

ZnSe 逐步过渡到 ZnTe, 而 ZnTe 中氮掺杂浓度可高达 10^{19}cm^{-3} , 有利于欧姆接触, 还有人用短周期 ZnTe/ZnSe 超晶格代替 Zn(Se, Te) 渐变层, 可使接触电阻降到 $2-9 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 300 K 时正向阈值电压可为 2.5—3.5 V. 在量子阱结构上, 有人采用 ZnS/ZnSSe/ZnS 多量子阱结构和 ZnMgSSe/ZnSSe/ZnMgSSe/GaAs 多量子阱结构, 这样可使激光波长移向纯蓝, 甚至紫外区. 激光器已从 77K 下脉冲工作. 进展到 77K 下连续工作, 继而从室温下脉冲工作进展到室温下连续工作. 值得指出的是, 日本索尼公司最近已研制成功世界上第一个室温连续工作的 CdZnSe/ZnSeS:Mn 量子阱蓝绿色半导体激光器, 其波长为 520nm, 阈值电流为 45mA, 阈值电流密度为 $1400 \text{A}/\text{cm}^2$. 从而将 ZnSe 基蓝绿色半导体激光器的研究提高到一个新水平. 在迅猛发展的事实面前, 研制

ZnSe 基蓝色和蓝绿色半导体激光器已经不是“观望”阶段, 也不是“有希望”阶段, 而是争取早日达到“实用化”阶段. 围绕着蓝色半导体激光器的商品化, 一场新的激烈的国际竞争正在进行之中. 中国的半导体科技工作者也应投身于国际竞争的行列.

- [1] R. M. Park et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 2127.
- [2] K. Ohkawa et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(1991), 152.
- [3] M. A. Haase et al., *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 1272.
- [4] A. V. Nurmikko et al., *J. Lumin.*, **52**(1992), 89.
- [5] H. Kukimoto, *J. Cryst. Growth*, **101**(1990), 953.
- [6] M. A. Haase et al., *J. Appl. Phys.*, **167**(1990), 448.
- [7] J. Ren et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 1901.
- [8] K. Ohkawa et al., *Jpn J. Appl. Phys.*, **30**(1991), 3873.
- [9] 王迅, 物理, **22**(1993), 187.

地震预报的物理学问题

吴 忠 良

(国家地震局地球物理研究所, 北京 100081)

近年来, 运用非线性物理学的概念和方法去理解地震现象的复杂性的研究取得引人瞩目的进展. 用临界现象理论来理解地震破裂的物理过程, 从自组织临界现象的角度对中长期时间尺度上的地震活动进行说明, 这都给地震预报研究以很大的启发, 并在实际地震预报算法的研究中得到应用. 地震预报目前仍是一个世界性的科学难题. 用物理学的概念和方法研究地震和地震预报问题, 可能是地震预报和减轻地震灾害研究中一个有希望的发展方向. 这篇综述的目的是在那些熟悉物理学的人和那些熟悉地震学的人之间架起一座桥梁.

关键词 非线性, 临界现象, SOC, 地震预报

Abstract

In recent year developments have been made in understanding the complexity of earthquake phenomena in the view of nonlinear dynamics. The study of the criticality of seismic rupture and the self-organized critical hypothesis of seismicity have provided the study of earthquake prediction with many useful clues which have, to some extent, been applied to the development of the algorithms of earthquake forecasting. At present, earthquake prediction is still one of the most difficult problems in seismology. It seems that using the theory and methods of nonlinear

dynamics may be a hopeful approach to the prediction and reduction of seismic hazards. Reviewing the recent developments in this field, this paper aims to bridge the blanks between physics and seismology.

Key words nonlinear dynamics, criticality, SOC, earthquake prediction

这篇综述的目的是在那些熟悉物理学的人和那些熟悉地震学的人之间架起一座桥梁。之所以这样做，一方面是因为近年来地震问题引起一些物理学家的关注（在自然界中大概还没有一种物理现象像地震活动这样具有如此宽的能量无标度区），同时地震预报的低水平与社会对地震预报的高要求之间的矛盾也促使一些敏感的地震学家笨拙地使用某些物理概念（特别是近年来发展起来的一些物理概念）进行地震和地震预报方面的研究。另一方面，尽管严格地说牛顿首先是一位地球物理学家，但在今天无论是让一位物理学家明白地震学家在说什么还是让一位地震学家了解物理学家在干什么，却都不一定是容易的事情。然而，既然物理学研究对象和地震学的研究对象都是我们生活在其中的这个现实世界中的自然现象，他们便注定会走到一起讨论一些共同关心的问题。今天的地震预报问题就是这类问题中的一个。

一、历史的回顾^[1]

用物理学的方法对地震震源的研究，如果从 Reid 的弹性回跳理论算起，至今已有 80 年的历史。1906 年 4 月 18 日，旧金山发生大地震，地震发生时，地面沿着著名的圣安德烈斯大断层发生长达 430km 的错动，错动幅度有些地方竟有 7m 之大。在这次地震前后，即 1851 至 1866 年，1874 至 1892 年以及 1906 至 1907 年，曾对圣安德烈斯断层做过几次大地测量，这些测标在地震前后的变动反映了地震孕育和发生的过程，这使得美国地震学家 Reid 在 1910 年左右发表了著名的弹性回跳学说。这个学说认为，地壳运动使岩石发生剪切形变，当形变达到一定程度时，岩石发生断裂错动，发生形变的岩石重新回到原来的状态，但此时断层两侧的

