

甘东南至陕甘宁交界中强震危险区 地震活动能量场时空特征^①

罗国富¹, 屠泓为², 马禾青¹, 杨明芝¹

(1. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏银川 750001; 2. 青海省地震局, 青海西宁 810001)

摘要:运用随机函数理论将甘东南至陕甘宁交界地区的地震活动能量场看作时间和空间的随机函数, 用自然正交函数展开方法, 系统研究主要典型能量场的时间权重系数变化曲线以及典型能量场的空间等值线图。结果发现, 目标曲线较大幅度的升、降变化预示了可能发生中强地震的时间段, 而等值线图的高值变化对应了可能发生中强地震的区域。

关键词:地震能量场; 随机函数; 地震危险区; 时空分布; 甘东南至陕甘宁交界地震区

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2012)02-0132-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0132

Space-time Distribution Characteristics of Energy Field of Seismic Activity for the Southeastern Part of Gansu Province to Shanxi—Gansu—Ningxia Boundary Region Moderate-strong Earthquake Hazard Area

LUO Guo-fu¹, TU Hong-wei², MA He-qin¹, YANG Ming-zhi¹

(1. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China;

2. Earthquake Administration of Qinghai, Xining 810001, China)

Abstract: Using the random function theory, taking seismic energy field in the southeastern part of Gansu province to Shanxi—Gansu—Ningxia boundary region as the random function of space and time, the time "weight" coefficients and the isogram charts of first several typical fields in the region are studied by the method of natural orthogonal function expansion. The result shows that the time coefficient curves upward and downward changes with large amplitude often meaning the moderate-strong earthquake is going up, while the high values of isogram give the region of earthquake hazard.

Key words: Earthquake energy field; Random function; Earthquake risk zone; Space-time distribution; The southeastern part of Gansu province to Shanxi—Gansu—Ninxia boundary earthquake hazard region

0 引言

甘东南至陕甘宁交界地区地处南北地震带北段和鄂尔多斯地块西南缘, 是中强以上地震频发的区域。1936 年甘肃天水 6.0 级地震后, 该区域 6 级以上地震已经平静 76 年, 超过历史上平静的最长时间。

2008 年龙门山断裂发生汶川 8 级大震, 其余震沿着断裂北西向分布, 一直延伸至甘东南的文县境内, 汶川地震可能有利于该地区发生中强地震。2009 年以来鄂尔多斯西缘中等地震显著增强。这

① 收稿日期: 2011-02-14

基金项目: 2011 年震情跟踪合同制定向工作任务 (2011020111); 甘东南至陕甘宁交界危险区强震趋势与短临危险强化研究 (2011016401); 南北地震带北段大震危险性强化跟踪研究项目

作者简介: 罗国富 (1987-), 男 (汉族), 山西沁源人, 工程师, 主要从事地震活动性研究。

些表明目前该区域存在发生中强地震的背景。

地震孕育过程的能量积累^[1]、地壳应变能量积累率的分布^[2]、地震波辐射能量的定量计算^[3]、地震释放能量与区域应力场的依赖性^[4]和能量聚集与地震前兆场的关系^[5]等方面已经开展了一定的工作,杨明芝等^[6],罗国富等^[7-8]研究了能量场分布和中强地震的关系。此外,荣代潞^[9]、代炜^[10]和李莹甄^[11]等人都针对某次中强地震的特征作过详细研究。本文试图应用自然正交函数(或称经验正交函数)展开方法,并引入能量场空间等值线高值异常的映震变化特征,研究甘东南至陕甘宁地震危险区内的地震活动能量场的时空变化,为这一地区中强地震预测提供中短临异常依据和震例经验。

