

# 从临界转变的角度理解地震预测技术<sup>1)</sup>

陈建志<sup>1,†</sup> John B. Rundle<sup>2</sup> Donald L. Turcotte<sup>2</sup> 尹祥础<sup>3</sup>

(1 中央大学地球科学系 台湾 32001)

(2 加州大学戴维斯分校地质学系 美国加州 95616)

(3 中国地震局地震预测研究所 北京 100036)

2013-04-09收到

† Email: chence@earth.ncu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20130503

## Theory of critical transitions helps understand seismicity-based earthquake forecasting techniques

Chen Chien-chih<sup>1</sup> John B. Rundle<sup>2</sup> Donald L. Turcotte<sup>2</sup> YIN Xiang-Chu<sup>3</sup>

(1 Department of Earth Sciences, Central University, Taiwan 32001)

(2 Geology Department, University of California, Davis, CA 95616, USA)

(3 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

**摘要** 侦测重大地震前相关的地震活动度异常，以此作为地震预测基础理论的研究，在近十年内常被提出讨论。其中有两个典型的算法，包括美国加州Rundle教授的“震模信息学”算法和北京尹祥础教授的“加卸载响应比值”算法。前者旨在揭示地震活动度的高异常变异性；后者则借助于日、月引力的响应，来研究地壳块体的受损程度。文章从“临界转变理论”出发，认为不管是高异常地震活动度变异，或是象征地壳材料已严重受损的高加卸载响应比值，都是地壳即将出现临界转变（亦即重大地震）的早期征兆。也就是说，原由两个独立研究群体提出的地震活动度算法，实为临界转变的前兆信号的一体两面，可以在临界转变理论下统一起来。

**关键词** 地震活动度，地震预测，临界转变，震模信息法，加卸载响应比值法

**Abstract** Seismicity-based earthquake forecasting/prediction techniques progressed rapidly in the last decade. Some were even claimed to be promising in predicting the occurrences of future large earthquakes. Yet, apparently ambiguous algorithms and lack of theory about seismicity precursor signals cast doubts on these techniques. Two fundamental issues stand out: is there any relationship between these apparently ambiguous algorithms, and is there any conceptual model that can unify these independently proposed algorithms? In this paper we suggest a unified framework based on the theory of critical transitions to link two seismicity-based predicting techniques, i.e., the loading-unloading response ratio (LURR) and pattern informatics (PI) algorithms. In terms of critical transitions, the loss of lithospheric resilience suggested by the LURR technique is theoretically associated with high seismicity variances portrayed in a PI hotspot map. This study thus implies the existence of generic seismicity precursors that could be also revealed by the recently proposed approaches of detecting early warning signals in the theory of critical transitions.

**Keywords** seismicity, earthquake prediction, critical transition, pattern informatics, loading-unloading response ratio

1) 海峡两岸在一些科技专有名词的译法方面不尽相同。在保留本文语言的“原汁原味”的前提下，这里给出本文中的一些科技专有名词的海峡两岸不同译法的对照，分号前是海峡东岸的译法，分号后是海峡西岸我们的译法：(1) seismological monitoring(地震侦测；地震监测)。(2) seismicity(地震活动度；地震活动性)。(3) magnitude((地震的)规模；震级)。(4) epicenter(震央；震中)。(5) pattern Informatics(震模信息学；(地震活动性的)图像信息学)。(6) attractor(吸引子；吸引子)。(7) stick-slip(锁-滑；粘-滑)。(8) fluctuation(漂移；涨落)

——编者注

近十年来,利用地震活动度以预测地震的算法蓬勃发展,逐渐变得热门起来,其中有些技术甚至宣称可以极好地预测到未来大地震的发生。但是,一方面由于许多地震预测算法中,仍然存在意义不明确的自由参数,另一方面很多算法也缺乏理论基础的支持,致使有更多的人对该类方法提出所谓的地震前兆信号多有质疑。这里有一个根本问题,现提出来讨论,这或许有助于我们增进对这些预测技术的理解,从而深化我们对地震预测本质的认识。这个问题是:存不存在某些概念,可以统一解释那些由个别研究群体独立提出的算法,从而透过这些概念让各种算法所得到的地震前兆异常信号能够彼此关联在一起?

