

# 地震原理新论

## ——兼述地震预测的科学基础

陆坤权<sup>†</sup> 曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家研究中心 北京 100190)

2018-02-08收到

<sup>†</sup> email: lukq@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180402

## On the novel principle of earthquake and its predictability

LU Kun-Quan<sup>†</sup> CAO Ze-Xian

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Beijing 100190, China)

**摘要** 地震是给人类造成巨大损失的自然灾害,地震预测是社会广泛关注的重大的科学问题。然而,地震机理还远未认识清楚,当前国际地震界的主流观点认为地震是不可预测的。本文以物理学的新观念为基础,从新的视角研究地震孕育和发生过程,提出了对地震原理的新认识,剖析了地震不可预测论的错误。地震不可预测论产生的根源在于对地震原理的不正确认识以及对自组织临界性的误解。地震具有自组织临界性的特征,表明不可能对地震作中长期预测,但短期预测应是可能的。成功预测的前提包括:对地震原理的正确认识,获得足够的特征前兆信息,并且掌握相关的地质资料。传统地震学基于固体连续介质理论,认为地震是地壳岩石的脆性破裂造成,用所谓“弹性回跳”来表述地震发生机制。此观点与实际观测严重不符,无法解释诸多地震现象,自然也不能正确地获取和理解地震前兆信息,因而得出地震不可预测的结论。作者根据地壳由岩石层块和其间断层泥组成这一基本事实,将地壳作为离散态体系处理,用颗粒物理原理认识地震孕育过程。获得的认识是:构造力以力链的方式传播,岩块以滞滑移动的方式运动。另一方面,在认真分析地壳岩石强度和构造作用力随深度分布规律基础上,提出地震发生的物理机制是岩石的塑性滑移和岩块运动的堵塞—解堵塞转变。对地震原理这些新认识,可解释传统地震学无法理解的很多地震学现象,例如,消解了传统的“弹性回跳”原理所遭遇的“热流伴谬”,解释了深源地震的成因等。基于对地震原理的新认识,提出了如何正确获取地震前兆信息,实现地震短期预测的途径。

**关键词** 地震预测,地震原理,颗粒物理,力链,滞滑移动,塑性滑移,堵塞—解堵塞转变,自组织临界性

**Abstract** Earthquake is a natural disaster that causes enormous loss to human society. Earthquake prediction is a major challenge to scientists from seismology and other relevant fields. However, the mechanism of earthquake is far from clear, and the mainstream view in the international seismology community is that earthquake is unpredictable. Based on some new concepts and knowledge from physics, the current article scrutinizes the gestation and occurrence of earthquake from a novel perspective, formulates a rational mechanism for earthquake. It is dissected that the basis of the erroneous cognition of earthquake unpredictability originates in misconceptions about the seismic principles and in a misunderstanding to the self-organized criticality. Earthquake is indeed consistent with the laws of self-organized criticality, that it is in

principle impossible to make a medium-or long term prediction, yet the short-term predictability for earthquake should not be excluded. Prerequisites for a successful short-term earthquake prediction are as follows: a correct understanding to the principle of earthquake, availability of sufficient precursors pertinent to earthquake gestation and occurrence, geological data at large concerning the regions of interest. Traditional seismology is based on the continuous solid medium assumption, by which earthquake is attributed to the brittle fracture of rocks, as summarized in the concept of elastic rebound. This viewpoint is not at all in accordance with actual observations, unable to explain a lot of earthquake phenomena, and furthermore unable to establish truly pertinent earthquake precursors, consequently it concludes the unpredictability of earthquake. As the crust is composed of rock blocks and fault gouges there between, it must be treated as a discrete system, and knowledge of granular matters can be applied to understand the gestation and triggering of earthquakes. The fundamental picture for a seismogenic process is that the tectonic forces are transmitted in a form of force chain and the rock blocks move in the stick-slip fashion. By carefully analyzing the distributions of the strength and the tectonic force upon the crustal rocks with depth, we formulated a mechanism of earthquake in that rock blocks flow via the plastic sliding, and the earthquake is essentially a jamming-unjamming transition confronted by rock blocks. Thus the elastic rebound as mechanism for earthquake can be abandoned. Our novel earthquake principle and the relevant understanding to the earthquake processes can explain many seismologic phenomena that usually could not be understood in terms of traditional seismology, for instance, the heat-flow paradox is resolved, and the cause of deep-focus earthquake also becomes clear. A feasible pathway to obtain the earthquake precursors correctly and to realize the short-term prediction of earthquake is also presented.

**Keywords** earthquake prediction, earthquake principle, granular physics, force chain, stick-slip movement, plastic sliding, jamming-unjamming transition, self-organized criticality

## 1 引言

物理学的发展不断深化人们对自然界物质运动规律的认识,不断促进其他学科的进步并导致新的技术革命。近半个世纪来,随着对复杂体系运动规律的研究,以及相关新物理分支学科的形成,物理学观念也发生着深刻的变化。物理学家们逐渐认识到,物质运动都遵循某种物理原理,但许多物理定律只在一定范围适用。物质运动行为和遵循的原理随物质体系的构成、状态、空间尺度和时间而改变。坂田昌一早就指出:“科学规律只能在一定范围是有效的,大自然具有许多层次,每个层次都具有其自身的规律”<sup>[1]</sup>。诺贝尔奖获得者 P. W. Anderson 认为“多则异”(More is different),“在复杂性的每一个层次之中会呈现全新的性质”<sup>[2]</sup>。P. Bak 在《大自然如何工作》(*How nature works*)一书中指出:“我们所观察到