1 研究方法

本文研究区域为 103°~107.5°E、33°~37.5°N,区域内取 0.5°×0.5°划分网格。以经纬度划分面积网格数 $n(n=k \times L)$,其中 k 是按照经度划分网格, L 是按照纬度划分网格),研究时间段取 1970~2010 年,把 n 个网格数取 m 次测值(m 按研究时间段的间隔 Δt 取值,如 $\Delta t=1$ 年)。所有小地震在不同网格中释放的地震波能量之和近似于地震释放的能量,剔除余震和大震释放的能量,就是该研究区域在研究时间内的能量分布矩阵,即能量场 E_0 ,该矩阵反映了研究区域地震活动能量场分布结构。平均每年小地震释放能量称背景能量场 ΔE ,能量场 E_0 与背景能量场 ΔE 之差为地震能量矩平场 E ,即

$$E = E_0 - \Delta E \quad (1)$$

该能量矩平场反映了研究区域内地震活动能量场时间和空间分布的特征。一般能量矩平场 E 可表示为

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{m1} & E_{m2} & \cdots & E_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 E_{ij} 表示能量矩平场在第 i 个时间段第 j 个网格内的能量,在分析能量矩平场的相对变化时一般要把它以正交方式展开。本文用自然正交函数展开将 E_{ij} 分解成空间函数 X_{kj} 和时间函数 T_{ik} :

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^n T_{ik} X_{kj} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

其中 X_{kj} 和 T_{ik} 分别表示空间和时间的函数,二者皆满足正交归一性。其正交性为

$$\sum_{i=1}^m T_{ik} T_{il} = \begin{cases} 0 & k \neq l \\ \sum_{i=1}^m T_{ki}^2 & k = l \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{kj} X_{lj} = \begin{cases} 0 & k \neq l \\ \sum_{j=1}^n X_{kj}^2 & k = l \end{cases}$$

归一性为 $\sum_{i=1}^m T_{ki}^2 = 1$ 和 $\sum_{j=1}^n X_{kj}^2 = \lambda_k$ 。用矩阵符号简单表示上述 3 式分别为

$$E = T X \quad (4)$$

$$T' T = \Lambda \quad (5)$$

$$X X' = I \quad (6)$$

令矩阵 R 为

$$R = E' E \quad (7)$$

则由式(4)~(7)可推出

$$R X' = X' \Lambda \quad (8)$$

由式(8)可求矩阵 R 的特征值和特征向量分别是 Λ 和 X 。式(8)的一般形式是

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{k1} \\ x_{k2} \\ \vdots \\ x_{kn} \end{bmatrix} = \lambda_k \begin{bmatrix} x_{k1} \\ x_{k2} \\ \vdots \\ x_{kn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $r_m (i=1, 2, \dots, n; m=1, 2, \dots, n)$ 等于矩阵 R , $x_{kl} (l=1, 2, \dots, n)$ 等于特征向量 X 。可解出矩阵 R 的 n 个特征值 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, n)$ 以及对应的特征向量 $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn})'$ 。由于矩阵 R 的对称性,所求出的特征值均为正实数。将这些特征值按从大到小的顺序排列, n 个特征向量对应 n 个典型能量场,自最大特征值和它的向量指标(它的位置)开始,顺次找出 t 个特征值,使 t 个特征值总和占全部特征值总和的 95% 以上,即 t 个能量矩平场的比重超过全部能量矩平场的 95%。本文将 t 个能量矩平场作为地震能量时空分布研究的主要对象, η 代表 t 个主要能量场占全部能量场的比重,它表示为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^t \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (10)$$

由能量矩平场 E 与矩阵 R 的特征向量 X 的乘积就可求出时间函数 T 即

$$T_i = E x_i \quad i = 1, 2, \dots, t \quad (11)$$

其中 T_i 反映第 i 个能量矩平场 x_i 在 m 年(m 为研究地震的时间段)的时间权重系数,相应绘出 t 个能量矩平场的时间权重系数随时间的变化曲线。研究发现,曲线中幅度变化大的那个时间段有可能发生

中强地震。此外再由 t 个特征向量 X 绘出对应能量矩平场的等值线图,分析等值线高值异常变化特征,可预测出中强地震发生的可能区域。

2 数据处理和分析

2.1 研究数据处理

本文选取甘东南至陕甘宁交界的研究区域 ($103^{\circ}\sim 107.5^{\circ}\text{E}$ 、 $33^{\circ}\sim 37.5^{\circ}\text{N}$),地震资料使用中国地震台网中心提供的弱震目录,时间段取 1970 年 1 月至 2010 年 12 月。对此期间地震资料进行 b 值检验,该区 $M_L \geq 2.7$ 地震记录完整,因此震级下限取 $M_L 2.7$;考虑到大震级地震发生率很小,其能量对背景场的影响很大,并且这些地震已经不属于区域正常活动状态,故震级上限取 $M_L 5.4$,并用 K-K 法删除 5 级以上地震的余震。图 1 为研究区构造与中强地震分布图。