在回答上述问题前,我们想先介绍“临界转变理论(theory of critical transition,或可译作临界转捩理论)”。

“临界转变”是动力系统(dynamical systems)框架下的一个概念。一个内在参数可缓慢改变的动力系统,其系统状态(state)会在某些特定状况(常被定义为分岔(bifurcation))下,从相空间(phase space)里一个数学上的吸引盆地(attraction basin,或称吸子(tractor)),转瞬间移动到另一个吸引盆地,具体表现在某些数学或物理量上的行为,就是该类量数值上的大幅度改变。我们姑且避开严谨的数学理论不谈<sup>[1]</sup>。“临界转变”的一个白话文诠释是:数学或物理上的动力系统由某个稳定状态突然转变成另一个稳定状态。

于是乎,“地震断层系统在摩擦面

上,摩擦面两侧块体由原本相互锁定的状态,转瞬间突然错动、移位,因而产生了或大或小的地震事件”,俨然就可以视为“地震断层系统的临界转变现象”。更进一步的启发则是,即使我们并不完全了解复杂地震断层系统背后细微的物理机制,但从临界转变理论的研究中所发现的通则,或许仍有机会可以让我们评估灾害性地震的发生风险。事实上,对复杂系统(如生态系统)的演化研究,近年来人们正在经历临界转变理论的研究与应用阶段,从而产生了许多在生态学中组织与管理上的变革,并因此让生态学家重新认识到生态系统演化的诸多特质<sup>[2]</sup>。

当然,上述地震事件与临界转变的模拟,仍嫌太过于空泛,不符合科学的严谨精神。所以,让我们进一步地从地震断层系统的角度,反思临界转变现象存在条件下的其他相对严谨的特性。临界转变现象如要在地震断层系统中出现,那么一个必要条件是能量函数分布(或称能量地貌(energy landscape))中,存在至少两个以上的相对极小值(或称双位能井(double-well potential energy))。热力学的观点是,这些相对低的位能井所对应的状态,正是系统普遍显现的“稳定”状态。但请注意,位能井的稳定性可以随着条件改变而变。而一个原属稳定的状态,在系统渐变条件下,逐渐失去其稳定性时,我们就可称呼其为“亚稳态(meta-stable state)”。我们可以想象地震断层系统中的两个稳定状态,

正是“锁(stick)”、“滑(slip)”两态。此两态的稳定性，可以从旋剪摩擦实验中普遍观察到的应力—应变迟滞循环(hysteresis loop)上得到印证<sup>[3]</sup>。

能量景观中位能井及其稳定性的概念，如加以推广应用到地震断层系统中，将会是极其有趣的，这就更有可能帮助我们理解大小地震之间的差异性。大小地震之间的差异，事实上，正是我们面对许多源于地震活动度计算的预测方法时所出现的基本争议。复杂的地震断层系统，当然可以有复杂的能量景观，其中并伴随着许多大小不一的吸子，吸子各自则又具有其随时可变的稳定性。当系统条件(如应力)逐渐改变时，可能因为改变了能量景观的起伏，造成了一些吸引盆地变大，而另一些吸引盆地变小，甚至消失。如此一来，大地震的酝酿过程就可以理解成能量景观中吸引盆地(位能井)的扩张。

根据临界转变理论，吸引盆地扩张又紧密地联系到系统的“复原力(resilience)”。这里的复原力可以是指动力系统受扰动后恢复原状态的快慢程度。而生态学家也定义一个处于相对稳定态的吸引盆地的宽度为“生态复原力”<sup>[4]</sup>。对于固体的破裂过程而言，晶格理论说明了材料在应力加载与卸载的过程中，位能井的宽度的确是会扩张、改变的<sup>[5, 6]</sup>。现在我们可以大胆地假设，在微小裂纹的集结、发育过程中，地震断层系统能量景观中的某些主要吸引盆地，可能因此而变得更加宽广，从而降低了系统的复原力。

