

山西带基于地震对应相关谱的多参数综合方法的应用研究^①

王霞, 宋美琴, 张淑亮, 李宏伟

(山西省地震局, 山西 太原 030021)

摘要:应用基于地震对应相关谱的多参数滑动极值相关度方法对山西地震带及邻区进行时间和空间扫描计算,定量识别和提取该区中强地震前的综合异常时空特征。时间扫描结果显示绝大多数目标地震前均有高值异常出现;空间扫描结果表明中强地震前1年左右震区及其附近区域多参数滑动极值平均概率出现高值异常现象,且异常区域逐渐扩大增强,地震多发生在异常区域内或者附近。中强地震发生后高值异常区逐渐缩小,震后1~2年异常区域基本消失;若高值异常区仍持续发展,可能是后续中强地震的异常反映。

关键词:山西地震带;地震对应相关谱;多参数滑动极值相关度;综合异常;时空特征

中图分类号: P315.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1026-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1026

Application of the Multi-parameter Method to the Shanxi Seismic Belt Based on Earthquake Corresponding Relevancy Spectrum

WANG Xia, SONG Mei-qin, ZHANG Shu-liang, LI Hong-wei

(Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030021, China)

Abstract: Using the method of multi-parametric moving maximum probability based on earthquake corresponding relevancy spectrum, we quantitatively identify and analyze the temporal-spatial evolution characteristics of multi-parametric precursory anomalies occurring before moderate-strong earthquakes in the Shanxi rift zone and adjacent regions, and discuss the development of these earthquake precursory anomalies. We established a database of earthquake corresponding relevancy spectrum with spatio-temporal attributes after performing retrospective research of earthquakes, and developed extrapolative prediction ability. This study presents a new method for the prediction of moderate-strong earthquakes in the Shanxi rift zone and adjacent regions. Since the time-interval in this study is 12 months, we performed temporal scanning of the multi-parameter earthquake corresponding relevancy spectrum in the northern, central, and southern districts of the Shanxi seismic belt. The target earthquake magnitudes in the northern, central, and southern districts of the Shanxi seismic belt were $M_L \geq 5.0$, $M_L \geq 4.5$ and $M_L \geq 4.5$, respectively. The selected parameters for the northern district were b value, earthquake absence and frequency, and that for the central and southern districts were η value, b value, and earthquake absence and frequency. The retrospective research period was from 1970 to 2009, and the extrapolative prediction

^① 收稿日期: 2014-03-03

基金项目: 山西省自然科学基金(2012011029); 山西省科技攻关项目(201003111292, 20090311084); 中国地震局星火计划(XH1005, XH13004)

作者简介: 王霞(1987—), 女, 助理工程师, 主要从事地震综合预报等研究. E-mail: 365372858@qq.com

通讯作者: 宋美琴(1968—), 女, 高级工程师, 主要从事地震活动性、综合预报等研究. E-mail: smq28@126.com

period was from 2010 to September, 2013. The results show that during the retrospective research period of 1970 to 2009, seven of the nine major changes in the multi-parametric moving maximum probabilities occurred before the occurrence of the target earthquakes and there were two false predictions in the northern district. There were nine and five major changes in the multi-parametric moving maximum probabilities in the middle and southern districts, respectively, before the target earthquakes. During the extrapolative prediction period, the major change in the multi-parametric moving maximum probability of the northern district corresponds to two $M_L 5.0$ earthquakes in 2010. There are no obvious anomalies in the central district and $M_L \geq 4.5$ earthquakes do not actually occur in this district. A major change in the multi-parametric moving maximum probability in the southern district appears from March, 2010 to May, 2013, with the possible occurrence of a $M_L \geq 4.5$ earthquake. The study area is the Shanxi rift zone and the adjacent region ($33^\circ \sim 42^\circ \text{ N}$, $106^\circ \sim 117^\circ \text{ E}$) and the target earthquake magnitude for the study area is $M_L \geq 5.0$. The retrospective research period is from 1970 to 2009, and the extrapolative prediction period is from 2010 to September, 2013. As the studied time-interval is 12 months and the window and step length are $2^\circ \times 2^\circ$ and 0.2° , respectively, we selected b value, and earthquake absence and frequency to perform spatial scanning of the multi-parameter earthquake corresponding relevancy spectrum in the study area. The spatial result shows the presence of large anomalies before the occurrence of the target earthquakes in both the retrospective research period and the extrapolative prediction period, and the high anomaly areas gradually reduce and disappear after the earthquakes. The main anomaly characteristics are as follows. There are large anomalies near the epicentral area about one year before the occurrence of moderate-strong earthquakes. The high anomaly areas gradually enlarge and intensify, following which, earthquakes occur. About 1~2 years after the moderate-strong earthquakes, the anomalies dissipate, decrease, or disappear. If high anomaly areas continue to be present, they may be the reflection of subsequent moderate-strong earthquakes.