岩体的位置却发生了移动，这就是地震的过程。1917 年 5 月 18 日，日本静冈县天龙川发生了一次地震。在研究这次地震时，京都大学的地震学家志田顺发现，各个观测点记录到的地震波初动方向，在地图上呈现出明显的四象限型分布。这个结果发表后，初动地理分布的调查开始盛行起来。大量实例表明，在所有的地震中，以四象限型的地震居多。1923 年，日本中央气象台的中村左卫门太郎从理论上指出，那些具有四象限型初动分布的地震，往往在震中区有一条地质上的断层与两条节线（即分隔不同初动符号区的线）中的某一条重合，而四象限型的初动分布，可以用与节线成同一方向的作用于断层的一对力（力偶）来说明。这样，地震的断层成因说开始在世界上传播开来，为许多地震学家所接受。

造成四象限型分布的作用于断层的等价力系究竟是单力偶还是双力偶，这是一个很长时间没能得到明确的问题。坚信弹性回跳理论的北美地震学家认为，断层滑动的等价力系显然是一组平行于断层面的单力偶，而日本地震学家本多弘吉却从剪切波的有关证据出发，指出这一等价力系具有双力偶的性质。在 1957 年多伦多断层力学讨论会和 1960 年赫尔辛基地震机制讨论会上，很多学者都卷入了这个问题的争论。60 年代，世界标准地震台网的建立提供了越来越多的精确的观测资料。同时，这方面的理论工作也取得突破性进展。1963 年，丸山卓男从力学上证明，对均匀各向同性介质而言，等价于断层滑动的点力系只能是双力偶而不可能是单力偶。1964 年，Burridge 和 Knopoff 推广了这个结果，并提出了一个断层滑动和地面上的地动位移之间的关系的方程。这个方程表明，通过滑动函数和格林函数的时空褶积，可以计算地面上任一点的理论地震图。

在地震波长远大于震源的特征尺度时,可以将震源视为一个偶极点源,而从弹性动力学的角度说,偶极点源与剪切位错点源即“点”断层等效。这种模式,称为位错模式。

位错模式是一个运动学模式,在这个模式中,断层面上的滑动函数是预先给定的,地动位移场可以随之导出。滑动函数应当如何给定,是地震的动力学模式——裂纹模式要回答的问题,在这个模式中,破裂一旦引发,断层面上的滑动便依据断层面上的应力分布和断层区内材料的强度自然地发展、扩大和停止。自从1966年Kostrov的开创性工作以来,许多动力学裂纹问题已经通过解析方法和数值方法获得解决。裂纹模式使震源理论成为断裂力学的一个分支。与断裂力学的情况相似,破裂面前缘的应力和质点运动速度的奇异性是一个必须克服的理论上的困难。引入滑动弱化模式,简单地说也就是假定一个二维裂纹面的边缘不是一条数学上的直线,则可以消除这种奇异性。基于线弹性力学和断裂力学建立起来的这些震源模型,成功地解释了很多地震现象,首先是地震波的辐射和地震引起的地面永久形变。引入地球介质的流变性质可以适当地推广这些模式,并由此对某些地震序列做出至少是半定量的解释。

为了解释地震图上复杂的高频信号,曾经引入两个互补的模型。障碍体(barrier)模型认为,地震断层不是一个连续的平面,而是被一系列障碍体分割成若干块,在破裂传播过程中障碍体保持不破。地震的结果是形成整个断层面上不均匀的残余应力分布,障碍体附近的应力集中导致了余震。凹凸体(asperity)模型则认为在主破裂发生之前,各小块之间的部分已经完成破裂,一旦破裂开始,滑动会在每一个小块上以可能是相互独立的方式完成,从而形成高频地震波。地震的结果是形成整个断层面上均匀的应力分布,小块周围的部分率先完成的破裂则对应着前震。实际上在自然界中,既有前震又有余震,所以可以设想实际的地震断层上既有障碍体又有凹凸体。而从地震波谱

物理

的角度说,障碍体和凹凸体在观测上并没有本质的区别。

与作为定量地震学范畴的上述震源模式的研究不同,和地震预报有关的“震源物理”研究更多地属于定性的和半定量的讨论。这方面研究的第一次热潮出现在60年代末70年代初,它的起因可能是Семенов等人在加尔姆地震试验场发现的震区压缩波和剪切波波速度之比在地震之前出现趋势性下降的现象。当时,岩石破裂实验的结果给地震学家以很大的启发。麻省理工学院的Brace和其他一些人的研究证实,在岩石破裂之前,岩石中有微裂纹和空隙出现,从而引起岩石体积的增加和孔隙率的变化,岩石发生“膨胀”。根据这个机制,在仅仅两年多的时间内,Sykes, Scholz, Aggarwal, Nur, Whitcomb, Garmany, Brady, 茂木清夫等人,就分别独立地建立了自己的模式。这些模式的侧重点各异,但共同点是试图用岩石膨胀现象解释波速比的变化。与“干模式”不同,在“湿模式”中还考虑了岩石中孔隙水的作用。从这些模式出发,人们试图对震前电阻率、声发射、水饱和度等的变化加以统一的半定量化的描述,并由此对地震前的地形变、地电、地磁、地下水、小震活动、前兆地声等异常现象作出物理解释。理论的发展给人以极大的鼓舞,乐观的科学家相信,他们已经发现了地震的秘密。70年代末,伴随着地震预报屡屡的失败和观测资料的增加,这次研究热潮开始降温,但是这次失败的研究热潮作为人们试图在一个统一的物理背景下,建立定量地解释地震前兆现象的理论模式的第一次尝试,是具有其独特的历史意义的。也就是在这个研究热潮前后,出现了首先由中国学者提出、并很快得到广泛的认可的地震预报程序。这个程序把地震预报分为长期(时间尺度为几年至几十年)、中期(时间尺度为一年左右)、短期(时间尺度为几个月)、临震(时间尺度为几天)四种。这种划分客观地反映了地震现象的层次性,在地震预报研究中具有重要意义。

