

中国大陆7级以上地震频次场与应变场对比研究

罗国富*, 罗恒之

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2026年7月27日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

本文应用自然正交函数展开方法, 分别研究1980~2020年中国大陆7级以上地震应变场和频次场的时间因子变化特征。结果表明大震前时间因子在平稳背景上会出现超过均方差突跳上升或突跳下降异常变化, 异常主要集中在前4个场, 大震前均出现中长期异常, 部分出现短临异常特征。最后对比研究频次场与应变场的时间因子异常的差异性, 为大震预测提供依据。

关键词

地震频次场, 地震应变场, 自然正交展开方法, 时间因子

Comparative Study on the Frequency Field and Strain Field of Earthquakes above Magnitude 7 in Chinese Mainland

Guofu Luo*, Hengzhi Luo

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: July 27, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

In this paper, the natural orthogonal function expansion method is applied to respectively study the time factor variation characteristics of the strain field and frequency field of earthquakes above magnitude 7 in Chinese mainland from 1980 to 2020. The results show that before a major earthquake, the

*通讯作者。

time factor will exhibit abnormal changes such as a sudden increase or decrease beyond the mean square error on a stable background. The anomalies are mainly concentrated in the first four fields, and all of them show medium- and long-term anomalies before the major earthquake, with some showing short-term and imminent anomaly characteristics. Finally, the differences in the time factor anomalies of the frequency field and the strain field are compared and studied to provide a basis for major earthquake prediction.

Keywords

The Seismic Frequency Field, The Seismic Strain Field, Natural Orthogonal Function Expansion Method, Time Factor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

研究一个区域的地震活动常用地震能量和地震频次这两个物理量, 这两个量是表征地震活动规律性, 研究地震活动水平的常用变量。如气象上常常把温度和气压作为随机变量, 根据气象场的时空变化判断天气的状况[1]。在地震活动分析中把地震能量和地震频次也做类似的研究, 应用自然正交函数展开方法形成地震能量场和频次场, 探索地震活动场的变化规律, 寻找场的异常变化特征与大震的关系, 力争解决大震的预测是目前国内外研究的焦点。地震能量通过计算可以转化成地震应变, 地震能量和地震应变本质上同一参数, 经过本团队近20年的不断探索, 发现地震应变场比地震能量场在大震分析中具有更多的优越[2], 首先应变值比能量值小, 容易发现异常变化时段, 其次在自然正交变换后应变场收敛慢, 异常易集中在前4个场或者前3个场, 最后应变场提取的异常更可靠和全面, 因此本文主要研究地震应变场和地震频次场。

2017年作者把地震能量场转化成地震应变场, 在地震预测中得到广泛应用。杨明芝等[2]研究中国大陆6级以上地震应变场, 发现大震前时间因子会出现上升和下降的异常变化, 并讨论地震应变场和地震能量场的差异。罗国富等[3]研究了2017年四川九寨沟7.0级地震前的地震应变场, 对比分析了1976年松潘平武7.2级双震应变异常随时间演变的差异。罗国富等[4]研究了大震前震中区域的地震活动应变场的时空异常特征, 以及与主震之间的关系。近年来对地震频次的研究有很多, 但主要侧重于地震波频率或者地震频次的研究。张喆[5]应用地震波高频辐射反投影技术研究2018年斐济8.2级地震破裂过程, 并解释破裂原因。李艳娥[6]利用川滇菱形块体的科学台阵数据分析2013年芦山7.0级地震和2014年鲁甸6.5级地震前区域范围内地震活动频次出现明显的增强异常现象, 对认识强震的孕育过程具有一定的启示意义。冯建刚[7]研究1980年以来青藏块体东北缘22次中强地震前, 有17次中强地震前存在明显的小震频次表示为矩阵形式增强现象。而应用地震场的理论研究大震前异常是近年来新发展起来, 马禾青[8]应用自然正交函数研究7次7级地震和8次6级地震的频次场时间因子变化, 发现强震前频次场异常主要集中在第一和第二典型场中, 异常起伏变化较大。

本文利用自然正交函数展开方法, 以中国大陆7级以上地震为研究对象, 计算震前地震活动频次场和应变场, 提取两种场的时间因子, 分析时间因子变化特征与7级以上地震的关系, 最后对比讨论频次场和应变场时间因子变化特征的差异, 找出其方法的优越性, 为今后实际地震预测工作提供相应的依据。

2. 方法和原理

(1) 首先将研究区域网格化

地震活动性分析中常以地震应变和地震频次为变量, 将这些参数看作随机变量, 通过自然正交函数方法, 分解成空间和时间的函数, 称为地震应变场或频次场。杨明芝等[9]提出用网格化方法构造地震活动场: 假设某个研究区域, 根据区域地震活动参数变量, 选取一个时间间隔 Δt , 将研究的时间域划分为 m 个时段, $t_i = \Delta t \times i (i = 1, 2, \dots, m)$, 将研究空间区域划分为 n 个相等的面积元 $\Delta s = \Delta x \times \Delta y$, 其中心坐标为 $(x_j, y_j) (j = 1, 2, \dots, n)$, 分别统计各个时段内每一个面积元内的地震累计值, 这个值可能为地震应变或者地震频次, 并将其值作为代表研究区域时空坐标 $(x_i, y_i, t_j) (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 的地震活动场函数值。

