

胡淑芳,袁丽文,李强,等.震源机制一致性参数方法在台湾地区的应用研究[J].华南地震,2022,42(4):137-144. [HU Shufang, YUAN Liwen, LI Qiang, et al. Application of Focal Mechanism Consistency Parameter Method in Taiwan Area [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 137-144]

震源机制一致性参数方法在台湾地区的应用研究

胡淑芳,袁丽文,李强,黄艳丹

(福建省地震局,福州 350000)

摘要: 基于台湾地区1977—2022年568次 $M_w \geq 4.5$ 以上地震的震源机制解资料,反演其一致性参数应力张量方差 Variance 的空间分布及 Misfit 角的时序变化特征。结合台湾地区历史震例研究表明:台湾 $M_s \geq 6.0$ 地震多数发生在应力张量方差 Variance 的低值区或高低值的过渡区,发震时间多为 Misfit 角出现 $\leq 40^\circ$ 过程中的几天至几年尺度。此外,该方法在台湾中央山脉以东地区通过 R 值检验,最佳预测时间为150 d,因此,在台湾中央山脉以东地区震情跟踪的中期预测指标中可推荐使用。

关键词: 震源机制解; Variance 参数; Misfit 角; $M_s \geq 6.0$ 地震

中图分类号: P315.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0137-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.18

Application of Focal Mechanism Consistency Parameter Method in Taiwan Area

HU Shufang, YUAN Liwen, LI Qiang, HUANG Yandan

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Based on the focal mechanism solution data of 568 earthquakes with $M_w \geq 4.5$ in Taiwan from 1977 to 2022, the spatial distribution of the consistency parameter stress tensor variance and the time series variation characteristics of the Misfit angle were inverted. Combining with the study of historical earthquake cases in Taiwan, it is shown that most of the earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in Taiwan occur in the low-value area or the transition area between high and low values of the stress tensor variance, and the earthquake occurrence time is mostly a few days to several years when the Misfit angle $\leq 40^\circ$. In addition, this method has passed the R value test in the east of central mountain range of Taiwan, and the best prediction time is 150 days. Therefore, it can be recommended for medium-term prediction indicators for earthquake tracking in the east of central mountain range of Taiwan.

Keywords: Focal mechanism solution; Variance parameters; Misfit angle; Earthquakes with $M_s \geq 6.0$

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 2022年度震情跟踪定向工作任务(2022010113)和国家自然科学基金面上项目(41774068)联合资助。

作者简介: 胡淑芳(1984-),女,工程师,主要从事地震监测和分析预报方面的研究。

E-mail: 282081391@qq.com

0 引言

震源机制解对了解地震的孕震机理、发震构造、震源区应力状态具有重要意义。对大量中小地震震源机制解的总体特征进行研究,有可能捕捉到与强震活动相关的构造应力场变化信息。陈颢^[1]研究发现,强震前中小地震震源机制解有趋于一致的现象,提出将震源机制一致性作为描述地震活动的新参数。Michael等^[2]对1989年洛马普列塔M7.1地震前后应力变化进行研究,结果显示主震之前中小地震震源机制一致性较好。大量的研究表明^[3-11],震源机制一致性参数的时空分布与中强地震的发生有一定对应关系,中强地震大多发生在震源机制一致性参数低值区或高低值的过渡区。震源机制一致性参数为地震的预测研究提供了一个新的方向。

台湾位于欧亚板块与菲律宾海板块的会聚边界上,是由吕宋岛弧与欧亚大陆边缘会聚、碰撞

形成的。正是由于板块俯冲和碰撞作用,台湾地区是我国境内地震活动强度最高的地区。福建与台湾隔海相望,台湾强震活动时常波及福建沿海地区。近年来,台湾地区一直是全国地震重点危险区,因此,为了科学合理的跟踪台湾地区的震情形势,我们基于测震学预测指标体系的清理工作,梳理了震源机制一致性方法在台湾地区的预测指标(时、空、强)并进行效能评价。