周围的大多数现象看起来离物理基本定理有很大距离”,“一切都能从第一原理予以理解的幻想,已经完全破灭了”<sup>[3]</sup>。近数十年来,物理学的发展促使人们以新视点去观察和认识物质世界。将物理学新观念用于地震的研究,也必将获得对地震原理的深入认识,有利于实现地震的科学预测。

地震是一种给人类造成巨大生命和财产损失的自然灾害,中国受地震灾害损失尤为严重。20世纪中,地震共导致我国60多万人死亡,即平均每天有近20人死于地震灾害。长期以来,人们作了很大努力,试图实现地震预报,以减轻地震所造成的损失。目前的基本共识是,地震预测仍是尚未解决的科学难题。我国著名地球物理学家陈运泰在谈到地震预测问题时就指出“其中的物理定律仍然几乎一无所知”<sup>[4]</sup>。国际地震界主流观点认为地震是不可预测的。然而,一次8级地震

所释放的能量为  $6.3 \times 10^{16} \text{ J}$ ，相当于175亿千瓦时的电力或  $1.3 \times 10^7$  吨 TNT 当量，释放如此巨大能量的突发事件，怎么会事先没有征兆、不可预测呢？一个合理的解释是，我们当前对地震成因和发生过程的认识有问题，不知道如何确立切中肯綮的地震前兆信息，自然也就无法实现地震的预测。

本文中我们将说明，地震不可预测论的错误，其根源在于错误认识地震原理，以及对自组织临界性 (self-organized criticality, 以下简称 SOC) 的误解。我们从地震发生所涉及的地壳和地幔不是连续介质而是离散的集合态物质体系这一基本事实出发，用物理学的若干新概念，重新分析地震孕育和发生的过程，获取了对地震原理的新认识：地震孕育过程中构造力以力链的方式传播，岩块以滞滑移动的方式运动；地震发生的机制是岩石的塑性滑移和岩块运动的堵塞—解堵塞转变。我们的理论否定了传统地震学中“弹性回跳”等错误观点，解释了传统地震学无法理解的地震学现象。依据新理论，我们认为地震可以短期预报，并给出了如何实现地震科学预测的建议。

## 2 地震不可预测论剖析

1997年，日本东京大学教授 J. Geller 等人在 *Science* 杂志上发表了“地震不可预测”一文，基于地震的自组织临界性质，认为“单个地震可能具有固有的不可预测性”，“成千上万观察到的异常现象……，声称为地震前兆，但是一般来说，这种现象只在地震发生后才被视为前兆”<sup>[5]</sup>。此文影响广泛，地震不可预测论已成为国际地球科学界的主流观点。

1999年，英国地震学家 I. Main 在 *Nature* 杂志网站发起了一次辩论<sup>[6]</sup>，重点讨论是否还应将地震预测作为科学研究目标。很多国际知名学者参加了讨论。参与者发表了不同见解，多数意见认为，没有观测到可靠的前兆现象，准确的短期预测不可能。但是，参与者们赞同并呼吁加强震

源和前兆物理的研究。例如，美国地震学家 Wyss 说“需要大量的严谨科学研究，这在任何国家都没有进行”。J. Geller 认为“为什么预测如此困难”？是“因为我们还没有一个关于震源的确切理论”。美国地震学家 L. Knopoff 提出：“现在是发展基于物理学的前兆理论，使我们摆脱简单模型的时候了”。法国科学家 D. Sornette 则主张“预测地震需要了解基础物理学，这就要求在从未有过的层面上进行新的多学科研究”。

最近20年来，地震预报研究没有获得明显的进展，国际上似乎也不再争论地震是否可预测了。地震不可预测似乎已被当成一种信条，写入教材或专著。美国加州大学地球物理教授 P. M. Shearer 近年编写的《地震学引论》(*Introduction to Seismology*)<sup>[7]</sup>是作为大学教材出版的，他在书中说：“地震或许具固有不可预测性”。美国地质调查局 S. Hough 在2010年出版的《预测那不可预测的——争论不休的地震预报科学》(*Predicting the Unpredictable—The Tumultuous Science of Earthquake Prediction*)一书中<sup>[8]</sup>，总结了美国自1970年以后所有关于地震预报的错误和失败，认为“地震不可预测”，并说“加州的下次大地震可能在明年，可能在30年后，也可能100年不发生”。她还在《纽约时报》发表文章，称“科学工作者追求地震预报——地震科学的圣杯——已经好几十年了……我们尽管做出了努力，却几乎没有得到进展，或者没有真正的进展”，“公众希望科学工作者能够预报地震。我们做不到，可能永远无法做到”<sup>[9]</sup>。

尽管如此，关于地震是否可预测的不同认识一直存在<sup>[4]</sup>。有些学者如 L. Knopoff, M. Wyss, I. Kawasaki 等认为，从科学发展角度看，将来可能实现地震预测，即地震预测“还不能，终究能”<sup>[6, 10]</sup>。不少地球物理学家对于地震预测性问题采取回避态度，因为无法提出合理的依据来判断地震是否可预测。

我国地球物理界和地震界对于地震预测大多采取比较积极的态度。认为地震应该有前兆，应该可以预测<sup>[11, 12]</sup>。陈运泰就认为“地震预测的确

困难,但并非是不可能的”<sup>[4]</sup>。

### 3 单一事件的预测

周期性或确定性发生事件容易预测,如太阳月亮作周期运动,我们可依据牛顿力学准确计算其运行轨迹,给出不同时间太阳月亮的位置。日蚀月蚀时间和覆盖区域均可精确预告。

针对可能发生的事件,应分别讨论。对于等概率事件,如在台面上旋转硬币,停下时字面朝上概率为1/2。硬币转动过程中,当观察到某一面持续朝向台面时,则此面必定朝下落于台面。但这一可判定的时间很短,约为1秒左右。假如旋转一个很大的圆形板,尺度为数十米或更大,则可有较长时间观测并预告其停止状态。掷骰子也是如此。这表明大尺度比小尺度体系的状态变化需更长时间,有利于进行预测。对某些突发事件,若能够事先获取必要信息,也可以做出短期(相对于事件自身的特征时间)预测。人们无法准确预测一个人的寿命,但现代医术可以通过观察生命体征,判定此人在数小时甚至数天内是否可继续存活。现代的科学技术也可通过观测小行星的轨迹和运动速度并进行计算,预测小行星是否会在未来某个时刻撞击地球。当然,我们不可能对一些微观状态或一些快速传播过程,如

