

地震预测与统计物理*

吴忠良[†] 陈运泰

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 将现代统计物理学的理论和方法应用于地震和地震预测问题的研究,近年来取得了长足的进展,成为物理学和地震学之间一个最为活跃的交叉领域.这一领域所取得的成果,例如,将地震作为一种临界现象的模型,不仅丰富和深化了对地震的认识,而且改变了地震预测研究中的一些传统观念.文章介绍了这方面的研究进展,讨论了与这一领域相关的一些重要的物理概念和悬而未决的科学问题.

关键词 地震 地震预测 统计物理

EARTHQUAKE PREDICTION AND STATISTICAL PHYSICS

WU Zhong-Liang[†] CHEN Yun-Tai

(*Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China*)

Abstract In recent years, the application of the theory and methods of modern statistical physics to the study of earthquakes and earthquake prediction has had significant progress, and became one of the most active interdisciplinary frontiers between physics and seismology. Developments in this field, such as the earthquake models which regard the earthquake occurrence as a critical phenomenon, not only improved phenomenology and understanding of the physics of earthquakes but also changed some of the traditional know-how and methodology of earthquake prediction. This paper introduces recent advances in this field, with special emphasis on the key concepts and outstanding scientific problems related to the statistical physics of earthquakes.

Key words earthquake, earthquake prediction, statistical physics

1991年冬意大利底里雅斯特(Trieste)一个阳光明媚的上午,亚德里亚海波澜不惊.曾任国际大地测量与地球物理学联合会(IUGG)主席的克依利斯-博罗克(В. И. Кейлис-Борок)走上讲台,多少有些不安地问大家:“对不起,谁看见我的透明片放在哪儿了?”

就这样克依利斯-博罗克院士用娴熟的却带着浓重的俄罗斯口音的英语,在国际理论物理中心(ICTP)开始了他那著名的题为“地震预测:新的尝试”(earthquake prediction: the new deal)的讲座.

长期以来,克依利斯-博罗克领导着莫斯科地震预测理论与数学地球物理国际研究所(International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics)致力于地震预测的理论和算法的研究.从1985年开始,国际理论物理中心每两年定期举办一次这方面的国际研讨会,每次研讨会都是以克依利斯-博罗克的讲座开始的.

但是没人知道他的透明片放在哪儿了——连他自己都不知道,别人怎么会知道呢.他耸了耸肩:“好

吧,那么,只好用黑板了”.

这件事肯定不是故意安排的.但此时此地此景,这一“偶然事故”却意味深长,多少有点讽喻意味——当地震学家开始讨论地震预测问题时,却突然发现自己手中的材料实际上还没有准备好.

1 地震预测

地震预测¹⁾是一个具有悠久历史的“新”领域.早在19世纪末20世纪初,作为一门现代科学的地

* 国家“九七三”项目(批准号:G1998040705)和国家自然科学基金(批准号:NSFDYS 49725410)资助项目

2002-03-01收到

[†] 通讯联系人. E-mail: wuzl@cdsn.org.cn

1) 这里所说的地震预测,就是习用的“地震预报”,但在地震学中,“预测”特指由专家做出的科学研究的结论,而“预报”则特指由政府机构或政府机构授权的业务部门发布的面向社会的预报信息.这两个概念不同的术语长期以来在一些场合下一直被不加区分地使用.

震学刚刚出现的时候,科学家就开始探讨地震预测问题.国际上大规模的地震预测研究开始于20世纪60年代.中国大规模的地震预测研究开始于1966年河北邢台地震以后,但早在20世纪50年代,中国地震学家就先于国际同行,将地震预测研究列入国家级的科技发展规划.因此,即使从20世纪60年代算起,地震预测研究也已有30多年的历史.时至今日,地震预测仍是一个没有得到解决的科学难题.