1 数据资料

收集台湾地区1977—2022年568次 M_w 4.5以上地震的震源机制解资料,其中4.5~5.9级地震497次,6.0~6.9级地震59次,7.0~7.9级地震12次(图1),震源机制解来源于哈佛CMT测定结果,主要采用矩张量反演测定。台湾地区震源机制解分布情况如图2所示。丰富可靠的震源机制解资料为深入研究台湾地区应力场的时空变化特征提供了数据保障。

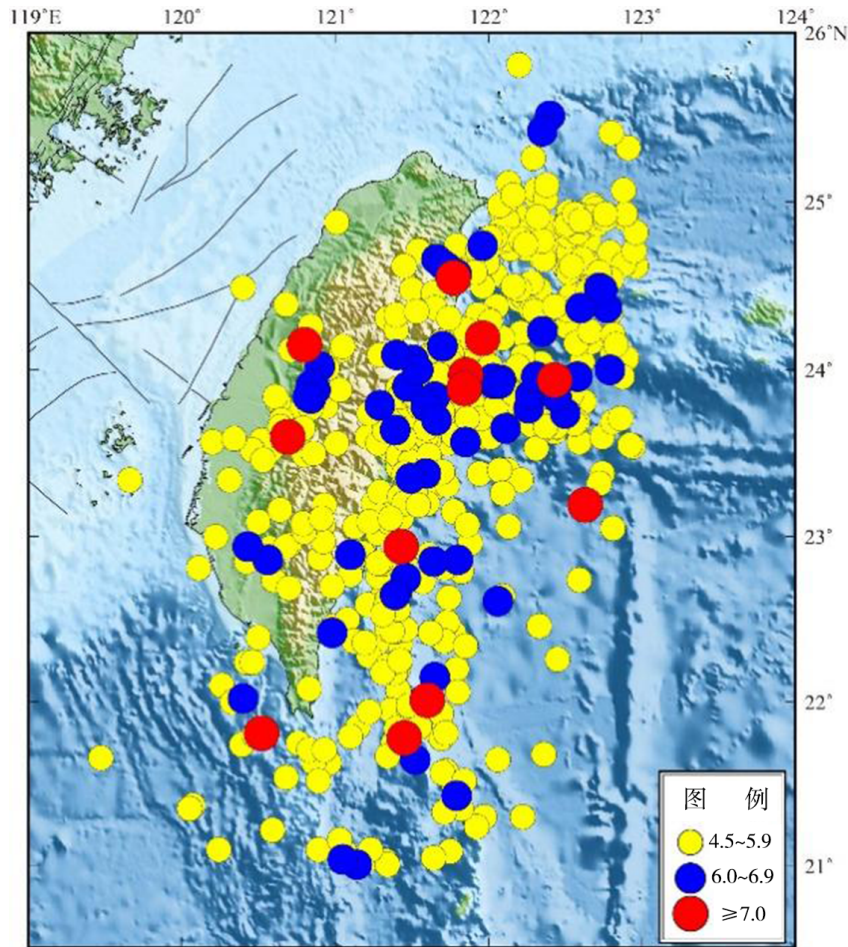
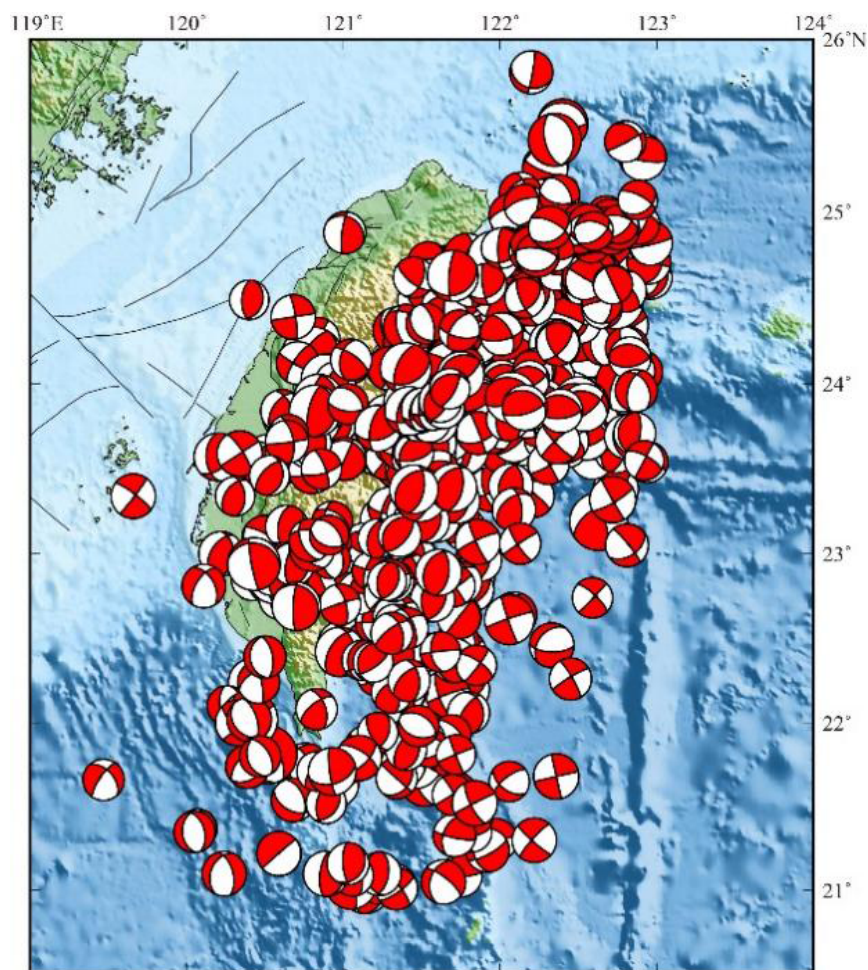
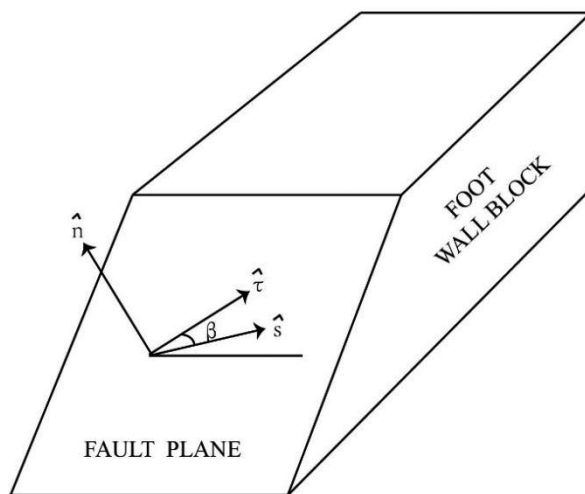