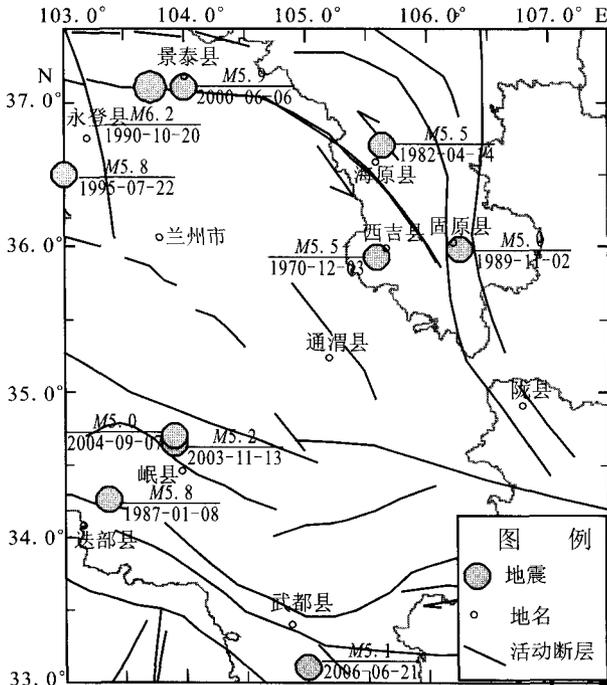


图 1 研究区域构造与中强地震分布图

Fig. 1 Distribution of the moderate-strong earthquakes and tectonics in the research area.

2.2 计算典型能量场参数

利用上述方法,分析和处理甘东南至陕甘宁交界 1970—2010 年地震观测资料。首先按 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格划分,时间间隔取 $\Delta t = 1/2$ 年,计算出 41 年来地震活动的能量场 E_0 和背景能量场 ΔE 。经度划分网格 $k=9$,纬度划分网格 $L=9$,空间网格 $n=81$,时间 $m=82$ 。按顺序算出 n 个空间网格 m 年的能量矩平场矩阵 $E_{82 \times 81}$,之后进行自然正交函数展

开,就得到矩阵 $R_{81 \times 81}$ 。当 $t=6$ 时,前 6 个典型能量场已超过全部能量场的 95%。最后计算出相应的前 6 个特征值 λ 和 6 个特征向量 X ,绘出相应 6 个时间权重系数变化的曲线图。

2.3 能量矩平场的时间分布

根据式(9)~(11)的计算结果,将前 6 个特征值列在表 1 中。前 6 个能量矩平场已表现出所有能量矩平场时空分布的主要特征。由上述 6 个能量矩平场的分布特征可以绘出前 6 个典型能量场的时间权重系数变化曲线(图 2)。图 2 一定程度上预测了甘东南至陕甘宁交界地区中强地震的可能发生时间。从图 2 看出: T_1 表现出几次中强地震前 1~3 年的能量矩平场曲线相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降异常,如 1970 年 12 月宁夏西吉 5.5 级地震和 1987 年 1 月甘肃迭部 5.8 级地震前都出现类似的异常变化; T_2 表现出能量矩平场曲线相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降异常,对应于 1987 年 1 月甘肃迭部 5.8 级地震、1995 年 7 月甘肃永登 5.8 级地震、2000 年 6 月甘肃景泰 5.9 级地震、2003 年 11 月和 2004 年 9 月甘肃岷县、临潭间 5.2 级、5.0 级地震,2006 年 6 月甘肃武都与文县间 5.1 级地震的发震时间;同理 T_3 有较大幅度的曲线变化对应 1995 年甘肃永登 5.8 级和 2000 年甘肃景泰 5.9 级地震; T_4 曲线有较大幅度的上升,则与 T_2 中的部分中强地震对应一样; T_5 和 T_6 相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降,分别与 T_2 中的中强地震对应外,还对应 1982 年 4 月宁夏海原 5.5 级地震。2008—2010 年研究区内还没有出现能量场的时间权重系数高值和低值异常。

