增加,预报效能的 R 值效果较之前有所上升,客观表明吴忠—灵武地区在震源机制一致性方面对 $M_s4.0$ 以上地震的预报效能相对较好(表2)。从表2可以看出,增加了一个地震导致 R 值较之前显著上升,这主要归因于可用的震例和对应资料变化“异常”偏少。根据中国大陆目前通常的地震预报效能平均 R 值 $0.22\sim 0.26$ 左右的范围来看(张国民等,2002;马宏生等,2004),本研究不同时间段的 R 值均高于前述的均值,由此认为本研究所计算的地震预报效能相对较好。

表2 2021年11月18日灵武 $M_s4.0$ 地震之后的震源机制一致性参数预测指标和地震预报效能

分析方法	异常判定标准	预测三要素			预报效能	地震概况(M_s)
		时间	地点	强度		
叠加应力场(SS1)的应力张量方差	空间方差小于0.22;时序张量方差小于0.1、维持1年且呈“V”型变化	1年左右	吴忠—灵武地区	$M_s \geq 4.0$	$R=0.895$ $R_0=0.432$ $R>R_0$	报准地震(2次):2012年11月20日永宁4.6级;2021年11月18日灵武4.0级地震。 漏报地震(2次):2009年11月21日灵武4.4级地震;2010年6月22日永宁4.5级地震。

4 和已有震源机制一致性研究的对比

国内外学者(Michael et al,1990;Lu et al,1997;付虹等,2011)认为,可将应力张量方差等于0.2作为应力场均匀性与非均匀性的分界,当应力张量方差小于等于0.2,可以理解为该区域的应力场相对较均匀,即震源机制一致性程度相对较高;应力张量方差大于0.2时,则反映了该区域应力场的相对非均匀性,即震源机制一致性程度较低。

根据已有的基于ZMAP计算的震源机制一致性研究成果来看,李金等(2015)研究了天山地震带的震源机制一致性,方差空间分布显示应力张量方差范围为0.05~0.38,方差时序表明自2010年起,应力时序张量方差下降至0.17以下;至2012年6月,应力张量时序方差下降为0.01(不仅低于0.1且低于0.05),之后发生新源和静交界处6.6级地震。刘自凤等(2020)研究了云南地区3次强震前后震源机制一致性特征,发现强震发生之前应力张量空间方差最低值低于0.1,且时序方差也低于0.1,强震前震区应力张量方差总体上经历了下降—转折—回升—发震的变化过程,呈“V”型变化,且地震均发生在“V”型变化形成过程中的趋势回升阶段,但异常时间不一(1~3年左右)。从本研究的结果来看,2003—2021年期间吴忠—灵武地区应力张量空间方差低于0.2且大于0.1,而其时序方差低于0.1、持续1年左右且呈现“V”型的两次变化之后的一年内均分别各自对应了2012年11月20日永宁 $M_s4.6$ 地震和2021年11月18日灵武 $M_s4.0$ 地震。与上述研究对比来看,其共同点是只要

时序方差低于 0.1、呈现类“V”型变化且持续 1 年以上,之后均大都对应目标地震,只是目标地震的震级下限有所不同,震级下限可能和应力张量空间方差最低值有关,这是唯一和上述研究不同的地方,李金等(2015)和刘自凤等(2020)的结果均表明强震前的应力张量方差空间值最小值均低于 0.1,所以对应了 5~6 级以上地震,而本研究的中等地震发生前的应力张量方差空间值最小值仅为 0.13(即没有低于 0.1),所以这可能是对应的目标地震震级下限为 $M_s 4.0$ 而上限不超过 $M_s 5.0$ 的原因之一,另外也可能是由于上述研究选取的目标地震为 5 级以上,而本文选取的是 4 级以上目标地震。2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s 4.0$ 地震发生前的异常变化阶段属于映震期内,自从异常变化之后,吴忠—灵武地区(105.5°E~107°E; 37.5°N~38.5°N)理论上未来 1 年内发生地震的震级下限可能仍介于 $M_s 4.0 \sim 4.9$ 之间,上限不超过 $M_s 5.0$ 。由于已经发生了 2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s 4.0$ 地震,属于报对的地震,映震期可能已过,因此吴忠—灵武地区应力张量方差时序图所显示的 2020—2021 年显著“V”型异常变化可以对应该地震。