不但没有得到解决,而且进步很慢,1975年2月4日中国地震学家在辽宁海城实现短临强震预报的“零的突破”之后,至今还没有人再能刷新这一“世界记录”.短临预测如此,中长期预测也如此.一些由地震学家“圈定”、被认为迟早会发生地震、并且“严阵以待”、在那里建立了地震预测试验场的地区,例如美国加利福尼亚州的帕克菲尔德(Parkfield)地区,地震“迟迟”没有发生,但就在地震学家“圈定”的范围之外,例如就在加州的洛马普列塔(Loma Prieta)和兰德斯(Landers),却接连不断地发生“意料之外”的地震.1997年前后,围绕地震预测问题,国际上爆发激烈的争论^[1-3].认为“地震不可能预测”的意见的论据之一是,迄今所报道的所有地震前兆和地震预测的个例,从统计的意义上几乎无一可取.应该说,这种颇为极端的观点并不是没有问题的,它至少没有考虑到一个重要的事实:世界上有不同类型的地震,因此在进行统计检验的时候,不应该把所有的地震都等同对待.但从另一个方面说,这种意见也确实在一定程度上反映了地震预测研究的现状.

说地震预测是一个“新”的研究领域,还不仅仅是因为目前地震预测研究所取得的成绩差强人意.从科学研究的角度说,说地震预测是一个“新”的研究领域,是因为迄今为止,在这个研究领域中的很多关键性的科学问题还没有恰如其分的提法.而按照爱因斯坦的说法,在科学上,提出(合适的)科学问题,就相当于解决了问题的一半.

目前的地震预测,按照时间尺度的长短不同,可以(人为地)分为长期预测(十年时间尺度)、中期预测(年时间尺度)、短期预测(月时间尺度)、临震预测(日时间尺度)等四类.20世纪70年代对此的“经典”提法,分别是“几年以上”、“几个月至几年”、“几天至几个月”、“几天以内”.这是一个人为的工作分类,并无明确的物理意义.因此,在一些场合下,我们还能看到“中长期预测”、“中短期预测”、“短临预测”这样的说法,并且不同作者对于这些术语的意义也有不同的理解.从物理的角度说,能不能把地球介质

近似成一种弹性介质,从而把地震简化成弹性介质中的破裂,可能是考虑问题的一个重要因素.对于比较长的时间尺度,介质的非弹性效应和地震断层上的化学变化成为不可忽略的因素.但这样一来我们就必须“倒退”到1966年邢台地震以前的概念,把地震预测简单地分为两种:“远期”预测和“近期”预测——只是这里的“近期”与“远期”的时间尺度与原来的定义不同.克依利斯-博罗克所研究的预测,相当于特征时间尺度为年的“远期”预测.

对于地震预测问题的提法,也经历了一个历史发展过程.20世纪70年代以前,寻找和检验可能的地震前兆或地震预测方法,是地震预测研究中基本的科学问题之一.时至20世纪70年代,人们几乎建议和检验了所有当时知道的和在当时情况下能够想到的可能是地震前兆的现象.20世纪80年代以后,地震预测问题的提法有所改变.很多人开始探讨地震从本质上说是否能够预测的问题——这个问题是地震预测研究刚刚开始的时候人们想都没有想过的.

2 岩石层系统中的地震

克依利斯-博罗克讨论的也正是这样一个问题:地震从本质上说是否能够预测,以及怎样预测.1987年,当他在IUGG大会上做这方面的报告^[4]时,引起了全场轰动.他的出发点有三个.第一,地球岩石层(平均厚度为百公里的数量级)是层次性的.岩石层可以分成许多块体,最大的块体就是地质学家所说的板块,再往下是次板块,等等,最后是矿物颗粒,大约有10到15个层次.块体之间被边界分开,边界的厚度比块体的尺度小约两个数量级.第二,边界并不是被动的,在边界上发生的相变或化学变化,可以动态地改变将边界两侧“粘”在一起的摩擦力和内聚力的强度,从而“调节”块体之间的运动.第三,由板块运动提供给岩石层的能量——这种能量来自地球的内部,一些地球科学家认为地幔对流是一个可能的动力来源——将通过这样一个层次性的、具有“主动”边界作用的系统被不断地耗散掉.那些发生在边界上的突然的失稳运动,就是地震.

