

*Whether earthquake precursors help for prediction do exist?*

# 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起

马瑾

中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

E-mail: majin@ies.ac.cn

2015-11-04 收稿, 2015-11-25 修回, 2015-11-26 接受, 2016-01-18 网络版发表

国家自然科学基金(41172180, 41572181)资助

**摘要** 是否存在有助于预报的地震先兆? 作者认为地震是以突发形式表现的构造变形, 它发生前有一个由慢变快的物理过程, 地震是应有先兆的. 寻找先兆除受观测仪器、测点布局、以及地震先兆与主震之间关系复杂性等的限制外, 能否抓住关键时段也十分重要. 地震是一个力学过程, 断层处于应力峰值强度后的亚失稳阶段时, 已进入一个不可逆的变形阶段, 标志着地震发生已不可避免. 因此这个阶段与地震发生有唯一性的关系.

**关键词** 地震先兆, 亚失稳阶段, 唯一性

## 1 问题的提出

美国 *Science* 杂志在创刊125周年之际把“是否存在有助于预报的地震先兆”列为125个最具挑战性科学问题之一. 问题的提出避开了地震是否能预报的争论, 首先提出是否存在有助于预报的地震先兆这个前提条件. 显而易见的是: 迄今为止破坏性地震屡屡发生, 而提前预报出来的震例却是凤毛麟角; 地震预报的科学性和社会性并存, 在不能准确预报的情况下, 漏报和虚报都会造成损失.

大震后为了取得经验, 科学家收集整理了很多震例, 开展了大量回溯性研究<sup>[1-9]</sup>. 在这些研究中提出了很多“前兆”, 由于一时无法证明现象与地震之间的关系, 很多人开始改称这些“前兆”为异常. 它们包括物理、化学或生物等的变化, 如应变率, 地震波速和电导率, 地下水、土壤和空气中氡浓度等的变化, 近地表及其上方的电磁变化, 热异常, 动物行为异常和地震活动性图像等.

## 2 至今不能确认地震先兆的原因

那么是否存在有助于预报的地震先兆呢? 显而

易见, 地震本身就是以突发形式表现的构造变形, 它的发生有一个由慢变快的物理过程, 怎么能没有先兆呢? 既然如此, 为什么至今没有被我们确认呢? 中国有一支研究地震前兆的队伍, 作者结合中国地震实际情况, 从以下几方面进行分析.

### 2.1 观测到的异常与地震关系的唯一性不能得到确认

在20世纪80年代后期, 国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)下属的地震预测委员会建立了一个评估前兆的同行评议程序. 企图寻找能识别出确保目标事件将以很高的概率发生在某个特定区域内的诊断性前兆<sup>[10]</sup>. 到1994年, 被该委员会评议的40项前兆中, 31项被拒绝, 只有5项被列入有意义的前兆. 1997年的总结中提出“没有一项被提出的前兆已被清晰地理解而现在就可用于预测<sup>[11]</sup>”. 地震之间的可比性差, “前兆”与地震之间没有唯一的关系, 寻找目标事件“前兆”的努力未能获得预期的结果. 作者认为每一次地震的孕育发展随着它所在地区的地质条件(其中包括构造条件、介质条件以及状态等因素)而变化, 可能发生的“前兆”也不相同. 大震后对

**引用格式:** 马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起. 科学通报, 2016, 61: 409-414

Ma J. On “whether earthquake precursors help for prediction do exist” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 409-414, doi: 10.1360/N972015-01239

震兆的回顾得到的往往是个性,而不是共性.

## 2.2 台站空间覆盖率差,没有观测到关键现象

1976年唐山地震前地震局管理的全国台站只有260多个,观测项目包括地震、地磁地电、重力、地形变、地应力、地下流体等.其中京津唐地区台站较多,有30个台站,落到唐山附近只有宁河、陡河、迁西和滦南台几个<sup>[3]</sup>.而且这些台站都是在1966年邢台地震后建立的,很难掌握地震前变化的全貌.2008年汶川地震时,活动性较强的上盘位于山区,台站稀少.

