

滇西北至滇南强震危险区地震活动能量场分析*

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, 将滇西北至滇南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, 研究主要能量场的时间权重系数变化曲线、空间等值线图和研究时段内的均值能量场空间分布。结果发现, 能量场的时间权重系数变化曲线较大幅度的升、降变化异常预示了可能发生强震的时间段, 而等值线图的高值变化异常对应了可能发生强震的区域。

关键词: 地震能量场; 随机函数; 地震危险区; 时空分布; 滇西北; 滇南

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0435-07

0 引言

滇西北至滇南地区地处我国著名的南北地震带的南段, 是强震频发的区域, 也是 2011 年度强震危险区^①。该区域发生过 1976 年龙陵 7.3 级、7.4 级双震和 1988 年澜沧 7.4 级地震, 至今自发生 7 级以上地震至今已平静约 22 年。2008 年四川汶川发生 8 级大震后, 南北地震带南端中强地震开始活跃。2008 年 8 月四川攀枝花发生 6.1 级地震, 2009 年 7 月云南姚安发生 6.0 级地震, 2009 年 11 月云南宾川发生 5.0 级地震, 2010 年 2 月云南元谋发生 5.1 级地震。而 2009 年以来滇南的 3 级以上地震平静较显著, 这些异常表明目前该区域存在发生强震的背景。

国内地震工作者在地震孕育过程中的能量积累(滕春凯等, 1991)、地壳应变能量积累率的分布(荆燕等, 2009)、地震波辐射能量的定量计算(秦嘉政等, 2002)、地震释放能量与区域应力场的依赖性(陈培善, Duda, 1993)和能量聚集与地震前兆场的关系(郑熙铭等, 1998)等方面已经开展了研究。蒋海昆等(1995, 1997)研究了地震能量空间分布局域标度特性, 杨明芝和赵卫明(2004), 罗国富和杨明芝(2005)研究了地震活动能量场的特征与中强以上地震的关系。笔者运用自然正交函数(或称经验正交函数)方法,

并引入能量场空间等值线高值异常的映震特征和平均能量场分布, 研究滇西北至滇南地震地区地震活动能量场的时空变化, 及其与 6 级以上地震的关系, 为强震的中期和短临预测提供异常依据和震例经验。

1 研究方法

本文研究区域为 $23^{\circ} \sim 27^{\circ}N$, $99^{\circ} \sim 103.5^{\circ}E$, 区域中空间单元取 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格。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数, L 是按照纬度划分网格数), 研究时间段取 1989 ~ 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)。每个地震释放能量为 e ($e = 10^{4.8+1.5M_s}$), 不同网格中的地震释放能量之和近似于研究区域地震能量, 再剔除余震和中强以上地震释放的能量, 就是该研究区域在研究时间段内的能量分布矩阵, 即能量场 E_0 。该矩阵反映了研究区域内地震活动能量场分布结构。平均每年的小地震(一般取研究区域中记录较完整的最低震级至 5.0 级以下所有地震)释放的能量称为背景能量场 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

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

E 反映了研究区域内地震活动能量的场时间和空间

* 收稿日期: 2011-02-20.

基金项目: 宁夏地震局指令性课题“中强以上地震震后趋势判定及强余震的预测”资助。

① 中国地震局年度地震危险区汇总组. 2010. 2011 年度全国地震重点危险区汇总研究报告.

分布特征。一般能量矩平场 E 可表示为

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

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_{ij} :

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^n T_{ik} X_{kj} \begin{cases} i = 1, 2, \cdots, m \\ j = 1, 2, \cdots, n \end{cases}. \tag{3}$$

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

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

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

归一性为 $\sum_{i=1}^m T_{ik}^2 = 1$ 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

$$E = TX, \tag{4}$$

$$T'T = A, \tag{5}$$

$$XX' = I, \tag{6}$$

令矩阵 R 为

$$R = E'E, \tag{7}$$

则由式 (4) ~ (7) 可推出

$$R X' = X' A. \tag{8}$$

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

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{k1} \\ X_{k2} \\ \vdots \\ X_{kn} \end{bmatrix} = \lambda_k \begin{bmatrix} X_{k1} \\ X_{k2} \\ \vdots \\ X_{kn} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