80年代初,人们把物理学中的分形概念应

用于地震预报,并取得重要进展。历史上,有三件事情对这方面的工作产生过深远的影响。第一件事情是40—50年代,地震学家 Gutenberg 和 Richter 在研究美国加州以及世界范围的地震活动时,发现震级与频度之间存在一个非常简单的关系(称为 Gutenberg-Richter 定律),即

$$\log n(m) = a - bm,$$

其中 $n(m)$ 是震级不小于 m 的地震的频度。震级 m 和地震释放的能量 E 之间的关系为

$$\log E = \alpha + \beta m,$$

因此在跨越了至少五个数量级的能量范围内,存在一个简单的标度关系。这个关系的物理含义是什么,当时并不清楚。第二件事是60年代初,地震学家 Burridge 和 Knopoff 为了解释地震活动性和断层的运动,引入了一个等效于由弹簧和滑块组成的玩具的模型,令人不解的是,考虑摩擦以后,由这个简单的弹簧滑块模型所产生的“地震目录”居然与真实的地震目录非常相似。第三件事是60年代,茂木清夫在50年代神村三郎工作的基础上,用岩石破裂实验研究“地震活动”,发现岩石破裂前的声发射事件也具有与 Gutenberg-Richter 定律相似的关系。这项工作和随后进行的一系列实验研究曾给当时的地震预报研究以极大的启示。耐人寻味的是,震源物理实验和天然地震过程之间的相似性问题却一直得不到理论上的论证。这三件事情发生的时候,人们并没有充分地意识到它们的价值。70年代以来,主要是来自物理学的关于非线性现象研究的成果,使地震学家开始重新认识这些现象的意义。

突破可能是从分形开始的。这方面突出的工作,例如 Kagan 和 Knopoff(1980,1981)^[2-4] 关于地震分布的分形结构的研究, Aki(1981)^[5] 和 King (1983)^[6] 关于断层的分数维和地震活动的 b 值关系的讨论, Brown 和 Scholz (1985)^[7] 实测自然岩石表面几何形态的结果和 Aviles 和 Scholz(1987)^[8] Okubo 和 Aki(1987)^[9] 实测圣安德烈斯断层系统的分数维的结果, Smalley 等(1987)^[10] 关于地震序列的分形结构的工作,陈颢(1989)^[11] 关于地震前兆“减熵降

维”的假说, Turcotte (1992)^[12] 使用分形概念对地质学和地球物理学中各类问题进行的广泛讨论,其研究结果已为许多作者引用。重正化群方法甚至也被用来讨论断层活动问题 (Smalley 等, 1985)^[13]。一些作者讨论了地壳中非均匀体的分形结构对地震波散射的影响 (Wu 和 Aki, 1985; Wu 和 Flatte, 1990)^[14,15]。另一些作者讨论了分形的地震断层的地震波频谱特征(小山顺二,原启明,1989)^[16]。不过,这些与分形有关的研究是“运动学的”而不是“动力学的”,它们不过是把一个问题变成了另外一个问题。要理解这些现象,并得出对地震预报研究有用的结论,还必须进一步借鉴物理学的成果,同时也必须明确这种借鉴所对应的特定的问题的地震学含义。

二、与不同时间尺度上的地震现象有关的物理学问题

1. 临近破裂:“地震统计力学”

最简单的一维模型可用方程

$$\ddot{u}(s) = \xi^2 \frac{\partial^2 u(s)}{\partial s^2} - u(s) - \Phi[v + \dot{u}(s)]$$

来描述。在这个已进行标度化处理后的方程中, $u(s)$ 是沿一维断层 s 点处断层“面”两侧的相对位移,右侧第一项是弹性项,第二项描写了断层两侧介质的耦合, $\Phi[v + \dot{u}(s)]$ 为粘滑摩擦项, v 为断层两侧介质缓慢的相对运动的速率,相当于板块相对运动的速率。为了描写粘滑摩擦的基本性质, Φ 不可能是 $\dot{u}(s)$ 的线性函数。上述方程的离散形式为

$$\ddot{u}_i = l^2(u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) - u_i - \Phi(v + \dot{u}_i),$$

