

吴忠良、蒋长胜, 2006, 地震前兆检验的地球动力学问题, 中国地震, 22(3), 236 ~ 241。

# 地震前兆检验的地球动力学问题

## 对地震预测问题争论的评述(之三)

吴忠良<sup>1), 2)</sup> 蒋长胜<sup>1)</sup>

1) 中国科学院研究生院计算地球动力学实验室, 北京石景山区玉泉路 19 号甲 100049

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京海淀区民族大学南路 5 号 100081

**摘要** 地震前兆的效能检验问题既是地震预测研究中的一个基本问题, 也是近年来围绕地震预测问题的一个争论焦点。传统的地震预测研究中关于地震前兆机理的一个基本假定, 即地震前兆来自地震孕育过程中应力场的某种变化, 与传统的地震前兆检验方案, 即针对“异常”信息统计与地震之间的“对应”情况, 并进行统计显著性检验, 存在一个内在的逻辑矛盾。地震前兆的检验不是一个简单的统计问题, 而是一个地球动力学问题, 不考虑地球动力学的地震前兆检验是没有意义的, 由此得到的检验结果则可能对相关研究造成误导。

**关键词:** 地震前兆 效能检验 地球动力学 应力场

[文章编号] 1001-4683(2006)03-236-06

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

## 0 引言: 地震前兆检验——地震预测研究中的一个基本问题

世纪之交关于地震预测问题的争论已近 10 年。10 年来, 地震预测研究不断开展(吴忠良等, 2005)。争论本身也使对一些重要的科学问题的认识得到深化, 例如, 如何认识地震的物理可预测性、如何认识地震预测检验问题、如何将近乎确定性的预测(prediction)与概率性的预测(forecasting)区分对待, 等等(作为评述, 参见吴忠良, 1998、1999; Jackson, 2004; 观点性的论述, 参见 [http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake\\_frameset.html](http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_frameset.html), 1999), 但有些基础性的科学问题, 仍没有从根本上得到解决。

在关于地震预测问题的争论中, 地震前兆检验问题始终是一个讨论的焦点(Kagan, 1996; Stark, 1996、1997; Geller, 1997)。20 世纪 60 年代地震预测研究刚刚起步的时候, 人们认为可以找到一些作为“前兆”的物理量, 这些物理量的“异常”变化达到一定程度往往预示着即将发生地震, 总结过去的经验可为未来的地震预测提供重要的线索。当时报道和讨论了很多前兆现象。但是, 随着观测资料的积累, 人们越来越多地注意到地震前兆的表现要比最初预期的复杂得多(Wyss, 1991; Wyss et al., 1997)。一些地震学家因“地震前兆”的变化过于复杂, 并且“对应地震”的“成功率”低于随机预测的成功率, 而断言迄今报道的所有地震

[收稿日期] 2006-02-17; [修定日期] 2006-03-19。

[项目类别] 国家 973 项目(2004CB418406)资助。

[作者简介] 吴忠良, 男, 生于 1963 年, 中国科学院研究生院地球科学学院教授, 中国地震局全国“测震”学科技术协调整组长。主要研究方向为地震学和地震预测研究。E-mail: wuzhl@gucas.ac.cn。

前兆无一可取(Geller et al., 1997)。我们曾经指出,地震前兆的检验问题不是一个简单的统计问题,而首先是一个地震学问题(吴忠良,1999)。本文根据地震孕育的地球动力学研究的近期发展,试图从另一个角度讨论地震前兆检验的基本概念,指出不考虑地球动力学的地震前兆检验结果是没有意义的。就是说,地震前兆的检验不是一个简单的统计问题,而首先是一个地球动力学问题。

## 1 以往研究中地震前兆物理图像与前兆检验方法的一个内在矛盾

地震前观测到的一些物理量的“异常变化”是地震前的应力场变化,或者等效地说是导致地震的地壳形变过程所引起的,这是最初考虑地震前兆的机制时提出的一个基本的物理图像。回过头看,当时的情况似乎多少有些自相矛盾:如果这一物理图像正确,那么地震前兆的检验,从理论上说就不应该像最初设想的那样简单。总结过去几十年的经验,Jackson(2004)曾给出地震前兆所必须满足的4个必要条件:①地震前兆应该在地震到来之前应力变化最为急剧的时候表现最明显;②距离地震越近,前兆应该越明显;③地震前兆应该能用观测到的地壳变形的一些过程来解释;④关于前兆的成因,应该能够排除地震之外的其他可能性。这一总结具有一定的代表性,反映了直到目前地震研究领域对地震前兆的一个基本的概念性认识。其中第1条实际上就是前兆的定义,第4条则是排除干扰的准则。但第2条和第3条只有在粗略的、统计的、大尺度的意义上才能相互一致,而对于具体震例,这两个条件从理论上说是无法相互调和的。导致地震的应力的变化或者地壳形变过程是一个场的概念,因此,一个基本的物理图像是,在同一地震之前,不同地点、不同局部地区的观测,应给出不同的前兆变化,有些点或者有些局部地区本来就“应该没有反映”;换一个角度说,同一观测点对不同的地震,也应有不同的“反映”,不同的“反映”取决于观测点与地震断层之间的相对位置。显然,不首先考虑这个因素,任何“前兆”的搜索和检验,其意义都是有限的。