其中, $r_{im}(i = 1, 2, \cdots, n; m = 1, 2, \cdots, n)$ 等于矩阵 R , $X_{kl}(l = 1, 2, \cdots, n)$ 等于特征向量 X 。可解出矩阵 R 的 n 个特征值 $\lambda_k(k = 1, 2, \cdots, n)$ 以及对应的特征向量 $X_k = (X_{k1}, X_{k2}, \cdots, X_{kn})'$ 。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 个能量矩平场的总和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

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^t \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \tag{10}$$

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

$$T_i = EX_i, \quad i = 1, 2, \cdots, t. \tag{11}$$

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时间段有可能发生中强地震。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, 就可预测出可能发生中强地震的区域。

2 数据处理和分析

2.1 研究数据处理

本文选取滇西北至滇南为研究区域 ($23^\circ \sim 27^\circ N, 99^\circ \sim 103^\circ E$), 使用中国地震台网中心提供的弱震目录, 并对 1989 年 1 月至 2010 年 12 月的地震资料进行 b 值检验, 该区 $M_L \geq 2.8$ 地震记录完整, 因此震级下限取 $M_L 2.8$; 考虑到中强地震发生率很小, 其能量对背景场的影响很大, 且这些地震已经不属于区域正常活动状态, 故震级上限取 $M_L 5.4$ (换算成面波震级为 $M_S 5.0$), 并用 K-K 法删除 5.0 级以上地震的余震。

2.2 计算典型能量场参数

利用上述方法，分析和处理滇西北至滇南 1989~2010 年的地震观测资料，首先按 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格对研究区域进行划分，时间间隔取年，计算出 22 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 $k=8$ ，纬度划分网格数 $L=8$ ，空间网格数 $n=64$ ，时间 $m=44$ ；按顺序算出 n 个空间网格 m 年的能量距平场矩阵 $E_{44 \times 64}$ ，之后进行自然正交函数展开，就得到矩阵 $R_{64 \times 64}$ 。当 $t=6$ 时，前 6 个主要的能量场的总和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，现将前 6 个特征值列在表 1 中，前 6 个能量矩平场已表现出

所有能量距平场时空分布的主要特征。

表 1 前 6 个主要能量场的特征值		
Tab. 1 First 6 eigenvalues of the main energy field		
序号	特征值 $\lambda_i/(J)$	前 i 个特征值占所有特征值总和的百分比 η
1	$5.638\ 0 \times 10^{12}$	25.21%
2	$4.766\ 0 \times 10^{12}$	46.52%
3	$4.360\ 5 \times 10^{12}$	66.02%
4	$3.828\ 2 \times 10^{12}$	83.14%
5	$2.136\ 6 \times 10^{12}$	92.69%
6	$4.995\ 3 \times 10^{11}$	95.02%

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 1），图 1 在一定程度上给出了在图 2 中研究区内 6 级以上地震的预测发震时间。