## 2.3 仪器的分辨率与频率范围和地震过程的不符

地震震动的频率跨越6个数量级,幅值跨越8个数量级,早期的模拟记录无法全面反映地震的情况.构造变形缓慢,早期的构造变形分析建立在每年一次以至几年一次的测量基础上.20世纪70年代初期,地震模拟记录的频率范围在0~20 Hz间.缓慢构造变形与快速构造变形(地震)的观测在频率上存在很大空段.观测技术的提高和台网密度的增加,为我们开辟了新视野.跨断层形变测量的台站逐渐由每天一次的数据,扩展到小时值、分钟值,以至秒值.GPS观测台网也有很大改进.地震仪器观测频段也扩大到5~400 Hz<sup>[9]</sup>.20世纪70年代有人报道存在人感地动或慢地震,而地震仪没有记录到的现象时,曾经不得其解.21世纪初观测到地震前存在预滑、震颤(tremor)以及前驱波等现象,为缓慢构造变形与快速地震之间搭起了一座桥梁,也促进了人们对地震问题思路转变<sup>[12]</sup>.预滑、震颤等现象正好刻画了构造变形由慢变快的过程.其实地震前的信息远不止于此,地震前观测到地光和地声,地声的频率一般在几百赫兹左右,而地光的频率则在 $10^{15}$  Hz左右.归根到底,地震的能量在不同频段如何分布,我们了解还很少.

## 2.4 地震先兆与主震关系的复杂性

震源不是孤立的,震源得以错动需要发震断层整体的协调.把视角仅仅盯住震源很难发现“前兆”现象,因为它并不会局限在震源附近.断层也不是孤立的,断层是块体的边界,至少有4个以上界面共同控制着一个块体的运动,其中之一,是块体的底部,它的活动涉及深部解耦过程.由此可见断层失稳的“前兆”绝不局限在发震断层上.正因为如此,中国地震界关于“场兆与源兆”以及“以场求源”进行过多年

的讨论和探索<sup>[6,9]</sup>.