表 1 前 6 个典型能量场的特征值

序号 i	特征值 λ_i	前 i 个特征值占有所有特征值总和的百分比 η
1	4.8968×10^{12}	28.10%
2	4.5667×10^{12}	54.30%
3	2.1382×10^{12}	66.57%
4	2.1276×10^{12}	78.78%
5	2.0388×10^{12}	90.48%
6	6.3955×10^{11}	95.15%

纵观图 2,曲线呈现较大幅度的升、降变化,均与甘东南至陕甘宁交界地区大部分中强地震发生的时间相对应。而曲线变化幅度一般与中强地震的震级大体成正比,即曲线变化幅度越大,地震释放能量越多,对应中强地震的震级也越大。一个中强地震可能与图 2(T_1)、(T_2)、(T_3)...(T_6)中几个典型能量场曲线相对应,对应数越多,这个中强地震发震前异常信度就越大。但是曲线只对应了甘东南至陕甘

宁交界大部分中强地震,仍有个别中强地震没有对应,如 1990 年 10 月甘肃景泰 6.2 级地震,这说明该

方法在预测中强以上地震时还存在一定的局限性。

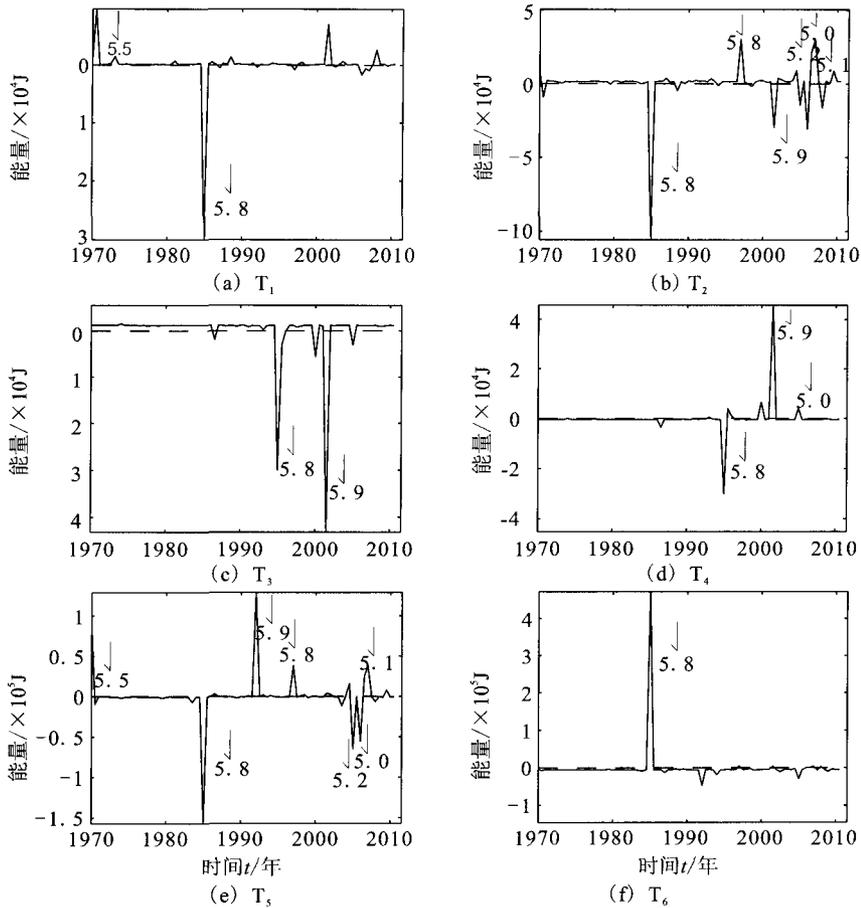


图 2 前 6 个典型能量场的时间权重系数曲线(图中虚线是曲线变化的基准线(纵坐标 0 点))

Fig. 2 The time "weight" coefficient curves in the first six typical energy fields.