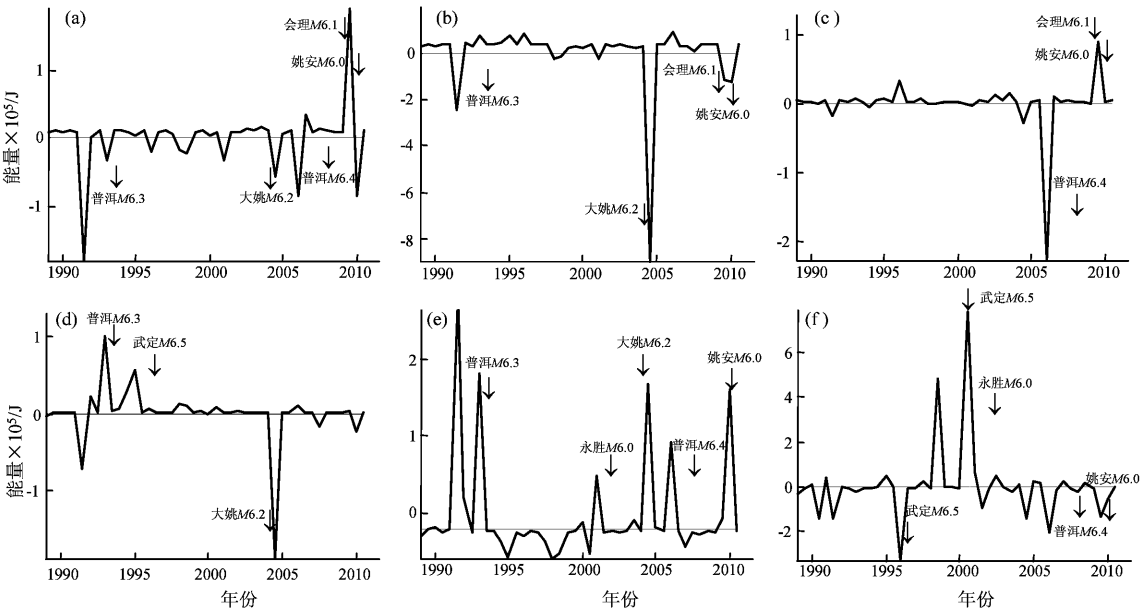


图 1 前 6 个主要能量场的时间权重系数曲线

(a) 第 1 个能量场占总能量场的 25.1%；(b) 第 2 个能量场占总能量场的 21.38%；(c) 第 3 个能量场占总能量场的 19.5%；(d) 第 4 个能量场占总能量场的 17.12%；(e) 第 5 个能量场占总能量场的 9.55%；(f) 第 6 个能量场占总能量场的 2.33%（细实线是曲线变化的基准线，过纵坐标 0 点）

Fig. 1 The time weight coefficient curve in the front of six main energy fields
(a) Time factor accounting for 25.1% of the total energy field; (b) Time factor accounting for 21.38% of the total energy field;
(c) Time factor accounting for 19.5% of the total energy field; (d) Time factor accounting for 17.12% of the total energy field;
(e) Time factor accounting for 9.55% of the total energy field; (f) Time factor accounting for 2.33% of the total energy field

图 1 中横坐标为时间，纵坐标代表的是研究时段中半年时间间隔内的地震总能量。在图 1a 中，几次 6 级以上地震前 1~3 年的能量场时间权重系数曲线相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降异

常。如 1993 年 1 月云南普洱 6.3 级地震、2003 年 7 月云南大姚 6.2 级地震、2007 年 6 月云南普洱 6.4 级地震、2008 年 8 月四川攀枝花—会理 6.1 级地震和 2009 年 7 月云南姚安 6.0 级地震前能量场

时间权重系数曲线都出现类似的异常变化。图 1b 显示曲线相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降异常，对应发生 1993 年云南普洱 6.3 级地震、2003 年云南大姚 6.2 级地震；2008 年四川会理 6.1 级，2009 年云南姚安 6.0 级地震。图 1c 中有较大幅度的曲线变化对应 2007 年以来研究区内 3 次 6 级以上地震。图 1d 曲线有较大幅度的异常变化，对应发生 1993 年 1 月云南普洱 6.3 级、1995 年 10 月云南武定 6.5 级和 2003 年 7 月云南大姚 6.2 级地震。图 1e, f 能量场时间权重系数曲线相对于基值 0 有较大幅度的上升和下降，分别与图 1b 中的中强地震对应，还与 2001 年 10 月云南永胜、宾川间 6.5 级地震对应。

图 1 中能量场时间权重系数曲线相对于基值，呈现较大幅度上升和下降，表明研究时段内每半年间隔的地震总能量大于或者小于年平均能量值，说明该时间间隔内地震能量释放多，弱震活动相对密集或者有显著中等地震发生，地震能量处于积累阶段，弱震活动相对处于平静状态。曲线有较大幅度变化均与研究区 6 级以上强震的时间相对应。而曲线变化幅度与强震的震级不成比例，而且一次强震可能与图 1 中的 6 个主要能量场曲线相对应，对应数越多，强震发震前的异常可信度就越大。从图 1a ~ e 中可以看出，研究区近几年存在发生强震的危险。