(2) 其次创建区域地震应变场和频次场

通常 E 表示地震释放的能量, $\sqrt{E}$ 表示为地震能量的平方根, 根据地震能量的平方根与地震应变成正比, 即 $\sqrt{E} = c\varepsilon$ (c 为研究区域内地震的震源相关参数, ε 为震源区地震累计应变参数)。区域网格化后, 再以 $S = \sum_i \sqrt{E_i}$ 创建应变场函数, 并表示为矩阵形式

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

同理, 以地震频次看作随机变量, 通过自然正交函数展开方法, 将地震频次分解成空间和时间的函数, 称为地震频次场。以 N 表示地震活动频次, 将区域网格化后, 再以 $N = \sum_i N_{ij}$ 建立频次场函数, 并

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

其中 N_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 是第 j 网格(代表空间)、第 i 时段(代表时间)的累计地震频次值。

(3) 自然正交函数计算

所谓自然正交函数展开, 就是把应变场矩阵 S (或者频次场矩阵) 分解成正交的空间函数 x 与正交的时间函数 T 乘积之和:

$$\text{应变场} \quad S_{ij} = \sum_{p=1}^n T_{ip} X_{pj} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{频次场} \quad N_{ij} = \sum_{p=1}^n T_{ip} X_{pj} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

应变场和频次场均满足正交和归一化条件, 即

$$\sum_{j=1}^n x_{kj} x_{lj} = \begin{cases} 0 & k \neq l \\ 1 & k = l \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m T_{ik} T_{il} = \begin{cases} 0 & k \neq l \\ \lambda_k & k = l \end{cases} \quad (6)$$

通过求解应变场的协方差矩阵的特征方程 $R = S'S$, 或者频次场协方差矩阵的特征方程 $R = N'N$, 即

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解特征向量 $\mathbf{x}_k$ 和特征值 λ_k ($k=1,2,\dots,n$)。其时间因子表示为

$$\text{应变场 } T_k = S\mathbf{x}_k \quad k=1,2,\dots,n \quad (8)$$

$$\text{频次场 } T_k = N\mathbf{x}_k \quad k=1,2,\dots,n \quad (9)$$

特征向量 $\mathbf{x}_k$ 代表了组成应变场或者频次场的不同场的地震应变空间分布, 可以用来分析强震前的空间异常; 而时间因子 T_k 则代表了应变场或者频次场 $\mathbf{x}_k$ 的时间变化, 反映了震源周围不同时间活动场的动态特征, 可以用来分析强震前的时间因子异常。

(4) 地震应变场和频次场的异常提取方法

将协方差矩阵 R 的前几个特征值(由大到小排序)所对应的特征向量满足拟合总场的精度, 表明前几个特征向量(应变场)叠加已经近似总应变场, 这样研究前几个主要应变场的变化, 代表了研究区域应变场的时空特征。假设 n 个特征值的和为 b_0 , 用前 l 个主要场拟合总场的精度 r_l 为

$$r_l = \sum_{p=1}^l \frac{\lambda_p}{b_0} \quad (10)$$

式中, λ_p 表示第 p 个特征根。

自然正交函数展开方法提取出前几个最大特征值相对应的应变场(或者频次场), 相当于把区域应变场(或者频次场)的主要信息浓缩在前几个主要应变场(或者频次场), 重点研究前几个应变场(或者频次场)的异常, 排除无异常或与强震关联程度小的应变场(或者频次场)。集中研究这几个主要应变场(或者频次场)的时空异常变化, 使研究问题简化。

求解前 l 个应变场的时间因子方差 s^2 , 分别给出应变场和频次场异常判别的阈值, 即

$$s^2 = \text{var}[T_k] = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l T_{ik}^2 = \frac{\lambda_k}{l} \quad (11)$$

时间因子超过均方差的值称为应变场和频次场的异常[10](本文选取一倍均方差作为阈值)。自然正交函数方法可以自动挑选出主要场异常, 克服以往人为判别异常阈值的劣势, 实现又快又准确地研究强震的异常, 以此预测强震。