电子运动、光波的到来等进行准确预测。微观体系因固有的不确定性以及观测必然带来的扰动而无法通过观测进行预测,而以光速传播的物理事件则因为不可能事先获得任何信息而无法预测。

自组织临界性(SOC)的概念被用来描述自然界和社会中复杂事件遵从的规律,诸如河水涨落、交通堵塞、金融市场、生物进化与物种灭绝,等等。大事件出现的概率低,小事件出现的概率高,事件发生概率与其大小呈幂函数变化,具有时间和空间尺度的标度不变性,这些变化没有周期性。因此,对于SOC体系,不可能做出中长期准确预报。地震发生频度与震级大小的统计可用古登堡—里克特(Gutenberg—Richter,以下简称G—R)关系描述,表明地震的发生遵从SOC规律,这一观点愈来愈多地得到认同<sup>[13-18]</sup>。美国西海岸地震震级与地震次数的G—R关系示于图1<sup>[18]</sup>,显示了在不同区域和不同时间范围统计得到的G—R关系,以及它们之间的区别。其差别说明,过去论文所述的地震发生频度 $N$ 与震级 $M$ 关系,即 $\text{Log}N=a-bM$ 中斜率 $b$ 值的不一致,以及某些偏离G—R直线关系的现象,可能正是由于观测地区或统计时间范围的不同所致。

SOC体系中单一事件的发生是否能进行短期预测呢?我们不妨先列举一些实际例子。河水涨落是SOC事例之一<sup>[4]</sup>,人们不知道数月后某条河的水位如何涨落,但可以提前数小时或数天预测某处河水是否暴涨,并给予警示,采取应对措施。降雨量也符合SOC幂次变化规律<sup>[19]</sup>。对于某地如北京,我们无法预知明年何时会下大雨,而数天内是否下雨或降雨量多少已不难准确预测。高速公路上车流密度随时间和位置的分布,以及交通堵塞情况也是SOC案例<sup>[20, 21]</sup>。我们可以通过严密监测局域路段车距和车速,预告在某指定地段是否会发生堵塞。即使偶发交通事故,车辆集聚形成堵塞也需若干秒到数分钟尺度的时间,尽管时间很短,但仍然可以事先得知是否发生。这些例子表明,遵从SOC规律的单一事件,是可以进行短期预测的。

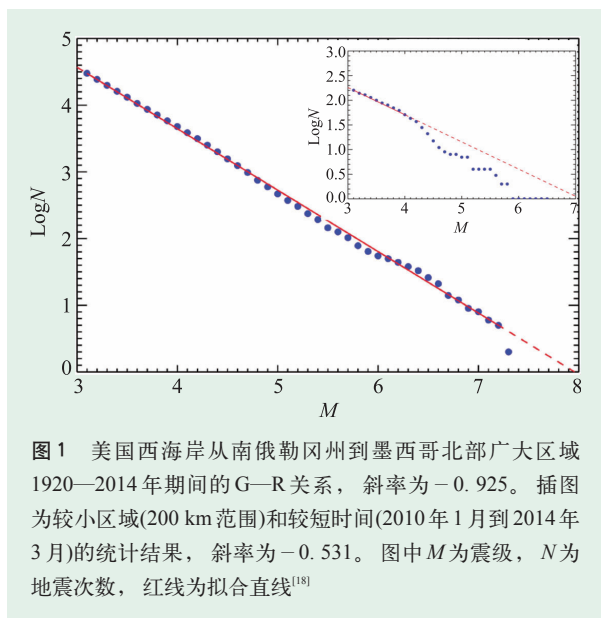


图1 美国西海岸从南俄勒冈州到墨西哥北部广大区域1920—2014年期间的G—R关系,斜率为-0.925。插图为较小区域(200 km范围)和较短时间(2010年1月到2014年3月)的统计结果,斜率为-0.531。图中 $M$ 为震级, $N$ 为地震次数,红线为拟合直线<sup>[18]</sup>



我们再回到 SOC 初始模型，即沙堆崩塌事件，略作深入讨论。由于在后面的论述中将地壳作为大尺度颗粒体系处理，故有必要多关注一下颗粒崩塌的现象。不断添加沙子造成沙堆崩塌次数与崩塌大小呈现幂律分布<sup>[22-25]</sup>。另一方面，颗粒流动形成的密度波<sup>[26, 27]</sup>，其功率谱也呈现类似的分布规律。最近的实验室模仿地震研究表明，通过对颗粒体系施加剪切作用造成的崩塌与地震行为相近。图 2 是实验获得的颗粒崩塌出现几率与崩塌过程声发射能量之间的关系，符合 G-R 规律<sup>[28]</sup>。一些实验表明，地震发生的规律与颗粒体系行为相似，事实上，地壳本身就是离散态断层岩块的集合体，这种相似具有内在的必然性。