图1 台湾地区地震分布图
Fig.1 Earthquakes distribution map in Taiwan

图2 台湾地区 $M_w \geq 4.5$ 震源机制解分布图Fig.2 Distribution map of focal mechanism solutions for earthquakes with $M_w \geq 4.5$ in Taiwan

2 研究方法

本研究使用Zmap软件包中Michael等^[12-13]提出的应力张量反演方法计算震源机制一致性参数。该方法首先对研究区域进行网格划分,进而利用每个网格节点及其周围一定范围内的多个震源机制解反演得到研究区的应力张量方差Variance和Misfit角。其中,Misfit角是指图3中 \hat{s} 与 $\hat{\tau}$ 之间的夹角 β ,即单次地震的滑动矢量与理论滑动矢量间的夹角。应力张量方差Variance定义为Misfit角与其平均数之差的平方和的平均数,是衡量地震震源释放应力场与区域构造应力场一致性程度的定量指标^[2, 13]。当应力张量方差Variance<0.1时,震源机制具有很好的一致性,表示区域应力场均匀,应力水平高;当Variance>0.2时,则表示震源机制比较紊乱,区域应力场具有非均匀性,应力水平低^[14]。

图3 地震断层面参数及应力模型示意图^[12]Fig.3 Schematic diagram of seismic fault plane parameters and stress model^[12]

3 结果分析与讨论

3.1 台湾地区应力张量方差 Variance 的空间演化特征

基于台湾地区 1977—2022 年 568 次 $M_w \geq 4.5$ 以上地震的震源机制解, 将研究区按照 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 进行网格化, 利用每个网格节点及其周围 25 个地震的震源机制解反演得到应力张量方差 Variance, 绘制应力张量方差 Variance 空间分布图(图 4), 为了便于分析中强地震活动与研究区应力场空间分布的关系, 在图上标注了 1977 年以来台湾地区发生的 $M_s \geq 6.0$ 地震。结果显示, 台湾北部大部分地区 and 西南地区应力张量方差相对较高, 其中新竹、苗栗一带的应力张量方差值高达 0.25 ~ 0.30, 处于极高值区。根据 Lu 等^[4]人的研究表明: 当 Variance > 0.2 时, 意味着这些区域的应力场在时空上是紊乱的、非均匀的, 应力水平相对较低。台湾中部(嘉义、云林和南投县)、花莲、台东及其海域以及宜兰海域等地的应力张量方差相对较低, 尤其在花

莲海域、台东海域及宜兰部分海域的应力张量方差值甚至小于 0.1, 处于极低值区, 当 variance < 0.1 时, 意味着这些区域观测到的震源机制解可以用统一的应力张量来表征, 应力场在时空上是有序的、均匀的, 应力水平相对较高。

从图 4 可以看出, 1977 年以来, 台湾地区的 $M_s \geq 6.0$ 地震绝大多数发生于应力张量方差值相对较低的区域或其高低值的过渡区, 其中, 台湾东部海岸山脉及海域地区处于应力张量方差低值中心, 而该地区也是台湾 $M_s \geq 6.0$ 地震的密集活动区, 反映出该区域应力水平对这些地震的活动起到了决定性作用。

3.2 台湾地区 Misfit 角的时间演化特征

为了分析强震发震时间与震源机制一致性参数变化趋势之间的关系, 本文选取窗长 25 个地震, 步长 5 个地震进行滑动反演得到 Misfit 角, 绘制了震源机制一致性参数 Misfit 角时序变化图(图 5), 并在图上按照发震时间的先后顺序标注了台湾 $M_s \geq 6.0$ 地震。