5 讨论与结论

本研究在已有震源机制结果基础上,通过多方法得到了吴忠—灵武地区 2003—2021 年大量 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解,然后通过 ZMAP 集成的叠加应力场反演了该地区的震源机制一致性参数,即应力张量方差,分析了其时空变化特征,并结合震例初步提取和总结了该地区的震源机制一致性预测指标及预报效能。得到的认识和结论主要如下:

吴忠—灵武地区整体资料的应力张量方差空间分布的最低值为 0.13,且未低于 0.1,这是两次“异常”没有对应 $M_s 5.0$ 以上地震的可能原因之一。虽然吴忠—灵武地区应力张量方差(2003—2021 年时段)最低值可能反映了该地区的目前介质应力水平程度,发生 $M_s \geq 5.0$ 地震可能性较小,但是该区域的过去震例表明,在时序方差低于 0.1 维持 1 年且呈现“V”型的 2 次显著变化里,其中 1 次对应了 2012 年 11 月永宁 $M_s 4.6$ 地震,另外 1 次为当前时期(2020—2021 年),已经对应 2021 年 11 月 18 日灵武 $M_s 4.0$ 地震。

预报的震级下限可能和应力张量方差空间最低值有关,根据诸多 5~6 级已有的相关基于 ZMAP 计算的震源机制一致性研究震例(李金等,2015;刘自凤等,2020)以及本研究研究结果来看,其 5~6 级地震震前应力张量空间方差大部分低于 0.1,而在吴忠—灵武地区和中国大陆其他地区,对于 4~5 级左右和 5~6 级震例来说,只要发生在目标地震之前,大都存在应力张量的时序方差小于 0.1 且显著“V”型变化,只是不同地区的异常持续时间不一,预测时间也略有所不同。为此,就本研究 and 已有基于 ZMAP 的震源机制一致性研究成果初步统计来看,应力张量的空间方差最低值可能反映了资料所在时间段介质应力水平程度,空间方差低于 0.1 可能反映的是基于该资料尺度下 5~6 级以上地震的发震水平;如果空间方差大于 0.1 且小于 0.2,则可能反映的是 4.0~4.9 级之间地震的发震水平;而应力张量的时序方差似乎和震级下限关系不大,但时序方差只要低于 0.1 且出现显著的“V”型变化,一般异常出现后 1~2 年内则对应目标地震(4~5 级地震预测时间为 1 年内;大于 5 级以上地震时间可能在 1~3 年内)。由于本研究仅反映吴忠—灵武和部分其他地区的震例,而应力张量空间方差最低值和预报震级大小的定量关系,以及应力张量时序方差变化的异常时间和预报地震时间的定量关系等仍需后期更多的资料进一步验证,当积累的震例和震源机制资料足

够多时,或许可以得到前述这些参数之间的定量关系甚至是统一的评判标准。

本研究初步建立了吴忠—灵武地区震源机制一致性方面的预测指标体系,认为震源机制一致性参数在吴忠—灵武地区具有一定的预报效能,后期仍需进一步积累震源机制资料和大量震例研究来完善和加强震源机制一致性参数在地震预测预报中的应用。