2.4 能量距平场的空间分布

由上述 6 个典型能量矩平场也对应前 6 个典型能量场的空间等值线如图 3,分析等值线的较大变化值,可判断出大部分甘东南至陕甘宁交界地区中强地震发生的区域。图中等值线越密集,其绝对值(释放为负)越大,等值线所围区域内所积累的地震能量就越多。等值线绝对值大于等于 2 的区域就可定为危险区,其周围是中强地震可能发生的区域。从前 6 个典型能量场在空间上的分布可以看出,过去 41 年大部分高能量场空间上比较集中,且主要分布在宁夏西海固地区和甘肃甘东南地区,也对应了 1970 年以来甘东南至陕甘宁交界地区中强以上地震发生的区域。在 X_1 中, $E104.8^\circ, N33.3^\circ$ 周围区域为一个危险区,与 2003 年至 2006 年甘肃岷县 5.2 级、5.0 级地震和文县 5.1 级地震发震区域相对应; X_2 中, $E104.3^\circ, N33.7^\circ$ 周围区域是危险区,与 1987 年甘肃迭部 5.8 级地震和 2003 年至 2006 年甘东南

3 次 5 级左右地震发震区域相对应; X_3 中, $E105.4^\circ, N36.5^\circ$ 周围区域和 $E106.3^\circ, N35.5^\circ$ 周围区域为两个危险区,分别与 1971 年宁夏西吉 5.5 级地震、1982 年宁夏海原 5.5 级地震和 1989 年宁夏固原 5.0 级地震发震区域相对应; X_4 中, $E105.3^\circ, N36.2^\circ$ 周围区域为一个危险区,与 X_3 中的中强地震对应一样;同理 X_5 中出现 2 个地震危险区,分别对应甘肃景泰 1990 年和 2000 年的 6.2 级和 5.9 级地震,1971 年宁夏西吉 5.5 级地震、1982 年宁夏海原 5.5 级地震和 1989 年宁夏固原 5.0 级地震的发震区域; X_6 中出现的地震危险区与 1982 年宁夏海原 5.5 级地震的发震区域相对应。

从前 6 个典型能量场空间分布图与甘东南至陕甘宁交界地区 1970 年以来所有 10 次中强以上地震事件的发震区域一一对应。这 6 个能量场等值线区域的空间危险区相对集中,但不能明确那个危险区在那段时期可以对应中强地震,这说明该方法在预