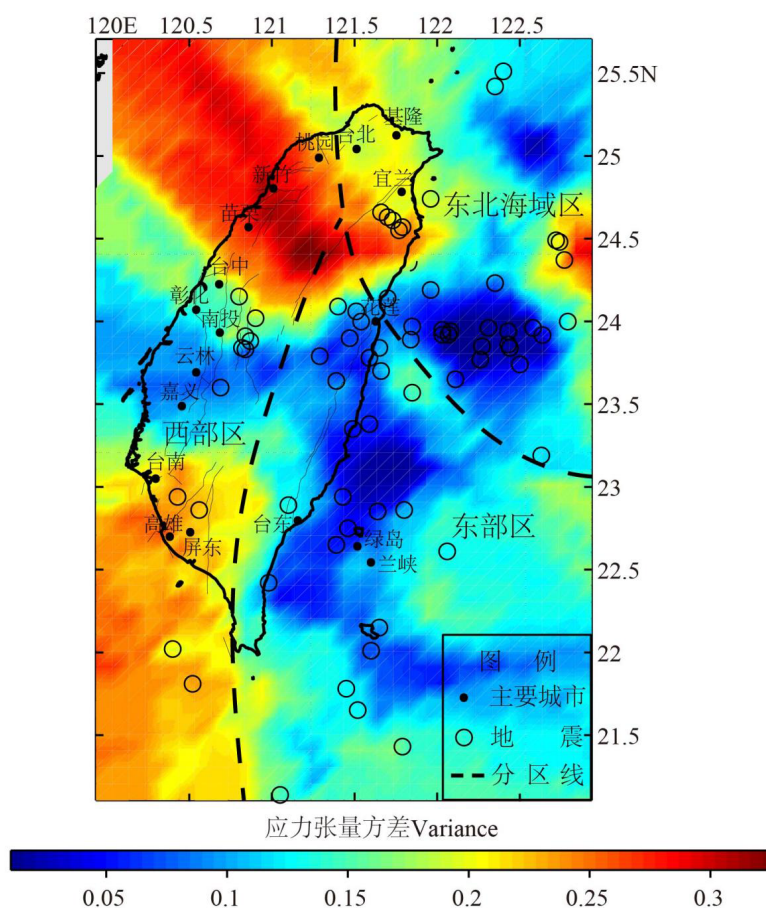


图 4 台湾地区应力张量方差空间分布及 1977 年以来 $M_s \geq 6.0$ 级地震震中分布图

Fig.4 Spatial distribution of stress tensor variance and the epicenter distribution of earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in Taiwan since 1977

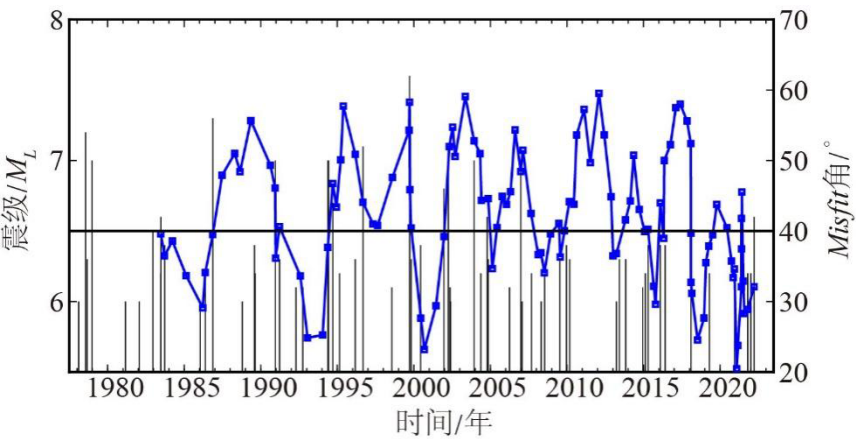


图5 台湾地区 Misfit角时序图

Fig.5 Sequence diagram of Misfit angle in Taiwan

为进一步明确震源机制一致性方法在台湾地区的判定标准及预测规则，结合台湾地区 $M_s \geq 6.0$ 地震分区域开展震例回溯性分析(表1、表2和表3)，根据台湾地震活动特征，以中央山脉和琉球海沟为界，分为三个地震区(图4所示)：东北海域区、东部区和西部区。结果显示：从1983年6月以来(Misfit角有计算值开始计起)，东北海域区共发生 $M_s \geq 6.0$ 地震27次，其中22次地震发生在Misfit角 $\leq 40^\circ$ 的情况下，对应率为81%；台湾东部区共发生 $M_s \geq 6.0$ 地震23次，其中14次地震发生在Misfit角 $\leq 40^\circ$ 的情况下，对应率为61%；西部区共发生 $M_s \geq 6.0$ 地震12次，其中3次地震发生在Misfit