致谢:本研究的震源机制一致性参数计算及其绘图来自 ZMAP 程序包(Wiener,2001),其他图件均用 GMT 软件绘制;审稿专家和编辑部老师给出了重要的修改建议,作者在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈颢. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数. 地球物理学报, **21**(2):142~159.
- 程万正,阮祥,张永久. 2006. 川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数. 地震学报, **28**(6):561~573.
- 崔子健,李志雄,陈章立. 2015. 云南景谷 M_s 6.6、云南沧源 M_s 5.5 地震谱振幅相关系数特征分析. 地震研究, **38**(4):535~540.
- 邓起东,程绍平,闵伟,等. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论. 地质力学学报, **5**(3):13~21.
- 刁桂苓,于利民,李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例. 地震学报, **16**(1):64~69.
- 杜航,郑江蓉,江昊琳,等. 2022. 利用 FOCMEC 和 CAP 方法反演 2021 年大丰海域 M 5.0 及天津 M 4.2 地震震源机制解. 防灾减灾工程学报, **42**(4):874~880.
- 范俊喜,马瑾,刁桂苓. 2003. 由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场. 地震地质, **25**(1):88~99.
- 付虹,王绍晋,李丽,等. 2011. 滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动. 地震研究, **34**(2):113~118.
- 国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法程序指南. 北京:地震出版社.
- 郭祥云,蒋长胜,王晓山,等. 2017. 鄂尔多斯块体周缘中小地震震源机制及应力场特征. 大地测量与地球动力学, **37**(7):675~685.
- 韩晓明,刘芳,张文韬,等. 2015a. 基于震源机制资料分析河套地震带的应力场变化特征. 地震地质, **37**(4):1030~1042.
- 韩晓明,荣代潞. 2015b. 美国南加州地区 1981—2011 年 $M_w \geq 6.0$ 地震前震源应力场与构造应力场趋于一致现象研究. 地震学报, **37**(6):948~958.
- 金严,赵毅,陈颢,等. 1976. 辽宁省海城地震前震震源错动方式的一个特点. 地球物理学报, **19**(3):156~164.
- 李金,周龙泉,龙海英,等. 2015. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征. 地震地质, **37**(3):792~803.
- 李丽,宋美琴,刘素珍,等. 2015. 山西地区震源机制一致性参数时空特征分析. 地震, **35**(2):43~50.
- 刘方斌,曲均浩,李亚军,等. 2018. 山东乳山地震序列震源机制解一致性参数特征. 地震地质, **40**(5):1086~1099.
- 刘自凤,付虹,彭关灵,等. 2020. 2014 年云南 3 次强震前后震源机制一致性时空演化特征. 地震研究, **43**(2):348~354.
- 马禾青,任雪梅,金春华,等. 2006. 2003—2004 年吴忠、灵武地区地震活动性分析. 地震研究, **29**(2):114~117.
- 马宏生,刘杰,吴昊,等. 2004. 基于 R 值评分的年度地震预报能力评价. 地震, **24**(2):31~37.
- 荣代潞. 2014. 研究中强地震前中小地震震源机制变化的一种方法. 地震工程学报, **36**(2):286~291.
- 孙丽娜,李皓,齐玉妍,等. 2017. 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚 M_w 9.0 大震前后震源机制一致性变化特征研究. 中国地震, **33**(3):424~431.
- 万永革. 2008. 美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致现象的研究. 中国地震, **24**(3):216~225.
- 万永革.(2022-07-18)[2022-11-20]. 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:1~16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html>.
- 王晓山,吕坚,谢祖军,等. 2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征. 地球物理学报, **58**(11):4149~4162.
- 许英才,郭祥云,曾宪伟. 2022a. 三种方法分析 2017 年宁夏固原 M_s 4.6 地震的震源机制解. 地震工程学报, **44**(5):1136~1150.
- 许英才,曾宪伟. 2020. 吴忠—灵武地区地震活动性与强震危险性分析. 地震科学进展, **50**(10):1~12.
- 许英才,曾宪伟. 2022b. 2021 年 11 月 18 日宁夏灵武 M_s 4.0 地震震源参数研究. 地球与行星物理论评, **53**(2):214~227.
- 许英才,曾宪伟,罗国富. 2022c. 2021 年吴忠—灵武 M_L 3.6 震群重新定位及震源机制研究. 地震科学进展, **52**(6):251~

262.