## 3 是否存在与地震发生有唯一关系的过程?

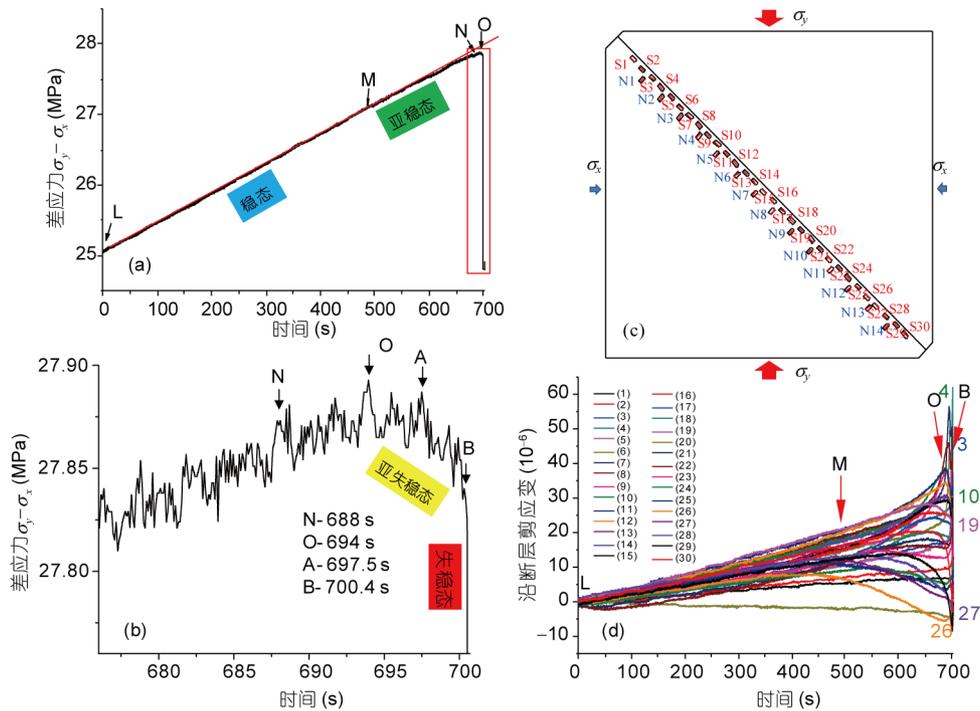
### 3.1 地震发生的力学过程

地震是一个力学过程<sup>[13]</sup>,是累积应力快速释放的过程,识别地震前断层所处的应力状态是关键<sup>[14,17]</sup>.借用一个实验结果来简单加以说明.实验在双轴压力下,横向力( $\sigma_x$ )保持常数,轴向( $\sigma_y$ )以等位移速率方式加载.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4种状态(图1(a)和(b)).它们分别以应力-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O)和失稳点(B)分割.众所周知,在稳态阶段,断层处于弹性变形阶段,只要外力撤除,变形立即恢复;在亚稳态阶段断层处于偏离线性阶段,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,而局部损伤区无法恢复;进入亚失稳阶段,断层已经处于以释放为主的变形阶段,外载的增加量已不足以弥补断层的应力释放水平.这时,即使外载不再增加,断层亦可进入自失稳演化阶段.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.

地震是地壳运动的结果,存在一个由缓慢变形向快速发展的过程,但是不是所有的构造变形最终都会导致地震发生.从亚稳态转变为亚失稳态的核心是发震断层进入了不可逆变形过程,它标志着地震不可避免地会发生.不可逆过程的存在是地震可预报性的基本逻辑基石.抓住亚失稳阶段的特点也就是找到了与地震发生有唯一关系的过程.以往从物理、化学以及生物角度的观测只是力学过程引起的结果,它们与力学过程之间的关系不是唯一的,而断层所处的应力状态才是本质.

### 3.2 识别亚失稳应力状态的可能性及初步结果

亚失稳阶段位于强度极限点(O)和失稳点(B)之间,是应力由积累为主转变为释放为主的关键阶段,也是由稳态向失稳的转折阶段<sup>[18]</sup>.亚失稳又可分为前期的准静态应变释放阶段和后期的准动态应变释放阶段,它们之间的转折点为(A),位置参见图1(b).从沿断层的30个测点(图1(c))应力随时间的变化(图1(d))中可以看到,在稳态阶段(LM)不同部位的应变



**图 1** 一次黏滑事件中差应力-时间过程(a)及变形阶段的划分。(b)为(a)中红框所示时段的放大；(c) 断层结构、加载方式；(d) 沿断层不同测点应变随时间的变化。字母表示关键变形时刻，L，起始点；M，屈服开始点；N，强屈服点；O，强度极限点；A，准静态向准动态释放转换点；B，失稳点  
**Figure 1** Differential stress versus time during a stick-slip event (a) and division of deformation stages. (b) Enlarged temporal stage marked by red box in (a). (c) Fault structure and loading way. (d) Strain variations with time at measurements sites along the fault. Letters are crucial times of deformation. L, beginning point; M, yield point; N, intensive yield point; O, limit strength point; A, turning point from quasi-static to quasi-dynamic release; B, instability point

变化一致，并保持线性，在此阶段出现震兆的可能性很少；亚稳态阶段(MO)不同部位的应变变化开始分化，少数部位出现应变释放，这些变化随时间逐渐加剧(NO)；亚失稳态(OB)是断层发震前的最后阶段，亦是地震前各物理量变化最突出的阶段。因此，亚失稳阶段应是震兆最丰富，变化最激烈的阶段。抓住这个变形阶段可以达到事半功倍的效果。

在应力时间过程中很易识别出亚失稳开始时间(O)，因为它是应力变化的峰值点，在实验室已经可以识别亚失稳阶段。与此同时，我们也很容易识别亚失稳阶段中从准静态阶段向准动态阶段的转折点(A)，并且在实验室能屡屡提前预测失稳的开始，问题在于在野外我们很难确定断层所处应力状态。

利用实验室既可以从加载压机的记录中观测到标本应力总体释放率，也可以从布设在标本表面的众多传感器以及面上的观测手段记录多种物理场的时空演化的优点，开展了系列实验研究，寻找亚失稳阶段不同物理场的变化特点。这方面研究的初步结果为野外识别亚失稳阶段打下了基础，主要结果概

