

# 多方法联合分析未来地震发生趋势

余怀忠, 程佳, 张小涛, 刘杰, 李纲, 张永仙

(中国地震台网中心, 北京 100045)

**摘要:**综合多种前兆方法分析地震活动规律,研究目标地区未来地震发生的趋势。首先采用图像信息法(PI)进行扫描,从长期尺度上找出研究区域内地震活动异常的地区,并结合相关的活动断裂分布及区域地震活动确定未来地震的发震危险区;然后采用加卸载响应比(LURR)、态矢量(SV)、矩张量加速释放(AMR)等中短期前兆方法分析这些区域的地震发生可能,并对地震发生的相关信息做进一步估算;在空间上实现向地震危险区域的逐渐逼近,时间上实现从长期预测到中短期预测的自然过渡。作为回顾性震例研究,我们对近 3 年来发生在中国西部的强震( $M_L > 6.5$ )进行了检验,结果表明,相对于单一算法而言,将不同前兆方法适当组合结合能够更为明确地为未来地震危险性评估提供信息和约束。

**关键词:**地震趋势; 图像信息; 加卸载响应比; 态矢量; 矩张量加速释放; 地震前兆

**中图分类号:** P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2012)01-0001-09

## Multi-method Linked to Study Future Seismic Tendency

YU Huai-zhong, CHENG Jia, ZHANG Xiao-tao,

ZHANG Lang-ping, LIU Jie, ZHANG Yong-xian

(China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China)

**Abstract:** Several earthquake precursory methods are combined to investigate the future large earthquake potential in the research region. First the Pattern Informatics (PI) method is used to quantify localized changes surrounding the epicenters of large earthquakes and to objectively quantify the anomalous areas (hot spots) of the upcoming events. Then the seismogenic regions of the ensuing large events are delineated by integrating with associated active fault zones. Finally, the earthquake potential in the region is evaluated using 3 other short-to-intermediate-term earthquake prediction methods (Load Unload Response Ratio, State Vector, and Accelerate Moment Release). In the spatial scale the approach can achieve the gradual approximation to the seismogenic zones; while in the temporal scale, the approach can achieve the natural transition from the long term to the short-to-intermediate-term earthquake forecast. As a retrospective study, the large earthquakes ( $M_L > 6.5$ ) occurred in western China in last 3 years are examined. The results may suggest that, rather than a single precursory method, the multi-methods combined approach can be a useful tool to provide stronger constraints on forecasts of future large events.

**Key words:** Earthquake potential; Pattern Informatics(PI); Load/Unload Response Ratio(LURR); State Vector(SV); Accelerate Moment Release(AMR); Earthquake precursor

收稿日期: 2010-12-24

基金项目: 国际科技合作计划(2010DFB20190); 国家自然科学基金(40704007)

作者简介: 余怀忠(1975-), 男(汉族), 安徽合肥人, 副研, 主要从事地震预测理论与前兆方法研究。

## 0 引言

灾害性地震一般发生在上地壳内的薄弱带即断层上,是在长期构造加载作用下地壳介质发生变形、失稳、破裂的结果<sup>[1-3]</sup>。地震发生的物理成因虽然早已认识,地震预报却始终是世界性难题,原因在于灾害性地震通常发生在地壳内数公里至数十公里深处,与地震孕育过程相关的介质性质、力学状态和动态演化均很难观测到,难以掌握其规律用于地震预报。地震的发生通常包含了构造应力加载、准静态成核,动态破裂,应力重新分布、及断层强度再恢复等不同阶段。然而由地震观测所得到的资料,诸如地震的空间分布和时间变化等,究竟能在多大程度上为地震预报提供约束?事实上地震能否被预报还尚未达成地震学界的共识,这在很大程度上与“地震的物理可预报性”有关。Ben-Zion 等人提出<sup>[4-5]</sup>,从演化特征来看地震属于一种“间歇性临界现象”,因此地震具有可预报性。Main 等人更进一步认为统计物理学的一些概念可以被用来判断地震系统是否接近“临界状态”<sup>[6-8]</sup>。Keilis-Borok 研究也发现,通过对地震序列进行统计分析,可以提取出强地震发生的前兆信息<sup>[9-12]</sup>。无论研究结果如何,可以肯定的是,地震作为一种临界现象(CP)或“类临界现象”(CP-like)是近年来关于地震孕育及发生过程的重要发现之一<sup>[13-15]</sup>,与其相关的前兆研究为地震物理预报提供了重要参考。

在地震预测研究中一个比较复杂的问题是如何恰当地选择地震前兆模型,模型不同常常在很大程度上影响了预报的结果。近年来,国际上将现代统计物理的理论和应用于地震和地震预测问题的研究取得长足进展,已成为物理学和地震学之间的一个活跃的交叉领域。对于一个地震活动强烈的地区,通常一系列规模不等、力学性质不同的活动断裂带强烈构造活动,使得地震活动存在明显的不均匀性,复发过程不具有良好的准周期性,也不存在“强度可预报性”或“时间可预报性”模型所预期的性质。如何恰当选择地震危险区域,直接制约了各种模型的分析结果。Rundle 等<sup>[16-19]</sup>把统计物理方法应用于地震活动性图像的分析,并宣称可以对加州的地震做出比较好的预测。他们尝试使用综合考虑地震活动“增强”与“平静”的地震活动图像算法,针对各种活动构造区域进行中长期地震危险性概率估算。围绕这一问题还有研究者<sup>[14,20-21]</sup>提出可以根据震前地震断层间相互作用的库仑应力触发关系,确定地

