

基于地震孕育过程追踪的地震预测方法

陈学忠, 李艳娥, 陈丽娟

Earthquake prediction method based on seismogenic process tracking

Chen Xuezhong, Li Yan'e, and Chen Lijuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-131>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2019年四川长宁 $M_S6.0$ 地震前破裂区内视应力和 b 值的变化

Variations in apparent stress and b value in the rupture area before the 2019 $M_S6.0$ Changning earthquake

地震科学进展. 2021(2): 49–58

实现地震预报向地震风险预测转变的方法及途径初探

Preliminary study on the methods to achieve the change of earthquake prediction to earthquake risk prediction

地震科学进展. 2018(1): 36–39

林甸5.1级地震前的测震学异常特征

Characteristics of seismological anomaly before the $M5.1$ Lindian earthquake

地震科学进展. 2018(4): 90–94

鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展

Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block

地震科学进展. 2020(4): 1–21

云南大理 $M_S6.4$ 地震与意大利拉奎拉 $M_W6.3$ 地震序列的比较研究和危险性分析启示

Comparative study on the sequences between Dali $M_S6.4$ earthquake in Yunnan and L'Aquila $M_W6.3$ earthquake in Italy and revelation of risk analysis

地震科学进展. 2021(8): 345–351, 361

用初至P震相联合深度震相sPL测定海南中小地震深度

Determining the depth of medium and small earthquakes in Hainan using the first arrival P seismic phase combined with depth sPL seismic phase

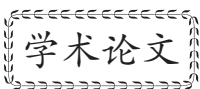
地震科学进展. 2020(12): 1–6



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈学忠, 李艳娥, 陈丽娟. 基于地震孕育过程追踪的地震预测方法 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(2): 63-76. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-131

Chen X Z, Li Y E, Chen L J. Earthquake prediction method based on seismogenic process tracking[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(2): 63-76. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-131



基于地震孕育过程追踪的地震预测方法

陈学忠^{1)*} 李艳娥¹⁾ 陈丽娟²⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 重庆市地震局, 重庆 401147

摘要 准确的地震预测是实现有效减轻地震灾害的途径之一。目前地震预测仍处于经验预测阶段, 其准确度远远不能满足有效减轻地震灾害的需求。地震预测的发展趋势在于从经验预测向物理预测过渡, 这个过渡的关键在于要首先实现对地震孕育过程更加深入的认识、描述和追踪。根据岩石力学实验结果, 岩石破坏前主要经历了应力上升过程和其后的亚失稳阶段。我们分析了天然地震的孕育过程。分析时将视应力和 b 值进行结合, 以获得地壳介质的应力变化信息, 利用地震活动与地球自转之间的相关性(用 p 值描述)来获取地壳介质的临界状态或亚失稳阶段的信息, 从而实现对地震孕育过程的描述。本文在对天然强震孕育过程进行震例研究的基础上, 提出了基于地震孕育过程追踪的地震预测思路和方法, 给出了中-短期地震危险区判定依据, 以期对实际地震预测工作有所裨益。

关键词 地震孕育过程; 地震预测; 中-短期; 地震危险区; 视应力; b 值; p 值

中图分类号: P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)02-0063-14

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-131

Earthquake prediction method based on seismogenic process tracking

Chen Xuezhong¹⁾, Li Yan'e¹⁾, Chen Lijuan²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China

Abstract Accurate earthquake prediction is one of the ways to effectively reduce earthquake disasters. Until now, empirical earthquake prediction methods have remained in use, but the accuracy falls far short of what is needed to effectively mitigate earthquake disasters. The trend in earthquake prediction lies in the transition from empirical prediction to physical prediction, and the key to this transition is to achieve a deeper understanding, depiction, and tracking of the seismogenic process. According to the experimental results of rock mechanics, it can be found that before failure, the rock mainly experienced a stress-increase stage and a subsequent stage of sub-instability. We have analyzed the seismogenic process of some natural earthquakes. In the analysis, apparent stress and b -value are used together to obtain information on the stress variability of the crustal medium. The correlation between seismicity and Earth rotation (described by p -

收稿日期: 2023-09-25; 采用日期: 2023-10-11。

基金项目: 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB23Z09)资助。

* 通信作者: 陈学忠(1963-), 男, 研究员, 主要从事地震学与地震预测研究。E-mail: cxz8675@163.com。



value) is used to obtain information about the critical state or sub-instability phase of the crustal medium. Thus, the seismogenic process can be depicted. In this paper, based on a case study of the seismogenic process for some natural strong earthquakes, we propose an idea and method for earthquake prediction based on the tracking of the seismogenic process, and provide a basis for the identification of short- to mid-term seismic risk regions. It is expected to be beneficial for practical earthquake prediction.

Keywords seismogenic process; earthquake prediction; medium and short term; earthquake risk regions; apparent stress; b -value; p -value

0 引言

目前地震预测尚处于经验预测阶段。经验预测是研究者根据自己的知识和经验对未来地震的时、空、强三要素作出的主观判断,可以用简单的“有”或“无”来描述,也可以用某种量化的可能性来表示。这种预测通常会因人而异。经验预测的局限性是显然的,停留在经验预测上是难以取得地震预测突破性进展的。但目前由于地震预测中的统计预测和物理预测方法尚不成熟,经验预测仍将发挥其应有的作用^[1]。不少国内外地震学者认为,要提高地震预测水平,关键在于深入研究地震孕育发生机理,发展新的地震预测理论,从经验预测向以物理为基础的预测过渡。但也有学者认为,应大力发展统计预测方法^[2-3],不过,1985年基于美国帕克菲尔德地区6级地震的准周期性做出的地震预测(1993年前帕克菲尔德地区有95%的概率发生1次6级地震)的失败,说明统计预测也存在相当的不确定性。在目前的地震预测工作中,很难从物理上说清楚前兆观测值的异常变化与地震发生之间的关系,并且不同的研究者对同一个观测值的异常变化也可能会有不同的认识,这种情况下要形成一致的预测意见显然是很难的。毫无疑问,地震预测应从经验预测向物理预测过渡,但这个过渡的关键在于首先要对地震孕育过程有更加深入的认识,弄清楚天然地震在震前所经历的过程有什么样的特征,还要给出描述孕育过程特征的方法,并对其实现追踪。本文将对近年来我们对天然地震孕育过程进行的实例分析结果进行全面介绍。

1 地震孕育过程分析

对于强震发生的预测来说,实现物理预测的关键在于弄清楚地震孕育过程的特征。本质上,地震是一个力学过程,是累积应力快速释放的过程。根据在双轴压力作用下进行的岩石实验结果,从差应力—时间过程看,变形过程存在稳态、亚稳态、亚失稳态、失稳态等4种状态。它们分别被差应力—时间曲