括为如下几方面。

(i) 从断层活动的协同化进程中识别应力状态所处阶段。我们用协同化来描述断层的失稳过程。断层上应变释放过程包括释放区产生(MO)、扩展和增加(OA)以及释放区的联结(AB)三个阶段。协同化过程的本质是断层上愈来愈多的部位相继破坏和弱化，应力逐步转移到局部高闭锁部位，进而使其应力达到能导致快速释放的条件。我们通过一个示意图来描述这个过程(图2)。由N至O以及由O至A应变释放区扩展的速度只是平稳增加，而由A至B的扩展速度是数量级的增加；由OA向AB的转变正发生在由准静态释放向准动态释放的转变时刻A。与此同时，在断层上的挤压区开始加速应变积累，随着积累范围的迁移和缩小，应力水平逐步提高。失稳发生在由高应力向低应力转变的梯度带。(ii) 不同物理场的相互印证。实验室的研究表明既可以从应变场<sup>[17]</sup>、位移场<sup>[15,21]</sup>，也可以从断层带升温过程中看到断层协同化过程<sup>[16,22]</sup>。此外，还可以从温度场上识别出A时刻。有两种引起温度变化的机制：其一是人所皆知

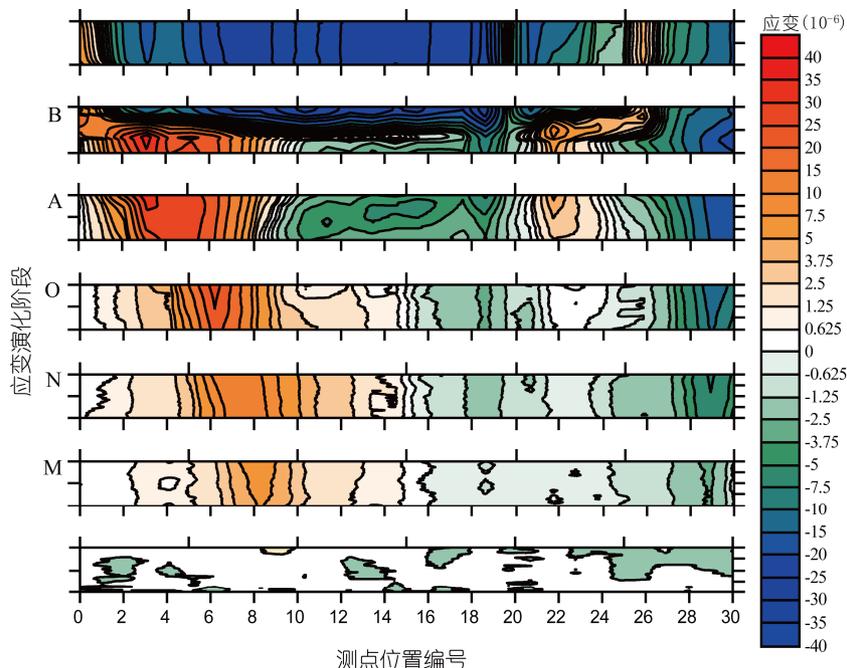


图 2 不同变形阶段沿断层的应变变化. 暖、冷色调分别表示应变积累(挤压)和释放(拉张), 自下而上分别表示变形发展的关键时刻(M前, M, N, O, A, B和B后)应变沿断层的变化

Figure 2 Strain variations at different deformation stages along fault. Warm and cold colors represent strain accumulation (compression) and release (extension), respectively. From bottom to top are strain changes along fault at crucial times (before M, M, N, O, A, B, and after B)

的摩擦增温, 其二是体积应变引起温度变化, 即挤压升温, 拉张降温<sup>[18]</sup>. 亚失稳阶段恰巧是2种温度变化并存和转化的阶段: 断层以摩擦引起的升温为主, 而断层两侧块体以应变释放引起的降温为主. A时刻后断层的加速升温 and 岩块的相对降温清晰可见. 实验结果为野外识别A时刻提供了分析思路<sup>[22]</sup>. 利用实验室得到的不同阶段物理场演化特点对野外观测数据进行了初步分析, 也获得了一些可喜的结果<sup>[19,20]</sup>.

(iii) 意义. 亚失稳应力状态的提出, 把不同时间和空间尺度失稳前的过程统一到应力状态的框架内, 不是用时间尺度, 而是用应力状态来衡量, 使不同尺度的失稳间有了可比性, 增加了对物理本质的理解; 协同化现象的提出使我们把孤立的点观测联系为时、空、强三维关系, 说明要了解地震的发生过程需要了解多种物理场的时空演化.