震临界区域,看来比较好地解决了统计区域的选择问题。然而,这些方法尽管在一定程度上能够确定大地震发生前的区域应力及地震活动性演化,但是还不足以分辨其中短期变化信息,因而难以直接应用于中短期地震危险性评估。

在目前尚无一个简单统一且时间相关的地震预测模型的情况下,可以尝试将多种前兆模型联合应用于地震预测研究。从而在空间上可以实现向地震危险区域的逐渐逼近,在时间上实现从长期预测到中短期预测的自然过渡。如果这一方案切实可行并能够在地震预测实践中有效的应用,极有可能为提高地震预测能力开辟一条新路。关于此, Yin 等<sup>[22-23]</sup>曾指出,诸如加卸载响应比、加速能量释放、态矢量等模型,在空间区域及时间区域的选择上存在明显的一致性,为将不同模型联合用于地震预测提供了有力的物理参考和依据。但是,各种前兆方法的不足无疑是存在的,如何切实解决各方法在时空尺度上的耦合关系,充分发挥各方法的长处,实现优势互补,还有待实践研究。本文尝试将4种不同的地震前兆方法相结合,分析地震活动演化规律,研究未来地震发生的趋势。为了验证算法的有效性,我们以近3年来发生在中国西部的强震为例进行回顾性预测检验。

## 1 算法与计算模型

迄今为止我们已经初步建立了多种前兆方法联合分析地震危险性的算法,并完成了一些前期研究工作。

### 1.1 图像信息法(PI)

首先采用图像信息法(Pattern Informatics)对目标区域进行扫描,找出地震活动异常的地区。

PI方法是Rundle等<sup>[16-18]</sup>基于统计物理学思想提出可以根据地震活动性的图像信息(PI)构建地震预测模型。模型的基本原理是把研究区域进行网格划分,对每个网格内的地震活动构建其强度时间序列,通过对每个网格多时间尺度地震活动强度异常变化的提取和所有网格间地震活动强度变化的归一化处理,计算每个网格里显著地震事件发生的概率,再减去背景概率,检测发震概率高的网格(即地震热点)。Tiampo等<sup>[19]</sup>对PI方法进行了数学定义,并且对其计算过程给予了较合理地解释。他们研究发现PI方法的地震预测效果要比相对强度法(该方法认为过去一定时间段内发震次数多的地方将来更有可能发生地震)和随机预测的预测效果更优越。

Rundle 和 Tiampo 等<sup>[17,19]</sup>利用 PI 方法对南加州地区(32° 38.3'N, 115° 123'W)2000 年 1 月至 2009 年 12 月期间发生 5 级以上地震的可能性进行了“预测”,期间南加州共发生 27 次 5 级以上地震,其中 25 次发生在距“地震热点(即:危险区,以下同)”11 km 的范围内。Holliday 等<sup>[24]</sup>对该方法的计算过程进行了系统的分析,并对全球 7 级以上地震进行了研究。

PI 具体实现过程如下:

(1) 把研究区域进行网格化,将其划分为  $N_b$  个边长为  $\Delta x$  的网格。对每个网格创建一个时间序列  $N_i(t)$ ,即第  $i$  个网格单位时间发生的震级大于震级下限  $M_c$  的地震数量。

(2) 计算地震强度函数  $I_i(t_b, t)$ :在两个时刻  $t_b$  和  $t$  之间(定义三个时间段如图 1),地震强度函数  $I_i(t_b, t)$  定义为:从  $t_b$  到  $t$  的单位时间内发生在网格  $i$  中震级大于  $M_c$  的平均地震数目。其表达式为

$$I_i(t_b, t) = \frac{1}{t - t_b} \sum_{t=t_b}^t N_i(t) \quad (1)$$

其中:  $t_b \sim t$  为参考时间段;  $t_1 \sim t_2$  变化时间段;  $t_2 \sim t_3$  为预测时间段;  $t_0$  为研究资料的起始时刻;  $t_b$  以  $\Delta t$  为步长从  $t_0$  时刻向  $t_1$  时刻滑动,通常  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。

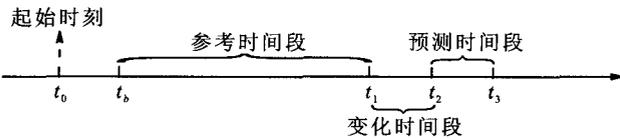


图 1 PI 方法所选时段划分

Fig. 1 Schematic diagram of time intervals of PI.