其中 $l = \frac{\xi}{a}$, a 为离散的小单元的尺度。容易

看出,这个方程所描写的,实际上就是 Burridge-Knopoff 弹簧滑块模型。很多作者(例如 Dietrich, 1972; Rundle 和 Jackson, 1977; Cohen, 1977; Cao 和 Aki, 1984, 1986; Nussbaum 和 Ruina, 1987; Huang 和 Turcotte, 1990)^[17-24] 从不同角度研究过这类模型,不约而

同地发现了其动力学行为的复杂性，并试图将有关结果应用于不同时空尺度的地震现象的解释。不过，随着模型所讨论的地震现象的不同，有关结果的物理意义是有很大差异的。有些模型也许是一个好的非线性动力学模型，却不一定是一个合适的地震模型。

Carlson 和 Langer (1989)^[23] 的工作属于同类工作中物理意义较为明确的工作。他们用“地震事件”的特征滑动时间 (s)、特征滑动位移 (m)、地震波速 (km/s) 对方程进行标度化，并考虑了数以千计的基本单元，用计算方法研究包括部分前震和余震序列在内的主要与地震破裂过程有关的地震现象。在他们的工作中，取粘滑摩擦项 Φ 为 $\dot{u}(t)$ 的分段线性函数，并附以 $\dot{u}(t)$ 不能反向的约束。计算结果表明，在这个破裂模型中，有两类性质完全不同的“地震”：一类是能够触发破裂传播的大事件，大事件具有复杂的高频成分，破裂传播速度却相当稳定；另一类是局域性的小事件，小事件的“震级与频度关系”具有与 Gutenberg-Richter 定律相似的形式。二维模型也给出类似的结果。这个模型中的复杂性可能意味着，含有丰富的高频成分的复杂的近场地震加速度的预测，不可能是确定性的。这个结论在工程地震学上的意义可能是深刻的。

Rundle (1988, 1989)^[26-28] 则认为 Gutenberg-Richter 定律是一种临界现象的反映。将热力学和统计物理学的处理方法运用于地震破裂问题的处理，有两个基本的假定。第一个假定是裂纹系统自由能最小的状态是最稳定的状态；第二个假定是如果系统不处于自由能最小的状态，那么系统就会自发地产生一组热动力使自己回到自由能最小的状态，这个过程往往伴随着熵的产生，因而具有典型的热力学不可逆性。“地震统计力学”与“经典”地震学的“接口”之一是弹性介质中“地震”前后总位能的变化。如果在弹性介质中引入裂纹面 A ，则“地震”前后总位能的变化

$$W_E = - \int_A \left[p(x)u(x) + \frac{1}{2} \tau(x)u(x) \right] dx.$$

物理

这里考虑的是一个“一维”情况。如果所考虑的“地震”为张性破裂，那么 $p(x)$ 就代表张应力场， $u(x)$ 为裂纹面两侧的张性位错；如果所考虑的“地震”为剪切破裂，那么 $p(x)$ 就代表剪切应力场， $u(x)$ 相应地代表剪切位错。 $\tau(x)$ 是“地震”前后破裂面上的应力降。引入 $\tau(x)$ 的格林函数表示式

$$\tau(x) = \int_A T(x-x')u(x')dx',$$

则

$$\begin{aligned} W_E &= \int_A w_E(x)dx, \\ w_E &= -p(x)u(x) \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_A T(x-x')u(x)u(x')dx'. \end{aligned}$$

自由能 F 为

$$F = \int_A f(x)dx,$$

$$f(x) = w_E - w_s,$$

式中第一项 w_E 即为“地震”前后总位能密度的变化，第二项 w_s 从微观上说，相当于克服断层两侧原子间的作用力将断层“撕开”所做的功，从宏观上说，相当于克服摩擦力或内聚力产生滑动及形成新的裂纹表面所做的功，它应当是 $u(x)$ 的非线性函数。从对称性的考虑，可取

$$w_s = - \sum_{n=0}^{\infty} a_n u(x)^{2n}.$$

要给出上式中的 a_n 的精确表达式显然是不容易的。Rundle (1989)^[28] 研究了一个可以产生粘滑摩擦效应的 w_s 函数：

$$w_s = -(a_0 + a_1 u^2 + a_2 u^4),$$

得到自由能函数的“平均场”形式为

$$f = -pu - a_0 - a_1 u^2 - a_2 u^4.$$

这是我们在统计物理中熟悉的与非经典成核模式有关的自由能函数的形式。如果以 u 为横轴，以 f 为纵轴，画出自由能函数曲线，那么我们很容易看出这条曲线是一个不对称的 w 形，其两臂伸向无穷远，两个不一样深的谷被一个峰分开，标志着稳态和亚稳态。当 $p < 0$ 时，左边的谷底为稳态，右边的谷底为亚稳态；当 p 由负变正时，左边的谷底变成亚稳态，而右边的谷

底变成稳态。 p 的增加并不能立即导致状态的“跃迁”，因为实现这种跃迁还要穿过中间的峰。因此亚稳态往往也能存在一段时间，这段时间相当于弹性回跳理论中弹性应变积累到极限值附近的情况。穿越“势垒”达到稳态的过程对应于地震的过程，在这个过程中，涨落和非线性相互作用耦合形成的非线性波的隧道效应具有重要的意义。而“热力学弹性回跳理论”可以表述为板块构造运动引起的应力增加首先使系统处在一个亚稳态上，然后系统自发产生的热动力使系统离开亚稳态开始出现破裂，最后系统以一次地震的方式回到自由能最小的稳态。从处理方法的特点上说，这个模式可称为“成核模式”。