让我们用图1来做说明。可以假设图1中的“能量”为热力学上的“亥姆霍兹自由能(Helmholtz free energy)”，该自由能是一个受损材料内部的状态变量(如裂纹密度、应力、应变)的“泛函(functional)”<sup>[5]</sup>。也就是说，随着损伤(可定义为裂纹密度)的累积，图1中能量景观的左侧

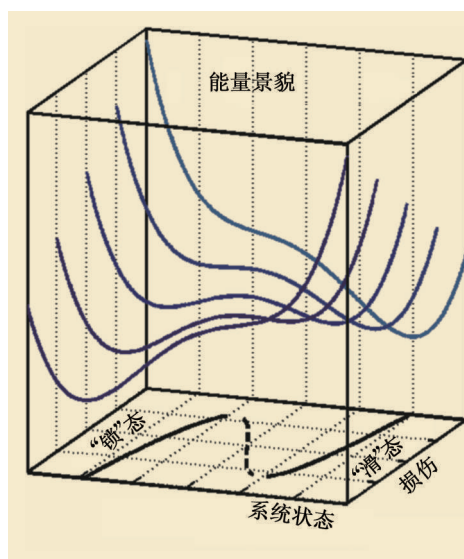


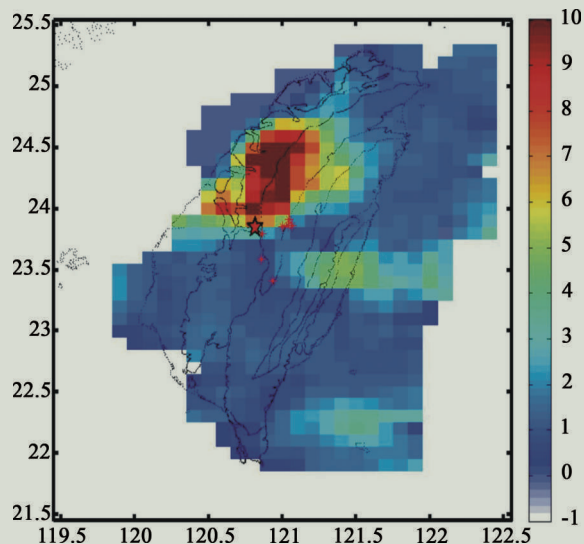
图1 地震断层的临界转变模型。一个地震断层层面可能存在“锁”、“滑”两个状态，此两态的稳定性依赖于其自由能的相对高低。当系统的“损伤”变量改变时，原先稳定的“锁”态可能瞬间失稳，并使断层面转变成“滑”态，从而伴随着地震事件的发生

支的吸引盆地可能变得宽广而平坦<sup>[6]</sup>，并失去其稳定性。当吸引盆地变得又宽又平时，系统状态一经扰动就不易退回到原始值，所以位能井变宽变平的左侧支，表明系统的复原力正在逐步地降低。而根据临界转变理论，复原力不断降低的直接冲击结果就是，系统在后续的时间内，只需一个微小扰动，就可以从图1双位能井的左支，轻易地跳跃到具有更低能量的右支底部。这个状态跳跃，意味着断层面从原本锁住状态骤变成滑移状态的“临界转变”过程，伴随着的当然就是所谓的地震事件，也因而产生了瞬间的滑移。

当我们谈及地震断层系统的复原力时，“加卸载响应比值法(loading-unloading responses ratio, 简称LURR)”正是通过计算岩石圈损伤程度，以监测其复原力的一种地震预测算法<sup>[7, 8]</sup>。LURR算法是中国尹祥础团队于1980年代提出来预测灾害性地震发生位置的技术，该法的基本观念源自于固体力学。当一岩体尚属于线弹性体时，对其施加应力所得到的响应几乎和卸除应力时的响应相等；反之，当该岩体随应变逐渐积累而脱离线弹性阶段时，其加载和卸载过程的响应会变得非常不同。如果我们视加载和卸