地震发生遵从 SOC 统计规律。对于 SOC 事件不可能作中长期预报，这一点是确定无疑的，但是对于单一事件应可以作短期预测，前述的河水涨落、降雨量和交通堵塞等例子皆是如此。对 SOC 问题的深入研究并没有得出不可进行短期预测的结论<sup>[15, 29, 30]</sup>，而是发现愈大的事件可预测性愈好<sup>[30]</sup>。Ramos 等人进行了预测颗粒崩塌的实验研究<sup>[31]</sup>，他们用数码摄像机对二维钢球堆(钢球直径为 4 mm)的崩塌进行观测，每次实验记录超过 310 小时，发生的崩塌 55000 次以上。结果表明，颗粒崩塌遵从 SOC 规律。他们发现，在大崩塌事件发生前，钢球堆中的结构出现明显的、可检测的变化。从而认定通过监控这些变化，大崩塌事件原则上是可以预测的。以上讨论可知，认为 SOC 事件具有“固有不可预测性”是一种误解。

另一观点认为，在临界状态下，任何小的变化都可能触发一个大事件，因此预测是不可实现的。我们知道，事件的发生都是状态的转变，转变点称为临界点。这种转变可以从一个平衡态到另一个平衡态，从亚稳态到另一亚稳态或平衡态，也可以从平衡进入非平衡，或反之。人们总习惯用理想情况或概念来描述临界现象。例如，水温降低到 0℃时，会结冰；放在山顶的一块小石头，手指轻轻一碰就会滚下山等等。须知，一

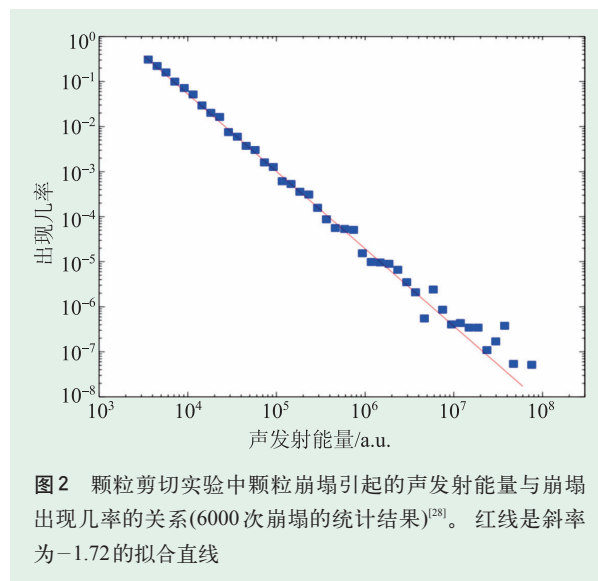


图2 颗粒剪切实验中颗粒崩塌引起的声发射能量与崩塌出现几率的关系(6000次崩塌的统计结果)<sup>[28]</sup>。红线是斜率为-1.72的拟合直线

滴水结冰有成核长大过程，只是时间很短，一般观察不到而已。若是一个游泳池或一整湖水，则即便温度到达 0℃，结满冰也需要较长时间。若安放在山顶的石头很大，则需很大的力才可推下山去。水变成冰，以及山顶石头从静止到滚下山，状态变化，即一个事件发生了。从“将发生”到“已发生”之间会有一个过程，必定经历一段时间。对于大事件，此变化时间较长，涉及的空间范围大，则可能满足允许实时监测且能够预报的条件。前面所举交通堵塞和降雨等例子均如此。因此，若能在一个大事件发生前，采用合适的方法进行严密监测，则可实现可靠的预报。用于监测的方法愈正确，获得的信息愈多，则预测的准确性愈高。在非线性体系中，人们常用所谓“蝴蝶效应”比喻对初始条件的敏感，但本文关切的是对大事件发展和结果的预测。“蝴蝶效应”这一观念最初由气象学家提出，但在飓风预报的实践中，谁也不会顾及是否曾有某只蝴蝶扇动过翅膀。

无论是等概率事件还是 SOC 事件，实现预测的必要条件是：(1)事件发生的物理机理清楚；(2)可以获取合适和足够的观测信息；(3)掌握相关区域环境资料。以天气预报的降雨为例，水蒸发为水汽，在高空降温形成云，由卫星云图和各地气象站采集的温度、气压、风向、风速等数据，然后用大型计算机计算云层在空间的运动和形态

变化,就可以做出相当准确的降雨预报。降雨预报以认识降雨产生的原理与获得足够的有效观测数据为基础。单凭“础润而雨”等经验,或只有局部气象的资料,是难以做出确定的天气预报的。实现预测的必要条件缺一不可,不清楚物理原理则不知道应观测哪些信息和如何观测,也就谈不上正确的分析和研判。若原理清楚且知道应获得哪些信息,但却无法进行充分的观测,比如过程太快、空间太小、已有技术水平未达到应用要求等,也不能实现预测。此外,有一类型SOC灾害事件难以进行预测,如塌方、泥石流、火灾等,这是因为这类事件可能发生区域广大,不可能在每处都安放检测仪器或投入人力进行实时监测。并非此类事件是不能预测的。

简言之,虽然地震过程遵从SOC规律,但并非具有“固有的不可预测性”,单个地震大事件原则上是可以作短期预测的。为什么到目前为止地震短期预测没有实现呢?我们认为这正是由于传统地震学对地震发生物理机理和地震孕育过程没有正确认识所导致的。认清地震孕育和发生的物理机制,便可知悉地震全过程中哪些物理量会发生变化,会产生哪些现象。据此布置必要的观测仪器,获得足够的前兆信息,并依据对地质状况的了解进行综合分析,则可能实现地震的短期预测。特别是,大地震所涉及的空间和时间尺度很大,震前积聚的能量很高,实现预测应易于小地震。