(3) 将地震强度函数  $I_i(t_b, t)$  标准化:为了对不同时段的地震强度函数进行比较,需要这些地震强度函数具有相同的统计属性。因此对地震活动强度函数进行标准化处理:

$$\hat{I}_i(t_b, t) = \frac{I_i(t_b, t) - \langle I_i(t_b, t) \rangle}{\sigma(t_b, t)} \quad (2)$$

其中  $\langle I_i(t_b, t) \rangle$  为所有网格在  $t$  时刻地震活动强度函数的平均值;  $\sigma(t_b, t)$  是所有网格在  $t$  时刻地震活动强度函数的标准偏离。

(4) 判断地震活动是否异常:利用标准化强度函数之差来判断网格  $i$  内的地震活动是否异常:

$$\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2) = \hat{I}_i(t_b, t_2) - \hat{I}_i(t_b, t_1) \quad (3)$$

(5) 计算  $\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2)$  的平均变化:为了减少地震活动随机波动(噪声)的影响,需要计算所有标准化地震强度函数的平均变化:

$$\overline{\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2)} = \frac{1}{t_1 - t_b} \sum_{t=t_b}^{t_1} \Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2) \quad (4)$$

(6) 求发震的概率函数:定义未来地震发生在第  $i$  个网格内的概率函数为  $P_i(t_0, t_1, t_2)$ ,即地震强度函数平均变化的平方:

$$P_i(t_0, t_1, t_2) = \overline{\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2)}^2 \quad (5)$$

(7) 求概率增益:强地震发生在第  $i$  个网格内的概率增益为该网格的概率值减去所有网格概率的平均值:

$$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) = P_i(t_0, t_1, t_2) - \langle P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle \quad (6)$$

其中,  $\langle \Delta P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle$  为所有网格发震概率的平均值。

$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) > 0$  的网格(地区)命名为热点(危险区),并假设在  $t_2$  到  $t_3$  的时间段内热点区将发生  $M_i (M_i \geq M_c + 2)$  以上的地震(这里称之为“目标地震”)。很明显阈值的大小将最终决定预测热点数的多少,通常这个下限的选取是根据实际需求或回溯性检验得到的最佳结果来确定。根据 PI 方法扫描的地震热点,结合活动断裂分布、区域地震活动及各个地区的应力场状态、震群分布特征等,确定出可能的发震危险区。

## 1.2 中短期预测方法

在以 PI 方法确定了可能发震危险区基础上,采用加卸载响应比(Load Unload Response Ratio)、态矢量(State Vector)逐个分析这些危险区域内的地震发生可能。

### 1.2.1 加卸载响应比(LURR)

加卸载响应比是近年来关于震源区地壳介质破坏演化规律性认识的重要发现<sup>[22-23,25-27]</sup>,其基本思路借鉴了系统论的方法,通过系统与外部的联系来了解系统的性态。简而言之,即研究系统的输入信号与输出信号之间的关系,或者说研究系统对输入信号的响应,达到了解系统性态的目的。在过去的 20 年中,加卸载响应比方法的研究已经取得了很大发展,并被广泛应用于地震中短期预测实践<sup>[28-37]</sup>。研究发现在大地震发生之前数月至数年间,加卸载响应比时间序列通常会发生明显的异常增加<sup>[25-26]</sup>,这一现象可以被用作地震发生的重要前兆规律<sup>[26-27,38]</sup>。

在地震预测实践时,一定时间窗和空间窗内释放的地震能量通常被作为响应量。加载和卸载过程可根据日月潮汐力在地震破裂面上引起的库仑破坏应力  $\Delta CFS$  进行判断<sup>[39-40]</sup>,  $\Delta CFS > 0$  为加载,

$\Delta CFS < 0$  则为卸载。这样,加卸载响应比可以定义为加载阶段和卸载阶段能量释放之比:

$$Y_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N+} E_i^m\right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N-} E_i^m\right)_-} \quad (7)$$

这里  $E_i$  表示第  $i$  个小地震所释放的能量;  $m = 0, 1/2$ , 或  $1$ 。当  $m = 0$  时,  $E^m$  就是地震事件数;而当  $m = 1/2$  时,  $E^m$  表示 Benioff 应变。为了避免地震数目太少造成加卸载响应比时间序列的强烈波动,计算时间窗内通常包含了多个加、卸载循环过程。当孕震区介质处于稳定状态时, LURR 在 1 附近波动,而当地震迫近时, LURR 远大于 1。

### 1.2.2 态矢量(SV)

态矢量是尹祥础和余怀忠<sup>[41-42]</sup>提出的一种地震预测新方法,是一种对连续场粗粒化描述的方法。在地震研究中应用态矢量方法涉及地震临界区域及子区域大小的确定,结合地震输入资料确定合适的参数,根据不同参数时间序列了解态矢量的变化,进而分析孕震区介质的状态变化等几个方面的问题。按照态矢量的定义,可以将连续物理场  $V$  划分成  $n$  个子区域。如果将每个子区域在一段时间  $T$  内的物理量  $V_i(t_k)$  (包括损伤、能量释放等,  $i = 1, 2 \dots n$ ) 看作一个  $n$  维矢量的分量,这个  $n$  维矢量就定义为态矢量,记作  $V_k$ 。很明显,态矢量  $V_k$  描述了物理场在  $t_k$  时段的状态(空间分布),通过对不同时刻的态矢量时间序列加以分析,就能描绘出该物理场的损伤演化情况。为了直观反映态矢量的时空演化特征,我们定义了 4 个相关的参数,它们是:

态矢量的模:

$$M = |V_k| \quad (8)$$

相邻两时刻态矢量的转角:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{V_{k+1} \cdot V_k}{|V_{k+1}| |V_k|}\right) \quad (9)$$

态矢量的增量的模:

$$\Delta M = |V_{k+1} - V_k| \quad (10)$$

矢量与均等矢量  $V_e$  的夹角:

$$\varphi_c = \arccos\left(\frac{V_e \cdot V_k}{|V_e| |V_k|}\right) \quad (11)$$

这里,均等矢量是指各个分量都相等的矢量。

当孕震区介质处于稳定状态时,态矢量变化相对平稳,而在大地震发生之前,会发生明显的异常变化,相应的 4 个相关参量时间序列会急剧增加。目前利用这一方法已经对中国大陆、美国南加州的大量震例以及工程实践进行了研究<sup>[43-47]</sup>,通常在大的