## 加卸载响应比值法

“加卸载响应比值法”根基于岩石的应力—应变曲线关系，视地震为地壳岩石材料的破裂力学过程。假设震源区内的物质会按照一般材料破损过程，逐步由变形、损伤、破裂，造成岩层间的错动，乃至于发生地震波的能量释放。从岩石的应力—应变曲线来看，当岩石系统在小量应变过程中，应力—应变曲线尚呈线性关系，其内部微裂纹密度尚稀，岩体大致还属于线弹性状态。如果此时给予岩体外力扰动作用时，该岩体在施加与卸除载荷的过程中，将会经历相似的形变过程，这时可视系统整体的响应过程为“可逆”表现。反之，随应变变量越来越大，岩体内部的损伤逐渐累积，应力—应变曲线已到了偏离线性的区域，整体变形过程将开始偏离线弹性的力学行为。此时如果给予外力扰动，则岩体在施加与卸除载荷的过程中，加载时的应变响应量将大于卸载过程的响应量，亦即系统整体的形变响应过程为“不可逆”过程。因此，地壳系统在相对稳定状态时，加卸载响应比值约接近于1，而当接近失稳、破裂状态时，加卸载响应比值会远大于1，暗示着地壳系统将要发生大型的破裂。自然界中，日、月对地壳引起的固体潮(earth's tide)，使得地壳各处持续地受到周期性的拉张与压缩，相当于不断重复地给予地壳微小的加、卸载过程，提供了对地壳加、卸载的外部应力源。右图是针对1999年发生在台湾地区规模7.6级的集集(为台湾一地名)地震，利用震前的地震活动度所做的“加卸载响应比值图”。



1999年规模为7.6级的集集地震发生前台湾地区的加卸载响应比值图。图中显示震源区在地震发生前有极高的加卸载响应比值，暗示震源区的损伤程度已变高，震源区材料的复原力已变小。图中大、小星号为集集主震及其规模为6级以上、深度在10公里以内的余震

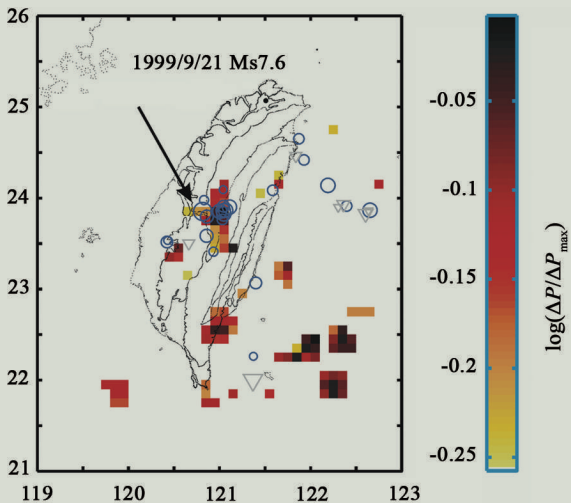
载为系统所受的扰动时，其对应的响应的改变就完全等价于临界转变理论中的复原力改变。在加卸载响应比值法中，所谓的“响应”可以从地震数目、贝尼奥夫应变(Benioff strain)或地震释出的能量来定义；而“加载、卸载”过程，则是通过地球固体潮对地壳的周期应力循环来进行。更重要的是，尹祥础团队已经证明了“加卸载响应比值”确实是“损伤变量”的函数。我们事实上可以得到一个定性的推论，随着孕震介质的损伤变量增加，岩石圈的复原力会随之减小(见图1)，加卸载响应比值则会随之增加<sup>[7]</sup>。

当动力系统接近临界转变时，除了从扰动中恢复的速率减缓外，状态变量的时空变异度往往也会增加。直观地说，正是因为恢复的速率减慢，使随机扰动对动力系统的影响不致于快速衰减而逐渐累积，