#### 4 传统地震学中的缺失与谬误

地震学主要应包括如下三部分内容:一是地震的孕育,关切地震发生前构造力与能量如何传播、积累;二是地震发生的机制与过程;三是地震波的产生与传播。传统地震学建立在连续介质理论的基础上,主要是系统地阐述地震波的产生及其传播,而对前述的其他两方面内容则很少涉及。近年出版的地震学专业书籍皆如此<sup>[7, 32-35]</sup>。对于浅源地震的发生机制,几乎毫无例外地用“弹性回跳”(elastic rebound)来表述。1906年,

H. F. Reid用地壳岩石破裂的“弹性回跳”来解释地震发生机制<sup>[36]</sup>,后来在其论文中作为一种理论作了系统阐述<sup>[37]</sup>。弹性回跳机制被认为是“目前公认的地壳地震的主因”<sup>[7]</sup>。甚至有著作称“用物理学的术语来简单表述,地震就是弹性体中的位错发生移动,释放出弹性波的现象”<sup>[10]</sup>。传统地震学的知识基础是固体连续介质的弹性力学,以固体中应力—应变关系为基本框架表述地震行为。基于这种认识,地震的发生是构造力挤压地壳岩石层,通过固体岩石的应力—应变来传播力和能量。当应力超过岩石强度时,则岩石脆性破裂,地震发生的机制是“弹性回跳”。过去研究地震预测方法和寻求地震前兆均以“弹性回跳”理论为基础<sup>[38]</sup>。

以连续介质理论为基础的传统地震学,其关于地震波的传播规律的认识是正确的,已达到相当完善的程度。这是因为地震波波长很长,大大超过断层边界间隔的典型尺度,采用连续介质理论近似是合理的。但是,将此观念用于地震发生的物理机制和孕育过程,很多地震现象都无法解释。P. M. Shearer在其所著《地震学引论》<sup>[7]</sup>一书中就指出“有关地震性质的许多基本问题……,仍然很不清楚”,“大范围地壳应力和应变场可能是不均匀的”,“断层上应力惊人得低,……比实验室测量岩石破坏应力低得多”,“清楚的、有确定的物理机制的前兆很少”,等等。他还感叹:“在加利福尼亚,尽管广布了地震计和其他仪器,但过去几十年里没有观测到任何大地震前有清楚的、可识别的前兆。那么,这是为什么?为什么能量这样惊人的事件在大地震前没有检测到明显的前兆”?鉴于这些问题的存在,他认为“一个可能原因……,地震或许具固有不可预测性”,“或许因为短期地震预测的固有困难,以致实际上不可能”。

在固体连续介质框架下的岩石脆性破裂以及弹性回跳的观点与观测事实严重不符,无法解释很多的地震基本现象,现撷取如下几则略述:

(1)“热流佯谬(heat flow paradox)”<sup>[39]</sup>。地震时岩石破裂做功为 $W=\tau_s DA$ ,其中 $D$ 和 $A$ 分别为岩石

的平均位移和截面积,  $\tau_s$  为岩石剪切强度。若地震是岩石的弹性破裂过程, 依据Byerlee定则<sup>[40, 41]</sup>, 岩石剪切强度 $\tau_s$ 很大。计算得到的岩石破裂做功比探测到的地震波能量 $E$ 高得多, 相差近两个数量级。那么, 能量哪里去了? 有一种猜测认为可能是脆性破裂时, 因为岩石摩擦系数很大, 大部分的能量经摩擦转换成了热能。然而, 通过温度测量和分析发现, 地下温度升高极少, 估算结果仍然是 $E/W \approx 10^{-2}$ 。这种巨大能量失衡称为热流佯谬, 最初是由美国圣安德烈斯断层的钻探数据证实的, 后来其他地方的观测数据也支持这一说法<sup>[7, 42-44]</sup>。人们提出了多种模型对比进行解释<sup>[45, 46]</sup>, 均不成功。这让C. H. Sholz提出了这样的疑问: “是我们忽略了某些简单东西, 还是地球的行为与我们想象的运动方式不一样?”<sup>[47]</sup>不少地球物理学家正是从热流佯谬意识到弹性回跳观点的不可信。

(2)超剪切波速破裂。一般岩石中剪切波传播速度约为2—4 km/s左右<sup>[41]</sup>。若认为地震发生是岩石的脆性破裂, 岩块破裂始端和终端距离为 $l$ , 两端破裂时间差为 $t$ , 则破裂速度 $v=l/t$ 。用此方法计算, 地震时岩石破裂速度一般为剪切波速度的0.75—0.95倍<sup>[48]</sup>, 即低于声速。但是, 也可能出现超剪切波速破裂, 甚至破裂速度 $v$ 可达10 km/s以上<sup>[48-50]</sup>。脆性破裂必定是应力传播达到时才可发生, 应力传播的速度就是声速。地震中观测到的超声速破裂显然违反物理原理。有人曾用撞击实验观测到了超剪切波破裂<sup>[51]</sup>, 但那是大质量物体快速撞击小薄片样品所致, 由动量守恒原理所决定。地震并非撞击引起, 而是在构造力缓慢作用下的岩石破裂, 范围可达数十公里或更大, 破裂速度不可能超过声速。所谓观测到了超声速破裂, 只是表明岩块破裂始端和终端的动作时间差很小而已, 这正说明地震不是因为岩石发生了弹性破裂, 而只能是由岩石滑移造成的。后文会有详细讨论。

(3)深源地震起因。中源和深源地震发生在地壳以下的地幔区域, 最大深度可达500 km以上。在此深度岩石会因高温而软化, 不可能发生岩石

的脆性断裂。曾经有多种解释, 如相变说、脱水说、爆炸说等, 均因不合理而未得到认可<sup>[7, 52, 53]</sup>。观测到的中源和深源地震的震波等性质与浅源地震相似, 它们的发生机制必定类似。如果认为深源地震成因与浅源地震不同, 则两者之间必定存在深度分界线, 这是无法想象的。既然中源和深源地震不可能是脆性破裂引起, 那只能说明弹性回跳观点不正确。