Key words: earthquake corresponding relevancy spectrum; multi-parametric moving maximum probability; integrated anomaly; temporal-spatial anomaly characteristics

0 前言

国内许多学者曾采用数理统计方法对测震学资料中的地震学参数进行异常定量化识别提取研究,以突出地震前兆异常过程,但单个地震学参数的预测分析又具有一定程度的局限性。将可能与孕震的不同阶段物理过程相关联的各种单项参数方法组合起来,可以较为客观地提取出地震孕育的综合异常特征,更有效地进行地震预测。王海涛等^[1]和 Wang et al.^[2]提出了地震对应概率谱和累计滑动平均概率方法,结合实际震例,分析了北天山地区地震学参数 η 值不同考察时长的前兆异常时效属性,并提出利用多种地震学参数进行基于地震对应相关谱的综合异常研究的方法。王琼等^[3-4]利用该方法,选取反映孕震过程不同侧面的多种参数,通过计算多参数滑动极值平均概率,对中强地震的前兆综合异常特征进行了定量化的识别提取。唐兰兰等^[5]根据该方法的定义进一步研制了 ECRS1.0 分析软件,并

充分提取多种地震学参数的综合前兆异常信息。这为地震综合预测研究提供了一种新的定量研究方法,而且已有学者在一些地区进行了应用^[6-8]。

目前,山西省震情趋势研究工作中测震学科主要使用中、短期地震活动性图像、地震学参数单个方法、应力场等方法,缺少综合方法的研究。本文基于地震对应相关谱的多参数综合方法,通过计算多种地震学参数求滑动极值平均概率,分析山西地震带中强地震前后的综合异常时空特征,可为山西带中强地震的危险性判定提供新的依据。

1 研究方法

本文依据王海涛等^[1-2]提出的基于多种地震学参数的地震对应相关谱的方法。假设地震学参数值序列为 $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{\max}$ 为序列中的最大值, $x_{\min}$ 为最小值。序列 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的均值 $\bar{x}$ 和标准差 σ 分别为

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n+1)}} \tag{2}$$

在均值和标准差计算的基础上,按一定规则对值域分布区间进行定义,统计每个参数值序列在各相应区间分布的频次,构建值域谱曲线。

通过对上述值域谱的计算和分析,可以进一步求解出分值域的地震对应相关谱。利用地震对应相关谱分析原始参数值序列基本前兆异常特征,判定不同值域数据的异常信度属性,得到各参数值序列不同值域的地震对应相关谱 P_i 。

以地震对应相关谱为基础,将不同值域地震对应相关谱 P_i 替换为相应值域内的参数值,每一个地震对应相关谱值仍然保留被替换参数的时间属性,再将值域内的地震对应相关谱值按时间先后顺序重新组合成一个新序列,即相关谱时间序列。再根据不同考察时段 t 的长度(单位:月),选择多点累加平均、逐点滑动计算方法,最后得到不同地震学参数的滑动平均相关度序列 $\bar{P}_{ij}$ 值。

在单项地震学参数异常识别的基础上,逐点求解不同参数滑动平均相关度序列 $\bar{P}_{ij}$ 的多点(文中选取 6 点作为滑动窗长)滑动极值相关度序列 M_{ij} ,最后将不同参数的滑动极值相关度序列 M_{ij} 求平均值,得到多参数滑动极值平均相关度 P_c 值。再依据多参数滑动极值平均相关度的时间和坐标属性,将其投影到相应空间位置上,就得到了多参数滑动极值平均相关度空间格点数据。