线上的偏离线性点(屈服点 M)、峰值应力点(强度极限点 C)和失稳点(B)分割(图1)。从 O 点到 M 点为稳态阶段,断层处于弹性变形状态,只要外力撤除,变形立即恢复;从 M 点到 C 点断层处于偏离弹性状态,为亚稳态阶段,外力撤除,一部分应变立即恢复,另一部分以缓慢方式逐步恢复,而局部损伤区则无法恢复;从 C 点到 B 点进入亚失稳阶段,断层已经处于以释放为主的变形阶段,随着变形程度增加,断层由准静态释放转变为不可逆转的准动态释放,最终失稳^[4-5]。如果我们认为岩石力学实验中岩石发生宏观破坏前所经历的过程与天然地震发生前所经历的过程相同,从图1中可以发现,地震孕育过程主要应包含2个阶段:一个是应力积累过程(应力峰值点 C 之前),另一个是临界状态或亚失稳过程(应力峰值点 C 之后)。一个油然而生的问题是:实际地震孕育过程是否与此一致?对这个问题的回答有赖于开展实际震例研究。在开展震例研究时,最为重要的是找到描述这2个阶段的参量。第1阶段的主要特征是应力增长,第2阶段的主要特征是震源介质处于临界或亚失稳状态,变得非常不稳定,一旦受到微小的外力作用就可能引发一些中小地震活动。对于第1阶段,我们需要获取震源处的应力状态。目前,在难以直接检测到地下几千米至几十千米的震源处的应力信息的情况下,可以通过 b 值或视应力进行间接地推测震源处的应力状态。岩石力学实验中发现 b 值与应力呈负相关关系^[6-7], b 值的变化还与地壳介质非均匀性有关^[8],甚至与地热梯度有关^[9]。视应力等于剪切模量与地震能量和地震矩之比的乘积,也等于地震效率 η 乘以断层面上的平均应力^[10-11]。当构造应力增加时, b 值降低,同时视应力增加,反之亦然。由于影响 b 值与视应力的因素并非单一的地壳应力,单独用它们不能唯一地获取地壳中应力的信息。如果地壳应力发生变化,一般 b 值与视应力都会相应地发生变化。当视应力增加时, b 值下降,地壳应力发生变化上升。因此如果 b 值与视应力的变化是由地壳应力变化引起,它们的变化应该呈负相关关系。因此,将 b 值与视应力进行联合分析,可

以在排除其他影响因素的前提下获取地壳的应力状态。需要说明的是, 在开展震例研究时, 由于缺乏视应力资料, 有的震例只能用 b 值的变化来获取地壳应力的变化过程。一般认为, 对于强震前发生在震源及其附近一定空间范围内几年至十年左右的 b 值下降是由于地壳应力变化造成的可能性大。

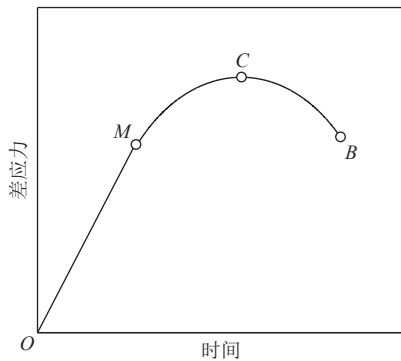


图1 差应力随时间的变化示意图(根据岩石实验结果)

Fig. 1 Schematic diagram of differential stress as a function of time (based on rock test results)

在日常生活中, 要判断一根立在地上的杆子稳不稳定, 最简单的方法是用手握住它轻轻地摇一摇。如果杆子晃动, 它就不稳定。用手握住杆子摇一摇这个动作实际上是在给杆子加上一个微小的作用力。将这个经验应用于震源区稳定性评估, 可以认为当震源区被加载到临界状态时, 它可能变得极其不稳定以至于微小的应力变化就可以在它及其附近地区激发一些中小地震活动。由于地球自转速率变化可以在地壳内部引起非常微弱的应力变化^[12], 因此, 如果震源区处于临界状态, 地球自转速率变化将会触发地震活动, 从而使这些被触发的地震与地球自转速率变化之间显著相关。我们可以根据与地球自转相关的地震活动性来描述震源区的临界状态或亚失稳状态。

对滑块模型的研究表明, 在给定应力作用下, 当其周期接近共振周期时, 滑动将被大幅度放大^[13]。当刚度 k 等于临界刚度 k_c 时, 在临界周期 T_c 附近滑移响应将被显著放大。当 k 大于 k_c 时, 临界周期变小, 引起滑动剧烈放大的应力周期变小^[14]。由于物体的固有周期与刚度 k 呈反比, 而与质量呈正比。对于震源体来说, 地震越大, 相应的震源体也越大, 质量就越大, 在刚度不变的情况下, 共振周期越大。因此, 如果强震发生前, 在震源体处于亚失稳状态时, 共振作用可以触发地震活动, 只要作用在震源体上的外力的周期与震源体固有周期相近, 即可触发地震活

动。有研究表明, 强震前固体潮引起的应力在震前触发了地震活动^[15-18]。固体潮是由日、月引力引起的, 主要含有半日潮、日潮、半月潮、月潮、半年潮和周年潮。地球自转速率在时间尺度上主要有“十年起伏”变化、季节性变化和短期变化。“十年起伏”变化主要与地球内部地核与地幔的耦合作用有关。季节性变化主要由大气环流引起, 也有研究表明, 地球自转速率季节性变化主要是由于太阳辐射光压在南、北半球表面上不平衡分布造成的^[19]。短期变化主要是大气的高频震荡和潮汐波动引起的^[20]。显然, 地球自转速率变化的影响因素比固体潮更多, 且包含了固体潮的影响, 它的变化更复杂, 所包含的周期成分更丰富。如果把地壳看成弹性介质, 地球自转速率变化在地壳中引起的应力变化的周期与它的周期是一致的。所以在分析地震活动与地球自转速率变化之间的关系时, 直接分析地震活动发生的时间与地球自转速率变化之间的相关性即可。然而, 对于固体潮而言, 需要计算潮汐应力, 计算潮汐应力时, 需要用到发震断层面的几何和运动学参数。目前对于中小地震, 很难得到其准确的发震断层参数, 使计算结果存在更多的不确定性。

本文中采用最大似然法计算 b 值^[21], 计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{\log e}{M - M_{\min}} \\ \sigma_b &= 1.96 \frac{b}{\sqrt{N-1}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

计算 b 值随时间的变化时, 使用等事件数的样本窗口, 以相等事件数进行滑动, 将每个窗口中最后一个事件发生的时间作为计算的 b 值的时间。对国外震例, 使用的地震目录来自于 USGS 网站(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), 国内震例使用的地震目录来自于中国地震台网中心全国小震正式目录。

视应力定义为^[22]:

$$\sigma_a = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (2)$$

式中, μ 为剪切模量(对地壳介质, μ 可取 3×10^4 MPa), E_s 和 M_0 分别为地震辐射能量和标量地震矩。

对国内的震例, E_s 是根据区域数字测震台网记录的波形数据, 将波形数据进行去倾和仪器响应校正处理之后, 取 S 波段的波形数据, 在近震源条件下计算震源谱, 得到震源谱参数, 进而根据震源谱参数得到地震矩、地震能量, 再由式(2)计算视应力。

对于国外地震, E_S 根据 Gutenberg-Richter 的回归关系换算得到^[23]:

$$\log E_S = 1.5 M_S + 11.8 \quad (3)$$

地震矩 M_0 和 M_S 数据来自于哈佛大学发布的震源参数目录 (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)。用所选取的地震的地震矩 M_0 和震级 M_S 数据, 根据式 (3) 可以得到 E_S , 然后由式 (2) 得到视应力。需要指出的是, Zobin^[24]曾分别用式 (3) 换算方法和 Boatwright 和 Choy^[25]的波形积分方法, 计算了勘察加地区 5 次地震的地震波能量, 结果表明两种方法得到的结果没有明显差别。

对于与地球自转相关的地震活动性分析, 首先根据地球自转速率变化曲线, 计算所选取的研究区内发生的每个地震的相位角 θ 。规定: 在地球自转速率变化曲线的极大值点处相位角为 0° ; 从极大值往左边数, 第 1 个极小值处对应的相位角为 -180° ; 同样, 往右边数, 第 1 个极小值处相位角为 180° 。即,

$$\left. \begin{aligned} \theta &= -180^\circ \times \frac{t_0 - t_e}{t_0 - t_{-180}}, \quad t_e < t_0 \\ &= 180^\circ \times \frac{t_e - t_0}{t_{180} - t_0}, \quad t_e \geq t_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, t_e 为某个地震的发生时间, t_0 为离地震最近的