这样的系统,会“生产出”什么样的地震呢?显然,搞清楚这个问题,对于地震预测问题的解决具有重要意义.在讨论这个问题的时候,克依利斯-博罗克有三个出发点,这三点都是地震学家熟悉的观测事实.得到这些重要的观测事实,是地震学家数十

年来的工作成果,而意识到仅仅有这些“证据”还没办法“破案”,也是目前地震学家的共识。

地震学家的“手边材料不够”的感觉,从克依利斯-博罗克的岩石层系统的角度说,可以“变换”成三个重要的科学问题。第一个问题是,假定我们已经知道了这个系统的结构,知道了这个系统中各个基本单元之间进行相互作用的“游戏规则”,由这个系统,按照这些“游戏规则”,理论上应该能够产生出什么样的“花样”,或者说图像(pattern)?第二个问题是,实际上,我们不可能知道这一系统中的一切细节,我们甚至不可能知道这一系统的大部分细节,那么为了掌握这个系统的变化规律,我们对于细节究竟需要了解到什么程度才行?或者换一个提出问题的方式:由这一系统所“产生”出的“花样”,在什么程度上是跟细节无关的?第三个问题是,由地震观测所得到的资料,例如地震的空间分布和时间变化,能在多大程度上为我们的模型提供约束?

3 统计物理的启示

地震学家意识到统计物理学可以帮助他们解决这些问题。众所周知,20世纪的物理学,是朝着三个同等重要的方向发展的,第一是试图理解宇宙的演化,第二是试图理解原子和比原子更小的粒子的性质,第三是试图理解各种层次上的复杂性。现代统计物理学在第三个方向上得到了很多重要的成果,这些成果不可能不影响到地震问题的研究。

统计物理学的基本任务,是从单个或少数基本单元(例如分子)的“微观的”运动规律出发,用统计方法推断和说明由很多基本单元组成的系统(例如溶液)的“宏观”性质^[5]。这里,“很多”既是一个重要的概念,又是一个不断进化的概念。“很多”是统计物理学中的一个基本概念,“很多”这个概念,决定了统计物理中“微观”和“宏观”之间的“界限”和这种“界限”的相对性。比如,为了研究星系的性质,“很多”恒星中的每一颗恒星都被看成是“微观”粒子。同样,在考虑一个具体的地震的时候,也通常可以将震源区中(乃至更大的“地震孕育区”中)的不同尺度的“单元”看成是“微观”的“粒子”,而在考虑一个地区的、或者全球的地震活动的整体特性的时候,每一个大地震又成了这一问题中的“微观”的“粒子”。

“很多”这个概念,也是在不断地进化的。20世纪80年代前的统计物理学中所说的“很多”,通常是 10^{23} 数量级的,在这种情况下,系统的涨落变得很

小,但是近年来人们越来越多地发现,那些由“很多”但又不是“特别多”的(例如几万个)基本单元组成的系统,具有一些很特殊的性质,对其中的一些性质,我们现在还没有完全把握。一些地震学家相信,岩石层动力系统或地震动力系统,可能与这类系统具有更多的相似性。

揭示“渐变”与“突变”之间的关系,是统计物理学的基本问题之一。在统计物理学中,突变通常是大量基本单元的一种“合作”或者“集体”现象。统计物理学可以在相当程度上说明,为什么水与水蒸汽之间的转换是在一个“相变点”上突然发生的(一级相变),为什么在温度上升到居里点之上时,磁体会突然失去磁性(二级相变)。在地震学中,渐变是地震孕育的过程,突变是地震发生的过程。搞清楚这两个过程之间的关系,也就搞清楚了地震预测的一个基本问题。这也正是近年来统计物理学对地震学家产生很大的吸引力的一个重要原因。至于统计物理所揭示的处于“远离平衡”的状态上的一些性质,其在地震研究中的意义至今还没有被充分地认识。

4 讨论之中的问题

大约从20世纪80年代末开始,用统计物理学的理论和方法研究地震问题成为地震学和物理学之间的一个重要的交叉领域^[6-9]。本文不拟对这样一个发展之中的新的研究领域进行全面的介绍,只向读者展示其中的几个侧面。

4.1 “类临界点”地震模型

近年来,一些地震学家建议,地震的孕育过程可以看成是一种类似于临界点的(critical-point like,又称CP-like,目前还没有一个标准的译名,这里权译成“类临界点”)过程^[10]。这一想法得到地震学中的一些观测证据的支持。