上述各个步骤的具体计算公式及方法参见文献[1]~[5]。

2 研究区域及资料选取

已有研究结果表明^[9-11],山西地震带大同、忻定、太原、临汾、运城五大盆地小区域应力场具有各自的变化特点。北端(大同、忻定盆地)和南端(临汾、运城盆地)的主压应力轴方位主要为 NEE-SWW 向,与华北的区域应力场比较一致;而中部的太原盆地的的主压应力轴方位主要为 W-NNW 向,与华北区域应力场差异较大。根据山西局部应力场与华北区域应力场的差异分布,并结合历史地震活动和活动断裂分布等,将山西带分为北区、中区、南区 and 渭河区共 4 个区域(图 1),并对其中覆盖山西地区的北区、中区、南区进行地震对应相关谱(ECRS)方法的时间扫描计算,对山西带及邻区(33°

~42°N,106°~117°E)进行 ECRS 方法的空间扫描计算。

本文采用中国地震台网中心提供的 1970 年 1 月至 2013 年 9 月全国地震目录,采用 K-K 法对山西带及邻区(33°~42°N,106°~117°E) $M_L \geq 5.0$ 地震进行了余震删除处理,并给出了震级—频度关系(图 2)。由图 2 可见,其最小完整性震级为 $M_L 2.2$ 。王霞等^[12]以 1970 年—2012 年山西省地震目录为基础资料,利用“震级—序号”法、“最大曲率”法(MAXC)、90%和 95%的拟合度 GFT 法,研究了山西断陷盆地地震目录最小完整性震级 M_c 为 $M_L 2.5$ 。

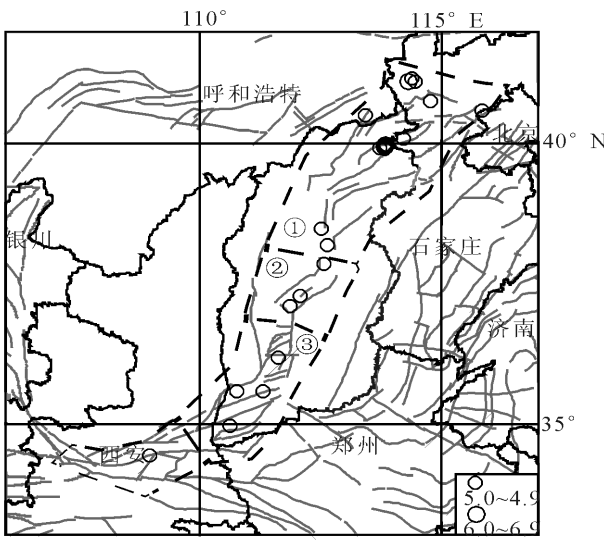


图 1 山西地震带及其分区(①山西带北区;②山西带中区;③山西带南区)

Fig.1 Shanxi seismic belt and its zoning(①the north district of Shanxi seismic belt, ②the middle district of Shanxi seismic belt, ③the south district of Shanxi seismic belt)

3 结果分析

3.1 时间扫描计算结果

本文分别选取 1970—2013 年 9 月山西带北区、中区、南区的地震目录,采用 K-K 法对 $M_L \geq 5.0$ 地震进行余震删除。时间扫描窗长 1 年,扫描步长 1 个月。北区目标震级 $M_L \geq 5.0$,中区、南区的目标震级 $M_L \geq 4.5$ 。选取了物理意义明确而相对独立的 7 类地震活动性参数来进行研究:震级—频度曲线与 G-R 关系式的偏离程度 η 值、 b 值(反映地震能量分布特征)、地震危险度 D 、平均震级 $\bar{M}$ (缺震)、地震强度因子 M_f 、地震频度 N 和地震调制比 R_m 。被选中的地震活动性参数要求值域谱接近于正态分布且

