

非平衡态统计物理学在地震成因分析中的应用——“局域”模型的建立

任光耀

(新疆大学)

摘 要

地震成因是一个极复杂的问题, 多学科的协作可能有助于对地震成因的探讨。本着这种想法, 作者根据廿世纪七十年代发展起来的非平衡态统计物理学的理论基础, 试图从“局域”模型出发探讨地震成因。

应用非平衡态统计物理学探讨地震成因是国内外几乎还没有开展的一项工作, 没有前人的工作成果可以借鉴。作者在经过几年的尝试后, 拟就这方面的问题作初步探讨。

一、理论基础简介

十七世纪以来, 人们习惯于把复杂系统分解为简单要素来考虑, 并且取得了极大成功。然而, 片面强调事物简单性方面, 就会忽视事物的复杂性和整体性。因为各个要素之间存在着复杂的相互作用。I. Prigogine等认为, 许多开放系统具有独特的类型, 如耗散结构, 它要求不断地输入不同形式的物质和能量。只有这种系统才有可能在发生某种特殊的事物耦合时(如自催化、反馈)会突然出现新的方式和结构。故需要对开放系统的复杂性和整体性进行研究。

耗散结构与为人们所熟悉的平衡结构是完全不同的概念。耗散结构是开放系统在远离平衡态时可能出现的一种自组织稳定化有序结构, 是在非平衡状态下宏观体系的自组织现象, 只存在于非线性的不可逆过程中。

在物理学中, 对于时间发展的方向和不可逆性的问题(即演化概念)是在十九世纪通过热力学与统计物理学中的热力学第二定律引入的, 即一个孤立系统在时间过程中最终要达到“热力学平衡”状态, 它对应于熵极大。也就是说, 它将把一切演化过程“吸引”到熵最大的平衡态, 而不同于经典力学中时间与位置的一一对应关系。在统计物理学中, 根据 Boltzmann 关系 $S = k \log W$, 高熵对应着无序, 而低熵对应着有序。就是说, 平衡是无序的, 非平衡却是有序的起源。

不可逆过程是客观存在的，反之，可逆过程才是一种科学抽象的假定。在许多运动现象中，不可逆过程起着基本的建设性的作用。例如，在化学反应过程中未来和过去是有区别的。现在人们正在探索将不可逆性和动力学的可逆定律统一起来，如把经典力学的轨道变成相空间的分布函数，这中间就显示出不可逆性的作用。

非平衡态理论的逐步建立，大致可分成三个阶段：

首先是从化学反应、热传导、扩散及粘滞等各种不可逆过程的熵产生研究开始的。

$$P = -\frac{d_{is}}{dt} = \sum_{\rho} J_{\rho} X_{\rho}$$

式中P是熵产生，是指系统内部的扩散类和化学反应类变化引起的熵增加。J是“流”或速率，X表示“力”，如化学亲和力、浓度差、温度梯度等。

第二阶段是线性不可逆热力学，它包括Onsager对易关系

$$J_k = \sum_{\rho} L_{k\rho} X_{\rho}$$

式中 $L_{k\rho}$ 是线性输运系数，各个系数 $L_{k\rho}$ 之间用矩阵的形式写出时，矩阵是对称的，即

$$L_{k\rho} = L_{\rho k}$$

其物理含义是输运系数 $L_{k\rho}$ 相当于一个单位大小的第 ρ 种动力 X_{ρ} 所引起的第k种性质的迁移。

反之， $L_{\rho k}$ 相当于一个单位大小的第k种动力 X_k 所引起的第 ρ 种性质的迁移。

线性不可逆热力学还包括最小熵产生原理，这是将Onsager原理应用于等温等压系统再对时间求微商得到的，即

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha}{T^2} \int dV \left\{ \sum_{i,j,k} L_{ij} \nabla \cdot \mu_i \nabla \left(\frac{\partial \mu_j}{\partial \rho_k} \right) \frac{\partial \rho_k}{\partial t} - \sum_{i,j,\rho,\rho'} v_{i\rho} L_{\rho\rho'} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial \rho_j} \right) \left(\frac{\partial \rho_j}{\partial t} \right) a_{\rho'} \right\}$$