- 薛宏运, 鄢家全. 1984. 鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场. 地球物理学报, **27**(2):144~152.
- 杨明芝, 马禾青, 廖玉华. 2007. 宁夏地震活动与研究. 北京: 地震出版社.
- 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 等. 2010. 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化. 地震, **30**(1):108~114.
- 曾宪伟, 莘海亮, 蔡新华, 等. 2013. 利用小震震源机制解研究宁夏北部及邻区构造应力场. 防灾减灾学报, **29**(4):25~30.
- 曾宪伟, 莘海亮, 陈春梅, 等. 2015. 利用小震震源机制解研究宁夏南部及邻区构造应力场. 地震研究, **38**(1):51~57.
- 张广伟, 雷建设. 2015. 2015 尼泊尔 M_s 8.1 地震中等余震震源机制研究. 地球物理学报, **58**(11):4298~4304.
- 张国民, 刘杰, 石耀霖. 2002. 年度地震预报能力的科学评价. 地震学报, **24**(5):525~532.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms. Bull Seismol Soc Am, **92**(6):2264~2276.
- Kilb D, Hardebeck J L. 2006. Fault parameter constraints using relocated earthquakes: a validation of first-motion focal-mechanism data. Bull Seismol Soc Am, **96**(3):1140~1158.
- Lu Z, Wyss M, Pulpan H. 1997. Details of stress directions in the Alaska subduction zone from fault plane solutions. J Geophys Res, **102**(B3):5385~5402.
- Lund B, Böövarsson R. 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes. Bull Seismol Soc Am, **92**(6):2419~2433.
- Michael A J. 1984. Determination of stress from slip data: Faults and folds. J Geophys Res, **89**(B13):11517~11526.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. J Geophys Res, **92**(B1):357~368.
- Michael A J, Ellsworth W L, Oppenheimer D H. 1990. Coseismic stress changes induced by the 1989 Loma Prieta, California Earthquake. Geophys Res Lett, **17**(9):1441~1444.
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. Earthq Notes, **55**(3):15.
- Snoke J A. 2003. FOCMEC: Focal Mechanism determinations. Int Geophys, **81**(3):1629~1630.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China. Earthq Sci, **23**(4):377~386.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismol Res Lett, **72**(3):373~382.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. Geophys J Int, **194**(2):839~843.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. Bull Seismol Soc Am, **86**(5):1634~1641.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. J Geophys Res, **97**(B8):11703~11728.

Analysis of Focal Mechanism Consistency and Earthquake Prediction Efficiency in Wuzhong-Lingwu Area

Xu Yingcai, Zeng Xianwei, Luo Guofu

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

Abstract Using calculated focal mechanism solutions of $M_L \geq 2.0$ earthquakes from 2003 to 2021 in Wuzhong-Lingwu area, the stress tensor variances in Wuzhong-Lingwu area were inverted using superposition stress field inversion method, and its spatial and temporal distribution characteristics were also studied. The relationship between four $M_s \geq 4.0$ earthquakes in Wuzhong-Lingwu region and focal mechanism consistency parameters in the region was analyzed, and then the prediction index of focal mechanism consistency parameters in the region was extracted, and its prediction efficiency was discussed. The results show that the spatial range of stress tensor variance in Wuzhong-Lingwu region from 2003 to 2021 is mainly between 0.13 and 0.22, with the latitude of 38.1° as the dividing line, showing the zoning characteristics of low in the south and high in the north. The four $M_s \geq 4.0$ earthquakes generally occurred in the transition region between high and low values of the stress tensor variance. There are two significant “abnormal” changes in the temporal sequence diagram of the stress tensor variance, which is characterized by the temporal sequence stress tensor variance being lower than 0.1 for about one year and showing a significant “V-shaped” change. These two “V-shaped” changes correspond to the 2012 Yongning $M_s 4.6$ earthquake and 2021 Lingwu $M_s 4.0$ earthquake respectively. Before the earthquake happens, the temporal stress tensor variances all have experienced a change of descending, turning, rising and earthquake occurring, and the time interval between rising and an earthquake occurrence is about one year. By analyzing prediction efficiency in the area, it is shown that the consistency parameters of focal mechanism can be used as the medium and long term prediction index of $M_s \geq 4.0$ earthquakes in Wuzhong-Lingwu region.

Keywords: Wuzhong-Lingwu area; Focal mechanism consistency; Stress tensor variance; Prediction efficiency