3. 资料和计算震例

3.1. 地震资料

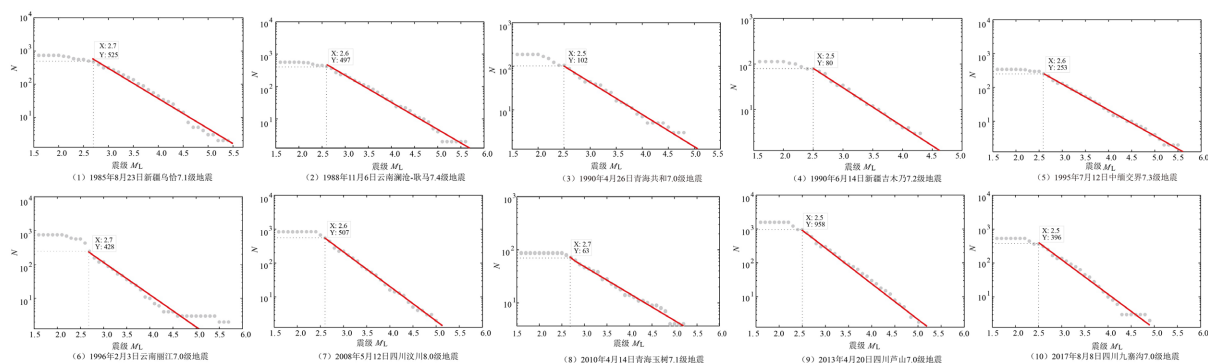


Figure 1. Discrimination of minimum complete magnitude by G-R relation curve

图 1. 由 G-R 关系曲线判别最小完整震级

本文使用的地震资料是中国地震台网中心提供的全国正式弱震目录, 针对不同7级以上地震震中研究

区域和时间段资料进行b值检验[9], 根据研究区地震资料G-R关系曲线, 计算出各7级以上地震震中研究区域最小完整震级, 确定最小完整震级下限图1。考虑到地震频次场与应变场的研究差异, 普遍认为较小的2~3级地震可能主要反映研究区域背景地震活动水平, 对地震频次场影响较大[10]; 而较大的4~5级地震则多受孕震机制的控制, 地震应变场受其影响较大[4]。为了更好地反映区域地震背景活动, 又能更好反映震源孕育过程。本文研究对象为10次7级以上震例, 图1分别计算出各震例的最小完整震级, 最终选取包括所有震例最小完整震级的下限 $M_L 2.7$, 地震资料较完整。

研究地震应变场和频次场对选取地震资料是否删除余震一直是有争议的话题。本文原则上不删除研究区余震, 是尽可能保留研究区前震和背景地震, 但研究区域相互重叠的7级以上地震, 且发震时间又很近, 前一次7级地震的余震影响后面7级地震, 这样的7级地震研究区要删除余震, 如果研究区在研究时段无5级以上地震, 这样的7级地震研究区就不需要删除余震。如2008年汶川8.0级地震研究区和2013年芦山7.0级地震的研究区部分重叠, 因此需要删除汶川8.0级地震的余震对芦山7.0级地震的影响。根据上述(7)式, 分别求得频次场和应变场的特征值, 以及主要场的时间因子。

本文采用自然正交函数展开方法, 对中国大陆1980~2020年的7级以上地震的频次场和应变场进行分析。由于地震台网监测能力的差异, 尤其西藏地区和部分青海地区的台网观测能力较低, 因此1997年11月8日西藏玛尼7.5级地震和2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震研究区域观测资料尚不完整, 无法满足计算条件, 不进行频次场和应变场计算, 因此本文只选取具备一定监测能力的10次7级以上震例。

3.2. 地震参数及计算精度

表1为1980~2020年中国大陆10次7级以上地震频次场和应变场选取的参数, 地震资料的震级范围选取 $M_L \geq 2.7$, 10次7级以上地震震例的震中分布图2。不同震例的研究范围和时间段见表1, 在研究时间段内以窗长为1年, 步长为3个月滑动计算, 而地震频次场按 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的经纬度网格划分, 应变场按 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的经纬度网格划分, 两者网格选取的不同, 后文会讨论。根据这些参数分别计算中国大陆7级以上地震研究区内网格为 n 、时间段为 m 的地震频次场和应变场时间因子。

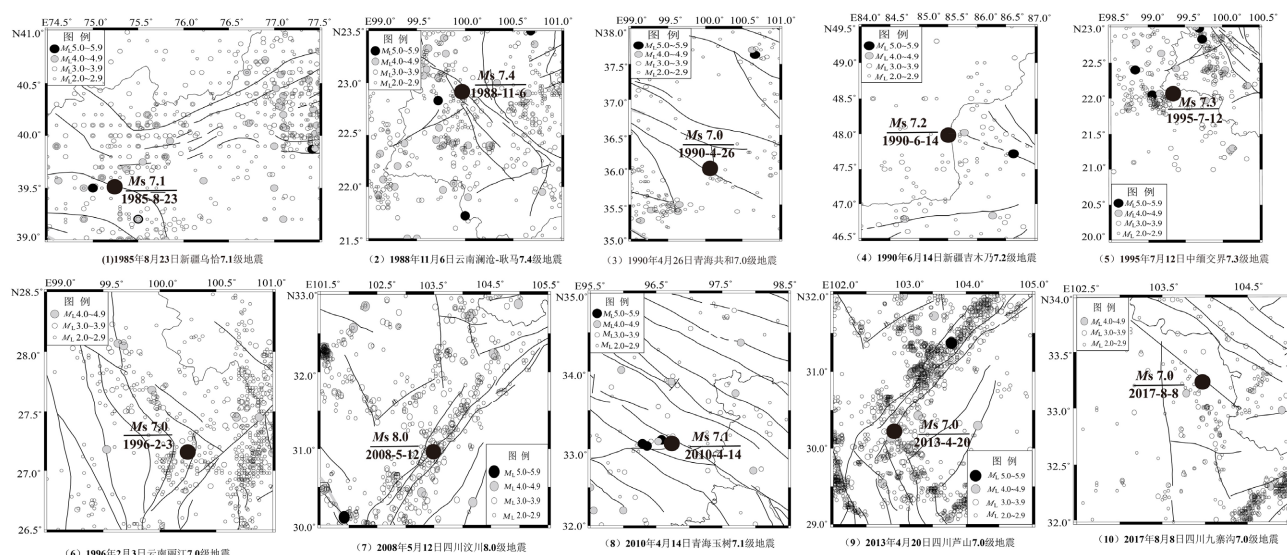


Figure 2. The distribution of epicenters of 10 earthquake cases above M7

图2. 10次7级以上地震震例的震中分布

Table 1. Calculation parameters table of ten earthquakes above $M7$ in Chinese Mainland
表 1. 中国大陆 10 次 7 级以上地震计算参数表