极大值处的时间, t_{-180} 和 t_{180} 分别为地震前后离地震最近的两个极小值处的时间。对于 N 个地震, 它们的发生是否与地球自转速率变化显著相关, 可以利用舒斯特 (Schuster) 统计检验方法来检验, 检验的基本参数是^[26]:

$$\left. \begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^N \sin \theta_i, \quad B = \sum_{i=1}^N \cos \theta_i \\ R &= \sqrt{A^2 + B^2} \\ p &= e^{-\frac{R^2}{N}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, θ_i 为第 i 个地震的相位角; $N > 10$, 为地震总数; $0 \leq p \leq 1$, 一般如果 $p \leq 5\%$, 地震活动与地球自转之间存在显著相关性^[27]。

我们选取了 2004—2023 年间发生在环太平洋地震带和欧亚地震带以及我国大陆地区的 15 次 $M_S \geq 6.0$ 地震进行分析。选取这些地震时, 首先考虑要有足够的资料, 其次是考虑不同的动力环境和构造条件以及震级分布范围等因素。图 2 给出了研究震例的空间分布, 具体信息见表 1。它们的震源机制主要是走滑型、逆冲型以及逆冲兼走滑型, 发生在不同的动力环境和构造条件下, 震级分布范围为 $M_S 6.0 \sim M_W 9.1$ 。

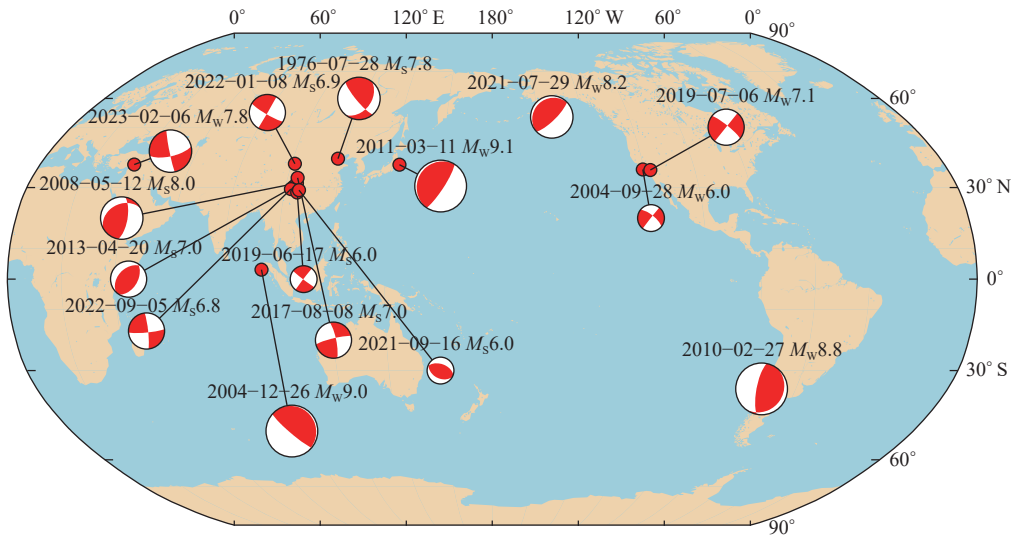


图 2 2004—2023 年间震例空间分布与震源机制解

Fig. 2 Locations of the researched earthquakes and their source mechanism solutions

图 3 给出了各次震例震前震中及附近地区视应力和 b 值随时间的变化。由于资料原因, 一部分震例只能给出 b 值随时间的变化。从图中可以看出, 所有震例地震发生前, b 值都出现了数年至十多年的显著

下降过程。有 8 次震例同时给出了视应力随时间的变化, 可以看出这些震例前视应力与 b 值呈负相关变化, 表明震前视应力和 b 值的变化是由于地壳构造应力的增强所致。 b 值下降过程主要表现为两个特

表 1 震例相关信息
Table 1 Information about the researched earthquakes

序号	时间 (年-月-日)	纬度	经度	震级	地区名称	发震断层性质
1	2004-12-26	3.90°N	95.90°E	$M_W 9.0$	印尼苏门答腊	板缘逆冲
2	2010-02-27	36.12°S	72.90°W	$M_W 8.8$	智利比奥比奥	板缘逆冲
3	2011-03-11	38.30°N	142.37°E	$M_W 9.1$	日本本州	板缘逆冲
4	2021-07-29	55.36°N	157.89°W	$M_W 8.2$	美国阿拉斯加	板缘逆冲
5	2019-07-06	35.77°N	117.60°W	$M_W 7.1$	美国里奇克莱斯特	板内走滑
6	2004-09-28	35.82°N	120.37°W	$M_W 6.0$	美国帕克菲尔德	板内走滑
7	2023-02-06	37.17°N	37.04°E	$M_W 7.8$	土耳其加齐安泰普	板内走滑
8	1976-07-28	39.40°N	118.00°E	$M_S 7.8$	河北唐山	板内走滑
9	2008-05-12	30.95°N	103.40°E	$M_S 8.0$	四川汶川	板内逆冲兼走滑
10	2013-04-20	30.30°N	103.00°E	$M_S 7.0$	四川芦山	板内逆冲
11	2017-08-08	33.20°N	103.82°E	$M_S 7.0$	四川九寨沟	板内走滑
12	2022-01-08	37.77°N	101.26°E	$M_S 6.9$	青海门源	板内走滑
13	2022-09-05	29.59°N	102.08°E	$M_S 6.8$	四川泸定	板内走滑
14	2021-09-16	29.20°N	105.34°E	$M_S 6.0$	四川泸县	板内逆冲兼走滑
15	2019-06-17	28.34°N	104.90°E	$M_S 6.0$	四川长宁	板内逆冲兼走滑

征：一是在 b 值下降过程的前期，其下降速度较快；另一个是除个别震例外，下降过程末期 b 值维持在自下降以来的低水平上，没有明显变化或小幅缓慢回升。

从图 3 中我们可以看到一个关于天然地震的基本事实，那就是，在震前震源及附近地区经历了较长时间的地壳应力上升过程，这个过程平均持续 5.8 年；震前在紧临震时的几年时间里，地壳应力维持在高位，或稍有松弛。因此，天然地震前地壳应力的变化与岩石力学实验中岩石发生宏观破坏前所经历的过程具有一致性。接下来需要考虑的问题是：在紧临震时的几年时间，当地壳应力处于峰值之后，震源及附近地区地壳介质是否处于亚失稳状态？为此，我们分析了这些震例发生前震源及附近地区地震活动与地球自转速率变化之间的相关性，用式(5)中的 p 值来评估。当 p 小于 5% 时，认为地震活动与地球自转速率变化显著相关。 p 值越小，相关性就越显著，地壳介质就越不稳定。图 4 给出了各次震例前 p 值随时间的变化，可以看到在临近地震发生前的几年内，即 b 值平稳变化阶段， p 值都出现了显著的下降过程，这表明地壳介质处于不稳定状态，即亚失稳状态。为了分析不稳定区域与震中之间的关系，给出了 p 值时间变化达到最低值期间， p 值的空间分布

(图 5)。从图中可见，当 p 值时间变化到达最低值时， p 值在空间上形成了一个低值集中分布区域，这个区域的地壳介质最不稳定。主震的初始破裂点位于这个低 p 值分布区内或其附近，地震破裂区一般都会穿过或终止于其内部^[28-31]。也就是说，强震发生前，在震中或其附近的一个区域内，地壳介质处于极不稳定状态，这个现象对于强震发生地点具有指示意义。

2 地震危险性判定

通过对上述震例的孕震过程的分析发现，强震发生前，在震中及其附近地区存在显著的应力增长过程。震前，在紧临强震发生的几年时间里地震活动受到地球自转速率变化的控制，显示出亚失稳或临界状态的特征，表明天然地震孕育过程与岩石实验中岩石破坏前所经历的过程是一致的。这不仅对利用岩石力学实验研究地震孕育过程，利用实验结果指导地震预测研究具有现实意义，同时对实际地震震情判定也具有重要意义。据此，可以在对孕震过程进行实时追踪的基础上，根据地震孕育所处的阶段，实现对强震发生的紧迫性的准确判定：联合利用视应力和 b 值约束构造应力的变化，利用地震活动与地球自转的相关性来分析地壳介质的临界状态，给