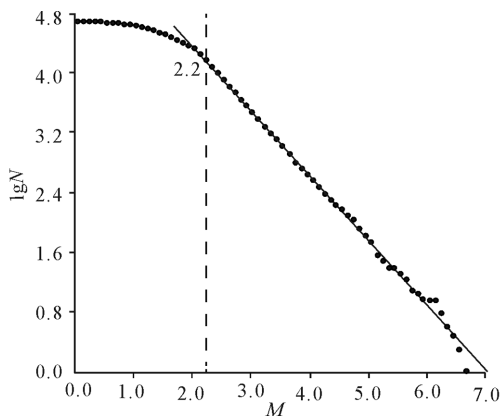


图 2 山西带及邻区 ($33^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 震级-频度关系

Fig.2 The magnitude-frequency relation of Shanxi seismic belt and adjacent region ($33^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)

值域谱的低值或高值端的地震对应率高。

经过上述处理最终确定山西带北区采用 b 值、缺震和频度 N ; 中区和南区采用 η 值、 b 值、缺震和频度。对 1970 年 1 月至 2009 年 12 月进行多参数滑动极值平均概率计算, 采用 6 点滑动平均及 3 点滑动极值, 以此计算结果作为学习库, 对 2010 年 1 月至 2013 年 9 月进行外推预测。

图 3(a)~(c) 分别为山西带北区、中区、南区多参数滑动极值平均概率时序曲线。山西带北区研究时段内发生的 9 次 $M_L 5$ 以上地震中有 7 次震前出现高值异常变化, 以均值线作为异常阈值, 但有 2 次虚报, 2 次漏报; 2010 年以来的外推预测结果显示该区滑动极值平均概率出现明显异常, 于 2010 年 4 月 4 日和 6 月 5 日区内发生了大同 $M_L 5.0$ 和阳曲 $M_L 5.0$ 地震, 表明应用该方法定量识别综合异常特征具有一定的可行性。山西带中区出现的 6 次高值异常均有目标地震对应, 研究时段内发生的 9 次 $M_L 4.5$ 以上地震前均出现高值异常变化; 外推预测结果表明 2010 年以来未出现明显高值异常, 实际 2010—2013 年 9 月该区未发生 $M_L 4.5$ 以上地震。山西带南区出现的 5 次高值异常过程均有目标地震对应, 均在高于均值线的上升过程中或高值转平后发震; 2010 年以来的外推预测结果表明, 2010 年 1 月 24 日河津 $M_L 5.2$ 地震前异常特征不明显, 但 2010 年 3 月—2013 年 5 月出现高值异常, 存在发生 $M_L \geq 4.5$ 地震的可能。

3.2 空间扫描计算

本文对山西地震带及邻区进行空间扫描, 采用

1970—2013 年 9 月 $M_L \geq 2.5$ 的地震目录计算 η 值、 b 值、 D 值、缺震、 M_f 、频度 N 和调制比 R_m 等 7 种地震学参数, 确定研究区内 $M_L \geq 5.0$ 地震作为目标地震。并对该区各个地震学参数进行空间扫描计算, 得到各个参数滑动极值概率的逐月空间分布值数据。

选择地震对应率高的 3 个地震活动性参数 b 值、缺震和频度, 对研究区以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 为空间窗长, 0.2° 为步长, 12 个月为考察时间长度进行空间扫描计算, 得到多参数滑动极值概率的逐月空间分布值数据。由于山西地区最近发生的目标地震日期为 2010 年, 故设置学习库时间段为 1970 年 1 月至 2009 年 12 月, 2010 年 1 月至 2013 年 9 月为外推预测时段。中山西地区的 13 次目标地震在震前 1 年左右的时间出现高值异常, 且在震后异常区逐渐缩小并消失。