(4)地震前后岩石应力降很小。若地震是岩石的弹性破坏, 则破裂前岩石中的应力会很高, 地震发生后应力会降低很多, 应该观测到约为100 MPa的巨大应力差。然而实际观测的同震应力降只有10 MPa左右<sup>[47]</sup>, 比岩石破裂的实验室测量值小得多<sup>[7]</sup>。另一方面, 若发生岩石脆性破裂, 根据Byerlee定则, 岩石的摩擦系数应为0.6以上, 而实际观测估算得到的摩擦系数要小得多。例如, 通过对2011年日本东北大地震后地下温度测量, 计算得到地震时岩石破坏时摩擦系数仅为0.08<sup>[44]</sup>。

(5)弹性回跳的回跳空间问题。若地震发生时是弹性回跳, 必定需要一定的回跳空间。对于发生在逆断层处的地震, 可以向地表以上空间回跳。但对于其他类型地震的回跳空间来自何处, 则无法解答。

以上这些说明, 传统地震学关于地震发生机制的脆性破裂和弹性回跳观点存在根本性问题。地球物理和地震界不少人士也已对此提出质疑<sup>[7, 38, 47]</sup>。陈运泰在一次访谈时指出, 地震和地震预测研究现状“远不如盲人摸象”。曾经强烈主张“地震不可预测”的地球物理学家J. Geller在2016年发表文章, 特别强调弹性回跳等震源理论不正确, 需要建立新物理模型。他说: “就像所有物理学分支中的理论一样, 震源理论应该是可验证的”, “不幸的是, 很多已有的震源理论, 如弹性回跳范式和特征地震模型, ……既与数据不符, 或者本来就是不可有效检测的表述。研究人员应该认识到, 这一领域处于危机状态”。他又说: 人们“不愿面对的真相是, 地震没有令人满意的物理模型, 一个也没有看到”, “这几乎还



未被认识到”。“显然，需要一种地震发生的新范式，然而，我们目前还没有一个新的范式”，“我们仍在继续依赖陈旧的、不可信的弹性回跳范式和特征地震模型来评判地震灾害”<sup>[54]</sup>。

由上面讨论我们可得出结论，过去的地震研究，在固体连续介质弹性力学框架中认识地震孕育过程，用弹性回跳理论解释地震发生机制，与观测事实严重不符，许多地震学现象不能得到解释，必将无法实现地震的科学预测。现在是抛弃弹性回跳等陈旧和错误传统理论，寻找地震发生新范式，去揭开地震神秘面纱的时候了。

## 5 地震原理新论

以色列学者 Ben-Menahem 在研究地震学发展史的基础上指出：“此次历史研究的结论可简述如下：地震学已经到了一个不能仅靠地震学家就能实现宏伟目标的阶段。除非发起集中的跨



图3 两岩块间的断层泥(取自 <http://geology.cns.mad.csulb.edu/people/bperry/metarock/METAMORPHISM.htm>)

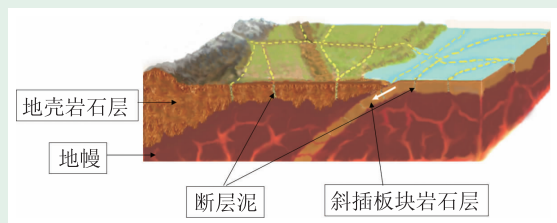


图4 地壳岩石层和地幔分布形态示意。显示断层、断层泥、斜插板块，以及地幔中的岩块及熔融岩浆。黄色虚线表示断层边界

学科研究，否则我们总会对下一次大地震感到惊讶”<sup>[55]</sup>。J. Geller 也认为：“未来的地震学基础研究必须完全基于物理学”<sup>[56]</sup>。显然，这些是正确的见解。要解开地震的谜团，首先必须从物理学原理出发，建立合适的地震发生模型。长期以来，几乎没有物理学家深入研究地震，或许这是至今不能正确认识地震的重要原因之一。物理学通过对复杂体系的研究获得了认识物质世界运动规律的新观念。地震所涉及的是离散集合态物质体系，以及慢动力学过程，其运动规律必定与连续态固体物质和一般实验室条件下的观测结果有所不同。近些年兴起的软物质和颗粒物理等新分支学科，使我们得以突破传统观点，从新的视角认识地震的原理。作者在2012年和2014年分别发表了《以颗粒物理原理认识地震——地震成因、地震前兆和地震预测》<sup>[57]</sup>和《论地震发生机制》<sup>[58]</sup>两篇论文，阐述了地震孕育以及地震发生的过程和原理，所提出的观点与传统地震学的认识有本质的区别。下面概述我们对地震原理的新认识。

### 5.1 地震孕育过程中构造力传播的基本形式——力链传播与滞滑移动

地壳由数个大板块组合而成，板块尺度达数千甚至上万公里。亿万年地壳变动，使得板块又分裂成很多断层，断层岩石块大小、形状、厚薄和材质不尽相同，其尺度一般可达数十到数百公里。断层间填充物称为断层泥(fault gouge)。断层泥由碎石和沙土等组成，是长时间来地壳活动的产物，宽度为 $10^{-1}$ — $10^2$  m。图3所示为两岩块间的断层泥。岩石是连续固体，弹性模量为数十GPa，受力时可用固体应力—应变关系表述。断层泥本身是颗粒介质，在外力作用下，断层泥很容易发生形变。在未受压时弹性模量约为10—100 MPa。岩块均被断层泥分割和包围，断层破坏了地壳岩石层的连续性和完整性。显然，由岩石石块和断层泥组成的地壳，并非是均匀的连续体。