地震或者工程灾变发生之前数月至数年,态矢量时间序列会出现明显的异常高值。

### 1.2.3 矩张量加速释放模型(AMR)

近年来一系列研究表明通常在大地震发生之前地震活动性会出现明显的变化<sup>[48]</sup>, Bufe 和 Varner<sup>[49]</sup> 提出一个从损伤力学模型得到的简单的幂率时间-破裂模型可以被用来描述这种震前地震活动性变化,他们的研究发现 1989 年美国加州  $M = 7.0$  Loma Prieta 地震发生前的地震活动可以用下式的幂率关系拟合:

$$\epsilon_p(t) = A + B(t_c - t)^z \quad (12)$$

其中,  $t_c$  表示地震发生的时间;  $z$  大约为 0.3。能量释放积累过程可以表示为

$$\epsilon(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} E_i(t) \quad (13)$$

式中,  $E_i$  表示第  $i$  个地震事件的能量释放,  $N(t)$  为  $t$  时刻的地震事件数。

震前能量幂率加速释放的这一规律, Sammis 和 Smith<sup>[13]</sup> 在研究地壳状态的间歇性临界状态时也有过类似的发现。按照这一假设大地震可以被看作是一种临界现象,地壳并不一直处于临界状态,当一次大地震发生之后,该地区的地壳将远离临界状态,然后,随着构造应力的逐步增加,地壳介质的相关尺度逐渐增大,该地区的地壳又逐步趋向临界点,而最终地壳介质的相关尺度大小势必与地震发生的震级密切相关。

## 2 震例应用

运用多方法联合模式我们对我国西部地区 ( $20 \sim 50^\circ N, 70 \sim 110^\circ E$ ) 2007 年 1 月 1 日至 2010 年 1 月 1 日的  $M_L > 6.5$  地震进行了回溯性研究。这一地区拥有一系列规模不等、力学性质不同的活动断裂带,构造背景复杂,地震活动多样,因此对这一地区近年来发生的强震作回顾性研究,更具有借鉴意义。地震数据来源于中国地震台网中心 1970 年 1 月—2009 年 12 月的“中国地震月报目录”( <https://baseapnet.seis.ac.cn;8443> ), 目录根据各区域地震台网测定资料汇编而成,震级单位统一为地方震震级  $M_L$ 。

首先,针对选择的研究区域使用 PI 方法进行扫描,找出地震活动出现异常的地区。根据目标震级 ( $M_L > 6.5$ ) 大小,我们取地震的震级下限:  $M_c = 4.5$  (在 PI 算法中,通常要求截止震级至少小于预测“目标震级”两个震级)。取 2007 年 1 月 1 日至

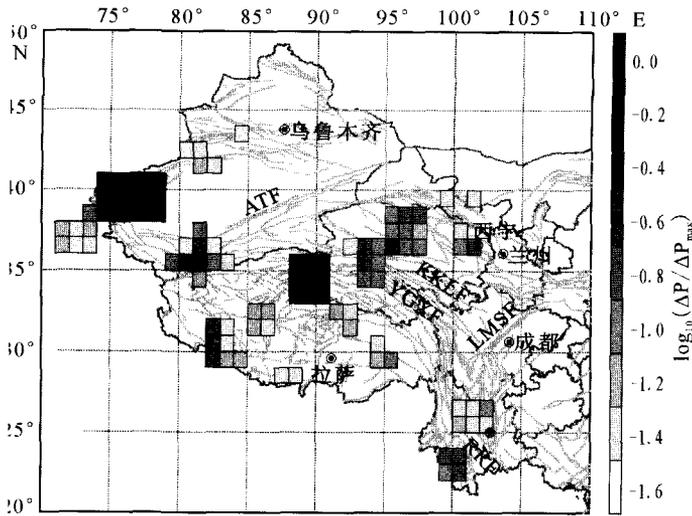


图 2 我国西部地区(20°~50°N,70°~110°E)预测时段内的 PI 扫描结果(带颜色的网格为利用 PI 方法计算得到的热点(即危险区))

Fig. 2 The hotspots detected by the PI method in western China (20°~50°N,70°~110°E) from 2007-01-01 to 2010-01-01.

2010 年 1 月 1 日作为回溯性研究的预测时段,相应的选取相同时间长度的地震活动“异常学习时段”为 2004 年 1 月 1 日—2007 年 1 月 1 日,目录起始时刻  $t_0$  为 1985 年 1 月 1 日,即相对于“预测时段”起始时刻 22 年,选择的时间滑动步长  $\Delta t=30$  天,对应的 PI 扫描结果如图 2 所示。根据目标震级大小及区域内地震定位精度选择网格大小为  $\Delta x=1.0^\circ$ 。计算中,对所有网格间地震活动强度变化进行归一化处理,在  $[0, 1]$  之间给定发出地震“警报”的门限阈值。反映研究区域在预测时段内空间上的相对危险程度的 PI 图像,以对数形式表现出来,即用  $\log_{10}(\Delta P/\Delta P_{\max})$  的数值表示在地图上, $\Delta P$  为对应网格内的发震概率, $\Delta P_{\max}$  为所有网格发震概率的最大值,发震概率较高的网格认为是危险区(地震热点)。