实际上,在传统的“经验预测”中,人们早已注意到这一简单的思维逻辑的局限。专家的一些“经验”,实际上就是对上面的简单思维逻辑的修正。只是这种修正所根据的,不是清晰的、可以定量表述的物理图像,而常常是专家的经验甚至“直觉”。现在需要解决的问题,是对传统的简单思维逻辑进行修正,修正的基础则是地震的地球动力学模型。

## 2 作为一个地球动力学问题的地震前兆检验

一般认为地震前观测到的一些物理量的“异常变化”是地震前的应力场变化所引起的,Jackson(2004)所说的第3条是目前对于地震前兆的物理图像的基本认识,也是地震预测研究试图检验的重要科学假说之一。与此相应,不同学科、不同手段的异常信息能否在应力场变化或者地球形变的框架下得到一个“自洽的”解释,是地震预测研究试图检验的另一个关键性的科学假说。检验这些科学假说离不开观测,同时也离不开地球动力学模型。

模型和观测的结合点之一是“预期前兆”的概念。Dieterich(1981)的试验清楚地表明,同一地震之前不同地点、不同局部地区的观测,应给出具有不同性质的“预期的”前兆变化。马瑾等(1999)用实验证明断层和构造单元的不同部位具有不同的预期前兆表现和“前兆敏感性”。因此,从地震预测的角度说,只有在一个相对统一的框架下,将整个区域上的所有观测点的情况都考虑在内,才能对地震孕育过程的全貌做出符合实际的描述,从而对地震前兆

的效能做出正确的评估。在实际震例方面,相关的启发性工作就更多。例如,安艺敬一把观测到的前兆与地震孕育和发生的动力学过程联系起来(Aki, 2003);赵玉林等(1996)观察到走滑型的唐山大地震前地电阻率异常呈现四象限型的空间分布;Crampin等(1999)从应力变化、大范围扩容各向异性(EDA)和与地震孕育相关的临界现象的角度考虑S波分裂问题;Bowman和King(2001)将地震位错“反向”从而计算出地震前的应力分布,发现应力增加的区域中可以看到清晰的加速矩释放(AMR)前兆。从地震前兆检验的角度说,只有搞清楚一个观测点与地震之间的关系后,根据前兆与地震之间的“对应”情况对这一观测点上的“地震前兆”进行效能评价和统计检验才是有意义的。换句话说,没有地球动力学模型的概念,事实上无从定义地震前兆的“对应”,更不用说定义“对应率”和“显著性”。

不同的观测手段往往都能给出一些“异常”信息。如何把这些不同观测手段的异常信息“转换”成“应力场变化”或者“地壳形变”的语言,是地震预测研究中的关键问题之一。在经验预测中,这种“转换”是靠专家的会商实现的。物理模型的贡献是可以统一地描述不同种类的前兆观测手段的信息,并将其“转换”成“应力场变化”或“地壳形变”的语言。把不同站点上的、不同学科的、不同手段的观测“综合”成一个统一的动力学过程,在数学上可以表述成一个反演问题:模型应尽量给出一个能满足尽可能多的观测结果的动力过程。

不过模型本身的假定,即“正演”模型,可能就是有问题的。所以必须清楚的是,满足尽可能多的观测结果的动力过程,不一定就是符合实际的。作为这个问题的一个补偿性的解决方案,可以考虑的工作之一,是Keilis-Borok等(2004)提出的“反向前兆追踪”(RTP-Reverse Tracing of Precursors),即,在发现某地出现了“疑似”短临前兆“异常”的情况下,回过头去,看“异常”区在过去的一段更长的时间里,是否存在中长期异常的“背景”和长期尺度上发生地震的条件。从模型的角度说,这样做实际上是要把该地区长期的动力过程和短期的动力过程尽可能地协调起来。