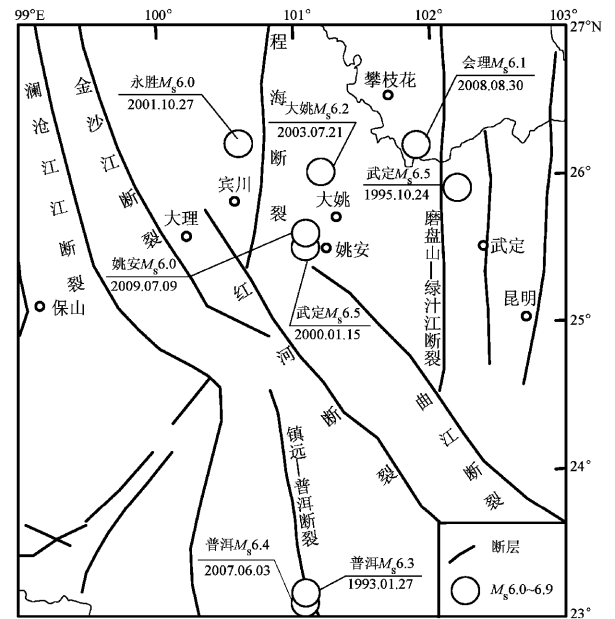


图 2 研究区域构造与中强地震分布图
Fig. 2 Distribution map of the moderate – strong earthquake and tectonics in the research area

2.4 主要能量场的空间分布

图 3 为滇西北至滇南地区前 6 个典型地震能量释放的空间分布等值线。分析等值线的较大变化值，就可判断出研究区可能发生 6 级以上强震的区域。等值线区越黑（或越白），其释放（或积累）能量就越大。黑色区域值的大小代表该区域地震释放能量的多少，表明该区域弱震处于相对活跃或者平静阶段。笔者将曲线等值区的值（或者绝对值）大于 0.5 的区域定义为危险区，其周围是可能发生 6 级以上地震的区域。从前文 6 个主要能量场在空间上的分布可以看出（图 1），过去 22 年大部分高能量场在空间上比较集中，且主要分布在滇西北的大理至姚安一带和滇南的思茅至墨江一带，也大部分对应了 1989 年以来研究区内的 6 级以上地震发生的区域。

图 3a 中，(25.8°N, 100.7°E) 周围区域为一个危险区，分别与 2000 年、2001 年和 2009 年云南姚安 6.5 级、6.0 级和 6.0 级地震震源区相对应，与 2003 年云南大姚 6.2 级地震发震区域对应。另外，(25.2°N, 99.2°E) 周围区域为另一个危险区，目前还没有发生 6.0 级以上地震，是今后值得关注的危险区。图 3b 中，(23.3°N, 101.8°E) 周围区域是危险区，与 1993 年和 2007 年云南普洱 6.3 级、6.4 级地震发震区域相对应。图 3c 中，(23.3°N, 101.7°E) 周围区域和 (24.8°N, 99.3°E) 周围区域为两个危险区，前一个危险区周围与 1993 年和 2007 年云南普洱 6.3 级、6.4 级地震发震区域相对应。而后者危险区也是今后强震可能发生的区域。图 3d 中，(25.8°N, 100.9°E) 周围区域和 (25.2°N, 99.2°E) 周围区域为两个强震危险区，与图 3a 中的强震发震区域对应。图 3f 中，(23.3°N, 100.3°E) 周围区域为一个危险区，与图 3a 中的强震发震区域对应。图 3f 中，(25.8°N, 99.8°E) 周围为一个地震危险区，其危险区周边 2001 年永胜、宾川间发生 6.0 级地震，该危险区周围地震能量释放明显不足。

前 6 个主要能量场空间分布图与滇西北至滇南地区 1989 年以来发生的所有 8 次 6.0 级以上地震的发震区域一一对应。这六个能量场等值线区域的空间危险区相对集中，但不能明确哪个危险区在哪段时期对应强震，说明该方法预测中强地震区域还存在一定的局限性。与图 3 对应的中强地震列于表 2。