然后,根据 PI 方法的扫描结果,结合中国大陆现代活动断裂带分布<sup>[50]</sup>,及各个地区的应力场状态、孕震环境,确定出预测时段内中国西部的地震危险区域。如图 3 所示,共 11 处。

地震危险区确定以后,进一步采用加卸载响应比、态矢量方法逐个分析这些危险区域内的地震发生趋势,对这些地区的中短期发震可能进行评估。加卸载响应比采用预测区域内的 Benioff 应变作为响应量,为了保持计算的一致性,所有计算区域选择的小震震级范围为 0~4.5,选择的时段为 2000 年 1 月 1 日至 2010 年 1 月 1 日,计算时间窗为 1 年,滑

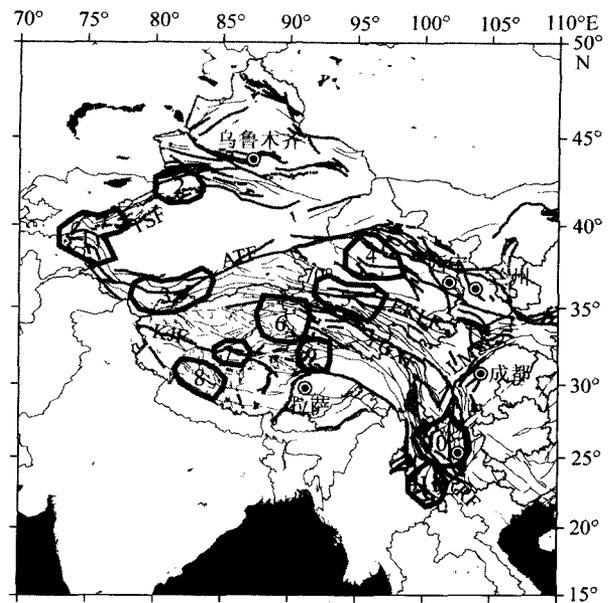


图 3 由图 2 所示的 PI 扫描结果确定的中国西部地区在预测时段内的地震危险区

Fig. 3 The seismic risk regions in western China within the forecast period determined by the hotspots shown in Fig. 2.

动时间窗为 1 个月。

图 4 是图 3 所示的危险区 1 的加卸载响应比时间序列(a)和态矢量时间序列((b)~(e))及 2008 年乌恰  $M_L 7.1$  地震前 Benioff 应变的释放过程和拟合曲线(f)。从图中可以明显看到加卸载响应比值在 2008 年初达到峰值,这一峰值与 2008 年 10 月 5 日发生的  $M_L 7.1$  地震相对应。图 4(b)~(e)则给出了采用该区域内的地震事件计算的 4 个态矢量时间序列,态矢量的相关参量采用预测区域内的地震震级计算,子区域大小选择为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,选择的小震震级范围为 0~4.5。从图中可以看到在 2008 年初,态矢量的 4 个参量  $M$ 、 $\Delta M$ 、 $\varphi$  和  $\varphi_c$  得到的时间序列都发生了明显的异常变化,这些异常变化与随后发生的  $M_L 7.1$  事件相一致。最后,我们利用加速释放模型对地震发生的时间作进一步的估算和检验。在本研究中, $\alpha$  统一取值为 0.3。这里还是以区域 1 为例,取震级下限 4.5 级,其对应地震震前的 Benioff 应变释放过程及拟合预测结果如图 4(f)。

类似地,我们对其他 10 个地震危险区进行了分析,除了断层参数由各地区区域构造确定以外,其他基本物理参数保持不变。发现类似于区域 1,区域 3,4,7,8,11 在地震发生之前都存在较为明显的中短期前兆特征;区域 6 观测到了异常,但没有强震发