序号	地震	研究区域 (纬度经度)	资料时段	频次场			应变场		
				n, m	前 4 特征值	精度	n, m	前 4 特征值	精度
1	1985-8-23 新疆乌恰 7.1	39.0°~41.0°, 74.5°~77.5°	1975-01~1985-06	6, 42	177.6046 72.4315 45.0674 25.8071	0.8891	12, 84	3.5912×10^3 0.9524×10^3 0.6985×10^3 0.6403×10^3	0.8329
2	1988-11-6 云南 澜沧耿马 7.4	21.5°~23.5°, 99.0°~101.0°	1975-01~1988-10	4, 55	370.8477 133.8201 108.5304 90.9299	1.0000	8, 110	235.8914 155.9525 136.1460 99.0805	0.7300
3	1990-4-26 青海共和 7.0	35.0°~38.0°, 99.0°~101.0°	1980-01~1990-03	6, 41	42.8715 10.1152 6.7076 4.5336	0.9548	12, 82	91.0688 58.5975 40.8794 15.9304	0.9227
4	1990-6-14 新疆吉木乃 7.2	46.5°~48.5°, 84.0°~87.0°	1980-01~1990-05	6, 42	18.2853 12.0240 8.9396 6.3606	0.8307	12, 84	13.1051 10.3549 3.6816 1.5037	0.8021
5	1995-7-12 中缅交界 7.3	20.0°~23.0°, 98.5°~100.5°	1985-01~1995-06	6, 42	119.8241 81.4368 27.2826 16.4039	0.9934	12, 84	1.0670×10^3 0.5072×10^3 0.2105×10^3 0.1965×10^3	0.8107
6	1996-2-3 云南丽江 7.0	26.5°~28.5°, 99.0°~101.0°	1985-01~1996-01	4, 44	196.6908 75.8525 36.3662 15.8406	1.0000	8, 88	41.3727 16.8231 12.9331 6.0894	0.7857
7	2008-5-12 四川汶川 8.0	30.0°~33.0°, 101.5°~105.5°	1998-01~2008-04	12, 41	90.7340 65.7430 45.2748 40.3907	0.7055	24, 82	647.9299 213.4451 157.4164 96.7784	0.8585
8	2010-4-14 青海玉树 7.1	32.0°~35°, 95.5°~98.5°	1998-01~2010-04	9, 49	18.9463 15.8337 13.3513 10.0722	0.7102	18, 98	635.2714 101.7391 88.7516 71.5995	0.9290
9	2013-4-20 四川芦山 7.0	29.0°~32.0°, 102.0°~105.0°	2000-01~2013-03	9, 53	273.4557 137.7011 90.7523 70.1106	0.8021	18, 106	298.9720 259.1229 33.7822 26.0381	0.9178
10	2017-8-8 四川九寨沟 7.0	32.0°~34.0°, 102.0°~105.0°	2009-01~2017-07	9, 34	142.0628 39.3225 27.8213 16.2313	0.8482	18, 68	661.8619 391.0843 176.3636 102.7762	0.7898

从表1可以看出中国大陆1980~2020年10次7级以上地震的研究区域大部分都在 $3^\circ \times 3^\circ$ 以上, 时间段在10年以上, 包括选取研究区内震级范围、网格和时间段等这些参数进行自然正交展开, 计算出应变场和频次场的前4个特征值的大小以及前4个典型场占研究总场的精度。大部分震例的频次场精度大于应变场精度, 但汶川8.0级地震、玉树7.1级地震和芦山7.0级地震的震例则相反; 大部分震例前4个应变场特征值大小都大于频次场特征值, 反映出应变场时间因子异常比频次场时间因子更集中。

3.3. 频次场和应变场时间因子对比

对比1980~2020年中国大陆10次7级以上地震前频次场和应变场的时间因子变化如图3，两者相同的是：所有震例的频次场和应变场时间因子在研究区内异常都浓缩在前4个典型场中，前4个典型场的异常就是整个研究区内的异常。两者不同的是，地震频次场时间因子变化比较敏感，曲线起伏较大，异常变化形态复杂多样，表现为上升、下降、上下波动等多种变化类型。地震频次场的时间因子变化在大震前超过一倍均方差的异常幅度(图3红色线)，通常被称为长期、中期、短期和临震异常；地震应变场时间因子受干扰因素较少，曲线比较规整，曲线变化超过一倍均方差为异常，明显可以看出突升、突降、连续波速的异常变化，也呈现出长期、中期、短期和临震异常特征。中国大陆10次7级以上地震频次场和应变场时间因子异常对比见表2，每次震例中前4个场在不同的时间出现一个或几个异常值，异常幅值是几个连续异常值中最大值。本文采用超过一倍均方差的绝对值判断是否存在异常的评判标准，异常性质按照地震预报规范的标准，主震前10年内出现的异常是长期异常、主震前1~2年内出现的异常是中期异常、主震前3个月出现的异常的是短期异常，主震前几天到几十天出现的异常是临震异常。中国大陆10次7级以上地震的震例绝大部分震例在主震前出现中长期异常，少部分震例前如2008年四川汶川8.0级地震和2013年四川芦山7.0级地震出现短期异常，甚至临震异常，为今后地震预测提供重要参考依据。