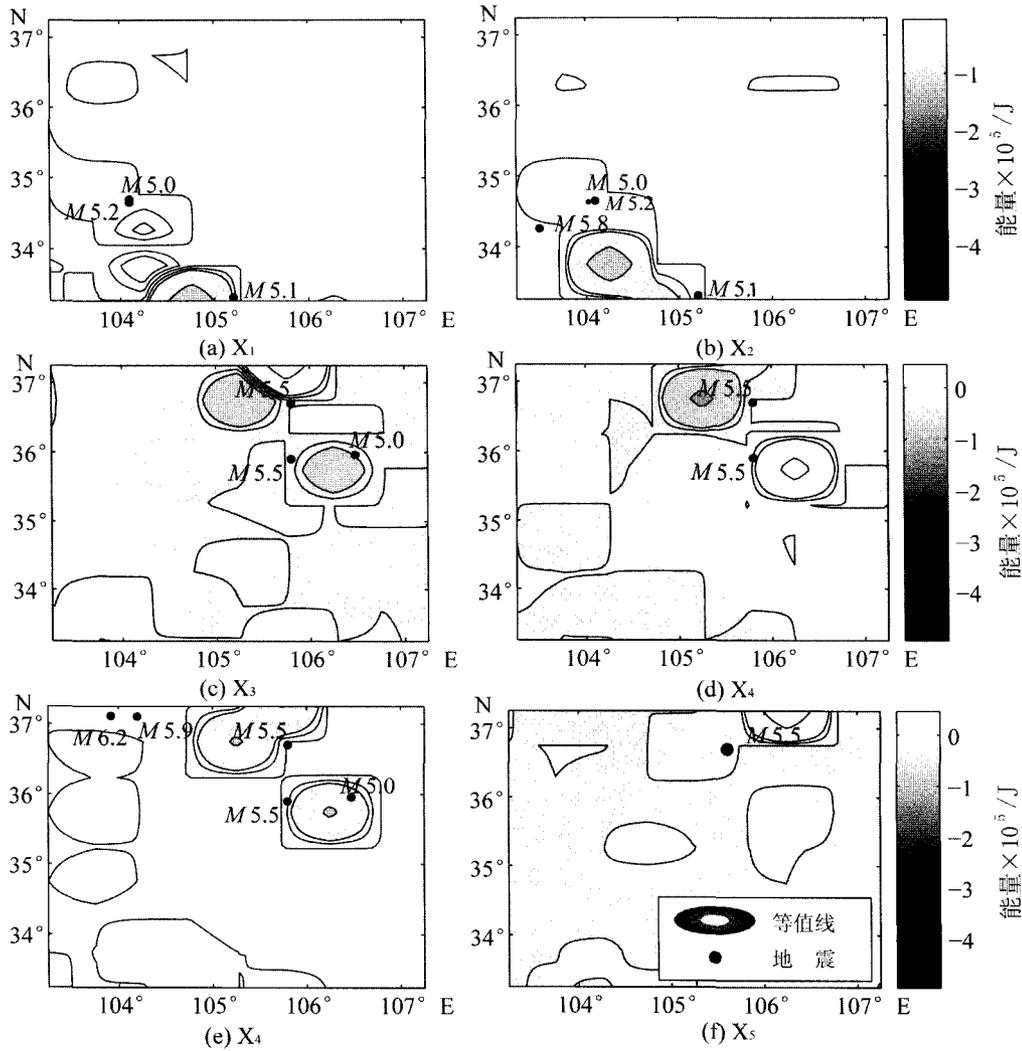


图3 前6个典型能量场的等值线图

Fig. 3 The isogram charts in the first 6 typical energy fields.

表2 1970—2010年研究区中强以上地震与能量距平场异常关系

序号	时间	震中地点	震级/M	时间系数异常特征	空间异常特征
1	1970-12-03	宁夏西吉	5.5	主震前0.5~1年高值	危险区外9 km发震
2	1982-04-14	宁夏海原	5.5	主震前2.5~3年高值	危险区边缘发震
3	1987-01-08	甘肃迭部	5.8	主震前2~3年高值	危险区外23 km发震
4	1989-11-02	宁夏固原	5.0	主震前3年内无异常	震中出现危险区
5	1990-10-20	甘肃景泰	6.2	主震前3年内无异常	危险区外75 km发震
6	1995-07-22	甘肃永登	5.8	主震前0.5~2年高值	无异常
7	2000-06-06	甘肃景泰	5.9	主震前2年内高值	危险区外68 km发震
8	2003-11-13	甘肃岷县、临潭间	5.2	主震前1年内高值	危险区边缘发震
9	2004-09-07	甘肃岷县、临潭间	5.0	主震前0.5年内值	危险区外27 km发震
10	2006-06-21	甘肃武都、文县间	5.1	主震前0.5年内值	危险区外27 km发震

测中强地震区域还存在一定的局限性。

由图2和图3对应研究区内的中强地震列于表2。由表2可以看出,1970年以来甘东南至陕甘宁交界地区10次中强地震前,7次主震前3年内,震源及其周围75 km范围内都出现地震活动能量场

的时空异常特征;另外2次在空间等值线上出现地震危险区异常,但时间权重系数在主震前3年没有出现明显异常;还有1次时间权重系数出现高值异常,空间等值线无异常。总之,过去41年研究区内70%以上的中强地震前地震活动能量场会出现中短

期时空异常特征,可为中强地震预测研究提供了宝贵的资料和经验。

2.5 能量场空间均值分布

图 4 是 1970 年 1 月至 2010 年 12 月研究区域能量场的空间均值分布图。可以看出研究区域在低能量释放的背景上,在宁夏西海固周围和甘东南地区存在两个地震能量高释放区,也是中强地震的危险区。一个位于区域北部 105.6°E、36.2°N 附近,该危险区等值线值相对较高,储蓄的地震能量也相对多,可能会发生震级较大的地震危险区。另一个位于研究区域的南部 105.0°E、33.7°N 附近,该危险区可能受汶川 8 级大震的影响,也具备发生中强地震的背景。而整个研究区的其它地区地震能量释放相对较低,发生中强地震危险的可能性也较低。

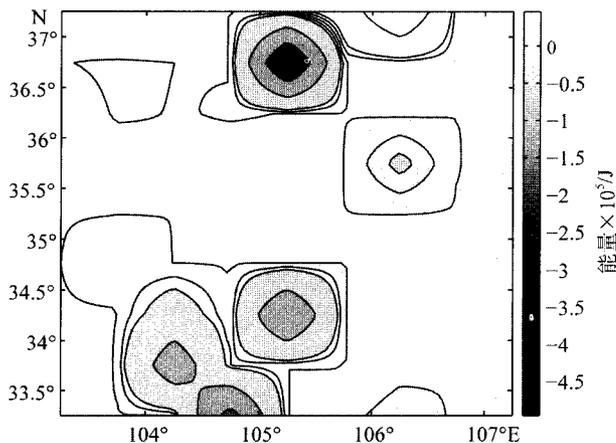


图 4 能量背景场的等值线图

Fig. 4 The isogram of the energy background field in research area.