再利用流体力学中的质量平衡方程及稳定边界条件后，得到

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\alpha}{T^2} \int dV \sum_{i,j,k} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial \rho_k} \right) \frac{\partial \rho_k}{\partial t} - \frac{\partial \rho_j}{\partial t} \leq 0$$

$$\frac{dP}{dt} \leq 0 \text{ 即为最小熵产生原理。}$$

离开稳恒态时， $\frac{dP}{dt} < 0$ ；处于稳恒态时， $\frac{dP}{dt} = 0$ 。此式的物理意义是：线性非平衡区系统随着时间的发展，总是朝着熵产生减少的方向进行，直到达到一个稳恒态，此时熵不再随时间变化。这说明在定态附近有“势”数，最小的熵产生可做为定态的判据。但是它也说明在定态附近不会产生新的结构，即系统有抗干扰能力，使由涨落引起的偏差不能引起状态离开稳定的定态。

第三阶段是用热力学概念来解释“自组织”过程的发生以致有可能产生新的结构。人们发现，对于远离平衡的定态，由于系统包含一定的非线性因素，Onsager倒易关系不再成立，它的熵产生不一定取最小值。将熵产生P在定态附近展开，取到二级项得到超熵产生的概念—— $\frac{1}{2} \delta^2 P = \delta_{\rho} P$ ，这是广义力对P的贡献的变分

当体系稳定时, $\delta_x p > 0$,

体系不稳定时, $\delta_x p < 0$,

体系处于临界状态时, $\delta_x p = 0$ 。

这个结论是根据里雅普诺夫稳定性定理得到的。当 $\delta_x p$ 由大于零变到小于零时, 在微小的扰动驱使下体系就离开不稳定的定态而进入一个新的稳定的定态——自组织有序的耗散结构。

从上述介绍可知, 非平衡确实是有序之源。而所有的耗散结构有三个共同的特性: 存在于开放系统中; 保持远离平衡态的条件; 系统内各个要素之间存在着非线性的相互作用。实际上, 一个开放系统熵的变化 ds 可以分成两部分, 即

$$ds = d_{is} + d_{es}$$

式中 d_{is} 是系统本身的化学反应类和扩散类的不可逆过程中产生的熵增加, 又称熵产生, 遵从热力学第二定律, 即

$$d_{is} \geq 0$$

而 d_{es} 是系统与外界交换物质和能量引起的熵流, 它可以大于零也可以小于零。因此总熵变 ds 即可以大于零, 也可以小于零。当随着时间的推移 ds 逐渐减小时, 系统就可以由无序逐步转化为有序状态, 即系统消耗负熵流而外界供应负熵流时, 系统就可能从无序态向有序态转化。

这种理论说明, 宏观结构的触发过程是一种远离平衡态的现象。尽管对象不同, 宏观结构不同, 但其触发过程是类似的。

二、“局域”模式的建立及其在地震成因分析中的应用

一个大地震的震源(包括: 近场、远场)正是一个非平衡系统。太阳及行星与地球之间的相互作用, 以及地下流体、化学反应、放射性等非线性变化引起了众多复杂过程, 为了便于分析, 作者建立了非平衡体系(震源)的“局域”模式。

“局域”概念是I. Prigogine在广义非平衡热力学中提出的, 即认为体系总体是非平衡的, 但可采用一定的方式将它看作是由下一个层次的许多小单元组成的, 每一个小单元从宏观上看是充分小的, 因而在一个很短的时间内可以看作是均匀的、平衡的, 但从微观上看又是非常之大的, 内部包含着更下一个层次的许多小单元, 因此, 仍然可以将其看作是一个宏观热力学系统。这样用化整为零的方法就可以把一个个非平衡问题化为许多局域平衡的问题来研究, 而任何两个单元之间, 其平衡数据却可能是不同的, 因而从整体来看仍然是非平衡的。另外, 这些众多的局域部分之间并非线性组合, 各子系统间协同动作的相干作用具有非线性特点, 因此, 对于一个复杂系统必须进行整体性的研究。

非平衡态统计物理学指出, 虽然产生突变的体系性质可以很不相同, 但在突变点附近的行为却具有很多共同点。随机小涨落通过相干效应不断增加形成“巨涨落”, 此涨落可使系统原来的定态失稳, 然后在涨落作用下产生一个新的有序的自组织结构, 称为非平衡相变。随机原理在非平衡相变中有着重要意义。

地震孕育过程很象一热力学过程, 系统在外界因素作用下(包括各种随机扰动), 由平衡状态过渡到线性非平衡态, 进而进入非线性非平衡状态直至临界状态。在其触发过程中, 外