Table 2. Time factor parameters of strain field and frequency field of ten earthquakes above *M*7 in Chinese Mainland
表 2. 中国大陆 10 次 7 级以上地震频次场和应变场时间因子对比表

序号	地震	活动场	时间因子	异常时间(年-月)	最大异常幅度	时间因子均方差	异常性质	异常应变场占总场比例
1	1985 年 8 月 23 日新疆乌恰 7.1	频次场	1	1979-10~12 1984-01~06	4.7400 -2.9761	±2.0813	中长期	0.4920
			2	1976-04~09 1978-07~09	4.0877 3.4967	±1.3291	中长期	0.2007
			3	1978-10~1979-03 1982-04~09	2.4285 1.3962	±1.0484	中长期	0.1249
			4	1978-01~03 1984-07~09	-2.1664 -1.4225	±0.7934	中长期	0.0715
		应变场	1	1983-02~04	-38.7708	±5.3815	中期	0.5085
			2	1982-12~1983-02	4.8120	±2.7715	中长期	0.1349
			3	1983-04~06	-12.1061	±2.3735	中期	0.0989
			4	1983-06~08	6.9730	±2.2724	中短临	0.0907
2	1988 年 11 月 6 日云南澜沧 - 耿马 7.4	频次场	1	1986-01~1987-12	-4.2504	±1.6088	中长期	0.3923
			2	1978-07~09 1988-01~03	4.3942 2.1328	±1.3869	中长期	0.2767
			3	1985-01~03 1987-10~12 1988-07~10	2.9369 -1.9242 1.9193	±1.2848	长中短临	0.2375
			4	1982-10~1983-03 1986-10~12 1988-04~10	-1.6735 1.3008 2.8872	±0.8883	长中短临	0.1135
		应变场	1	1987-10~1988-10	-5.9957	±1.2030	中短临	0.2558
			2	1988-07~10	6.6598	±0.9781	短临	0.1691
			3	1988-08~10	-1.1282	±0.9139	短期	0.1476
			4	1987-09~11	-5.6940	±0.7797	短临	0.1074