地壳岩石层以下的上地幔由高温软化岩石组成，大部分以固体形态存在。上地幔局部熔融，熔融物质约占1%—10%<sup>[59]</sup>。大块固态岩石和少量熔融物组成的上地幔也并非均匀连续体。图4为地壳岩石层和地幔分布形态的示意图。

由此可知，地壳岩石层和地幔都不是均匀的连续体，而是显示出离散态结构基本特征。可认为是大尺度离散颗粒体系，必须运用颗粒物理原理来说明其运动和变化规律。特别地，在讨论地震孕育这样的准静态力传播主导的过程时，完全不可将地壳和地幔作为连续介质处理，连续固体介质的应力—应变关系此处不适用。

用GPS可以测量地块的移动距离和方向，给出地球表面各处地块运动图像。图5为中国大陆地块运动速度分布矢量图，标示了各处地块的移动方向和年移动量<sup>[60]</sup>。基于地壳岩石为连续介质和固体蠕变观点，无法说明移动方向变化和各地块移动量的不同。用所谓“大陆逃逸”和“地壳增厚”<sup>[61]</sup>的假说来解释，显然不合理。若将地壳作为岩块和断层泥组成的大尺度颗粒体系，地壳是离散态而不是连续的，则容易理解这些形态变化。不妨用图6中的模型加以说明。图6所示的是岩块和断层泥的一种组态，黑色线条代表岩块间的断层泥。由于岩块大小和形状各不相同，断层泥厚度也各异，在推力作用下，岩块压缩断层泥渐次移动，岩块的形状、布局和阻力决定了作用力传播方向和大小，这正是颗粒体系作用力以力链传播的特征<sup>[62]</sup>。只有在岩块组成的力链上或附近才受到力的作用，其他地方力很小或不受力。再看图5，在印度洋板块推动下，拉萨和羌塘地块向东北运动，塔里木和准噶尔地块向北运动，华北、华南和鄂尔多斯地块向东运动，而滇西和滇南地块则向南运动。显然，这种地块运动方向的改变正是地块边界形状决定，而移动量的不同主要是由断层泥压缩程度所决定。

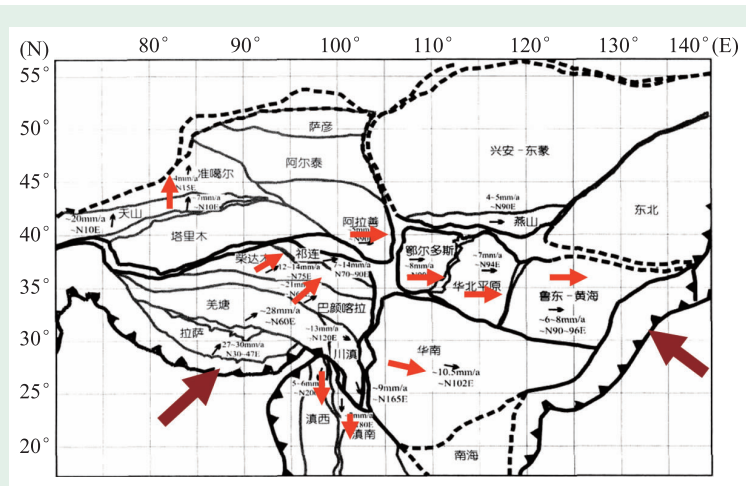


图5 中国大陆地块运动速度矢量图<sup>[60]</sup>。其中黑色小箭头标记了移动方向和年移动量。为清楚起见，用红色箭头放大标明地块移动方向，大箭头表示印度洋和太平洋板块挤压作用

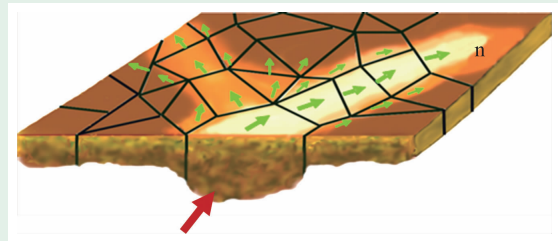


图6 作用力推动地块的模型。黑色线条表示断层泥，绿色箭头为各层块运动方向，岩块浅色表示受力小，红色箭头表示推力，n为力链上岩块标号

图5显示的地块运动方向的变化，即是由颗粒体系的力链(图6)所致。由此可见，地壳岩石层中构造力是以力链形式传播，岩块主要沿力链方向移动。

再来具体分析构造力推动下岩块的运动方式。岩块间的相对位移通常称为蠕变，实际上主要是断层泥受压缩或错动所致，岩石自身的蠕变很小。现行的蠕变观测是通过测量断层边界的相对位移获得的，若取短时间观测数据，就会发现位移是跳跃式变化。图7绘出了美国南加州Hayward断层蠕变站一段时间内的测量数据。可以看出，若在长时间段上观察，断层边界之间的移动似乎是平滑地变化的。但在放大后的短时间尺度图上，则发现位移明显呈台阶式跳变。这种台阶式位移正是岩块克服断层泥等阻力发生的滞滑移动(stick-slip)，单次跳变可向上或向下，总趋势是