综上所述, 寻找亚失稳阶段的变化特征, 有助于

找到与地震发生有唯一关系的变形过程. 由应力积累为主转变为应力释放为主提示了失稳可能发生, 而由准静态阶段向准动态阶段的转变提示失稳的不可逆转和临近; 亚失稳阶段中应变的积累区与未来的震源有关; 而协同化过程中断层应变释放区域愈长, 应变积累区的应变愈高, 可能发生的震级会愈高.

#### 4 结语

地震先兆是有的, 问题在于是否能观测、记录到, 即使观测到了, 又是否能识别. 上述研究是在动力学条件、构造条件、介质条件都比较简单的实验室条件下进行的. 很多因素尚未充分研究, 例如, 瞬间因素对地震的触发作用会增加地震过程的不确定性等. 实验室的观测条件可以达到高密度、高分辨率、多物理场同步观测; 野外地质构造复杂、加载条件多样、台站稀少, 要达到实验室观测水平尚需时日. 亚失稳研究从实验室走向野外需要经过持续的努力.

致谢 在本文撰写过程中, 得到中国地震局地质研究所刘力强、刘静和郭彦双等专家的启示和帮助, 审稿专家提出了宝贵意见, 在此一并致谢.

## 参考文献

- 1 Ma Z J, Fu Z X, Zhang Y Z, et al. Nine Major Earthquakes of China in 1966–1976 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1–216 [马宗晋, 傅征祥, 张颖珍, 等. 1966~1976年中国九大地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1–216]
- 2 Zhu F M, Wu G. 1975 Haicheng Earthquake (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1–220 [朱凤鸣, 吴戈. 一九七五年海城地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1–220]
- 3 Compilation Group of 1976 Tangshan Earthquake, State Seismological Bureau. The 1976 Tangshan Earthquake (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1–458 [国家地震局一九七六年唐山地震编写组. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1–458]
- 4 Guo Z J, Ma Z J. Studies of Huge Earthquakes in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988. 1–352 [郭增建, 马宗晋. 中国特大地震研究. 北京: 地震出版社, 1988. 1–352]
- 5 Zhang Z C, Zheng D L, Luo Y S, et al. Preliminary research of precursory data in “Earthquake Cases in China” (in Chinese). Earthquake, 1990, 10: 9–24 [张肇诚, 郑大林, 罗咏生, 等. 《中国震例》前兆资料的初步研究. 地震, 1990, 10: 9–24]
- 6 Mei S R, Feng D Y, Zhang G M, et al. Introduction to Earthquake Prediction in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 1–498 [梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 1993. 1–498]
- 7 Chen Y T. Earthquake prediction: Retrospect and prospect (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39: 1633–1658 [陈运泰. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1633–1658]
- 8 Zhang G M. Selected Research Papers on Earthquake Prediction (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2013. 1–623 [张国民. 地震预测科学研究论文选. 北京: 地震出版社, 2013. 1–623]
- 9 Chen Z L, Li Z X. Scientific Principles and Logical Thought in Earthquake Prediction (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2013. 1–202 [陈章立, 李志雄. 地震预报的科学原理与逻辑思维. 北京: 地震出版社, 2013. 1–202]
- 10 Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, et al. Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for utilization. Ann Geophys, 2011, 54, doi: 10.4401/ag-5350
- 11 Wyss M. Second round of evaluations of proposed earthquake precursors. Pure Appl Geophys, 1997, 149: 3–16
- 12 Cyranoski D. A seismic shift in thinking. Nature, 2004, 431: 1032–1034
- 13 Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. Ratio of loading to unloading: A new method of earthquake prediction (in Chinese). Chin J Geophys, 1994, 37: 767–775 [尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比: 一种新的地震预报方法. 地球物理学报, 1994, 37: 767–775]
- 14 Ma J, Sherman S I, Guo Y S. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault. Sci China Earth Sci, 2012, 42: 869–881 [马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别—以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例. 中国科学: 地球科学. 2012, 42: 633–645]
- 15 Zhuo Y Q, Guo Y S, Ji Y T, et al. Slip synergism of planar strike-slip fault during meta-unstable state: Experimental research based on digital image correlation analysis. Sci China Earth Sci, 2013, 56: 1643–1650 [卓燕群, 郭彦双, 汲云涛, 等. 平直走滑断层亚失稳状态的位移协同化特征—基于数字图像相关方法的实验研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1881–1887]
- 16 Ren Y Q, Liu P X, Ma J, et al. Experimental study on evolution of thermal field of an echelon fault during the meta-unstable stage. (in Chinese). Chin J Geophys, 2013, 56: 2348–2357 [任雅琼, 刘培洵, 马瑾, 等. 亚失稳阶段雁列断层热场演化的实验研究. 地球物理学报, 2013, 56: 2348–2357]
- 17 Ma J, Guo Y S. Accelerated synergism prior to fault instability: Evidence from laboratory experiments and an earthquake case (in Chinese). Seismol Geol, 2014, 36: 547–561 [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. 地震地质, 2014, 36: 547–561]
- 18 Chen S Y, Liu L Q, Liu P X, et al. Theoretical and experimental study on relationship between stress-strain and temperature variation. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 52: 1825–1834 [陈顺云, 刘力强, 刘培洵, 等. 应力应变与温度响应关系的理论与实验研究. 中国科学: 地球科学, 2009, 39: 1446–1455]
- 19 Shapiro S A, Rentsch S, Rothert E. Characterization of hydraulic properties of rocks using probability of fluid-induced microearthquakes. Geophysics, 2005, 70: F27–F33
- 20 Liu Y Z, Ma J, Ma W T. The role of the Zipingpu reservoir in the generation of the Wenchuan earthquake (in Chinese). Earth Sci Front, 2014, 21: 150–160 [刘远征, 马瑾, 马文涛. 探讨紫坪铺水库在汶川地震中的作用. 地学前缘, 2014, 21: 150–160]
- 21 Zhuo Y Q, Ma J, Guo Y S, et al. Identification of the meta-unstable stage via synergy of fault displacement: An experimental study based on the digital image correlation method. Phys Chem Earth A/B/C, 2015, 85–86: 216–224
- 22 Ren Y Q. Experimental study of evolution of the thermal field in the meta-unstable stage of faults and its application to earthquake precursors analysis (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2015. 1–114 [任雅琼. 断层亚失稳阶段热场演化的实验研究及野外应用探索. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015. 1–114]