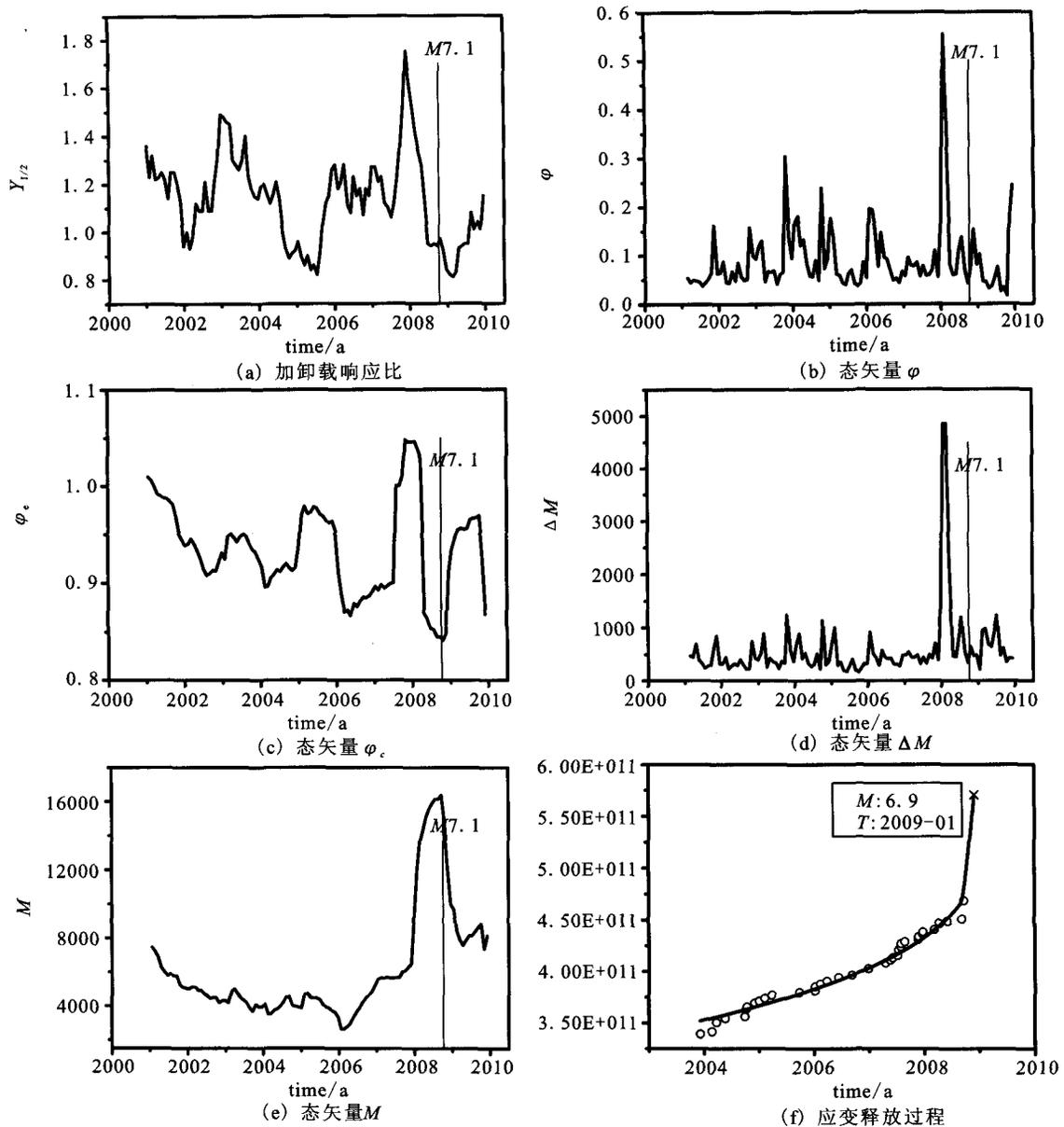


图4 图3所示1区在预测时段内的加卸载响应比(a)和态矢量(b~e)时间序列,及(f)  $M_L 7.1$ 地震前 Benioff 应变释放过程及拟合结果('X'为该地震的预测结果)

Fig. 4 Time series of LURR (a) and state vector (b~e) with the critical region of area 1 as shown in Fig. 3 (f) is cumulative Benioff strain before the  $M_L 7.1$  earthquake and its fit of the data to the power-law time-to-failure equation. ('X' indicate the prediction of the earthquake).

生;而区域2,5,9,10则没有观测到任何异常发生。综合分析得到地震危险区域如图5所示,对应的发震情况统计见表1。

### 3 讨论和结论

通常在地震发生之前,区域地震活动会发生一定的变化。PI方法从平静和活跃两个方面分析地震活动相对于长期背景场的变化,这与强震发生前

区域地震活动性相一致,因而能较为准确地把握地震发生位置及区域范围。但是这一方法也存在明显的不足,主要包括2个方面,(1)预测的时间尺度太长,难以应用于中短期预测研究;(2)存在一定的误报率,有的区域虽然从PI的角度观测到异常,但未必就一定是地震发生的前兆信息,如图3所示,PI扫描的结果共有11处地震活动异常区域,而实际发生地震的只有6处。在这种情况下,我们尝试把PI

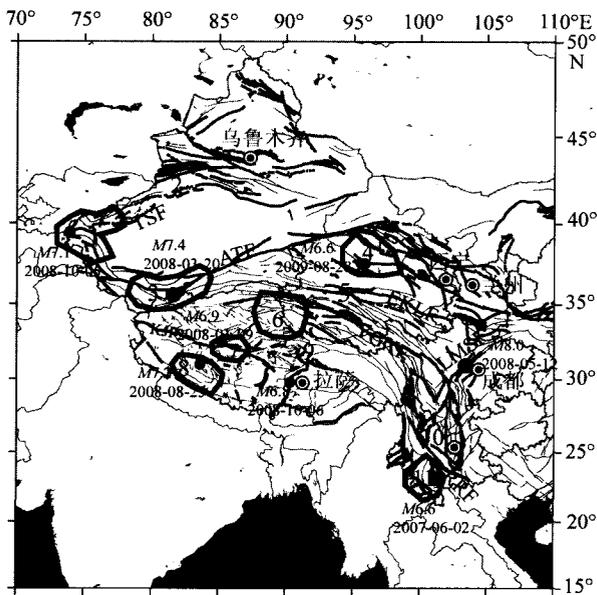


图5 多方法联合确定的2007年1月1日至2010年1月1日中国西部地区的地震危险区域(黑圆点为期间实际发生的 $M_L > 6.5$ 地震)

Fig. 5 The seismic risk regions from 2007-01-01 to 2010-01-01 in western China detected by the multi-approach (dots are the  $M > 6.5$  earthquakes occurred during the forecast period).