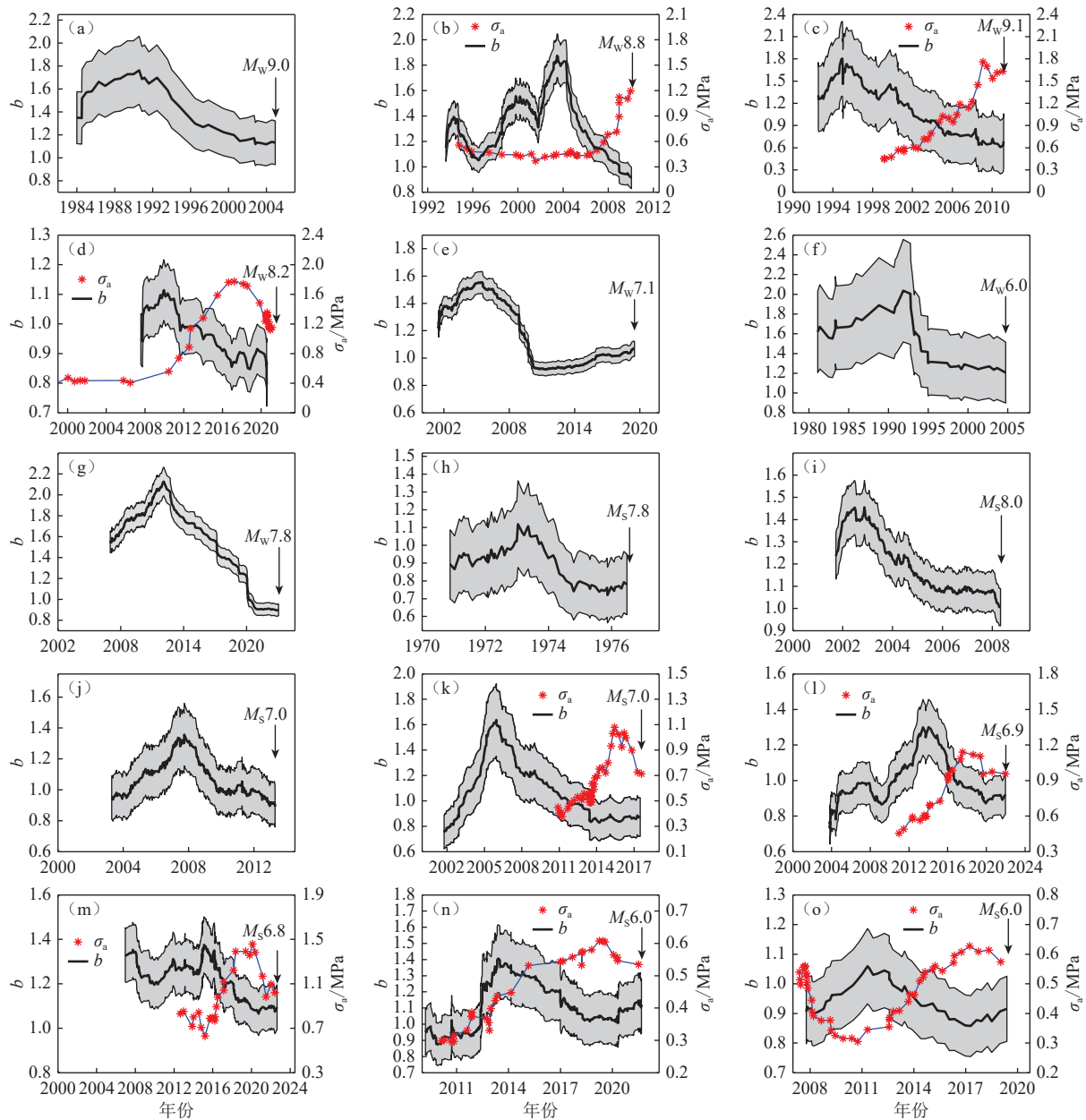


图3 各次震例震前震中及附近地区视应力和 b 值随时间的变化

Fig. 3 Apparent stress and b value as a function of time in and around the epicenters prior to the researched earthquakes

出一个地区孕震过程所处的阶段特征,进而对地震发生的紧迫性进行评估。同时将非测震学前兆(也称地球物理观测前兆)与孕震过程相结合,可以显著提高对非测震学前兆的识别以及加深其与强震发生的关联性的认识,进而实现短临地震预测。

2.1 地震强度判定

2.1.1 由 b 值变化过程持续时间估计震级

震例研究发现, b 值下降过程表现为前期的快速下降和后期的平稳变化。表2中给出了 b 值快速下降阶段持续时间 T_r 、平稳变化或小幅缓慢回升阶段持续时间 T_s 以及下降全过程持续时间 T_a 。 $T_r = (5.8 \pm$

2.5) a, $T_s = (3.65 \pm 2.35)$ a, $T_a = (9.5 \pm 3.7)$ a。图6给出了 b 值下降过程持续时间与震级的关系。

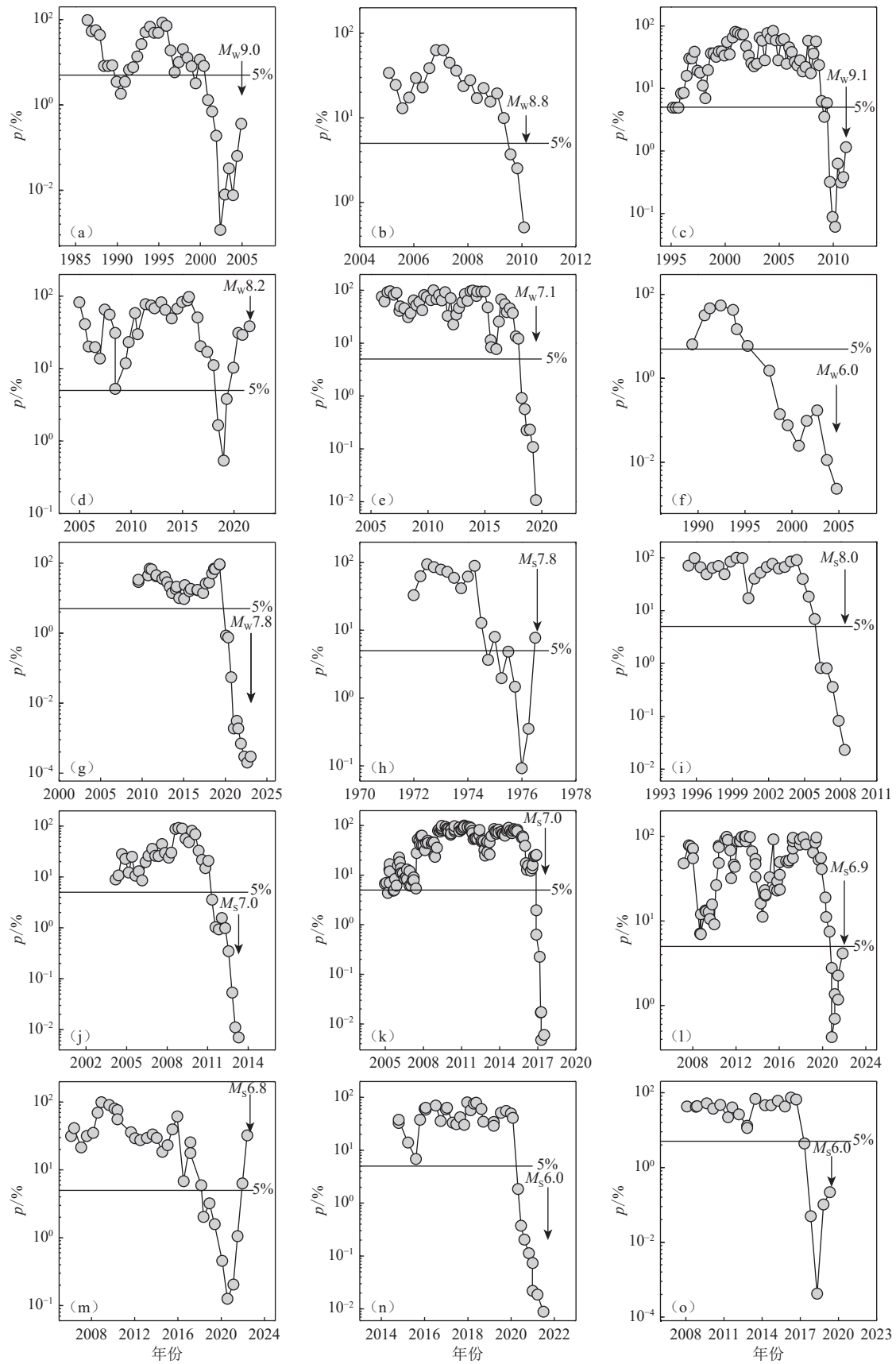
对于 $T_r > 4$ a 的12次地震(图6a中两条红色实线中间的地震), T_r 与震级 M 之间的关系为:

$$M = 0.522T_r + 3.839 \pm 1.73 \quad (r = 0.78) \quad (6)$$

对于 $0 < T_s < 6$ a 的12次地震(图6b中两条红实线中间的地震), T_s 与震级 M 之间的关系为:

$$M = 0.488T_s + 5.935 \pm 1.24 \quad (r = 0.59) \quad (7)$$

式中, M 为震级, r 为相关系数。

图4 各次震例震前震中及附近地区 p 值随时间的变化Fig. 4 p value as a function of time in and around the epicenters prior to the researched earthquakes

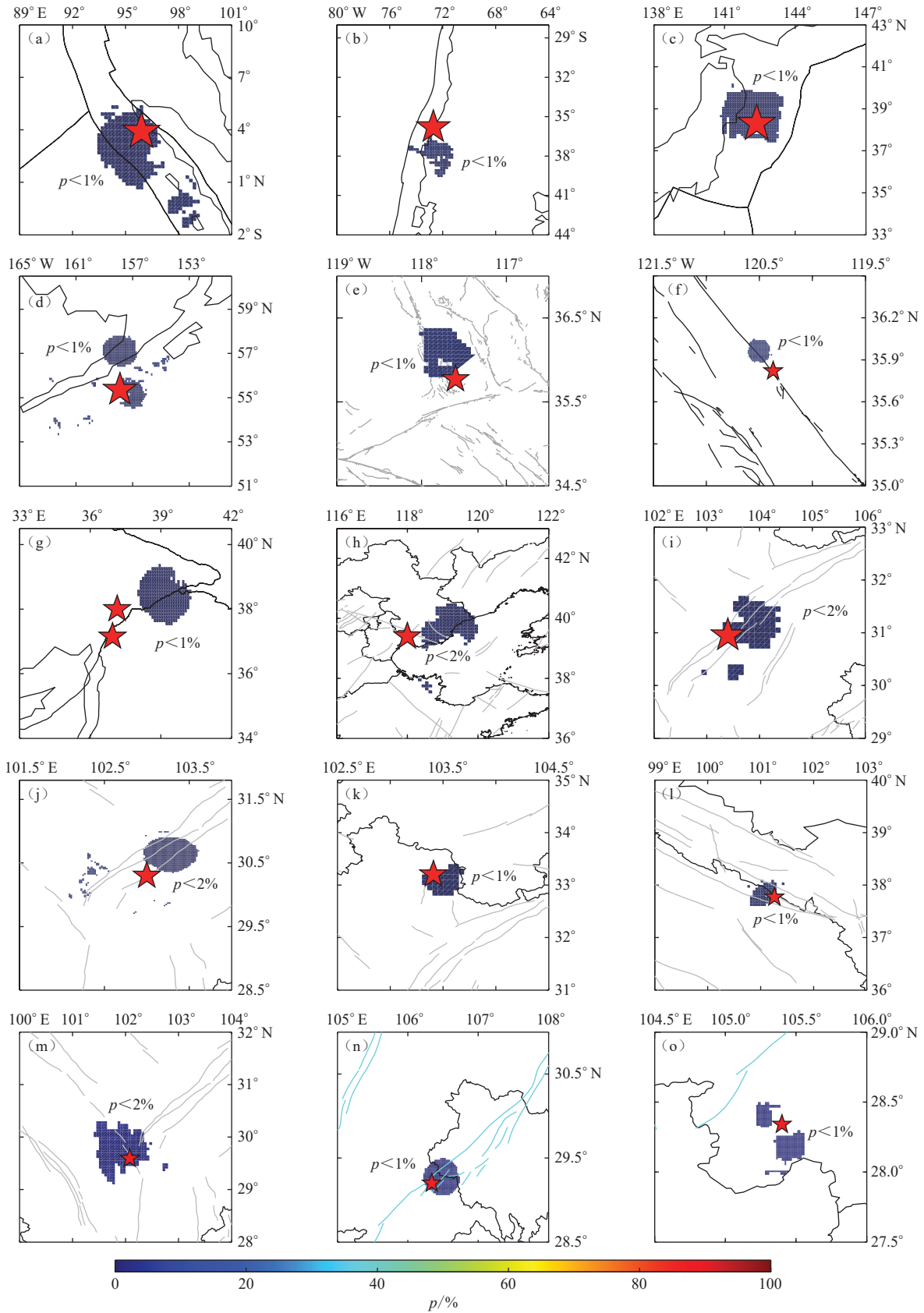


图5 各次震例震前震中及附近地区低 p 值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of lower p -values prior to the researched earthquakes

表 2 各震例 b 值下降过程持续时间
Table 2 The duration of the period of decline in b -value for all earthquake cases

序号	震例	持续时间/a		
		快速下降段 T_r	平稳变化段 T_s	全程 T_a
1	印尼苏门答腊 $M_W 9.0$	9	4	13
2	智利比奥比奥 $M_W 8.8$	6.75	0	6.75
3	日本本州 $M_W 9.1$	10.5	5.75	16.25
4	美国阿拉斯加 $M_W 8.2$	7	4.67	11.67
5	美国里奇克萊斯特 $M_W 7.1$	4.67	9.4	14.07
6	美国帕克菲尔德 $M_W 6.0$	6	7	13
7	土耳其加齐安泰普 $M_W 7.8$	8	3	11
8	河北唐山 $M_S 7.8$	1.83	1.91	3.74
9	四川汶川 $M_S 8.0$	2.75	2.91	5.66
10	四川芦山 $M_S 7.0$	2	2.58	4.58
11	四川九寨沟 $M_S 7.0$	7.58	4.17	11.75
12	青海门源 $M_S 6.9$	5.5	1.58	7.08
13	四川泸定 $M_S 6.8$	5.83	2	7.83
14	四川泸县 $M_S 6.0$	5	3.33	8.33
15	四川长宁 $M_S 6.0$	5.5	2.42	7.92

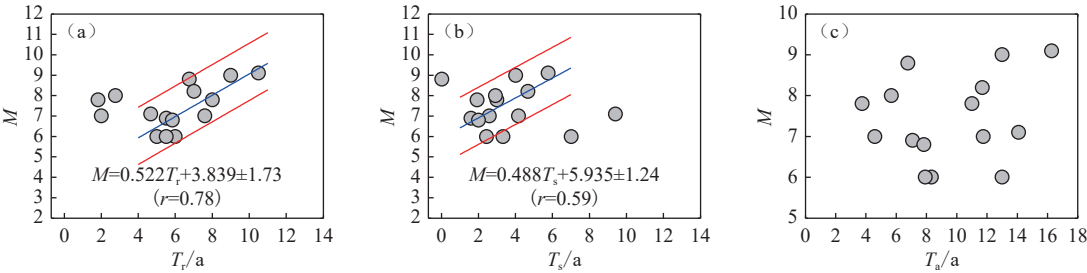


图 6 (a) 快速下降段持续时间 T_r 与震级 M 的关系; (b) 平稳变化段持续时间 T_s 与震级 M 的关系; (c) b 值下降全过程持续时间 T_a 与震级 M 的关系