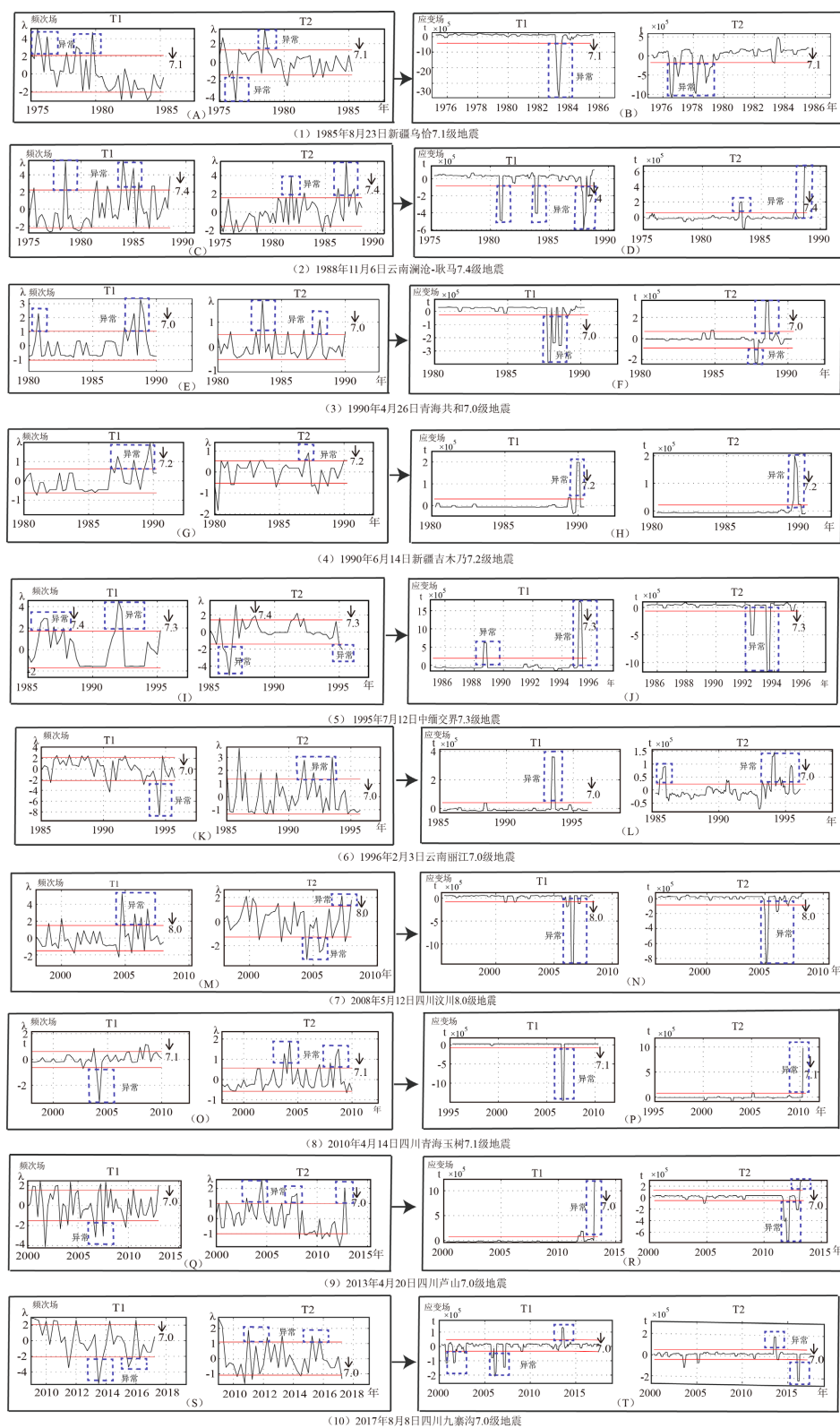
续表

3	1990 年 4 月 26 日青海 共和 7.0	频次场	1	1980-10~12 1988-01~1989-03	1.3020 3.2967	±1.0353	长中期	0.6373
			2	1983-07~09 1987-01~03	1.8698 1.1038	±0.5029	长期	0.1504
			3	1987-04~09	-0.6848	±0.4095	长期	0.0997
			4	1984-01~06 1987-10~1988-09 1989-07~09	-0.5432 -0.4545 -0.5759	±0.3367	长中期	0.0674
		应变场	1	1987-08~1988-04	-3.8884	±0.8712	中长期	0.4070
			2	1987-09~1988-06	3.5326	±0.6988	中长期	0.2618
			3	1989-04~06	-3.6195	±0.5837	中期	0.1827
			4	1987-03~5	2.0295	±0.3644	中长期	0.0712
4	1990 年 6 月 14 日新疆 吉木乃 7.2	频次场	1	1987-07~09 1989-04~1990-03	1.5919 2.2373	±0.6678	长中短	0.3330
			2	1988-01~03 1988-07~12	0.8137 -1.7110	±0.5415	中长期	0.2190
			3	1988-07~12 1989-10~12	1.0586 0.7609	±0.4669	中长期	0.1628
			4	1986-10~1987-06 1988-10~12	-0.7909	±0.3939	中长期	0.1158
		应变场	1	1989-09~11	1.9896	0.3277	中短期	0.3670
			2	1989-07~9	1.9925	0.2913	中短期	0.2900
			3	1990-02~04	1.0846	1.0846	短临	0.1031
			4	×	×	×	×	×
5	1995 年 7 月 12 日中缅 交界 7.3	频次场	1	1986-01~09 1991-01~06	2.9845 4.5031	±1.7095	中长期	0.4860
			2	1985-07~1986-09 1995-04~07	-5.0412 -2.0745	±1.4093	长中短临	0.3303
			3	1994-04~06 1995-01~06	3.1704 2.1671	±0.8157	中短临	0.1106
			4	1985-07~09	-2.4894	±0.6325	长期	0.0665
		应变场	1	1995-02~04	17.4633	±2.9453	中短临	0.4366
			2	1993-04~06	-11.5929	±2.0308	短临	0.2076
			3	1993-11~1994-10	-7.4821	±1.3083	中期	0.0861
			4	1993-09~1994-11	-6.8692	±1.2641	中期	0.0804
6	1996 年 2 月 3 日云南丽江 7.0	频次场	1	1994-04~12	-8.6238	±2.1387	中期	0.6057
			2	1986-01~03 1993-07~09	3.6841 2.9939	±1.3282	中长期	0.2336
			3	1992-10~1993-06	-2.6703	±0.9196	中期	0.1120
			4	1987-10~12 1993-10~12	1.6602 1.6085	±0.6069	中长期	0.0488
		应变场	1	1993-03~05	3.6293	±0.5641	长期	0.4210
			2	1993-01~1995-06	1.4570	±0.3597	中短临	0.1712
			3	1993-01~1994-02	1.3167	±0.3154	中长期	0.1316
			4	1992-11~1993-02	0.5076	±0.2164	长期	0.0620