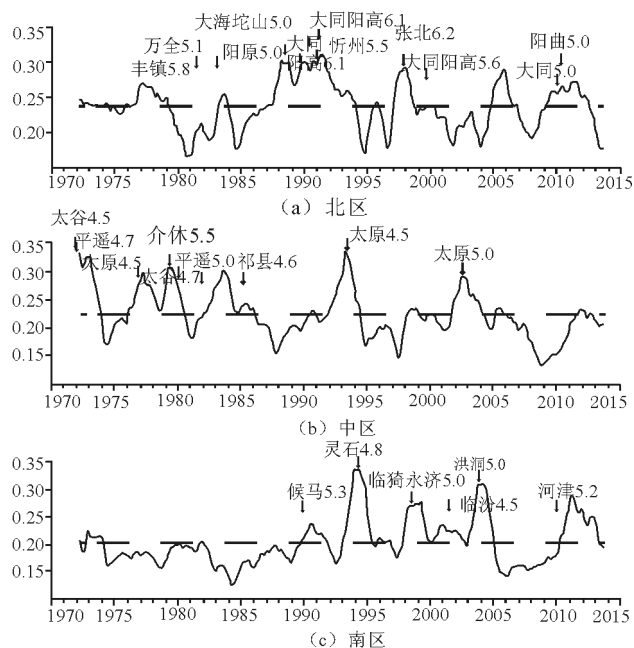


图 3 山西带北区、中区、南区多参数滑动极值平均概率曲线 (图中标注地震均为 M_L 震级)

Fig.3 Multi-parametric moving maximum probability of the north, middle and south district of Shanxi seismic belt (the magnitude is M_L)

(1) 学习库时段山西 1989 年和 1991 年大同—阳高 $M_L 6.1$ 、 $M_L 6.1$ 地震

图 4 为学习库时段 1989 年 10 月 19 日和 1991 年 3 月 26 日大同—阳高两次 $M_L 6.1$ 地震前后的多参数滑动极值概率空间异常演化。自 1986 年 8 月晋冀蒙交界区域开始出现高值异常并且逐渐扩大、增强, 于 1988 年 7 月发生阳原 $M_L 5.0$ 地震, 震后高

值异常并没有消失而是继续增强,之后相继发生了 1989 年 10 月和 1991 年 3 月两次 $M_L6.1$ 地震。这三次地震后,异常区逐渐弱化消失。

(2) 外推预测时段山西 2010 年大同—阳高 $M_L5.0$ 与阳曲 $M_L5.0$ 地震

自 2009 年 1 月晋冀蒙交界区域开始出现高值异常,异常区逐渐扩大到山西中北部地区并增强,至 2010 年 4 月和 6 月分别发生大同 $M_L5.0$ 、阳曲 $M_L5.0$ 地震,表明外推预测效果较好。