Fig. 6 (a) The duration of the rapid decline period T_r versus magnitude M ; (b) The duration of the stationary change period T_s versus magnitude M ; (c) The duration of the whole process of the decline in b versus magnitude M

T_a 与 M 之间相关性不明显 (图 6c)。需要说明的是, 式(6)和式(7)是初步结果, 需要根据震例的积累进一步完善。

b 值快速下降阶段的持续时间和平稳变化阶段的持续时间与震级之间分别存在经验关系, 即式(6)和式(7)。虽然这两个关系式是初步的, 不甚精确, 但不妨也可以将其应用于对震级的估计。式(6)的相关系数比式(7)的高, 但方差大。因此, 可以将两者的平均作为震级的估计。需要注意的是, 在实际地震预测时, 由于地震尚未发生, 平稳变化阶段的持续时间尚不能完全确定, 此时, 不能由式(7)估计震级;

如果确认地震孕育已经进入短临阶段, 也可以由式(7)估计震级。

2.1.2 由视应力变化过程特征估计震级

强震前视应力变化一般表现为上升—下降或上升—维持在高值的变化形态。表 3 给出了 11 个震例在震前视应力变化过程特征参数的数值。这些参数分别是: 相对上升幅度 R_σ 、上升段持续时间 T_i 、下降或高值段持续时间 T_d 以及变化全过程总时间 T_w 。当视应力从 σ_{a1} 上升到 σ_{a2} 时, 相对上升幅度 R_σ 为:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{a2} - \sigma_{a1}}{\sigma_{a1}} \tag{8}$$

表 3 视应力变化过程特征参数
Table 3 Characteristic parameters of apparent stress variation

序号	时间 (年-月-日)	地点	震级	相对上升幅度 R_σ	变化过程持续时间/a		
					上升段 T_i	下降或高值段 T_d	总时间 T_w
1	2010-02-27	智利	$M_W8.8$	1.2	4	0	4
2	2011-03-11	日本本州	$M_W9.1$	1.4	8	2.25	10.25
3	2021-07-29	阿拉斯加	$M_W8.2$	2.4	9	4.5	13.5
4	2013-07-22	岷县	$M_S6.6$	1.1	2.583	0	2.583
5	2014-08-03	鲁甸	$M_S6.5$	0.9	3.25	0.333	3.583
6	2017-08-08	九寨沟	$M_S7.0$	1.87	4.3	2.083	6.383
7	2019-06-17	长宁	$M_S6.0$	0.3	5	1.46	6.46
8	2021-05-21	漾濞	$M_S6.4$	1.1	2.667	1.583	4.25
9	2021-09-16	泸县	$M_S6.0$	0.67	7.5	2.3	9.8
10	2022-01-08	门源	$M_S6.9$	2.0	6.5	4.5	11
11	2022-09-05	泸定	$M_S6.8$	1.24	5	2.667	7.667

我们分析了这些参数与震级 M 的关系(图 7):

$M = 0.623R_\sigma + 5.817 \pm 0.64 \quad (r = 0.91) \quad (9)$

$M = 0.234T_i + 5.744 \pm 2.15 \quad (r = 0.39) \quad (10)$

$M = 0.226T_d + 6.202 \pm 1.53 \quad (r = 0.61) \quad (11)$

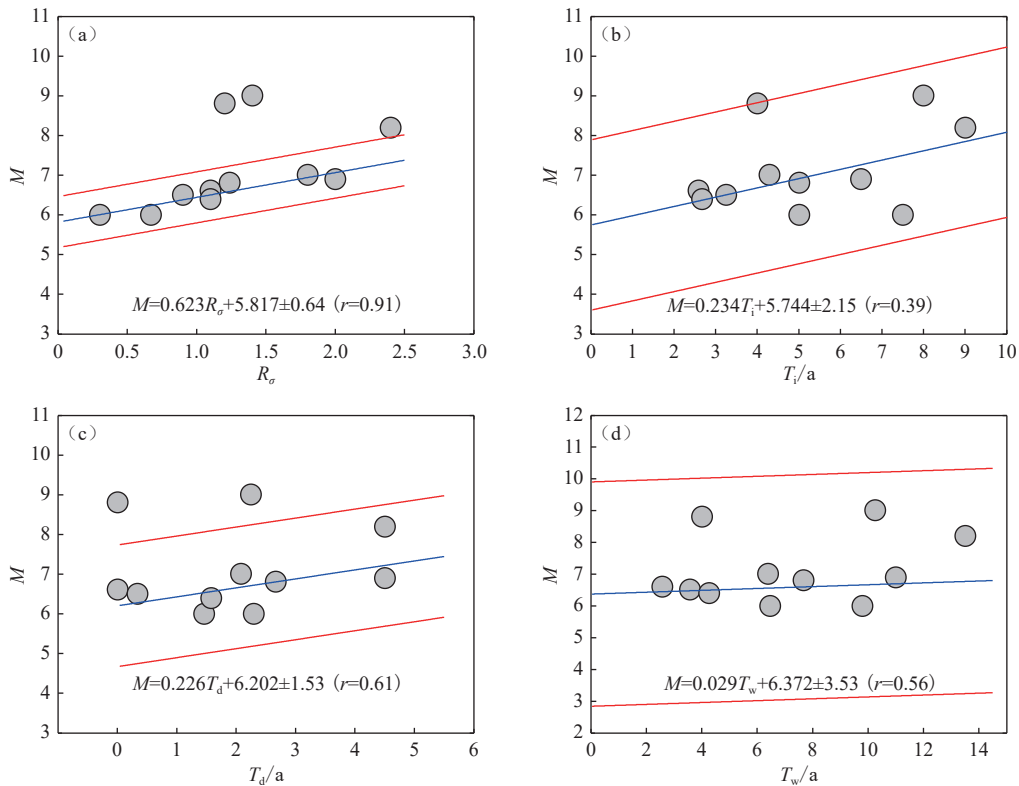


图 7 (a) 视应力相对上升幅度 R_σ 与震级 M 的关系; (b) 视应力上升阶段持续时间 T_i 与震级 M 的关系; (c) 视应力下降或高值段持续时间 T_d 与震级 M 的关系; (d) 变化过程总持续时间与震级 M 的关系(红色实线为 1 倍标准差范围)
Fig. 7 (a) The relative increase in apparent stress R_σ versus magnitude M ; (b) The duration of the period of increase in apparent T_i versus magnitude M ; (c) The duration of the period of decline in or high value of apparent stress T_d versus magnitude M ; (d) The duration of the whole process of the change in apparent stress versus magnitude M

$$M = 0.029T_w + 6.372 \pm 3.53 \quad (r = 0.56) \quad (12)$$

这些式子中给出的是 11 个震例中的 9 个震例拟合的结果。智利 $M_w8.8$ 和日本本州 $M_w9.1$ 属于板缘强震, 明显偏离其他地震, 被排除在外了。图 7 中红色实线给出了 1 倍标准差范围。在 4 个参数中, 视应力相对上升幅度 R_σ 与震级之间的相关性最好, 相关系数最高, 达 0.91, 标准误差最小, 为 0.64。地震的大小与地震发生时释放的地震波能量有关, 地震越大, 释放的地震波能量就越多。地震波能量来自于岩石中积累的弹性应变能。弹性应变能与应力和应变的乘积成正比。当应力增加越多时, 积累的弹性应变能就越大。在这种情况下发生的地震, 释放的地震波能量就越多, 地震的强度就越大。这或许就是视应力相对变化幅度与震级之间存在着良好的相关关系的根本原因。