表1 2007年1月1日至2010年1月1日中国西部地区强震发生的多方法联合检验结果统计(—表示未能对地震做出预测(漏报),///表示实际没有强震发生(虚报))

序号	地震名称	时间	震级/ $M_L$	$t_c/a$
1	云南宁洱	2007-06-03	6.6	2007.2
2	西藏改则	2008-01-09	6.9	2008.6
3	新疆于田	2008-03-21	7.4	2008.8
4	汶川地震	2008-05-12	$M8.0$	—
5	西藏仲巴	2008-08-25	7.2	2008.3
6	新疆乌恰	2008-10-05	7.1	2009.0
7	西藏当雄	2008-10-06	6.8	—
8	青海大柴旦	2009-08-28	6.6	2009.3
9	///	///	///	2009.8

方法作为发现地震异常区域的前期手段,结合加卸载响应比、态矢量、矩张量加速释放等方法提高地震预测的效力。这三种方法无论是理论、实验还是地震预测实践,都进行过大量的研究,统计表明,在多数地震发生之前,这些方法都能观测到相应的前兆异常。而这三个方法的不足之处恰恰就在于地震区域的选择,这正是PI方法的优势。因此将这些前兆方法相结合,势必能进一步提高预测的准确性,减少误报的发生,同时为地震的逼近程度,及发生强度做

出更准确的判定。本文所研究的震例就是这样的情况,在有地震发生的地区,联合算法能对地震发生的时间等相关信息做较为准确的估算,而对未发生地震的地区也能加以排除。正因为所选择的4种模型能够实现优势互补,因而地震预测效力得到了提高。

虽然我们仅对中国西部的强震进行了研究,但是所提出的算法是通用的,可以被应用到任何地震构造区域。根据中国大陆的地震活动情况,西部地区可以选择 $M > 6.0$ 目标地震,而东部地区则可以选择 $M > 5.0$ 地震进行研究。依据算法与地震发生在时空尺度上的内在联系,可以研究各地区的断层特征、地震活动性演化及地震危险性。即便如何切实解决各方法在时空尺度上的耦合关系还有待更多的实践研究,本文的研究事实表明算法能够明显提高地震预测的准确性及量化程度。在地震预测实践时,我们可以根据预测的起始时间,调整适当的预测时段和空间尺度,尽可能地发现地震活动出现异常的区域,减少漏报的发生。然后结合各地区区域构造特征及孕震环境,采用加卸载响应比、态矢量、矩张量加速释放等方法,研究从长期到短临时段内的地震活动性变化以及相应的地震孕育、发生趋势,为预测目标地震发生提供依据。一旦监测到前兆异常,可以帮助揭示相关地区的应力应变场演化,认识其地震危险性。这对于认识各地区断层结构、地震孕育、发生相关的应力应变场演化及其对强震发生的调制作用,增进了解长期预测与中短期预测的自然联系有着重要的借鉴意义。

#### [参考文献]

- [1] Burridge R, Knopoff L. Model and theoretical Seismicity[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1967, 57: 34-371.
- [2] Cao T, Aki K. Seismicity simulation with a Mass-spring Model and a displacement hardening-softening friction law [J]. Pure Appl. Geophys., 1984, 122: 10-24.
- [3] Carlson J M, Langer J S. Mechanical Model of an Earthquake Fault[J]. Phys. Rev., 1984, A40: 6470-6484.
- [4] Ben-Zion Y, Sammis C G. Characterization of fault zones[J]. Pure appl. Geophys., 2003, 160: 677-715.
- [5] Ben-Zion Y, Lyakhovskiy V. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns on earthquake faults[J]. Pure appl. Geophys., 2002, 159: 2385-2412.
- [6] Main I G. Earthquakes as critical phenomena, implications for probabilistic seismic hazard analysis[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1995, 85: 1299-1308.
- [7] Main I G. Statistical physics, seismogenesis, and seismic hazard[J]. Rev. Geophys., 1996, 34: 433-462.
- [8] Main I G, Al-Kinfi F H. Entropy, energy, and proximity