相互作用项也有可能成为控制地震破裂发生的主要矛盾。这种情况与温度变化和压力变化都能引起相变的情况多少是相似的。作为一种简化的情况，考虑 W_E 的“粗粒平均”形式 $W_E^{c.s.}$ ，且仅考虑相邻单元之间的相互作用，并令体系具有平移对称性，则¹⁾

$$W_E^{c.s.} = - \sum_i \left\{ p u_i + \frac{T}{2} \sum_{j=\langle nn \rangle} u_i u_j \right\},$$

式中 $j = \langle nn \rangle$ 表示仅对邻域求和， p 不再是应力而变成力， T 也相应地变成其积分形式。而如果认为这个函数即是所考虑的裂纹系统的哈密顿量的话，那么上述系统与统计物理中熟知的某些相变系统应当具有相当好的可类比性。一段有趣的插曲是逾渗模型很早就被用来讨论地震活动性和破裂连通^[29-33]，然而这种尝试似乎并未得到地震学界的普遍承认，物理学中也不把地震活动性和岩石破裂问题作为逾渗模型的一个好的应用实例来引用^[34]。一个很重要的原因是逾渗模型与地震问题的“接口”不明确。逾渗模型中形形色色的集团的分布看上去确很像地震丛集，跨越集团形成中的临界现象也很容易使人联想到地震破裂失稳，但是逾渗模型中的键、座、集团如何与地震学问题对应起来，却一直未见系统的和严格的讨论，而直观上的相似性毕竟不是物理。另一方面，在前面所说的相变模型中需要一个“温度”，这个量的地震学

含义是什么，也是一个不清楚的问题。物理学中这两个至少在 10 年以前已经不是问题的 问题却使地震学家困惑了一段时间。

在上面给出的能量表达式中不显含时间，因而看上去这类模型似乎适用于不同时间尺度的地震现象，可是从地震活动性的角度说，并非如此。我们知道在这些模型中，标度性是与临界点相联系的，也就是说 Gutenberg-Richter 定律并不是任何时候都成立的，对于时间尺度与短临预报的时间尺度相当的震级较小的地震来说，情况的确如此。可是就更长一点的时间尺度和更大一点的地震来说，Gutenberg-Richter 定律告诉我们，在中长期的时间尺度上，地震动力系统仿佛被锁定在一种持续的临界状态上，这是上面的模型所无法说明的。从物理上看，道理也很简单。在地震破裂的时间尺度上，起决定性作用的因素是摩擦和地震波的释放，这正是前面给出的自由能函数和哈密顿量中所包含的实际的物理内容。而在中长期地震活动的时间尺度，很多其他因素，例如蠕变，也开始具有不可忽略的意义。附带提一下，使用位移函数展开的方法可以证明，Burridge-Knopoff 模型可以看作是成核模型的一个一级近似。

计算技术的进步和物理学中一些概念的引入，使我们对临近破裂时的地震现象的描述和理解更加深入和细致，从而对短临预报的性质也有了物理意义更为明确的认识。由于地质构造和实际地球物理过程的复杂性，我们显然不能期望这种研究能够导致实用的地震预报方法。事实上，真正的地震预报也许是介于物理学和统计学之间的一种预报，然而这种讨论毕竟可以给我们许多有益的启示。通过一些物理上的考虑和数学上的处理，我们也有可能从“线性”的震源理论平滑地过渡到“非线性”的震源模式。从地震学的角度说，在这类模型中，非线性的摩擦定律看来是一个关键性的因素。现有

1) J. B. Rundle, The statistical mechanics of earthquakes, Lecture Notes, ICTP Workshop on Nonlinear Dynamics and Earthquake Prediction, Trieste, (1991).

的结果^[35-37]显然是不够充分的,在上面的讨论中仍有很多决非必不可少的简化和先验假设。而在这个问题从实验上和观测上得到充分的讨论之前,这方面的理论研究恐怕不太可能取得进一步的突破性进展。

2. 中长期地震活动:“图象动力学”

到目前为止还未能写出决定中长期时间尺度上的地震现象的基本方程。当然,对于这个基本方程应当满足什么样的条件,我们还是有一个大概的认识。我们希望这个方程能够描写板块运动造成的应变能积累,积累起来的能量是通过地震和蠕变两种方式释放的。这里的蠕变不单指粘弹性介质的流变,地震台网记录不到的小地震和只有破裂但不辐射地震波的“准地震”也是地球介质“视蠕变”的一个重要来源。我们希望这个基本方程能将这种“视蠕变”全面地考虑进去,希望这个方程能够给出触发事件和被触发事件之间的时间延迟,能够正确地考虑地下流体的作用及地壳中应力积累和应力传递的机制,从而在定量上给出地震丛集、地震迁移、前震和余震、地震平静、地震空区,以及地震活动的种种“自然节律”现象的物理解释。最后,如果我们的模型是离散模型的话,我们还希望这个模型的行为在所考虑的基本单元趋于无穷小,所考虑的基本单元数趋于无穷大时,能渐近地退化为连续介质力学的结果。而在此之前,我们必须从实验上和观测上回答下述问题¹⁾:

(1) 小尺度地震活动性具有怎样的重要性?