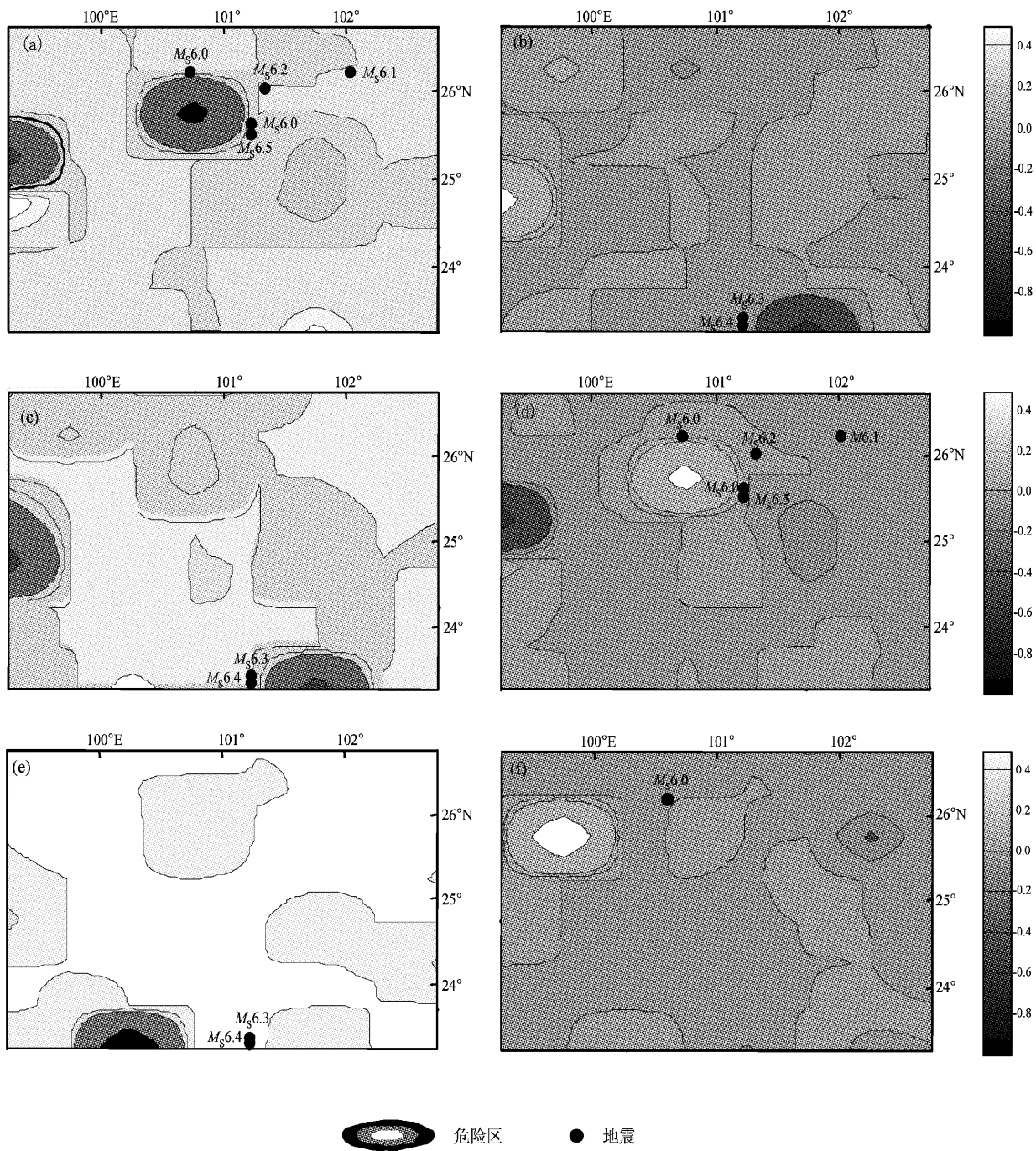


图 3 前 6 个主要能量场的等值线图 (图中色标数字为能量 (单位: $\times 10^5$ J))