## On “whether earthquake precursors help for prediction do exist”

MA Jin

*State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

Whether earthquake precursors help for prediction do exist? This paper attempts to answer this question from the mechanism of tectonic deformation. Because an earthquake is sudden slip on a fault, a physical process from slow to fast should happen prior to its occurrence. Consequently, observable precursors should appear before earthquakes. Whereas, to detect such precursors remains a difficult task. In addition to some limitations of the effort, such as observational instruments, deployment of measurement sites, and complicated relations between the precursor and main shock, it is an important step whether the crucial temporal stage can be recognized. An earthquake is a mechanical process. From the differential stress-time process, the deformation of the seismogenic fault should have four states, i.e. stability, meta-stability, meta-instability, and instability. In the stability and meta-stability stages, when the external force is removed, the strain of the fault can be recovered to some extent. As the causative fault enters the meta-instability stage, it is just the deformation stage dominated by release behind the stress peak strength. After this moment, even if no external force is loaded, the fault has entered an evolutionary stage of self-instability, i.e. an irreversible deformation stage, indicating the seismic event is bound to occur. Thus, this stage has a relation of uniqueness with the burst of the earthquake.

**earthquake precursor, meta-instability stage, uniqueness**

doi: 10.1360/N972015-01239



### 马瑾

1934年生, 中国地震局地质研究所研究员, 中国科学院院士. 1962年毕业于前苏联科学院大地物理所构造物理专业, 获副博士学位. 从野外调查、实验模拟及理论分析等方面研究构造变形的物理机制及与此相关的实际问题. 自1966年邢台地震发生后, 研究重点转向与地震形成机理和预测有关的构造物理问题. 目前正致力于“亚失稳应力状态的识别及演化趋势”和“地震前准动态失稳形成的动力条件和过程”方面的研究.