角 $\leq 40^\circ$ 的情况下，对应率为25%；东北海域区地震对应率最高，东部区次之，西部区地震对应率最低。中强震前 Misfit角会出现几天至几年尺度的低值过程，地震通常发生在 Misfit角持续下降或转折上升过程中。值得注意的是在1999年9月21日台湾西部区发生 $M_s 7.3$ 集集地震，该地震发生在Misfit角的高值时段，初步分析其原因在该地震发生之前，Misfit角在1995—1999年之间出现了一次持续下降并转折上升的过程，只是未达到文中所设的阈值，但说明在该时间段内应力存在积累的过程，而1999年9月21日集集地震就发生在Misfit角的转折上升过程中。

表1 台湾东北海域区 $M_s \geq 6.0$ 历史震例回溯情况

Table 1 Retrospection of historical earthquake cases with $M_s \geq 6.0$ in the northeastern sea area of Taiwan

异常时段			历史地震震例	
异常开始	异常结束	持续时间	地震事件	与异常开始时间间隔
1983-06-23	1986-12-31	3.5 a	1983-06-24 台湾花莲海域 6.6	1 d
			1983-09-22 台湾花莲海域 6.4	91 d
			1986-01-16 台湾台北 6.0	2.6 a
			1986-11-15 台湾花莲海域 7.3	3.4 a
1990-12-12	1994-06-22	3.5 a	1990-12-14 台湾花莲 7.0	2 d
			1992-09-28 台湾花莲海域 6.1	1.8 a
			1994-05-23 台湾花莲海域 6.1	3.4 a
			1994-05-24 台湾花莲海域 7.0	3.4 a
			1994-06-05 台湾宜兰 7.0	3.5 a

(转下表)

(接表 1)

异常时段			历史地震震例	
异常开始	异常结束	持续时间	地震事件	与异常开始时间间隔
1999-10-29	2002-05-30	2.6 a	2001-12-18 台湾花莲海域 6.8	2.1 a
			2002-03-31 台湾宜兰海域 7.1	2.4 a
			2002-05-15 台湾宜兰海域 6.1	2.5 a
			2002-05-29 台湾花莲海域 6.0	2.6 a
2008-02-17	2009-12-31	1.9 a	2009-07-14 台湾花莲海域 6.3	1.4 a
2013-01-06	2013-10-31	0.8 a	—	—
2014-12-01	2015-10-18	0.9 a	2014-12-11 台湾新北海域 6.1	10 d
			2015-04-20 台湾花莲海域 6.4	140 d
			2015-04-20 台湾花莲海域 6.0	140 d
2016-04-25	2016-06-11	47 d	2016-05-31 台湾新北海域 6.4	36 d
2018-02-04	2019-07-11	1.4 a	2018-02-04 台湾花莲海域 6.2	0 d
2020-09-28	2021-05-24	1.0 a	2020-12-10 台湾宜兰海域 6.6	73 d
2021-07-06	2022-03-22	1.0 a	2021-10-24 台湾宜兰 6.5	181 d
			2022-01-03 台湾花莲海域 6.2	110 d

表 2 台湾东部区 $M_s \geq 6.0$ 历史震例回溯情况
Table 2 Retrospection of historical earthquake cases with $M_s \geq 6.0$ in eastern Taiwan

异常时段			历史地震震例	
异常开始	异常结束	持续时间	地震事件	与异常开始时间间隔
1983-06-23	1986-12-31	3.5 a	1983-09-23 台湾花莲海域 6.0	92 d
			1986-05-20 台湾南投 6.2	2.9 a
1990-12-12	1994-06-22	3.5 a	1990-12-13 台湾花莲 6.3	1 d
			1991-03-26 台湾台东东南海 6.3	104 d
			1992-04-20 台湾花莲东南海 6.1	1.4 a
1999-10-29	2002-05-30	2.6 a	1999-11-02 台湾花莲海域 6.3	4 d
2008-02-17	2009-12-31	1.9 a	2008-04-24 台湾台东海域 6.0	67 d
			2008-07-13 台湾台东东南海 6.2	147 d
			2009-12-19 台湾花莲海域 6.4	1.8 a
2013-01-06	2013-10-31	0.8 a	2013-10-31 台湾花莲 6.3	298 d
2014-12-01	2015-10-18	0.9 a	2015-02-14 台湾台东海域 6.2	75 d
2016-04-25	2016-06-11	47 d	—	—
2018-02-04	2019-07-11	1.4 a	2018-02-06 台湾花莲海域 6.4	2 d
			2019-04-18 台湾花莲 6.3	1.2 a
2020-09-28	2021-05-24	1.0 a	—	—
2021-07-06	2022-03-22	1.0 a	2022-03-23 台湾台东海域 6.6	260 d