(a) 第 1 个能量场占总能量场的 25.1% ; (b) 第 2 个能量场占总能量场的 21.38% ; (c) 第 3 个能量场占总能量场的 19.5% ; (d) 第 4 个能量场占总能量场的 17.12% ; (e) 第 5 个能量场占总能量场的 9.55% ; (f) 第 6 个能量场占总能量场的 2.33%

Fig. 3 The isograms in the first 6 main energy fields (colour code in the figure indicates energy ($\times 10^5$ J))
(a) Isograms in the first main energy field accounting for 25.1% of those in the total energy fields; (b) Isograms in the first main energy field accounting for 21.38% of those in the total energy fields; (c) Isograms in the first main energy field accounting for 19.5% of those in the total energy fields; (d) Isograms in the first main energy field accounting for 17.12% of those in the total energy fields; (e) Isograms in the first main energy field accounting for 9.55% of those in the total energy fields; (f) Isograms in the first main energy field accounting for 2.33% of those in the total energy fields

表 2 1989 ~ 2010 年滇西北至滇南地区 6.0 级以上地震
Tab. 2 M_s 6.0 earthquake in the region from the
northwest to the south in Yunnan

序 号	时间 (年-月-日)	纬度 $\varphi_N/(^{\circ})$	经度 $\lambda_E/(^{\circ})$	震级 M_s	震中地点
1	1993-01-27	23°06′	101°06′	6.3	云南普洱
2	1995-10-24	25°54′	102°12′	6.5	云南武定
3	2000-01-15	25°30′	101°06′	6.5	云南姚安
4	2001-10-27	26°12′	100°36′	6.0	云南永胜、宾川间
5	2003-07-21	26°00′	101°12′	6.2	云南大姚
6	2007-06-03	23°00′	101°06′	6.4	云南普洱
7	2008-08-30	26°12′	101°54′	6.1	四川攀枝花
8	2009-07-09	25°36′	101°06′	6.0	云南姚安

通过研究 1989 年以来滇西北至滇南地区地震能量场的时间权重系数和空间高值危险区，可以看出研究区域的大部分 6.0 级以上地震发生前，地震活动中短期时空发生异常变化，显示出弱震活动与中强地震活动相关。

2.5 均值能量场空间分布

考虑到研究区最近 1 次 7.0 级以上地震为 1988 年云南澜沧 7.4 级，选取 1989 年 1 月至 2010 年 12 月研究区域 M_L 2.8 ~ 5.4 地震绘制其能量场均值等值线（图 4），该能量场等值线值可能受中等地震（ M_L 4.5 ~ 5.4）释放能量的影响较大，如发生中等地震的震中周围空间能量场等值线值出现明显突降变化，而长时地震平静的区域空间

能量场等值线值出现上升变化。而研究区域明显存在能量释放（黑）和积累（白）相互连接的区域可能是强震危险区，即滇西北的大理至姚安一带和滇南的思茅至墨江一带。一个地震危险区位于研究区域西北部（25.5°N，99.7°E）附近，该危险区等值线高值和低值梯度交错，储蓄能量较多，属已发生 6 级以上地震，但能量释放明显不足。另一个地震危险区位于研究区南部（23.2°N，101.0°E）东西两侧附近，也具备发生 6 级地震的条件。而其它区域地震能量释放相对较低，发生强震的危险性也较低。

3 结论和讨论

（1）研究区 6 级以上强震发生前 1 ~ 3 年，主要能量场的时间权重系数随时间呈现较大幅度的升降异常变化，大部分都对对应发生了强震，曲线变化幅度越大，地震异常越明显。几个能量场同时都出现异常，表明该异常可信度较高。目前研究区主要能量场的时间权重系数存在明显异常，仍在中强地震的映震期内。

（2）分析研究区主要能量场的空间等值线分布，得出过去 22 年研究区域的地震能量场高值（绝对值大于 0.5）危险区周边，对应了所有 8 次 6 级以上地震事件。6 个主要能量场的地震危险区相对集中，但不能明确哪个危险区在哪段时期可以对应强震，这说明用该方法预测强震区域还存在一定的局限性。