- to criticality in global earthquake populations[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29 (7); doi:10. 1029/2001GL014078.
- [9] Keilis-Borok V I. The lithosphere of the Earth as a nonlinear system with implications for earthquake prediction[J]. *Rev. Geophys.*, 1990, 28:19-34.
- [10] Romachkova L L, Kossobokov V G, Panza G F, et al. Intermediate-term predictions of earthquakes in Italy, Algorithm M8[J]. *Pure appl. Geophys.*, 1998, 152:37-55.
- [11] Keilis-Borok V I, Shebalin P N. Special Issue—Dynamics of Lithosphere and Earthquake Prediction [J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1999, 111:179 - 327.
- [12] Keilis-Borok V, Ismail-Zadeh A, Kossobokov V, et al. Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate term earthquake prediction[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 247-260.
- [13] Sammis C G, Smith S W. Seismic Cycles and the Evolution of stress Correlation in Cellular Automation Models of Finite Fault Networks[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1999, 155: 307-334.
- [14] Bowman D D, King G C P. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28 (21):4039-4042.
- [15] Smith S W, Sammis C G. Revisiting the Tidal Activation of Seismicity with a Damage Mechanics and Friction Point of View[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161:2393-2404.
- [16] Rundle J B, Iain W, Tiampo K, et al. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems[J]. *Phys. Rev.*, 2000, E61:2418-2431.
- [17] Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, et al. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near-mean field dynamics and its implications for earthquakes, neuro-biology, and forecasting[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2002, 99: 2514-2521.
- [18] Rundle J B, D L Turcotte, R Shcherbakov, et al. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems[J]. *Rev. Geophys.*, 2003, 41(4): 1019, doi:10. 1029/2003RG000135.
- [19] Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, et al. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions[J]. *Pure and applied geophysics*, 2002, 159(10): 2429-2467.
- [20] King G C P, Cocco M. Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences [J]. *adv. Geophys.*, 2001, 44:1-38.
- [21] Yu H Z, Shen Z K, Zhu Q Y, et al. Increasing critical sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern[J]. *Tectonophysics*, 2006, 428(1-4): 87-94.
- [22] Yin X C, Mora P, Peng K Y, et al. Load-Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2002, 159:2511-2523.
- [23] Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, et al. Load-Unload Response ratio (LURR), Accelerating Energy release (AER) and State Vector evolution as precursors to failure of rock specimens. [J] *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161:2405-2436.
- [24] Holliday J R, Rundle J B, Tiampo K F, et al. Systematic procedural and sensitivity analysis of the Pattern Informatics method for forecasting large ( $M > 5$ ) earthquake events in Southern California[J]. *Pure And Applied Geophysics*, 2005, 163 (11-12):2433-2454.
- [25] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A New Approach to Earthquake Prediction—The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1995, 145:701-715.
- [26] Yin X C, Wang Y C, Peng K Y, et al. Development of a New Approach to Earthquake Prediction—Load/unload Response Ratio (LURR) Theory[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, 157:2365-2383.
- [27] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's Twenty Years and its Perspective[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2006, 163:2317-2341.
- [28] 杨林章,何世海,郝饮文,等.用潮汐体应变加响比研究岩石弹性性质变化[J]. *中国地震*, 1994, 10(增刊):90-94.
- [29] 李旭东. 倾斜固体潮的响应比研究[J]. *地壳形变与地震*, 1995, 15(3):67-73.
- [30] 陈棋福,尹祥础,马丽.加卸载响应比的自然分布[J]. *中国地震*, 1996, 12:270-273.
- [31] 曾小苹,续春荣,赵明,等.地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震[J]. *地震地磁观测与研究*, 1996, 17(1):49-53.
- [32] 李佐唐. 门源 6.4 级地前后加卸载响应比的异常变化[J]. *西北地震学报*, 1997, 18(4):47-50.
- [33] 王勤彩,杜锡武,马兴国,等.大同两次中强地前应变、倾加卸载响应比异常研究[J]. *华北地震科学*, 1997, 15(3):67-72.
- [34] 续春荣,林云芳,吕桂芳,等.地球磁场对太阳风的加卸载响应比与川滇中强地震[J]. *中国地震*, 1998, 14(2):190-196.
- [35] 张昭栋,王秀芹,董守德.加卸载响应比在体应变固体潮中的应用[J]. *地震*, 1999, 19: 217-222.
- [36] 常克贵,高立新,张建业,等.加卸载响应比理论在包头西  $M_s 6.4$  地震预报中的应用[J]. *西北地震学报*, 1999, 21(4): 350-355.
- [37] 任隽,陈运平,潘纪顺,等.海南岛及其近海中强地震前加卸载响应比的变化特征[J]. *西北地震学报*, 2002, 27(1):71-74.
- [38] Zhang Y X, Yin X C, Peng K Y. Spatial and Temporal Variation of LURR and its Implication for the Tendency of Earthquake Occurrence in Southern California [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161:2359-2367.
- [39] Cochran E S, Vidale J E, Tanaka S. Earthquake tides can trigger shallow thrust fault earthquakes[J]. *Science*, 2004, 306:1164 -1166.
- [40] Tanaka S, Ohtake M, Sato H. Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress[J]. *Earth Planets Space*, 2004, 56(5):511-515.
- [41] 尹祥础,余怀忠,等.态矢量—分析地震活动性的一种新方法[J]. *中国地震*, 2004, 20(1):73-79.

- [42] Yu H Z, Yin X C, Zhu Q Y, et al. State vector—a new approach to prediction of the failure of brittle heterogeneous media and large earthquakes[J]. *Pure appl. geophys.*, 2006, 153 (11/12): 2561-2574.
- [43] Zhang Y X, Wu Y J, Yin X C, et al. Comparison Between LURR and State Vector Analysis Before Strong Earthquakes in Southern California Since 1980[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2008, 165: 737-748.
- [44] 姜彤, 王伟, 崔江利, 等. 滑坡临滑预报的态矢量方法研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1747-1752.
- [45] 黄显良, 陈宇卫, 沈小七, 等. 华东地区态矢量的研究[J]. *地震地磁观测与研究*, 2006, 27(5): 3-7.
- [46] 余怀忠, 尹祥础, 等. 态矢量方法的实验研究[J]. *地震*, 2004, 24(3): 1-7.
- [47] 吴永加, 张永仙, 尹祥础. 1970年以来中国大陆25次6.8级以上地震前态矢量异常特征研究[J]. *地震*, 2006, 26(2): 61-67.
- [48] Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1999, 155: 279-306.
- [49] Bufe C G, D J Varnes. Predictive modelling of the seismic cycle of the greater San Francisco bay region[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 9871-9883.
- [50] 邓起东. 中国活动构造图(1:400万)[M]. 北京: 地震出版社, 2007: 1-5.