表3 台湾西部区 $M_s \geq 6.0$ 历史震例回溯情况

Table 3 Retrospection of historical earthquake cases with $M_s \geq 6.0$ in western Taiwan

异常时段			历史地震震例	
异常开始	异常结束	持续时间	地震事件	与异常开始时间间隔
1983-06-23	1986-12-31	3.5 a	—	—
1990-12-12	1994-06-22	3.5 a	—	—
1999-10-29	2002-05-30	2.6 a	2000-06-11 台湾南投 6.4	226 d
2008-02-17	2009-12-31	1.9 a	—	—
2013-01-06	2013-10-31	0.8 a	2013-03-27 台湾南投 6.0	80 d
			2013-06-02 台湾南投 6.3	147 d
2014-12-01	2015-10-18	0.9 a	—	—
2016-04-25	2016-06-11	47 d	—	—
2018-02-04	2019-07-11	1.4 a	—	—
2020-09-28	2021-05-24	1.0 a	—	—
2021-07-06	2022-03-22	1.0 a	—	—

综上所述,台湾 $M_s \geq 6.0$ 地震发震地点多位于震源机制一致性参数应力张量方差 Variance 的低值区或其高低值过渡区,主要集中在台湾东北海域区和东部区;发震时间多为震源机制一致性参数 Misfit 角 $\leq 40^\circ$ 时的持续下降或转折上升过程中。为了进一步提高震源机制一致性方法在台湾地区应用的准确性,使用 R 值评分法进行效能评价,计算结果显示在台湾的东北海域区 R 值为 0.27, R_0 为 0.18, $R > R_0$; 东部区 R 值为 0.24, R_0 为 0.19, $R >$

R_0 ; 表明该方法在台湾中央山脉以东地区(东地震带)的预测效能通过显著性检验,预测最佳时间为 150 d,因此震源机制一致性方法可以在台湾中央山脉以东地区的中期预测指标中推荐使用,对未来台湾地区强震危险性的判定提供参考依据。而在台湾的西部区地震对应率偏低,也未能通过 R 值检验,因此该方法在台湾西部区参考使用。具体的判定标准及预测规则见表 4。

表4 震源机制一致性方法在台湾地区的预测指标

Table 4 Prediction index of focal mechanism consistency method in Taiwan region

指标名称	判定标准	预测三要素			效能
		最佳预测时间/d	强度/ M_s	地点	
台湾地区震源机制一致性	利用台湾地区 1977 年以来 $M_w 4.5$ 以上地震震源机制计算结果,得到台湾地区震源机制一致性参数时空分布, $M_s \geq 6.0$ 地震多位于 Variance < 0.1 的地区及边缘,时间多为 Misfit 角 $\leq 40^\circ$ 时段的持续下降或转折上升过程中。	140	≥ 6.0	台湾东北海域地区	$R=0.27$ $R_0=0.18$
		150		台湾东部区	$R=0.24$ $R_0=0.19$
		230		台湾西部区	$R=0.09$ $R_0=0.20$

4 结论

本研究以台湾地区为研究区域,基于 1977—2022 年 568 次 $M_w 4.5$ 以上地震的震源机制解资料,分析了台湾地区震源机制一致性参数时空分布特

征与中强地震活动的关系。结果表明:
(1)研究中反演得到的台湾地区应力张量空间分布情况与该地区的构造和动力来源较为吻合,应力张量方差低值区与台湾地区的三个主要地震活动区基本一致,其中:①东北海域区地质构造与地震活动主要受琉球隐没系统弧后扩张裂-冲绳