于是系统行为表现得反倒像是变异度渐增的随机漫游(random walk)过程。这种现象在许多生态系统中都已经被观察到了<sup>[2]</sup>。有趣的是，地震活动度的时空变异正是近年来另一个颇有前景的地震预测技术——“震模信息法(pattern informatics, 简称PI)”的计算基础。借助于PI法的计算，我们可以编制一张地震“热点地图(hot-spot map)”，并标示出近期内地震活动有高度变异的地区，以作为未来特定时段内，灾难性地震可能发生的位置。而在PI法的计算中，地震动力系统的状态变量，普遍是以空间网格(一般大小为 $0.1^\circ$ 乘以 $0.1^\circ$ )中的地震数目为主。近年来，全球许多灾难性地震的PI法案例研究<sup>[9]</sup>指出，在这些灾难性地震发生前，震源附近地震活动的变异度都有明显增加的现象。

本文想点出的一个重要结论是，最近

1999年规模为7.6级的集集地震发生前台湾地区之震模信息学热点图。图中显示震央区在地震发生前已出现震模信息学热点丛集,暗示震央区的地震活动度出现大范围的异常,表现出临界转变前典型大方差的临界涨落。图中震央附近大、小空心圆为集集的主震及其规模在6以上、深度在20公里以内的余震



### 震模信息法

“震模信息法”的概念是假设地震活动度的演化可以用相动力系统(phase dynamics)的数学语言来描述。此法利用了希尔伯特空间(Hilbert space)的状态向量(state vector)的旋转,来推论地震活动度随时间的演变。这些代表地震活动之状态向量,本质上是通过以地震活动度的关联矩阵(correlation matrix)分解所得的特征向量(eigenvector)为基底(base)而展开表述的。在地震系统的相动力学空间里,地壳应力的累积与释放,造就了地震活动度的变异,也就使得

这些高维度希尔伯特空间中的状态向量不断地改变。而基于相动力系统来理解这些状态向量的优势,在于我们可以将所有状态向量的长度化约为单位长度,于是所有动力学系统变化的信息便只隐含在一个相位角度的旋转量中。

当假设状态向量的长度近似为常数时,动力系统时的时空演化过程就可以简单地利用向量的相位角漂移来表达。就地震活动度之计算而言,我们假设了这种相位角的漂移,满足统计稳态性(ergodicity,或称各态遍历性)。于是,在过去一段变化时期内,相位随时间产生的旋转量就可以被用来推测未来一段时期内之高地震风险地区。但是,由于地震活动度的高噪声本质(这反映在地震活动度的高变异性上),震模信息法可以进一步计算相位角在过去变化时期内的平均漂移量,作为推估未来预测时期内将发生事件所对应的稳定漂移量。上图是针对1999年发生在台湾地区的规模为7.6级的集集(为台湾一地名)地震,利用震前的地震活动度所做的“震模信息学热点图”。

十年来两大热门的地震预测技术——LURR算法和PI算法,事实上能整合、统一在临界转变理论的框架中。虽然LURR算法是尹祥础领导的中国团队提出来的,而PI算法则是独立地由美国John B. Rundle的团队提出和发展的,但这两种技术极有可能在本质上都和地震断层系统在发生临界转变前的能量景貌演化有关。通过对临界转变理论的理解,可以知道,地震断层系统高LURR异常值象征的低复原力,以及高PI异常值标志的地震活动高变异性,是系统能量景貌中吸引盆地不断地集结、成长的结果,并暗示着地震断层系统中灾难性的临界转变(亦即灾难性地震)即将发生。因此,临界转变理论很有希望成为我们理解地震预测技术的关键基础,加深我们对地震

前兆活动的认识。

### 参考文献

- [1] Kuehn C. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2011, 240:1020
- [2] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A *et al.* *Nature*, 2001, 413:591
- [3] Rundle J B. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94B:2839
- [4] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A *et al.* *Nature*, 2009, 461:53
- [5] Lawn B. *Fracture of Brittle Solids*. 2nd Ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- [6] Lyakhovskiy V, Podladchikov Y, Poliakov A. *Tectonophysics*, 1993, 226:187
- [7] Zhang L, Yin X, Liang N. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27:1874
- [8] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H *et al.* *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163:2317
- [9] Chen C C, Rundle J B, Li H C *et al.* *Geophysical Research Letters*, 2006, 33:L18302