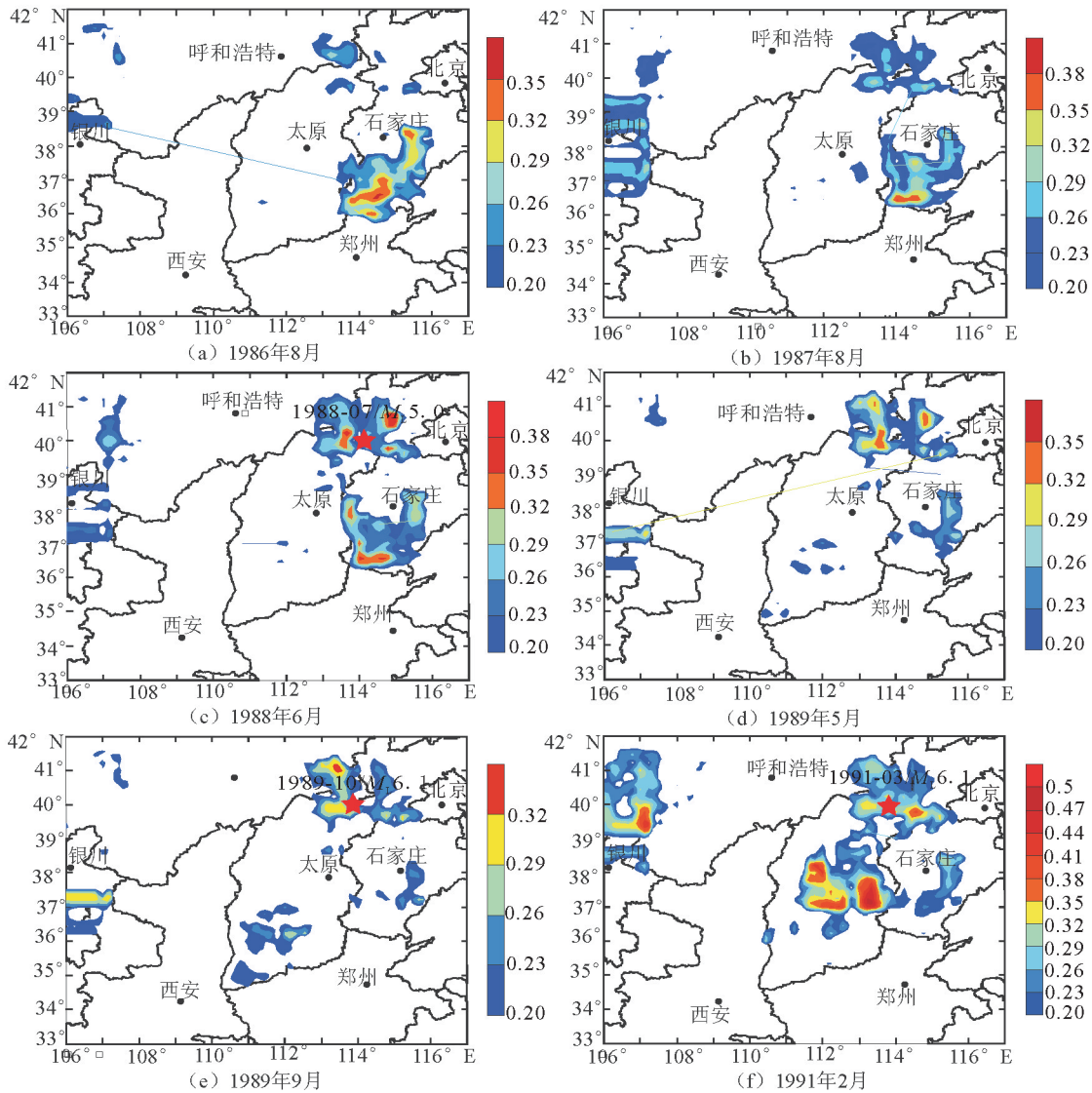


图 4 1989 年和 1991 年大同—阳高 $M_L6.1$ 、 $M_L6.1$ 地震前后多参数滑动极值概率空间异常演化

Fig.4 The spatial anomaly evolution of multi-parametric moving maximum probability before and after the $M_L6.1$ and $M_L6.1$ Datong-Yanggao earthquakes in 1989 and 1991

4 结论与讨论

本文应用基于地震对应相关谱的多参数滑动极值相关度方法,量化识别和分析山西地震带及邻区中强地震前的多参数综合异常时空演化特征,突出了地震前兆异常过程。通过震例回顾建立了具有时空属性的对应概率谱数据库,可在此基础上开展

外推预测,从而为山西带及邻区中强地震预测研究提供一种新的思路。

利用山西带北区、中区、南区 1970—2013 年 9 月地震目录(删除余震),预测目标地震震级分别为 $M_L5.0$ 、 $M_L4.5$ 、 $M_L4.5$,北区选取 b 值、缺震和频度 3 个参数,中区和南区选取 η 值、 b 值、缺震和频度 4

个参数进行时间扫描计算。基于地震对应相关谱的多参数滑动极值平均概率曲线显示,1970—2009 年的学习库时段内山西带北区 9 次目标地震中有 7 次震前出现高值异常,漏报 2 次,虚报 2 次;中区 9 次目标地震前均出现高值异常现象;南区 5 次目标地

震前均有高值异常现象出现。外推预测时段结果显示,北区出现的高值异常对应了 2010 年的 2 次 $M_L 5.0$ 地震;中区未出现明显异常,实际情况该区也未发生 $M_L \geq 4.5$ 地震;南区 2010 年 3 月—2013 年 5 月出现高值,存在发生 $M_L \geq 4.5$ 地震的可能。