界的随机扰动、系统的初始状态在突变中是起重要作用的。

震源是一个开放系统,它不仅与周围地质环境发生物质、能量及信息的交换,而且与大气环境以及天体星球之间发生物质、能量及信息的交换。为此,作者依据对太阳磁场和地球磁场的大量观察结果和实验数据及理论结果,建立了两个简化的太阳磁场与地磁场相互作用模型,计算了方圆36公里,厚20公里的区域内,由于太阳磁场的变化使地磁场受到扰动而产生的相互作用能为 1.25×10^{16} 尔格。又根据急始型磁暴的观测结果计算出地磁场受到的扰动要比平时高1—2个数量级。如果磁场的能量转换为应变能的转换效率为1%,则有 $E_{\text{应变}} = 10^9 - 10^7$ 焦耳。这个能量若能够以某种方式积累起来,则在28天里积累的能量可以达到 $10^{12} \sim 10^{13}$ 焦耳,相当于一个五~六级地震释放的能量。太阳磁场的扰动对地磁场的影响在地震孕育、发生过程中起着不可忽视的触发调制作用,而在某些突变点上(如磁暴发生附近)可能起着决定性的影响。若把地球看作是一个准弹性体,把月球绕地球轨道视为椭圆,则可计算出在地球表面半径为50公里,厚度为10公里的范围内的引潮势的数值范围为 10^{17} 焦耳。这也说明引潮势对于地震的孕育及触发也有着不可忽视的影响。

当震源达到非线性区域,在热力学分支点后,随机涨落已不再遵从高斯分布,而是随机小涨落通过相干效应不断增加而形成“巨涨落”,直至起到非平衡相变的触发器作用,使系统由不稳定状态(即先失稳——即地震发生)变成一个新的稳定的有序结构。非平衡相变是突变式的而不是一个相变区域,是在同一状态中的转变,而不涉及物态间的相转变,这些特点与地震的发生是一致的。

当然,若系统处于线性非平衡区域时,根据前述的最小熵产生原理可知,系统有抗干扰能力,这时即使有一较大的涨落只能使系统暂时离开定态,却不会使定态失稳,最终还是要回到定态的。用这个特性可以对地震预报中的误报作出解释,即虽然有一些预报手段发生较大异常,但这时因系统处于线性非平衡区,故不可能失稳,因此地震不会发生。

事实上,地球相对于太阳系只是一个微小的组成部分,是组成太阳系的下一个层次。而它又是由大量的小体系(属于下一个层次)构成。进一步,可以把某一次地震所涉及到的范围看作是一个层次,它也是由大量的小体系组成的,如由地壳和部分上地幔组成。由于这个系统是个开放系统,可以和地幔、地壳的其它部分如大气、宇宙发生能量、物质和信息的交换。而其自身构造,如物质组分、强度、硬度、弹性、电磁性质、相态等并不是均匀分布的。于是就可以根据局域含义将大体系分成许多小体系,对这些小体系可以认为是各种性能大致均匀的。

在地震孕育过程中,地应力积累的弹性变化阶段相当于线性区域,而非弹性变化阶段相当于非线性非平衡变化,临震相当于涨落被放大的过程即体系处于亚临界状态,一旦超过其阈值即放大到超过临界状态,体系即失稳发震。值得注意的是,由于地质结构的复杂性,结构运动的多样性加上种种随机力和非线性因素,很难用简单的几条原则去预测所有的地震。但是,在临震前即在一定阈值附近一定会出现大的涨落,这是最重要的共性。

当震源区的涨落不断增大时,震源区表现出激化特征,即出现突跳异常和宏观异常的前兆手段的种类、频率、强度剧增,这就是临震异常现象。震源区的涨落总趋向是不断增大的,这样就会使断层加速蠕滑。对未滑部分则是更加速了应力的积累。从岩石性质方面考虑,作为震源的局域部分其岩石的强度相应比邻近局域部分大,这样通过交换它就可以积累

更高的应变能。在垂直方向上,强度大的岩石的局域区的电磁性比强度小的局域区(如破碎区、多液区等)的电磁性质强。

总之,作者认为根据局域模式,可以从同一模式出发既考虑地球内部不同局域之间的相互作用,又可同时考虑太阳系各天体与地球之间的相互作用,为从理论上对地震成因问题作全面深入探讨提供了便利条件。

参 考 文 献

- [1] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self organization in non-equilibrium systems*, John Wiley and Sons, 1977.
[2] 郭增建、秦保燕,震源组合模式与地震预报,地震科学研究, No. 1, 1979.

APPLICATION OF NON-EQUILIBRIUM STATISTICAL PHYSICS IN ANALYSIS OF CAUSE OF EARTHQUAKE

Ren Guangyao
(*Xinjiang University*)

Abstract

The cause of earthquake is a complex problem. Perhaps, the combined efforts of many branches of science would contribute to the study of cause of earthquake. In view of the train of thought, the author tried to discuss the cause by using "localizability" model, based on the theory on non-equilibrium statistical physics developed in the 1970s.