3 结论和讨论

本文研究甘东南至陕甘宁交界地区的地震活动能量场的时空分布特征,得出如下结论:

(1) 对甘东南至陕甘宁交界地区小地震活动典型能量场的初步研究发现,主要典型能量场的时间权重系数随时间呈现较大幅度的升降变化,预测出可能发生中强地震的时间,曲线幅度变化大小大体与中强地震的震级大小成正比。

(2) 分析甘东南至陕甘宁交界地区主要典型能量场的空间分布等值线图,得出过去 41 年研究区域的地震能量场高值危险区周缘对应了所有 10 次中强地震事件。总体上甘东南至陕甘宁交界地区能量场等值线区域的空间危险区相对集中,但不能明确那个危险区在那段时期可以一一对应中强地震,

这说明该方法在预测中强地震区域还存在一定的局限性。

(3) 研究 1970 年以来研究区内能量场空间均值的分布发现,宁夏西海固地区和甘东南地区是中强地震发生的危险区,目前还没有出现能量场时间权重系数高值或者低值异常,但可能是未来几年发生中强地震的危险区。

(4) 我们将地震活动能量场看作为一个随机场,研究了主要典型能量场的时空分布特征。但地震活动受到许多因素的影响,而一些因素本文并未予以考虑,因而其研究结果的局限性是明显存在的。

对于本文研究还需要特别以下说明:自然正交函数展开方法使我们对于能量场有了更加深入的了解,只对主要典型场的变化集中分析研究,既简化了研究问题,又突出了研究结果;同时一个中强地震与一个或几个典型场有关,一个典型场可能与一个或几个中强地震对应,说明通过能量场分析将不易觉察的变化信息可以提取出来,在提取中强震前的地震活动异常信息方面具有一定的有效性。

[参考文献]

- [1] 滕春凯,白武明,王新华. 流变介质中亚临界扩展前地震孕育过程的能量积累[J]. 地球物理学报,1991,13(1):32-41.
- [2] 荆燕,李宏,熊玉珍,等. 利用地震矩张量与 GPS 资料推算中国大陆现今地壳运动能量分布特征[J]. 高校地质学报,2009,15(1):108-114.
- [3] 秦嘉政,钱晓东,叶建庆,等. 用峰值速度估算姚安地震序列的地震能量[J]. 地震学报,2002,24(1):98-102.
- [4] 陈培善,S J Duda. 地震辐射能对环境应力场的依赖性[J]. 地震学报,1993,15(2):146-152.
- [5] 郑熙铭,肖家鑫,林家逖. 地震前兆场的演化和能量非线性聚集的关系[J]. 中国地震,1998,14(1):74-80.
- [6] 杨明芝,赵卫明. 宁夏及邻近地区地震活动能量场的统计分析[J]. 地震学报,2004,26(5):516-522.
- [7] 罗国富,杨明芝. 云南地区地震活动能量场的时空分布特征[J]. 中国地震,2005,21(3):332-340.
- [8] 罗国富,赵卫明,盛菊琴,等. 青藏高原北部中强以上地震前震兆异常的分级特征研究[J]. 西北地震学报,2009,31(2):179-185.
- [9] 荣代璐,李亚荣. 汶川 8.0 级地震前地震空间相关长度变化特征[J]. 西北地震学报,2010,32(1):54-58.
- [10] 代炜,严武建,马占虎. 2008 年 3 月 30 日甘肃南 5.0 级地震特征[J]. 西北地震学报,2010,32(3):307-312.
- [11] 李莹莹,聂晓红,王在华,等. 2008 年新 疆和静 5.3 级地震异常特征及短临跟踪回顾分析[J]. 西北地震学报,2010,32(4):381-387.