续表

7	2008年5月12 日四川汶川 8.0	频次场	1	2004-10~12 2006-10~12	5.2214 3.4450	±1.5061	中长期	0.2831
			2	2004-07~09 2005-07~12	-3.1590 -2.5542	±1.2820	中长期	0.1834
			3	2004-10~2005-09	-1.7189	±1.0639	中长期	0.1263
			4	2008-01~04	-2.7228	±1.0049	短临	0.1127
		应变场	1	2006-05~07	-14.1671	±2.0315	中期	0.4986
			2	2005-01~2007-01	-8.6209	±1.1660	中长期	0.1643
			3	2008-02~04	6.4793	±1.0013	短临	0.1211
			4	2007-04~06	1.5711	±0.7851	中期	0.0745
8	2010年4月14 日青海玉树 7.1	频次场	1	2004-01~06 2008-07~12	-3.2832 1.1713	±0.6283	中长期	0.2312
			2	2003-10~2004-06 2008-04~12	1.8723 1.5190	±0.5743	中长期	0.1932
			3	2009-04~09	1.7919	±0.5274	中期	0.1629
			4	2008-03~2009-09	-1.2653	±0.4581	中期	0.1229
		应变场	1	2006-05~07	-14.4247	±1.8734	长期	0.6577
			2	2010-02~04	9.7744	±0.7497	短临	0.1052
			3	2010-01~03	1.3678	±0.7002	短期	0.0919
			4	2010-01~03	0.4226	±0.6289	短期	0.0741
9	2013年4月20 日四川芦山 7.0	频次场	1	2011-07~2013-03	8.8316	±2.2932	中短临	0.3834
			2	2012-07~2013-03	3.4351	±1.6273	中短临	0.1931
			3	2012-01~2013-03	-4.4865	±1.3211	中短临	0.1273
			4	2006-07~2007-12	2.9353	±1.1612	长期	0.0983
		应变场	1	2013-02~03	11.7708	±1.3844	短临	0.4441
			2	2012-01~03	-7.6751	±1.2888	中期	0.3849
			3	2012-10~12	-3.1351	±0.4654	中期	0.0502
			4	2012-02~09	2.0213	±0.4085	中期	0.0387
10	2017年8月8 日四川九寨沟 7.0	频次场	1	2013-07~12	-5.4744	±2.0748	中期	0.5345
			2	2017-04~06	-1.3303	±1.0916	短临	0.1479
			3	2015-07~12	-1.4614	±0.9182	中期	0.1047
			4	2014-04~06 2016-01~03	-1.7373 1.8994	±0.7013	中期	0.0611
		应变场	1	2006-04~06	-1.4225	±1.7266	长期	0.3906
			2	2015-10~12	-2.5068	±0.4107	中期	0.1766
			3	2013-05~11	-2.5522	±0.3883	长期	0.1579
			4	2005-05~2006-04	-0.5682	±0.2222	长期	0.0647

注：“×”表示无异常或异常不明显。



注: (A)~(T)分别为1980~2020年中国大陆10次7级以上地震频次场和应变场对比图。

Figure 3. Time factor comparison diagram of frequency field and strain field

图 3. 频次场与应变场的时间因子对比图

4. 讨论和结论

4.1. 计算起算震级讨论

本文应用中国地震台网中心提供的全国正式地震目录, 计算1980~2020年中国大陆10次7级以上地震的应变场和频次场, 地震分布在新疆、青海、四川和云南, 因此涉及地震台网的监测能力主要是四个省级行政区。本文着重计算10次7级以上地震震中周围 $3.0^{\circ} \times 3.0^{\circ}$ 范围的最小完整震级, 采用G-R关系曲线方法。四川省和云南省地震台网较密集, 监测能力较高, 1980~2020年 $M_L 2.5$ 以上地震较完整; 而青海省和新疆维吾尔自治区地震监测相对较低, 1980~2020年有 $M_L 2.6$ 以上地震, 也有 $M_L 2.7$ 以上地震完整。因此本文计算10次7级以上地震最终采用统一起算震级为 $M_L 2.7$; 另外地震应变场方法主要受4~5级地震影响, 起算震级 $M_L 2.7$ 基本不影响; 地震频次场对起算震级影响较大, 但本文用统一的最小完整震级 $M_L 2.7$ 为起算震级, 消除10次7级以上地震震例间的起算震级的影响。

4.2. 网格单元划分差异

在地震应变场自然正交展开计算时, 最优方法是采取 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的方形网格单元化[2], 但在地震频次场计算时最优方法按照 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 的方形网格划分[9], 两者网格的划分标准差异, 主要是为了避免出现两个问题, 第一, 自然正交函数展开收敛非常慢, 提取出研究区域主要应变场和频次场要控制在前4个场中, 并确保4个场占总场的精度70%以上, 精度控制不能低; 第二, 网格划分过密, 导致应变场或频次场分布平均化, 不能突出主要场的异常特征; 更不能反映区域地震活动场分布特征; 同理, 网格过于稀疏(如 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 的网格), 提取出研究区异常集中在前1~2场, 且受高值异常影响, 低值异常淹没在背景场, 失去自然正交函数方法分解出多分量异常优越性。因此经过多次试算, 最优频次场采取 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 的网格[8] [9]和应变场 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的方形单元化[10]提出的前4个场既能满足计算精度, 也能满足前4个主要场具有多分量异常特征。

以2008年汶川地震为例, 区域按照 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 单元分别计算地震应变场和频次场, 前4个应变场占总场的拟合精度85.58% (表1), 已满足本文大于70%精度; 而前4个地震频次场的拟合精度为45%, 前8个地震频次场的拟合精度为68%, 前9个地震频次场的拟合精度为72%, 才满足大于本文70%精度。如果区域按照 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 单元分别计算地震频次场, 前4个地震频次场的拟合精度为70.55%, 满足本文70%以上精度。事实上, 地震频次与地震应变在网格划分上往往不一致, 地震频次场在自然正交函数展开上收敛速度相较应变场要慢, 计算网格过小会使频次的空间差异变小, 拟合精度降低, 适当增大划分网格单元既能提高拟合精度, 又能集中在几个主要频次场。