地震学家很早就注意到,在一些地震发生之前,可以观测到地震活动或者由地震活动所表征的地形变速率的“加速”现象^[11]。这种“山雨欲来风满楼”式的“加速”过程可以用一个指数函数来近似。一些地震学家利用这一现象,发展了利用“加速”过程来推测未来地震的发生时间的计算方法,称为“离破裂还有多少时间的分析”(time-to-failure analysis)方法,简称“破裂时间分析”方法,并在一些实际震例的回溯性检验中取得成功^[12,13]。但是,对这种方法本身还有很大的争议。一个问题是,并不是在所有的地震之前,都能看到“加速”现象。

注意到“加速”过程在地震的物理学中的意义是 20 世纪 80 年代以后的事情. 在临界现象的统计物理学中, 一些系统在接近临界点时, 总有一些物理量以临界点为中心呈现指数型的变化. 到了 20 世纪 70 年代人们已经理解, 出现这种类型的变化, 是由于系统中存在某种“不随观测尺度而改变”的性质, 描述指数函数的形态的指数, 就是描述这种“尺度不变性”的“标度常数”. 因此“加速”现象被认为是地震的“类临界点”模型的一个有力的证据. 而从另一个角度也无妨说, 地震学家选择指数函数而不是别的函数来描述“加速”过程, 与其说是数据拟合中的“奥卡姆剃刀”原则的结果, 不如说是受了统计物理学的启发.

仔细考察一下地震学家所用的数据, 这一点就会变得特别明显. 一个有趣的特征是, 在几乎所有的震例中, “加速”的过程看来都不是单调的. 在“加速”的过程中也常常伴随着明显的起伏. 起初, 一些作者认为这种情况是一种在理论上可以预期的将“标度常数”写成复数的结果, “标度常数”成为复数, 是因为系统的性质并不具有连续的尺度不变性, 而只具有间断的(或离散的)尺度不变性^[8]. 在这种情况下, 复数的指数往往给出物理量的“对数周期性”. 但是一些观测资料的分析表明, 复指数的“破裂时间分析”并不比原来的实数指数的“加速”过程分析更有效^[14]. 而且, 正如在数字信号处理中采样率可以影响对于频率成分的分辨本领, 在“对数周期性”的确认中, 数据质量往往有不可忽视的影响^[15].

也许物理学家更感兴趣的观测结果是, 在一些大地震之前, 可以看到中小地震之间的“关联长度”的系统的增加^[16, 17]. 不过, 同“破裂时间分析”方法一样, 这种“关联长度”增加的情况似乎也只存在于一部分地震之中. 而且比“破裂时间分析”的方法问题更多的是, 地震的“关联长度”的定义还是一个尚未达成一致意见的问题.

读者未免奇怪, 地震是一个明显的非平衡过程, 为什么研究地震竟可以应用处理平衡态的临界点理论. 其实, 正如在固体物理中, 晶格的“振动模式”也可以被看作一种“粒子”(“声子”), 晶体的“振动模式”的变化也可以被看成是一种“相变”一样, 把中小地震看成类似的“虚拟粒子”, 给定一些动力学条件的约束(例如能量守恒), 也同样可以将地震动力系统的“演化”过程“处理”成一种“平衡相变”. 其实, 这种思路在物理学中是司空见惯的. 在地球内部传播的地震波、水面上的重力波、空气中的声波、宇宙中

的电磁波, 在物理上各不相同, 但是, 描述这些现象的基本方程都是波动方程.

4.2 地震的“自组织临界性(SOC)”模型

在地震的“类临界点”模型中, 地震是作为一个“宏观”性质出现的, 用统计物理学的语言说, 地震相当于贯穿整个系统的突变. 当我们转而考虑“很多”地震——例如全球地震活动时, 单个地震则被描述成系统中的涨落事件.

在这类模型中, 曾经引起广泛注意的是把地震活动看作是一种“自组织临界”(SOC)现象的模型^[18-20]. 这里的“自组织”临界现象与临界现象不同, 它专指由很多具有(非线性)相互作用的基本单元所组成的开放系统“自组织地”演化到一个稳定与非稳定之间的“临界”状态的情况. 临界现象所涉及的是平衡态问题; “自组织临界现象”所涉及的却是非平衡态问题. 在临界现象中, 系统达到一个临界状态需要一个“控制参数”的“调节”; “控制参数”的“量变”引起系统的“质变”. 但是在“自组织临界现象”中不需要这样一个控制参数, 这种稳定与非稳定之间的“临界”状态, 是系统“自组织”地演化的结果.