上述3个“统一解释”,即不同地点/不同局部地区的前兆观测的统一解释、不同手段的前兆观测的统一解释、不同时间尺度的动力过程的统一解释,是地球动力学模型应用于地震前兆检验的关键问题。在这方面的没有认真开展之前,无论是声称“地震预测是不可能的”,还是声称所发现的“前兆”或预测方法是“成功”的,都为时过早,因为此时无论是“成功”的概念还是“可能”的概念,都还没有正确地定义。而从这个意义上说,“地震预测是否可能”的问题,现在实际上仍是一个没有答案的问题;面向应用的地震预测研究,现在实际上还没有真正开始。一些地震学家多少有些极端地批评目前的地震预测研究实际上还不是真正的“硬科学”(Kagan, 1999),在相当意义上其实是有道理的,从科学哲学的角度说,他们所讨论的,是地震预测领域的“研究纲领”问题,因而是有很大启发意义和建设性的。不过“当局者迷”之处在于,由于“成功”和“可能”的基本概念是有问题的,“地震不能预测”(Geller et al., 1997; Jackson, 2004)这一过于匆忙的结论,却正是这种有问题的“研究纲领”的一个直接结果。

### 3 地球动力学模型的一个内在问题及其解决方案

关于地震孕育的地球动力学模型,有一个典型的现代物理问题需要解决。这也是为什么直到现在地震预测研究的理论和观测还没有很好地结合的一个重要原因。人们对地下结

构的了解和对地震孕育过程的了解显然是有限的,这就注定了所用的模型肯定是一个简化的模型。那么,在这个简化的模型中,哪些因素对于决定模型中的“预期前兆”和“应力场变化”是不可缺少的,哪些因素是可以“不起作用”的,需要通过反复的计算试验和试验结果与观测结果的比较来回答。可以想见的是,考察这样的科学问题,需要两个同等重要的技术条件作为支撑:一是大型计算,因为过于简单的模型难以解决问题;二是改变参数反复进行计算,因为只有通过大量的计算试验,才能首先从经验上,然后从理论上回答上述问题。显然,只有在高性能计算和网格开始成为科学研究和工程应用的“通用技术”的时代,提出和解决这样的科学问题才成为可能。而目前看来,已经有条件从地球动力学模型的角度,重新审视地震前兆检验这一“经典”的科学问题。

## 4 结论和讨论

尽管向前预测对地震预测方法而言是最重要的、不可取代的检验(Mulargia, 1997),回溯性的前兆效能检验在当前和今后的一段时间内,仍是发现和确认地震前兆的主要方法之一。本文讨论了与地震前兆检验有关的一个基本概念问题,指出地震前兆检验问题不是一个简单的统计问题,而是一个地球动力学问题。从地球动力学的角度看,把观测曲线和一定范围内发生的地震的时间序列进行“对应”,并用这种“对应”关系来回溯性地检验地震前兆的预测效能的方法,与认为地震前兆现象反映了地震前的应力变化过程或者地壳形变过程的基本假定,是不能相互协调的。如果说回溯性地搜索地震前兆、用统计方法检验地震前兆的效能,实际上就是首先给出一个“什么是成功”的定义,然后再寻求一个“成功率”最大的“最优化”解答的过程,那么不考虑地球动力学的“成功”的定义本身就是有问题的。地震预测研究长期以来似乎一直处于一种自相矛盾的状态:一方面,要得到可靠的和有效的前兆,进行地震前兆的效能检验是必不可少的;但另一方面,不考虑地球动力学的效能检验,其本身就大有问题,从而所给出的结论,也往往是误导性的。

现在我们正面临着这一领域的一个转折点。地震前兆检验问题是地震预测研究中的一个“经典”问题,用物理模型来理解地震前兆也一直是地震预测的理论和实验研究中的一个重要的研究方向。之所以重新讨论这两个问题,并将这两个问题放在一起讨论,是因为科学技术的发展,目前已在相当程度上使这一看上去相当复杂的科学问题的研究,开始具有一定程度的可操作性。一个研究方案就是,在地震发生之后,根据对当地的地壳上地幔结构、应力环境、地壳形变过程、地震震源过程的观测,同时考虑地震前观测到的各种前兆资料,“反演”地震的孕育过程,再在这一地球动力学过程的背景下,重新审视观测到的“前兆”异常信息与地震之间的“对应”。

一些地震学家强调,由于不同地区的地壳结构、震源过程等非常不同,所以要积累足够可信的观测资料,需要在一个地区等待相当长的时间(Jackson, 2004)。解决这一“不可能”问题的一个手段,是同时考虑不同的地区,而不同地区的“可比性”就在于尽管地壳结构、震源过程、地震前兆不同,但其背后的地球动力学规律却是可以相互比较的。

这个问题的讨论也提醒我们,在一些探索性的研究领域,诸如地震预测这一研究领域,对于一些很基本的物理概念的一些普遍接受的认识,不一定具有不言自明的正确性。地震前兆的效能检验就是这样一个概念。耐人寻味的是,用物理模型理解地震前兆的理论和实

验研究,从 20 世纪 60 年代以来一直未曾中断,然而自 20 世纪 90 年代至今,在人们围绕地震前兆检验问题和地震预测的可能性问题开展激烈争论的时候,却在相当程度上忽视了这些研究结果对地震前兆检验工作的启示。