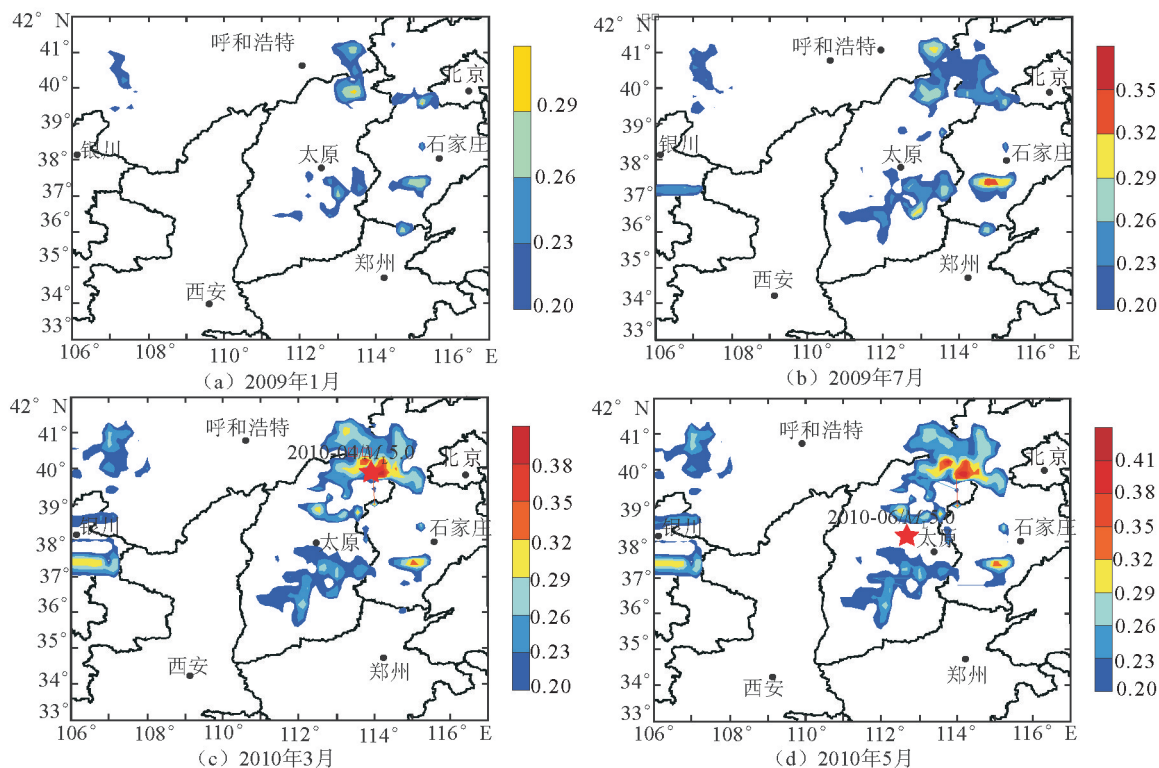


图 5 2010 年大同 $M_L 5.0$ 、阳曲 $M_L 5.0$ 地震前后多参数滑动极值概率空间异常演化

Fig.5 The spatial anomaly evolution of multi-parametric moving maximum probability before and after the $M_L 5.0$ Datong earthquake and $M_L 5.0$ Yangqu earthquake in 2010

空间扫描计算山西带及邻区(研究区)的地震,不论是学习库时段还是外推预测时段的目标地震均在震前出现了高值异常现象,且在震后异常区逐渐缩小并消失。其主要异常特征如下:中强地震前 1 年左右,震区及其附近区域多参数滑动极值平均概率出现高值异常现象,且异常区域逐渐扩大增强,地震多发生在异常区域内或者附近。中强地震发生后,高值异常区逐渐缩小,震后 1~2 年异常区域基本消失;若高值异常区仍持续发展,可能是后续中强地震的异常反映。

在山西地区基于地震对应相关谱的多参数滑动极值平均相关度空间异常特征的应用研究中,其回溯性震例研究有较好的预测效能,但由于是震后总结,异常阈值的判定会受到人为调整的影响且具有一定的经验性。本文中选取 0.2 为经验阈值,其合理性仍待检验。

致谢:本文使用新疆维吾尔自治区地震局唐兰兰等的计算程序,在此表示衷心感谢。

参考文献(References)