“自组织临界状态”的一个形象的例子是往砂堆顶上匀速地撒砂粒(有时称为“砂堆模型”). 在砂堆的坡度达到一个临界值时, 砂堆就处于“自组织临界状态”. 这时撒到砂堆上的砂粒不会永远停留在砂堆上, 而是要通过一系列大小不等的“滑坡”滑到砂堆的下面. 砂堆本身的临界坡度却在统计的意义上保持不变. 地震学家关注的是, 在这个例子里, “滑坡”的发生是不可预测的.

“自组织”临界状态的一个重要特征是, “滑坡”的大小 S 与频度 f 成反比, 呈现出 $S \sim f^{-B}$ 的关系, 其中 B 是常数. 地震学中早就发现, 地震的能量 E 与频度 f 之间也存在 $E \sim f^{-B}$ 的关系, 其中 $B = 3/2$, 这个关系在地震学中称为古登堡(Gutenberg)-里克特(Richter)关系^[21, 22], 简称 GR 关系. 地震学家在很长的一段时间里并不清楚 GR 关系的物理意义. 因此不论地震的 SOC 模型是否正确, 试图从物理的角度给出 GR 关系的解释, 都是 SOC 模型带给地震学的一个重要的进展.

从另一个角度说, 对于地震的 SOC 模型的最有力的质疑, 也是来自 GR 关系的研究. GR 关系是一个粗略的近似关系. 如果对地震进行更为“精细”的处理, 比如, 去掉余震, 则可以发现地震现象存在一个大约为 3km 的特征尺度(一些地震学家认为, 它相当于大地震的地震“断层带”的平均厚度), 震源尺

度大于这个特征尺度的地震的 GR 关系,与震源尺度小于这个特征尺度的地震的 GR 关系有很大的不同^[23]。另外,对于特别大的地震,地震的频度分布也明显地偏离标准的 GR 关系^[6]。与这种现象有关的一个特征尺度是 30km,相当于地壳中能够发生地震的脆性区的平均深度。这两个特征尺度的引入使得 SOC 模型中“尺度不变性”(即不存在特征尺度)的结论不再成立。对此,地震学家诺波夫(Knopoff)有一个说法:“地震的特点,看来是 SOC(自组织)但不(临界)”。

支持地震的 SOC 模型的另一个证据是,在震源学中发现,地震所引起的应力的变化,只占地球岩石层中积累起来的应力的不大的一部分。有些地震学家相信,有时即使很小的应力变化(例如潮汐引起的应力变化)也可以“触发”地震的发生^[24,25]。但对这一点,有些地震学家并不苟同。

地震的“类临界点”模型和地震活动的“自组织临界性”模型所得出的关于地震预测的推论是不同的。在地震的“类临界点”模型中,地震是可以预测的,但是在地震的“自组织临界性”模型中,地震预测却是不可能的。

5 转变观念

统计物理学在地震预测研究中的应用,转变了地震学家的一些传统观念。观念的转变可能比某一具体的成果更为重要。

5.1 地震预测的可能性

以前地震学家提出地震预测问题的主要方式,是怎样进行地震预测,他们的研究,主要集中在寻找、检验和解释可能的地震前兆现象上。现在,地震学家开始从物理上考虑地震预测的可能性问题。这是一个历史性的进步。近年来,一些地震学家开始怀疑,是否从本质上说,一些类型的地震的预测,从理论上说是不可能实现的,就像从理论上说,蒸汽机可以实现,但永动机却是不可能实现的一样。在 1997 年前后关于地震预测问题的争论中,公众从一些不甚了解情况的媒体得知,一些国际著名地震专家在鼓吹“不可知论”,这是一个误解。事实上,争论过程中的“过火”言论[比如盖勒(R. Geller)的一些言论,盖勒倒是经常发表一些“石破天惊”的言论]确实是有的,但总的说来,争论双方却一直是在严肃地讨论物理问题和地震学问题。“反方”的物理依据之一,就是地震的 SOC 模型^[1]。