2.2 震中判定

图 5 中显示, 当 p 值的时间变化达到最低值时, p 值在空间形成低值集中分布区, 未来强震的震中绝大多数位于这个低 p 值集中区内或其附近。也有个别地震离得稍远, 比如土耳其地震。尽管土耳其地震震中离低 p 值集中区相对较远, 但它们也都在东安纳托尼亚断裂带上。因此, 可以根据低 p 值集中区来确定未来发生的强震所在的地区。另外, 我们也研究了 b 值在下降阶段的相对下降幅度的空间分布, 发现在震中及其附近地区, b 值的相对下降幅度最大^[32-35]。因此, 也可以将 p 值集中区与这个结果结合起来, 对未来强震震中进行综合判定。

2.3 发震时间判定

发生强震前, 震源区处于不稳定阶段时, 可能会出现 p 值降低, p 值降至低于 5% 进入发震中短期阶段。表 4 给出了 p 值低于 5% 时至发震时刻的时间间隔(ΔT), 除帕克菲尔德 $M_w6.0$ 地震外, p 值低于 5% 时至发震时刻的时间间隔平均为 2 年, 最少 8 个月, 最多 4.5 年, 85.7% 的震例在 3 年内。图 8 给出了 ΔT 与震级 M 的关系, 可以看出, ΔT 与震级 M 之间没有显著相关性。

这个时间间隔相当于地震孕育进入中短期阶段, 即根据 ΔT 无法判定孕震过程进入短临阶段。但如果结合地球物理观测前兆异常, 有可能实现短临地震预测。如, 芦山地震孕育过程始于 2007 年, 到 2011 年震中附近地区已经进入亚失稳状态, 特别是 2012 年初以后, 亚失稳进一步快速发展。在中短期前兆异常方面, 川西地区的跨断层形变自 2010 年起

表 4 各震例 p 值低于 5% 的时间间隔

Table 4 Time interval of earthquakes when $p < 5\%$

序号	震例	$\Delta T/a$
1	印尼苏门答腊 $M_w9.0$	4.5
2	智利比奥比奥 $M_w8.8$	0.67
3	日本本州 $M_w9.1$	2.25
4	美国阿拉斯加 $M_w8.2$	2.58
5	美国里奇克莱斯特 $M_w7.1$	0.67
6	美国帕克菲尔德 $M_w6.0$	9.0
7	土耳其加齐安泰普 $M_w7.8$	3.0
8	河北唐山 $M_s7.8$	1.58
9	四川汶川 $M_s8.0$	1.417
10	四川芦山 $M_s7.0$	2.0
11	四川九寨沟 $M_s7.0$	0.75
12	青海门源 $M_s6.9$	1.0
13	四川泸定 $M_s6.8$	4.5
14	四川泸县 $M_s6.0$	1.5
15	四川长宁 $M_s6.0$	1.5

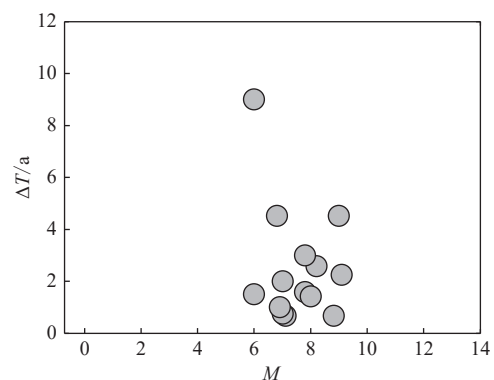


图 8 p 值低于 5% 的时间间隔 ΔT 与震级 M 的关系

Fig. 8 Time interval ΔT versus magnitude M when $p < 5\%$

出现群体性、准同步的异常趋势转折^[36-37], 这个异常与 p 值揭示的震中附近地区处于不稳定状态的时间非常一致。在短临前兆异常方面, 姑咱台分量钻孔应变仪的记录资料显示, 2012 年 9 月起不时出现“压性脉冲”和“潮汐畸变”异常信号, “潮汐畸变”信号持续到 2012 年年底。从 2013 年 4 月 15—19 日, 4 路应变同时出现大幅度的突跳变化^[38]。FY-2 卫星云图与红外亮温数据分析显示, 2013 年 4 月 17 日延展数千米的线性云在芦山震中处交汇^[39]。如果结合孕震过程, 将这些前兆异常进行综合分析, 对实现芦山地震的短临预测无疑是非常有意义的。

3 讨论和结论

本文在分析了全球范围内发生的 15 次地震的孕育过程的基础上,提出了基于地震孕育过程追踪的地震预测思路和依据。这些震例在空间上主要分布在环太平洋地震带和欧亚地震带以及我国大陆地区。它们的震源机制主要是走滑型、逆冲型以及逆冲兼走滑型。最小震级为 $M_S 6.0$, 最大震级为 $M_W 9.1$ 。在分析过程中,将 b 值与视应力进行联合分析,以获取震源区的应力状态;根据与地球自转相关的地震活动性来描述震源区的临界状态或亚失稳状态,得到了如下结果:

(1) 强震发生前,在震中及其附近地区存在显著的应力增长过程。震前,在紧临强震发生时的几年时间里地震活动受到地球自转速率变化的控制,显示出亚失稳或临界状态的特征,表明天然地震孕育过程与岩石实验中岩石破坏前所经历的过程是一致的。

(2) 强震三要素判定依据。

① 地震强度判定:根据式(6),由 b 值快速下降阶段持续时间 T_r 估计震级;根据式(9),由视应力相对上升幅度 R_σ 估计震级;可以将上述得到的两个震级的平均值作为预测震级。

② 震中判定:联合利用 p 值的时间变化达到最低值期间低 p 值空间分布集中区以及 b 值在下降阶段的相对下降幅度最大区域,可以确定震中所在的地区。

③ 发震时间判定:中短期阶段, p 值的时间变化

低于 5% 之后的 3 年时间内,地震发生的可能性可达 80%;短临阶段,在 p 值进入低于 5% 的下降过程期间,当发现震中附近地区出现地球物理观测前兆短临异常时,判定进入短临阶段。

关于所得结果的普适性,本文所涉及的震例的震源机制有走滑型、逆冲型以及逆冲兼走滑型。既有板内地震,也有板缘地震,它们发生在不同的动力环境和构造条件下。震级分布范围为 $M_S \geq 6.0$, 具有一定的普适性。需要说明的是,震例的普适性不应仅用震例的数量来衡量,而应主要考虑地震类型、震级分布范围以及地震发生的动力环境和构造条件。在地球上,地震已经经历多少年? 已发生过多少次地震? 都是未知数。即使是从 1900 年以来,全球已发生近 2400 次 $M_S \geq 7.0$ 地震。如果从数量来考虑震例研究的普适性,那多少次震例才具有普适性呢? 如果按所谓的“多数”来考虑,若 55% 可以算“多数”的话,那也需要做 1320 次,这几乎是没有人可以做到的事情。所以,考虑基于震例数量来认定普适性是没有实际意义的。

地震预测取得突破性进展的关键在于所走的是什么路子。路走对了,离目标就会越来越近。本文提出的地震预测方法具有扎实的物理基础,重点不在于预测方法的依据本身,这些依据尚是初步的,需要更多震例进行完善,需要在实际地震预测工作中接受检验。但,本文提出的预测思路是值得重视的,它对终结地震经验预测,并向物理预测过渡可以起到积极作用,对提升实际地震预测工作水平亦具有指导作用。