（3）从研究区域 1989 年以来能量场空间均值的分布，笔者发现滇西北的保山、大理至姚安一带和滇南的思茅至墨江一带是强震危险区，也是未来几年有可能发生强震的区域。

（4）将地震活动能量场看作为一个随机场，研究了主要能量场的时空分布特征。但地震活动受到许多因素的影响，如太阳黑子活动、地球自转速率变化以及活动断裂运动大小等，本文并未予以考虑，因而研究结果有局限性。

自然正交函数展开方法让我们对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，既简化了问题，又突出了结果；一次强震与一个或几个能量场有关，一个能量场可能与一个或几个强震对应，说明能量场的时空变化特征与部分强震之间有一定对应关系。

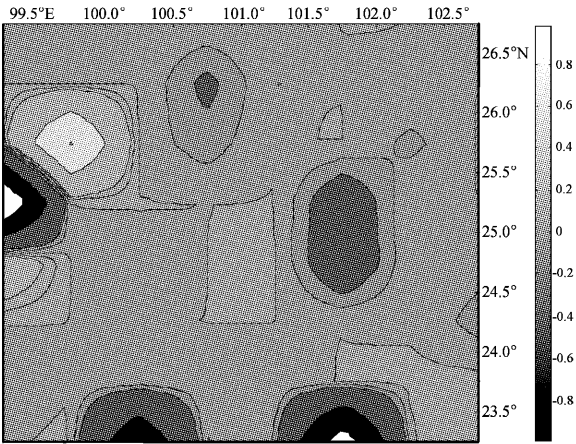


图 4 研究区能量场均值等值线图
(图中色标数字为能量 (单位: $\times 10^5$ J))

Fig. 4 Contour of the energy background field
(colour scale in the figure indicates energy ($\times 10^5$ J))

参考文献：

陈培善, Duda S J. 1993. 地震辐射能对环境应力场的依赖性[J]. 地震学报, 15(2): 146 – 152.

蒋海昆, 王忠民, 刁守中. 1995. 地震能量空间分布局域标度特性的初步研究[J]. 地震研究, 18(4): 357 – 364.

蒋海昆, 王忠民, 陶九庆, 等. 1997. 地震能量空间分布局域标度特性中短期预报方法及效能评价——实际震例的回顾性检验[J]. 地震研究, 20(2): 206 – 211.

荆燕, 李宏, 熊玉珍, 等. 2009. 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, 15(1): 108 – 114.

罗国富, 杨明芝. 2005. 云南地区地震活动能量场的时空分布特征[J]. 中国地震, 21(3): 332 – 340.

秦嘉政, 钱晓东, 叶建庆, 等. 2002. 用峰值速度估算姚安地震序列的地震能量[J]. 地震学报, 24(1): 98 – 102.

滕春凯, 白武明, 王新华. 1991. 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, 13(1): 32 – 41.

杨明芝, 赵卫明. 2004. 宁夏及邻近地区地震活动能量场的统计分析[J]. 地震学报, 26(5): 516 – 522.

郑熙铭, 肖家鑫, 林家骝. 1998. 地震前兆场的演化和能量非线性聚集的关系[J]. 中国地震, 14(1): 74 – 80.

Analysis on Energy Field of the Seismic Activity in Earthquake Hazard Area from the Northwest to the South of Yunnan

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

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

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

Abstract

According to the Random Function Theory, we take the seismic energy field from the northwest to the south of Yunnan as a spatial-temporal random function, and study the isogram chart of the time weight coefficient of several typical sub-fields, spatial contour, and distribution of the average energy field by the expansion of natural orthogonal function. We find that the curve’s sharp rise and fall suggests the occurrence time of the strong earthquakes, while the high-value anomaly of the spatial contour suggests the risk zone of the strong earthquakes.

Key words: seismic energy field; random function; earthquake risk zone; spatial-temporal distribution; north-west of Yunnan; south of Yunnan