4.3. 应变场和频次场影响因素

地震频次场时间因子变化比较敏感, 曲线起伏较大, 异常变化形态复杂多样, 表现为上升、下降、上下波动等多种变化类型; 分析其原因, 频次场时间因子受区域内小震数量影响, 例如不论1次 $M_L 2.7$ 级地震还是1次 $M_L 5.3$ 级地震, 对频次场的贡献是相同; 而地震应变场曲线比较规整, 受干扰少, 异常形态突出, 主要原因是受中等地震能量值(或应变值)影响, 震级相差1级, 能量值相差约33倍, 因此1次 $M_L 2.7$ 级地震的能量值与1次 $M_L 5.3$ 级地震能量值相差巨大, 通常能量值大的时间段变化幅度会掩盖应变值小的时间段。但频次场与应变场相比, 更能突出研究区域重叠中每次7级以上大震前时间因子异常特征, 而应变场有时掩盖这样异常特征变化。

由于地震频次主要受小震级地震的影响, 而地震应变(能量)主要受中等地震的影响, 因此统计不同时空范围, 计算频次场的地震样本量不同, 时间因子曲线会略有不同; 但应变场时间因子形态通常随时空范围的变化, 差异较小或者基本不变。

4.4. 结论

本文综合研究和对比分析1980~2020年中国大陆10次7级以上地震前的频次场和应变场时间因子异常得出如下结论:

(1) 地震频次场和应变场的时间因子在大震前, 出现平稳背景上出现突跳上升或突跳下降异常变化, 异常具有多分量的特点。大震前地震异常主要集中在频次场和应变场的前4个场, 前4个场占总场的比例通常在70%以上。

(2) 频次场时间因子变化比较敏感, 曲线起伏较大, 异常变化形态复杂多样, 表现为上升、下降、高值上下波动、先升后降、先降后升等多种变化类型。地震应变场时间因子受干扰因素较少, 曲线比较规整, 异常变化超过均方差较显著, 可以看出显著突升、突降的异常变化。

(3) 由于地震频次主要受小震级地震的影响, 而地震应变场(能量场)主要受中等地震的影响, 统计区网格越小将使得频次的空间差异变小, 不利于突出场的变率差别, 因此分析地震频次场时的网格划分往往大于地震应变场。

在10年前自然正交函数分解地震能量场或者应变场的方法, 已经应用在判定全国年度重点危险区强震发震的紧迫性, 有取得成功的实例, 也有失败的实例。如研究2012年度甘东南至陕甘宁交界强震危险区[11], 指出甘东南发生强震较紧迫, 事实上2013年7月22日在危险区内发生岷县漳县6.6级地震, 为取得成功的实例。但研究2011年度滇西北至滇南强震危险区[12]的紧迫性, 指出滇南存在强震紧迫, 只在边境外发生2011年3月24日缅甸7.2级地震, 为失败的实例。通过上述2个实例表明能量场或者应变场方法在时间上判定强震仍有缺陷, 还需进一步改进, 提高预测效能。

基金项目

本文研究受宁夏自然科学基金项目“基于地震应变场方法对宁夏中强地震的预测研究”(2024AAC03437)资助。

参考文献

- [1] 马开玉, 丁裕国, 屠其. 气候统计原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [2] 杨明芝, 马禾青, 罗国富, 等. 中国大陆 6 级以上强震前的地震应变场研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3804-3814.
- [3] 罗国富, 柳忠旺, 丁凤和, 等. 2017 年四川九寨沟 7.0 级地震前应变场分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1322-1330.
- [4] 罗国富, 屠泓为, 丁凤和. 大震前区域地震活动应变场的时空异常特征[J]. 地震, 2019, 39(2): 63-76.
- [5] 张喆, 许力生, 杜海林. 2018 年斐济 $M_w8.2$ 深震: 高频辐射过程和发生的原因[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4279-4289.
- [6] 李艳娥, 陈丽娟, 程学忠. 2013 年芦山地震和 2014 年鲁甸地震前巧家台阵观测到的地震活动增强现象[J]. 地震, 2017, 37(3): 95-106.
- [7] 冯建刚, 周龙泉, 杨立明. 等. 青藏块体东北缘中强地震前小震频度异常研究[J]. 地震, 2009, 29(3): 19-26.
- [8] 马禾青, 杨明芝, 罗国富. 地震活动频次场研究[J]. 地震, 2020, 40(3): 99-111.
- [9] 杨明芝, 赵为明. 宁夏及邻区地震活动能量场的时空分布特征[J]. 地震学报, 2004, 26(5): 516-522.
- [10] 罗国富, 屠泓为, 丁凤和, 等. 中国大陆 7 级以上地震频次场时空异常特征[J]. 地震, 2022, 42(1): 181-196.
- [11] 罗国富, 屠泓为, 马禾青, 等. 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[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 132-137.
- [12] 罗国富, 屠泓为, 马禾青, 等. 滇西北至滇南强震危险区地震活动能量场分析[J]. 地震研究, 2011, 34(4): 435-441, 565.