- [1] 王海涛,王琼. 基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别研究[J].地震研究,2008,31(4):330-334.
WANG Hai-tao, WANG Qiong. Precursor Anomaly Identification Based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum Analysis[J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(4): 330-334. (in Chinese)
- [2] WANG Hai-tao, WANG Qiong TANG Lan-lan. Comprehensive Precursor Anomaly Research Based on Earthquake Corresponding Relevancy Spectrum[J]. Earthq Sci, 2009, 22(6): 675-681.
- [3] 王琼,王海涛,唐兰兰. 基于地震对应概率谱的多参数综合异常研究[J].中国地震,2009,25(3):294-302.
WANG Qiong, WANG Hai-tao, TANG Lan-lan. Research on Multi-parameter Comprehensive Anomaly Based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum[J]. Earthquake Re-

- search in China, 2009, 25(3):294-302. (in Chinese)
- [4] 王琼, 王海涛, 唐兰兰, 等. 基于地震对应概率谱的多参数综合异常空间特征研究[J]. 地震, 2010, 30(1):98-107.
WANG Qiong, WANG Hai-tao, TANG Lan-lan, et al. Multi-Parametric Anomaly Spatial Characteristics Based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum [J]. Earthquake, 2010, 30(1):98-107. (in Chinese)
- [5] 唐兰兰, 王海涛, 王琼. 新疆中强地震前 ECRS 方法的异常研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2):159-165.
TANG Lan-lan, WANG Hai-tao, WANG Qiong. Research on Anomaly of ECRS Method before Moderate-strong Earthquake in Xinjiang Region [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2):159-165. (in Chinese)
- [6] 卢显, 王琼, 刘杰, 等. 郯庐带中强地震前后多参数综合异常时空特征研究[J]. 地震, 2012, 32(1):40-48.
LU Xian, WANG Qiong, LIU Jie, et al. Temporal-spatial Characteristics of Multi-parametric Anomaly before and after Moderate-strong Earthquakes on the Tanlu Fault Zone [J]. Earthquake, 2012, 32(1):40-48. (in Chinese)
- [7] 王想, 王琼, 冯建刚, 等. ECRS 方法在河北及周边地区的应用研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(3/4):1-9.
WANG Xiang, WANG Qiong, FENG Jian-gang, et al. The Application of ECRS Methods in Hebei Province and Around Area [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(3/4):1-9. (in Chinese)
- [8] 冯建刚, 王琼, 唐兰兰. 古浪窗口地震的 ECRS 方法异常指标识别研究[J]. 高原地震, 2012, 24(1):38-42.
FENG Jian-gang, WANG Qiong, TANG Lan-lan. Research on Precursory Anomaly Identification of the Gulang Window Earthquake Based on ECRS Method [J]. Plateau Earthquake Research, 2012, 24(1):38-42. (in Chinese)
- [9] 宋美琴, 梁向军, 宁亚灵. 山西地区构造环境剪应力场研究[J]. 山西地震, 2008(2):1-3.
SONG Mei-qin, LIANG Xiang-jun, NING Ya-ling. Study on Shear Stress Field of Tectonic Environment in Shanxi [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2008(2):1-3. (in Chinese)
- [10] 宋美琴, 李华玥, 韩立波, 等. 用 CAP 方法翻译 2010 年 6 月 5 日山西阳曲 $M_s4.6$ 地震震源机制解[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3):692-697.
SONG Mei-qin, LI Hua-yue, HAN Li-bo, et al. Focal Mechanism of the $M_s4.6$ Yangqu Earthquake of June 5, 2010, Determined from the CAP Method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3):692-697. (in Chinese)
- [11] 王秀文, 宋美琴, 杨国华, 等. 山西地区应力场变化与地震的关系[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1127-1133.
WANG Xiu-wen, SONG Mei-qin, YANG Guo-hua, et al. Research on Relationship Between Stress Field Variation and Earthquakes in Shanxi Area, China [J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(5):1127-1133. (in Chinese)
- [12] 王霞, 宋美琴, 李丽. 山西断陷盆地地震目录最小完整性震级分析[J]. 山西地震, 2013(3):6-10.
WANG Xia, SONG Mei-qin, LI Li. Analysis on the Minimum Magnitude of Completeness for Earthquake Catalogue in Shanxi Graben Basins [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2013(3):6-1. (in Chinese)