5.2 长程关联

统计物理学的应用使地震学家感受到自己原来的思考问题方法的局限性。早期的地震预测研究在寻找地震前兆的时候,总倾向于把视野集中在震源区附近,因为单纯考虑地球介质中地震断层之间的“相互作用”(这种相互作用主要是靠粘弹性介质传递的,而从理论上说,粘弹性相互作用的影响范围是有限的),很难理解唐山地震之前在包括 200km 之外的北京在内的一个相当大的范围内都出现了明显的地震前兆现象。早在 20 世纪 70 年代,一些地震学家就指出这样考虑问题是不对的^[26],寻找前兆信息,不能局限于震源区附近。在统计物理学中,近邻相互作用的系统产生“长程关联”的例子比比皆是,这些模型也启发地震学家,应该把研究地震前兆现象的视野扩展到更大的范围。

5.3 简单模型的意义

原来在地震学研究中,地震学家不怎么太重视“玩具式”的理论模型。1967 年,伯里奇(Burridge)和诺波夫用一个由弹簧和滑块组成的一维链来模拟地震^[27],称为 BK 模型。BK 模型提出之后,大约有 20 年左右的时间没有引起地震学家足够的重视。许多人觉得,很难想象这类理论“玩具”在地震学中会有多少实际的应用价值。统计物理学告诉我们,在逼近临界状态的时候,这类简单模型所具有的一些性质,可能是带有普遍性的,把这些带有普遍性的性质研究清楚,对于研究更“真实”的系统非常有用。因此到了 20 世纪 80 年代末,BK 模型及其各类“变种”重新引起人们的重视^[28,29],对 BK 模型的研究成为地震学和物理学之间最活跃的交叉领域之一。

6 预测的尝试

不知道克依利斯-博罗克后来是不是找到了他的透明片,但是那天只用黑板也讲得很不错。

克依利斯-博罗克相信,正如在统计物理学中,每一个分子的动力学方程都很复杂,但大量分子的统计效应却可以导致简单的热力学规律一样,岩石层动力系统也可以有比较简单的、自由度不高的“热力学函数”,这种“热力学函数”的定义对细节并不敏感。从这一思路出发,他和他的研究集体用地震目录定义了“地震流函数”,再通过对这种“地震流函数”的性质的研究来判断发生地震的“概率增长时间”(time of increased probability,简称 TIP)。当人的直观经验不足以把握“地震流函数”的性质时,一个方便

的办法是用计算机进行模式识别。克依利斯 - 博罗克发展的 TIP 算法,取得了一些成功,但对方法本身的物理依据和实际效果,还有很大的争议。

克依利斯 - 博罗克的上述思路,还被应用于其他复杂系统的预测,例如股票市场的预测、美国总统选举结果的预测、经济危机的预测,等等,据说也取得了许多成功。然而,正当克依利斯 - 博罗克满怀信心地——当然,只能在黑板上——介绍他的预测方法的时候,在他的家乡,却正发生着一件他没有预测到的、后来令全世界所有的人(也包括预测专家)都感到震惊的重大事件——苏联走向解体。

7 不是结尾的结尾

从某种意义上说,本文的内容相当于用统计物理学的语言讲述了一个关于地震和地震预测的故事。地震使我们想起统计物理学中的逾渗模型。设想有一个通信网络,例如北美大陆的通信网络,由于某种日地空间过程,它的每一段连线都已被破坏。我们随机地,但却是接连不断地把它的每一段连线——从小石城到孟菲斯、从休斯顿到新奥尔良、……连接起来,目的是从网络的一端(洛杉矶)到网络的另一端(纽约)通话。起初,这种努力似乎效果不大,尽管局部的通信——亚利桑那、印地安那、德克萨斯、……可以渐渐地联系起来,但洛杉矶和纽约之间还是没有接通。事实上,被连接起来的连线的比例,有一个临界点,在达到这个临界点之前,网络的一端和另一端总是不通的。我们继续努力、努力,多少也有些失望。然而,终于有一刻,被连接起来的连线的比例达到了临界点,洛杉矶和纽约之间“突然”接通。这一刻来得如此突然,如此富有戏剧性,以至于我们认为这是一个奇迹。但事实上,统计物理学告诉我们,这不是奇迹,这是一个典型的从“量变”到“质变”的过程。系统存在一个临界点,在临界点前后,整个系统的性质以“是或否”的方式发生质的变化。而且重要的是,实现从网络的一端到另一端的接通,不一定需要等到把全部的连线都接通之后。