(2) 物理上能否区分粘性蠕变和作为“视蠕变”的小地震?

(3) 如果不能区分的话,那么描述小地震和“视蠕变”的等效的连续介质流变方程是什么?

(4) 在描述破裂前的加速蠕变状态的时候,我们必须达到怎样的精度?

(5) 在描述破裂过程中的滑动摩擦不稳定性的时候,我们必须达到怎样的精度?

(6) 如何处理所考虑区域之外的形变,包括大地震引起的形变?

(7) 断层泥的等效流变状态方程是什么?

(8) 如何考虑与碎裂过程相竞争的其他可能的“愈合”过程的作用?

这里我们涉及的实际上是一个连续介质问题,其自由度原则上应当是无限的。这个无穷维系统在其演化过程中能否被归并为维数较低的系统,这是一个正在讨论的问题。确有一些作者(例如 Huang 和 Turcotte^[23,24], Knopoff 和 Newman^[38])讨论过维数很低的“地震”模型,但是这些模型最多是示意性的,很难说这类模型能够在什么意义上适用于地震问题。一些地震学家的猜测是,如果地震序列具有混沌性质的话,那么地震动力系统在其演化过程中落到一个维数不高的吸引子上应当是很自然的事情,但是到目前为止,并没有一个有说服力的结果表明地震序列是否具有混沌的性质。由于地震目录具有非常普遍的不完整的问题,所以时间序列分析方法目前尚不足以给出肯定或否定的结果。

Keilis-Borok^[39,40]则认为要写出上面所说的基本方程是不可能的。Keilis-Borok 的假设有两个基本点。第一个基本点是地球岩石圈具有层次性(hierarchy),岩石圈分成许多块体,块体之间有相对运动,从最大的板块到最小的矿物颗粒,其间相差十几个数量级,块体之间被边界区分开,边界区的厚度通常较块体的大小薄 2—3 个数量级。第二个基本点是块体之间的边界不是被动的,它们在块体的运动中起着重要的作用。在这样一个模型中,第一找不到一个特征尺度,第二找不到一种起决定性作用的主要物理机制,而是多种已知的和未知的物理机制都具有同等的不可忽略的作用。我们至今还不知道应当怎样用物理学方法来处理这类高度复杂的系统。然而 Keilis-Borok 以他的物理直觉,指出这样的系统应当具有四个性质:第一,引起地震的动力学来源,不仅仅是一个孤立的断层,而是整个岩石圈系统。在这个系统

1) L. Knopoff, Self-organization in self-damaged environment, Lecture Notes, ICTP Workshop on Nonlinear Dynamics and Earthquake Prediction, Trieste, (1991).

中,在一个相当大的时空范围内,强震之间不是彼此孤立的,而是相互关联的。因而一次地震的前兆,应当来自一个相当大的时空范围,而不是仅仅局限在震源附近的狭小的区域里。第二,地震前兆具有鲁棒(robust)性,即可以“粗粗拉拉”地定义,而不受一些细节的影响。第三,由此给出的前兆现象,在不同的时空尺度上是自相似的。第四,岩石圈动力系统具有自组织临界性。这四个性质是从地震预报的角度提出的,具有很强的实用性。但是也很明显,这四条既不是相互独立的,也不是相互平等的。相对说来,自组织临界性可能具有更为重要的意义,这个想法与一些物理学家的想法不谋而合^[41-43]。在这里, Gutenberg-Richter 定律被看作是一种特殊的 $1/f$ 定律。这样,在写不出基本方程的情况下,地震学家有两类工作可以做。一是使用一些给定的模型,比如 Burridge-Knopoff 模型, Keilis-Borok 的层次性模型,用计算的或实验的方法,看一看它们能否演化到一个“自组织临界状态”;二是考虑一些具有自组织临界性的模型,比如砂堆模型,针对这些模型发展一些预报方法。从统计学上讲,地震给科学提供的样本实在是过于吝啬了,而理论模型却能在短短的几秒时间里“重现”时间尺度为几个世纪的“地震目录”。同时在物理学中我们有这样的经验,在临界点附近,许多差异极大的物理系统往往具有一些很相似的性质,因此这种研究对地震预报还是有实际的参考意义的。陈颀把这个思路称为“地震图象动力学”(pattern dynamics of earthquakes)。

三、地震模型与地震预报

这里就一个简单的例子说明一下今天地震学家是怎样进行地震预报的。这种称为“M8 算法”的使用地震目录进行强震中期预报的方法是 Keilis-Borok 领导的前苏联(今俄罗斯)科学院地震预报理论与数学地球物理国际研究所在 80 年代发展起来的据说是具有一定预报能力的方法。国际理论物理中心和国际科学与

高技术中心曾于 1983 年、1988 年、1991 年和 1993 年在意大利的里雅斯特(Trieste)举办工作研论班介绍包括这个算法在内的一整套算法^[44,45]。算法所用的基本资料是地震目录,首先要做的一件事是去掉余震,形成一个只有主震的地震目录,然后从一段时间内的主震目录中提取出四个函数:

函数 $N(t, m, s)$, 即 $(t-s, t)$ 时段内震级大于 m 的主震的总数;