海槽地堑的南北向伸张变形所控制,使得该区域应力集中,地震也最为活跃。②台湾东部海岸山脉在地质上属于板块缝合带,菲律宾海板块以8 cm/a的速度向西北与欧亚板块聚合,故台湾东部区也属于应力集中区,存在大量的地震活动;③台湾的西部区由于造山作用内部存在多组断裂的交汇复合,形成了一些断陷平原或盆地,成为该区域强震发生的主要部位,应力相对集中。

(2)台湾地区 $M_s \geq 6.0$ 地震多数发生在应力张量方差低值区及高低值过渡区,尤其是台湾东部及其海域处于低值中心,反映出该区域应力水平处于较高水平,后续应密切关注该区域内中强地震的发生。

(3)结合历史震例回溯性研究,认为在台湾地区震源机制一致性技术方法在台湾中央山脉以东地区的预测效能较好,在时间预测方面表现为几天至几年尺度,最佳的预测时间为150 d,当震源机制一致性参数Misfit角 $\leq 40^\circ$ 的持续下降或转折上升的过程中应注意台湾中强地震的发生。

(4)震源机制一致性技术方法在台湾中央山脉以东地区的应用通过 R 值检验,目前在台湾中央山脉以东地区震情跟踪的中期预测指标中推荐使用,在台湾的西部区参考使用。

后续将继续多途径搜集台湾地区更多中小地震活动的震源机制解以及基于台湾复杂的地质构造背景,分区域计算讨论震源机制一致性方法在台湾地区的合理性和科学性,不断的对该指标进行检验和修正。

参考文献

- [1] 陈颙. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 1978, 21(2): 21-43.
- [2] Michael A J, Ellsworth W L, Oppenheimer D H. Coseismic stresschanges induced by the 1989 Loma Prieta, California earthquake[J]. Geophys Res Lett, 1990, 17(9): 1441-1444.
- [3] Wiemer S. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seismol Res Lett, 2001(72): 373-382.
- [4] 刁桂苓, 赵英萍, 啜永清, 等. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特[J]. 内陆地震, 2004, 18(3): 202-206.
- [5] 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 等. 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化[J]. 地震, 2010, 30(1): 108-114.
- [6] 付虹, 王绍晋, 李丽, 等. 滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 113-118.
- [7] 倪红玉, 刘泽民, 洪德全, 等. 综合研究2014年霍山 $M_s 4.3$ 地震序列的震源机制变化过程[J]. 地震地质, 2015, 37(4): 1004-1019.
- [8] 张致伟, 周龙泉, 龙锋, 等. 汶川8.0和芦山7.0级地震序列应力场时空特征[J]. 地震地质, 2015, 37(3): 792-803.
- [9] 李金, 周龙泉, 龙海英, 等. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征[J]. 地震地质, 2015, 37(3): 792-803.
- [10] 刘方斌, 曲均浩, 李国一, 等. 山东长岛震群震源机制解一致性参数时空演化特征[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1034-1041.
- [11] 刘自凤, 付虹, 彭关灵, 等. 2014年云南3次强震前后震源机制一致性时空演化特征[J]. 地震研究, 2020, 43(2): 348-354.
- [12] Michael A J. Determination of stress from slip data: faults and folds[J]. J Geophys Res, 1984, 89(B13): 11517-11526.
- [13] Michael A J. Use of focal mechanisms to determine stressa control study[J]. J Geophys Res, 1987, 92(B1): 357-368.
- [14] Lu Z, Wyss M, Pulpan H. Detail of stress directions in the Alaska subduction zone from fault plane solutions[J]. J Geophys Res, 1997, 102(B3): 5383-5402.