有一个被称为“凹凸体(asperity)模型”的地震模型所讲述的“故事”,大体上与此类似^[30]。“凹凸体”是从摩擦学中“借用”过来的概念。现在可以证明,“凹凸体模型”是很多地震的孕育和发生过程的一种简化的描述,而上面所说的逾渗模型,相当于一种更为简化、也许是极端简化的情况^[31,32]。这个“故事”说,地震的孕育过程相当于在一个即将发生失稳的

地震断层面上,或者通过地震滑动(即地震学中的“前震”),或者通过“寂静的地震”的滑动(在大地测量学中有时称为“短周期事件”,这里“短”是相对的,因为大地测量学经常与特征周期“长”到月或日的潮汐打交道),或者通过蠕变,完成相当比例的预滑。当这些预滑发展到一个临界值,以至地震断层面上“硕果仅存”的“凹凸体”孤立难支的时候,整个系统便出现失稳——大地震发生了。

其实,在我国传统文化中,早就有很多关于类似的“从量变到质变”的过程的描述,尽管这种描述多少有些浪漫。诗人在总结怎样才能写好好诗的时候,把写诗过程的“动力学”归纳为三个阶段:第一阶段“昨夜西风凋碧树,独上高楼,望尽天涯路”和第二阶段“衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴”都是在“临界点”之前的情况,第三阶段“众里寻他千百度,蓦然回首,那人正在灯火阑珊处”所描述的,却正是在“临界点”附近的情形。

从长远的观点看,地震预测研究又何尝不是如此。目前,地震预测研究看上去进展缓慢,取得的成功有限,这是因为我们还处在“临界点”以前的状态。我们不知道什么时候——也许是我们这一代,也许是下一代,也许是下下一代,能够达到这一“临界点”。但是我们知道,我们持续不断的、看上去近乎毫无成效的努力,实际上是在为将来的“质变”准备“量变”的基础。也许这正是很多地震学家“衣带渐宽终不悔”的动力所在吧。

致谢 感谢国际理论物理中心(ICTP)1991 年冬、1997 年秋和 2000 年夏资助作者参加有关的学术活动。陈晓非教授建议并推荐作者为《物理》杂志创刊 30 周年专辑撰写这篇文章。

参 考 文 献

- [1] Geller R, Jackson D, Kagan Y *et al.* Science, 1997, 275: 1616
- [2] Wyss M. Science, 1997, 278: 487
- [3] Nature debates, 1999, <http://helix.nature.com/debates>
关于地震学和地震预测研究的历史,可参见:陈运泰,吴忠良,吕苑苑.地震学今昔谈(周光召主编,21世纪学科发展丛书·地震学).济南:山东教育出版社,2001.163[Chen Y T, Wu Z L, Lu Y Y. Seismology: Retrospect and Prospect(Zhou G Z ed. Development of Sciences in the 21th Century Series: Seismology). Ji'nan: Shandong Education Press, 2001. 163(in Chinese)]
- [4] Keilis-Borok V I. Rev. Geophys., 1990, 28: 19
- [5] 郝柏林.统计物理介绍.见:现代科学技术简介.北京:科学出版社,1978.30[Hao B L. An introduction to statistical physics. In: A Brief Introduction to Modern Science and Technology. Beijing: Science Press, 1978. 30(in Chinese)]

这是介绍统计物理学的基本概念的一篇文章。20多年后，统计物理学已有很多新的进展，但该文的基本观点看上去并没有过时。在同一文集中还收录了傅承义院士(中国、也是世界上的第一个国家级地震预测研究计划的执笔人)介绍固体地球物理学的文章和马宗晋院士介绍地震预测的文章