致谢:本工作在很大程度上来自作者与石耀霖院士、张国民教授、朱传镇教授的讨论。工作得到中国地震局监测预报司的支持和帮助。与刘桂萍博士的讨论使作者对一些基本问题的表述更为清晰。

## 参考文献

- 马瑾,刘力强、马胜利,1999,断层几何与前兆偏离,中国地震,15(2),106~115。
- 吴忠良,蒋长胜,2005,近期国际地震预测预报进展的几个侧面,中国地震,21(1),103~112。
- 吴忠良,1998,自组织临界性与地震预测:对目前地震预测问题争论的评述(之一),中国地震,14(4),1~10。
- 吴忠良,1999,地震预测统计检验的地震学问题:对目前地震预测问题争论的评述(之二),中国地震,15(1),14~22。
- 赵玉林、卢军、李正南、钱复业、张洪魁,1996,唐山地震应变-电阻率前兆及虚错动模式,地震学报,18(1),78~82。
- Aki, K., 2003, Seismology of earthquake and volcano prediction. ICTP Seventh Workshop on Non-linear Dynamics and Earthquake Prediction, September 29 ~ October 11, 2003, Trieste, Italy, Lecture Notes H4. SMR/1519-10.
- Bowman, D. D. and King, G. C. P., 2001. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes. Geophys. Res. Lett., 28, 4039 ~ 4042.
- Crampin, S., Volti, T. and Stefánsson, R., 1999, A successfully stress-forecast earthquake. Geophys. J. Int., 138, F1 ~ F5.
- Dieterich, J. H., 1981, Potential for geophysical experiments in large scale tests. Geophys. Res. Lett., 8, 653 ~ 656.
- Geller, R. J., 1997, Earthquake prediction: a critical review. Geophys. J. Int., 131, 425 ~ 450.
- Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y. and Mulargia, F., 1997, Earthquakes cannot be predicted. Science, 275, 1616 ~ 1617.
- Jackson, D. D., 2004, Earthquake prediction and forecasting. Geophysical Monograph, 150, IUGG Volume, 19, 335 ~ 348.
- Kagan, Y. Y., 1996, VAN earthquake predictions-an attempt at statistical evaluation. Geophys. Res. Lett., 23, 1315 ~ 1318.
- Kagan, Y. Y., 1999, Is earthquake seismology a hard, quantitative science? Pure appl. Geophys., 155, 233 ~ 258.
- Keilis-Borok, V., Shebalin, P., Gabrielov, A. and Turcotte, D., 2004, Reverse tracing of short-term earthquake precursors. Phys. Earth Planet. Inter., 145, 75 ~ 85.
- Mulargia, F., 1997, Retrospective validation of the time association of precursors. Geophys. J. Int. 131, 500 ~ 504.
- Stark, P. B., 1996, A few statistical considerations for ascribing statistical significance to earthquake predictions. Geophys. Res. Lett., 23, 1399 ~ 1402.
- Stark, P. B., 1997, Earthquake prediction: the null hypothesis. Geophys. J. Int., 131, 495 ~ 499.
- Wyss, M. (ed.), 1991, Evaluation of Proposed Earthquake Precursors. Washington, D. C., American Geophysical Union.
- Wyss, M. and Dmowska, R. (ed.), 1997, Earthquake Prediction, State-of-the-Art. Special Issue, Pure appl. Geophys., 149, 1 ~ 264.

## Performance Evaluation and Statistical Test of Candidate Earthquake Precursors: Revisit in the Perspective of Geodynamics

—Critical Review on the Recent Earthquake Prediction Debate

Wu Zhongliang<sup>1),2)</sup> Jiang Changsheng<sup>1)</sup>

1) Laboratory for Computational Geodynamics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

**Abstract** Performance evaluation and statistical test of candidate earthquake precursors is one of the fundamental problems in earthquake prediction study and controversial issues in the debate on earthquake prediction in recent years. In traditional earthquake prediction studies, a basic understanding of earthquake precursors is that these precursors originate from the change of stress field in the process of earthquake preparation. The traditional scheme for the evaluation of these candidate precursors, on the other hand, accounts for the correlation between the observed precursory change and earthquake occurrence, and then calculates the statistical significance of such a correlation. In this review, it is pointed out that, in the perspective of geodynamics, the above mentioned traditional understanding and test scheme are intrinsically incompatible with each other. Performance evaluation of candidate earthquake precursors is not simply a statistical problem as being treated in the recent earthquake prediction debate. Test of earthquake precursors is a geodynamical problem. Without the consideration of geodynamical models, the test of earthquake precursors is fundamentally misled and regrettably misleading.

**Key words:** Earthquake precursor Performance evaluation Statistical test Geodynamics  
Stress field