函数 $L(t, m, s)$ 是用来描写地震活动性的长期变化趋势,可表示为

$$L(t, m, s) = N(t, m, t - t_0)$$

$$- N(t', m, t' - t_0) \cdot (t - t_0) / (t' - t_0),$$

其中 $t' = t - s$, t_0 是地震目录的起始时间,这个函数描写的是地震活动性的长期变化趋势;

函数 $Z(t, m, M_0, s)$ 是描述 $(t-s, t)$ 时段内震级大于 m 、小于 M_0 的地震的空间集中度的一个函数;

函数 $b(t, m, M', s, M_0, e)$ 是 $(t-s, t)$ 时段内震级在 m 与 M' 之间的主震后 e 天内发生的余震的总数,如果在这 e 天之内又发生了一次 M_0 级以上的地震,那就不再继续这次地震的余震的记数。接下去由这四个函数进一步组合成七个函数:

$$P1 = N(t, M(10), 6 \text{ 年}),$$

$$P2 = N(t, M(20), 6 \text{ 年}),$$

$$P3 = L(t, M(10), 6 \text{ 年}),$$

$$P4 = L(t, M(20), 6 \text{ 年}),$$

$$P5 = Z(t, M(10), M_0 - 0.2, 6 \text{ 年}),$$

$$P6 = Z(t, M(20), M_0 - 0.2, 6 \text{ 年}),$$

$$P7 = b(t, M_0 - 2.0, M_0 - 0.2, 1 \text{ 年}, M_0 - 4.0, 14 \text{ 天}),$$

其中 $M_0 = 8$, $M(10)$ 表示平均每 10 年发生一次的地震的震级, $M(20)$ 表示平均每 20 年发生一次的地震的震级。这七个函数再生成四个函数组:

$$g1 = \{P1, P2\},$$

$$g2 = \{P3, P4\},$$

$$g3 = \{P5, P6\},$$

$$g4 = \{P7\}.$$

如果出现异常的函数的个数超过某一个阈值,同时出现异常的函数组(即至少有一个函数出现异常的函数组)的个数也超过某一个阈值,便认为出现了“强震发生概率增长时间(TIP)”(原文为 time of increased probability of strong earthquakes),即出现比较大的地震危险性的机率。这里,阈值和异常值都是靠经验取定的。据报道,用这个算法曾预报了1985年9月19日墨西哥8.1级地震。

简单地说,地震学要求物理学回答的问题是,从物理学的角度看,这么干行吗?如果不行的话,还有没有更好的办法?

在地震预报中,鲁棒性(robustness)看来是一个首要的问题。在过去的地震时间序列分析中,有些人简单地以省为界,居然也能得到一些不错的结果,而我们知道地震可没有什么省界的概念,连国界都不承认。震级标度一直是一个重要的地震学问题,有一段时间差不多每天都有一篇这方面的文章发表。不同的震级系统之间有时可以相差很多,但有意思的是在M8算法中,只取最大的那个震级进行分析,竟然也得到较满意的结果。这个现象在理论上如何理解,目前还不十分明确。如果真的存在这种鲁棒性的话,则至少对中期地震预报来说是一个好的消息。那时我们可以放心地“粗粗拉拉”地定义一些函数,就像在M8算法中那样。到底需要多少个这样的函数(独立函数)才能够用,这是另一个有意义的问题。如果地震序列具有确定论系统中的混沌性质的话,那么可以期望这个系统最终演化成只需要很少几个独立变量的吸引子,这时所取的独立函数的个数不能低于吸引子的维数。而如果地震具有自组织临界性的话,那么这个无穷维系统将无法“缩并”成自由度较低的系统,这时如何从总体上统计性地预报系统的动力学行为,还并不清楚。重要的是,对于不同时间尺度上的地震现象,应当使用不同的物理模型;在研究一个特定的物理模型的时候,必须明确它所对应的是哪个时间尺度上的地震现象。遗憾的是,尽管没有人认为写出月球的薛定谔方程是有意义的事情,却有相

当一些物理学家和地震学家忽视了不同时间尺度上的地震现象的特殊性,从而用相当好的“模型”得出了似是而非的结论。

迄今为止,地震预报研究所取得的成果仍旧是非常有限的。1975年2月4日中国海城7.3级地震的预报是国际上唯一一次没有争议的具有科学意义的成功的预报。地震预报所面临的问题远远多于它所取得的成果,因此目前不得不采用多途径探索的策略。本文所述的仅仅是诸多思路中的一种思路,但也许是最有希望的一种思路。

作者得到国家地震局地球物理研究所陈运泰教授的指导,得到 IIEPTMG V. I. Keilis-Borok 教授、北京大学物理系林宗涵教授、国家地震局陈颀教授的帮助,特致谢意。