[6] Main I G. Rev. Geophys. ,1996 ,34 :433
 [7] Rundle J B ,Turcotte D L ,Klein W(eds). GeoComplexity and the Physics of Earthquakes(Geophysical Monograph Series No. 120). Washington :AGU ,2000 .284
 [8] Somette D. Critical Phenomena in Complex Systems. Berlin :Springer ,2000 .412
 [9] Teisseyre R ,Majewski E(eds). Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth 's Interior. San Diego :Academic Press ,2001 .674
 [10] Main I G. Bull. Seism. Soc. Amer. ,1995 85 :1299
 [11] Varnes D J. Pure Appl. Geophys. ,1989 ,130 :661
 [12] Brehm D J ,Braile L W. Bull. Seism. Soc. Amer. ,1999 89 :275
 [13] Bowman D D ,King G C P. Geophys. Res. Lett. ,2001 28 :4039
 [14] Gross S ,Rundle J. Geophys. J. Int. ,1998 ,133 :57
 [15] Huang Y ,Johnson A ,Lee M W *et al.* J. Geophys. Res. ,2000 ,105 :25451
 [16] Shebalin P ,Zaliapin I ,Keilis-Borok V I. Phys. Earth Planet. Interi. ,2000 ,122 :241
 [17] Zoeler G ,Hainzl S ,Kurths J. J. Geophys. Res. ,2001 ,106 :2167
 [18] Bak P ,Tang C. J. Geophys. Res. ,1989 94 :15635
 [19] Somette A ,Somette D. Europhys. Lett. ,1989 9 :197
 [20] Ito K ,Matsuzaki M. J. Geophys. Res. ,1990 95 :6853

[21] Gutenberg B ,Richter C F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. 2nd ed. Princeton ,NJ :Princeton Univ. Press ,1954 .310
 [22] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge :Cambridge Univ. Press ,1992 .221
 物理学家于 院士和郝柏林院士在 20 世纪 70 年代曾涉猎地震和地震预测问题的研究。他们的研究涉及 GR 关系在地震预测中的应用，恰恰是地震物理学中最基本的问题。参见 李全林，于 郝柏林等。地震频度 - 震级关系的时空扫描。北京：地震出版社，1979。10[Li Q L ,Yu L ,Hao B L *et al.* Spatio-Temporal Scanning of the Frequency-Magnitude Relation of Earthquakes. Beijing :Seismological Press ,1979 .10(in Chiese)]
 [23] Knopoff L. Proc. Natl. Acad. Sci. ,2000 97 :11880
 [24] Stein R S. Nature ,1999 402 :605
 [25] Harris R A. J. Geophys. Res. ,1998 ,103 :24347
 [26] 傅承义. 地球十讲. 北京：科学出版社，1976。181[Fu C Y. Ten Lectures on the Earth. Beijing :Science Press ,1976 .181(in Chinese)]
 在这本书里，傅承义院士提出了著名的“红肿”理论
 [27] Burridge R ,Knopoff L. Bull. Seism. Soc. Amer. ,1967 57 :341
 [28] Carlson J M ,Langer J S. Phys. Rev. ,1989 ,A40 :6470
 [29] Carlson J M ,Langer J S ,Shaw B E *et al.* Phys. Rev. ,1991 ,A44 :884
 [30] Lay T ,Kanamori H. An asperity model of large earthquake sequences. In :Simpson D W ,Richards P G(eds). Earthquake Prediction : An International Review(M. Ewing Ser. 4). Washington ,D. C. :AGU ,1981 .579
 [31] Trifu C-I ,Radulian M. Phys. Earth Planet. Interi. ,1989 58 :277
 [32] Wu Z L. Geophys. J. Int. ,1998 ,133 :104

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类图书精品推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
大学物理(新版)(上册)	吴百诗	30.00	2002年1月	0-1266
大学物理(新版)(下册)	吴百诗	32.00	2002年1月	0-1302
纳米材料与纳米结构	张立德	35.00	2002年1月	0-1236
微米/纳米尺度传热学	刘 静	23.00	2002年2月	0-1289
分析力学	王振发	18.00	2002年2月	0-1535
奇妙的半导体	万 群	12.00	2002年3月	0-1550
应用力学对偶体系	钟万勰	42.00	2002年3月	0-1542
量子力学(原名为非相对论量子力学)	张永德	36.00	2002年3月	0-1571
激光的衍射及热作用计算	李俊昌	34.00	2002年3月	0-1553
充液系统动力学	王照林 刘延柱	35.00	2002年4月	0-1543

即日起，欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书，并可免费索取书目。凡购书者均免邮费。有意者请按以下方式联系我们，同时欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>

电 话：010-64011127 传 真：010-64034622 电子邮件：luxiuming@sina.com

通讯地址：北京东黄城根北街16号 科学出版社 邮政编码：100717

联系人：卢秀明