参考文献

- [1] 张天中,王琳瑛,刘庆芳.地震短期预测的概率方法浅议[J].国际地震动态,1998(7): 1-5
Zhang T Z, Wang L Y, Liu Q F. Elementary discussion on the probabilistic method of short-term earthquake prediction[J]. Recent Developments in World Seismology, 1998(7): 1-5
- [2] 戴维·维尔琼斯.对分析预报中心发展统计学方法的建议[J].国际地震动态,1997(4): 8-12
Vere-Jones D. Statistical development within the center for analysis and prediction (CAP)[J]. Recent Developments in World Seismology, 1997(4): 8-12
- [3] 张琰,毕金孟,蒋长胜.日本近年来关于地震预测研究的科学计划和科学理念[J].地震科学进展,2024, 54(2): 135-139
Zhang Y, Bi J M, Jiang C S. Scientific plans and concepts of associated researches on earthquake forecast in Japan for recent years[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(2): 135-139
- [4] 马瑾,郭彦双.失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J].地震地质,2014, 36(3): 547-561
Ma J, Guo Y S. Accelerated synergism prior to fault instability: Evidence from laboratory experiments and an earthquake case[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(3): 547-561
- [5] 马瑾.从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J].科学通报,2016, 61(4): 409-414

- Ma J. On “whether earthquake precursors help for prediction do exist” [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(4): 409-414
- [6] Scholz C H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(1): 399-415
- [7] Wyss M. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution[J]. *Geophysical Journal International*, 1973, 31(4): 341-359
- [8] Mogi K. Magnitude-frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1962, 40: 831-853
- [9] Warren N W, Latham G V. An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(23): 4455-4464
- [10] Wyss M. Stress estimates for South American shallow and deep earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(8): 1529-1544
- [11] Wyss M, Molnar P. Efficiency, stress drop, apparent stress, effective stress, and frictional stress of Denver, Colorado, earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(8): 1433-1438
- [12] 陈学忠, 王恒信, 王生文, 等. 地球自转减速对2008年汶川 $M_s8.0$ 地震的作用[J]. *地震*, 2018, 38(2): 127-136
Chen X Z, Wang H X, Wang S W, et al. Effect of the Earth rotation deceleration on the occurrence of the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake[J]. *Earthquake*, 2018, 38(2): 127-136
- [13] Perfettini H, Schmittbuhl J, Rice J R, et al. Frictional response induced by time-dependent fluctuations of the normal loading[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B7): 13455-13472
- [14] Lowry A R. Resonant slow fault slip in subduction zones forced by climatic load stress[J]. *Nature*, 2006, 442(7104): 802-805
- [15] 李艳娥, 陈学忠. 2008年汶川地震前地震的固体潮触发检验[J]. *科学通报*, 2018, 63(19): 1962-1970
Li Y E, Chen X Z. Earth tidal stress as an earthquake trigger prior to the Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(19): 1962-1970
- [16] Tanaka S, Ohtake M, Sato H. Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of $M_w7.5$ [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16): 3-1-3-4
- [17] Tanaka S. Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 ($M_w9.0$), 28 March 2005 ($M_w8.6$), and 12 September 2007 ($M_w8.5$)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(2): L02301
- [18] Tanaka S. Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake ($M_w9.1$)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): L00G26
- [19] 宋贯一. 地球自转速度季节性变化的主要原因解析[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 450-455
Song G Y. Solutions on seasonal transformation of the velocity of Earth rotation[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 450-455
- [20] 郑大伟. 地球自转与大气、海洋活动[J]. *天文学进展*, 1988, 6(4): 316-328
Zheng D W. Earth rotation and the activities of ocean and atmosphere[J]. *Progress in Astronomy*, 1988, 6(4): 316-328
- [21] Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1965, 43(2): 237-239
- [22] Wyss M. Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches[J]. *Geophysical Journal International*, 1970, 19(5): 479-484
- [23] Gutenberg B, Richter C F. Magnitude and energy of earthquakes[J]. *Annals of Geophysics*, 1956, 9(1): 1-15
- [24] Zobin V M. Apparent stress of earthquakes within the shallow subduction zone near Kamchatka Peninsula[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(3): 811-820
- [25] Boatwright J, Choy G L. Teleseismic estimates of the energy radiated by shallow earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B2): 2095-2112
- [26] Schuster A. On lunar and solar periodicities of earthquakes[J]. *Proceedings of Royal Society of London*, 1897, 61(369/377): 455-465
- [27] Heaton T H. Tidal triggering of earthquakes[J]. *Geophysical Journal International*, 1975, 43(2): 307-326
- [28] Chen X Z, Li Y N. Relationship between the deceleration of Earth's rotation and earthquakes that occurred before the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(12): 5253-5260
- [29] 陈学忠, 李艳娥, 隗永刚, 等. 本州 $M_w9.1$ 地震前破裂区内地震与地球自转之间的相关现象[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2): 440-444
Chen X Z, Li Y E, Wei Y G, et al. Relationship between the Earth's rotation rate and earthquakes occurring prior to the 2011 $M_w9.1$ Tohoku-Oki Japan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2): 440-444

- [30] Li Y N, Chen X Z, Chen L J. The Earth's rotation-triggered earthquakes preceding the occurrence of the 2019 $M_{7.1}$ Ridgecrest earthquake[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 3021-3034
- [31] 隗永刚, 陈学忠, 李艳娥. 唐山 $M_{5.8}$ 级地震前中小地震与地球自转的关系[J]. *科学通报*, 2018, 63(18): 1822-1828
Wei Y G, Chen X Z, Li Y E. Relation between Earth's rotation and small earthquakes occurring before the $M_{5.8}$ Tangshan mainshock[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(18): 1822-1828
- [32] 陈丽娟, 陈学忠, 李艳娥, 等. b 值下降幅度与汶川 $M_{8.0}$ 地震孕震区的关系[J]. *地震地质*, 2022, 44(4): 1046-1058
Chen L J, Chen X Z, Li Y E, et al. Relationship between decreasing amplitude of b -value and the seismogenic zone of the Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(4): 1046-1058
- [33] Li Y E, Chen X Z, Chen L J. Joint analysis of b -value and apparent stress before the 2011 $M_{9.0}$ Tohoku-Oki, Japan earthquake[J]. *Earthquake Science*, 2021, 34(4): 323-333
- [34] 陈学忠, 李艳娥, 陈丽娟. 唐山 $M_{5.8}$ 地震前 b 值异常特征[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(10): 3612-3618
Chen X Z, Li Y E, Chen L J. Anomalies of the b value prior to the $M_{5.8}$ Tangshan earthquake of 1976[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(10): 3612-3618
- [35] Chen X Z, Li Y N, Chen L J. The characteristics of the b -value anomalies preceding the 2004 $M_{9.0}$ Sumatra earthquake[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 390-399
- [36] 刘冠中, 马瑾, 杨永林, 等. 川西地区长周期气温变化对跨断层位移观测的影响及芦山 $M_{7.0}$ 地震前的异常断层活动[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2150-2164
Liu G Z, Ma J, Yang Y L, et al. Effect of long-term surface temperature variation on fault displacement observation and anomalous fault movement in Western Sichuan before the Lushan $M_{7.0}$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2150-2164
- [37] 苏琴, 杨永林, 郑兵, 等. 4·20 芦山 7.0 级地震预测思路及过程回顾[J]. *地震地质*, 2014, 36(4): 1077-1093
Su Q, Yang Y L, Zheng B, et al. A review of the thinking and process about prediction of Lushan $M_{7.0}$ earthquake on Apr. 20, 2013[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(4): 1077-1093
- [38] 池顺良. 分量钻孔应变仪记录的汶川、芦山强震前兆应变异常[J]. *科技导报*, 2013, 31(12): 27-30
Chi S L. Strain anomalies before Wenchuan and Lushan earthquakes recorded by component borehole strainmeter[J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(12): 27-30
- [39] 吴立新, 郑硕, 仲小红, 等. 四川芦山 $M_{7.0}$ 级地震前卫星线性云异常现象[J]. *科技导报*, 2013, 31(12): 23-26
Wu L X, Zheng S, Zhong X H, et al. Satellite linear clouds anomaly before $M_{7.0}$ Lushan earthquake[J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(12): 23-26