- [1] 本文只引用与主要内容有关的参考文献,关于历史背景,可参阅 K. Aki and P. G. Richards, *Quantitative Seismology*, Freeman, (1980); T. Rikitake, *Earthquake Prediction*, Elsevier, (1976); 吴忠良、刘宝诚, *地震学简史*, 地震出版社, (1989)。
- [2] Y. Y. Kagan and L. Knopoff, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **62**(1980), 303.
- [3] Y. Y. Kagan and L. Knopoff, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **67**(1981), 697.
- [4] Y. Y. Kagan and L. Knopoff, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **67**(1981), 719.
- [5] K. Aki, *AGU Maurice Ewing Series 4*, (1981), 566.
- [6] G. King, *PAGEOPH*, **121**(1983), 761.
- [7] S.R. Brown and C.H. Scholz, *J. Geophys. Res.*, **90**(1985), 12575.
- [8] C. A. Aviles and C. H. Scholz, *J. Geophys. Res.*, **92**(1987), 331.
- [9] P. G. Okubo and K. Aki, *J. Geophys. Res.*, **92**(1987), 345.
- [10] R. F. Smalley et al., *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**(1987), 1368.
- [11] 陈颀, *分形与混沌在地球科学中的应用*, 学术期刊出版社, (1989), 85.
- [12] D. L. Turcotte, *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge Univ. Pr., (1992).
- [13] R. F. Smalley, D. L. Turcotte and S. A. Sola, *J. Geophys. Res.*, **90**(1985), 1884.
- [14] R.-S. Wu and K. Aki, *PAGEOPH*, **123**(1985), 805.
- [15] R.-S. Wu and Flatte, *PAGEOPH*, **132**(1990), 175.
- [16] 小山顺二,原启明著,李学良译, *世界地震译丛*, No. 4(1991), 59.
- [17] J.H. Dietrich, *J. Geophys. Res.* **77**(1972), 3771.
- [18] J. B. Rundle and D. D. Jackson, *Bull. Seism.*

- Soc. Am.*, 67(1977), 1363.
- [19] S. Cohen, *J. Geophys. Res.*, 82(1977), 3781.
- [20] T. Cao and K. Aki, *PAGEOPH*, 122(1984), 10.
- [21] T. Cao and K. Aki, *PAGEOPH*, 124 (1986), 487.
- [22] J. Nussbaum and A. Ruina, *PAGEOPH*, 124 (1987), 629.
- [23] J. Huang and D. L. Turcotte, *Geophys. Res. Lett.*, 17(1990), 223.
- [24] J. Huang and D. L. Turcotte, *Nature*, 348 (1990), 234.
- [25] J. M. Carlson and J. S. Langer, *Phys. Rev. A*, 40(1989), 6470.
- [26] J. B. Rundle, *J. Geophys. Res.*, 93(1988), 6237.
- [27] J. B. Rundle, *J. Geophys. Res.*, 93(1988), 6255.
- [28] J. B. Rundle, *J. Geophys. Res.*, 94(1989), 2839.
- [29] D. Vere-Jones, *PAGEOPH*, 114(1976), 711.
- [30] D. Vere-Jones, *Math. Geol.*, 9(1977), 455.
- [31] T. L. Chelidze, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 28 (1982), 93.
- [32] J. Lomnitz-Adler, *Geophys. J. R. astron. Soc.*, 83(1985), 435.
- [33] C.-I. Trifu and M. Radulian, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 58(1989), 277.
- [34] M. Bebbington, D. Vere-Jones and X. Zheng, *Geophys. J. Int.*, 100(1990), 215.
- [35] J. Byerlee, *PAGEOPH*, 116(1978), 615.
- [36] A. Ruina, *J. Geophys. Res.*, 88(1983), 10359.
- [37] J. R. Rice and S. T. Tse, *J. Geophys. Res.*, 91 (1986), 521.
- [38] L. Knopoff and W. I. Newman, *PAGEOPH*, 121 (1983), 495.
- [39] V. I. Keilis-Borok 著, 陈颀译, 分形与混沌在地球科学中的应用, 学术期刊出版社, (1989), 59.
- [40] V. I. Keilis-Borok 著, 吴忠良、刘杰译, 非线性理论在地震预报中的应用, 地震出版社, (1992), 116.
- [41] P. Bak and C. Tang, *J. Geophys. Res.*, 94(1989), 15635.
- [42] A. Sornette and D. Sornette, *Europhys. Lett.*, 9 (1989), 197.
- [43] K. Ito and M. Matsuzaki, *J. Geophys. Res.*, 95 (1990), 6853.
- [44] V. I. Keilis-Borok 著, 陈颀译, 中期地震预报: 模型、算法、全球实验, 地震出版社, (1991).
- [45] V. I. Keilis-Borok 著, 黄德喻、吴忠良、周翠英译, 中期地震预报 TIP 算法程序使用指南与练习, 地震出版社, (1992).

数学、物理学与生态学的结合——种群动力学模型

陈 兰 荪

(中国科学院数学研究所, 北京 100080)

王 东 达

(白城师范专科学校数学系, 吉林白城 137000)

种群动力学模型是描述种群与环境, 种群与种群之间相互竞争, 相互作用的动力学关系的数学模型, 可用于描述、预测以至调节和控制物种的发展过程与发展趋势。这个模型的应用, 将促使人们进一步了解自然。它已成为人们开发资源, 合理使用资源和保护环境工作中的一种有用工具。

Abstract

Models of population dynamics describe competition and interaction among species or between species and the environment. They can be used to describe, predict and even adjust the growing process and developing trends of species. They may also help human beings understand nature, develop natural resources rationally and protect the environment.

Key words Population dynamical model, Lotka-Volterra system, global asymptotic behavior, mathematical physics

动力学方法在物理学中已是人们熟悉而常见的方法, 这个方法是否适合于用来研究某些