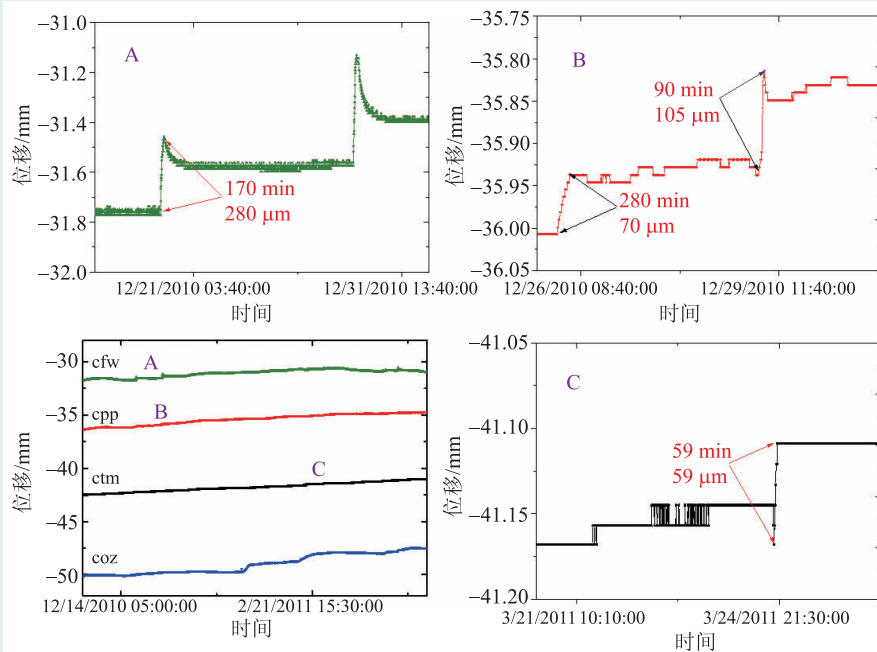


图7 美国南加州Hayward断层若干蠕变测量站的数据,纵坐标为断层相对位移量,横坐标为测量时间,测量点时间间隔为10 min,精度为10  $\mu\text{m}$ 。左下图为2010年11月到2011年3月cfw, cpp, ctm, coz各测量站测量数据图,取图中A, B, C处截出的天数数据分别绘于对应的小图,其中标出了一些台阶式跳变持续的时间和跳变高度<sup>[63]</sup>

相对位移量增大。关于跳变向上和向下的原因,后面将会讨论。其实,很多其他观测方法也都发现这种滞滑移动现象或其产生的影响。在探测岩石应力或应变时常观测到“阶跃”或“毛刺”<sup>[64-67]</sup>,地下水位也常有突变发生<sup>[68]</sup>,这些都是由岩块的滞滑移动造成的。这种滞滑移动是岩块在地幔上的滑动。

正是岩块一步一步滞滑移动并挤压断层泥,又推动下一块岩石作滞滑移动,这样渐次传递和积累作用力,最终导致地震的发生。GPS观测到地块宏观尺度上的不均匀移动,形变主要发生在断层泥区域,岩石中应力和应变则很小,因为岩石弹性模量比断层泥大得多。

无论是GPS观测到的地块运动方式,还是蠕变测量出现的岩块位移跳跃现象,均无法用连续介质观点进行解释。上面列举的地壳组成等基本事实以及多种观测结果均表明,地壳应被作为大尺度颗粒体系加以处理。地震孕育过程的基本特征是,作用力以力链的方式传播,岩石层块运动

基本方式为沿力链的滞滑移动。各处的构造应力很不均匀,岩块移动量也不相同。

需要说明,地壳岩石层为大尺度离散颗粒体系,将每个岩块作为一个颗粒,体系包含的颗粒数不多。例如,中国大概有数百个断层,每条力链约包含数十个岩块。这是颗粒体系的少体问题,无法过渡到连续介质加以处理。断层泥由泥沙和碎石组成,是包含大量颗粒的体系,有些情况下可仿照连续介质方法,比如借用应力—应变概念来表述。因此,由岩块和断层泥组成的地壳,是极为复杂的

集合态物质体系,其运动行为与连续介质有着本质区别。而作为颗粒物质体系,在讨论地震孕育和发生这样的问题时,又须考虑单个或少数几个岩石块的特征与运动。这与一般颗粒体系研究中不关心颗粒体自身性质很不一样。在后面的讨论中,既要基于颗粒物理的原理考虑作用力在岩石和断层泥中的传递,又要从一般连续介质出发理解岩块的破裂机理,最终需要综合所有因素,才可正确认清地震发生的机理。

## 5.2 地震发生机制——塑性滑移与堵塞—解堵塞转变

前面已经说明了弹性回跳作为地震机制的不合理性。弹性回跳的观念源于在剪切作用下岩石弹性破裂实验和传统固体力学。由于岩石实验受到实验条件限制,一般所用样品很小,且实验时间很短,与地壳岩石层中发生的实际情况很不同。

关于地震发生的物理机制，我们在以前文章中已详细阐述<sup>[58]</sup>，这里只作简要说明。

### 5.2.1 原始地壳岩石中的应力状态和强度分布

自然界的一个重要规律是“久则变”。地质变迁、生命演化等都经历了很长的时间过程。滴水穿石就是千年万年的累积效应所致。实验室内的短时间观测同自然界中的长时间演变有显著区别。就对岩石的认识来说，地质过程以千万年计，实验室内岩石力学试验的典型时间为小时，时间尺度差别高达 $10^{11}$ 倍。自然推移与实验室力学试验这两种环境中，所观察到的岩石状态与变化行为必定大不一样。

地壳原始岩石自重产生的应力 $\sigma_n(h)$ 随深度变化关系为 $\sigma_n(h)=\rho gh$ ，其中 $\rho$ 为密度， $g$ 为重力加速度， $h$ 为深度，此处 $\sigma_n(h)$ 的方向是指向地心。在10公里深处，自重压强近300 MPa，温度近300℃。根据量子力学原理，固体中原子在外力作用下具有一定的几率发生迁移，温度愈高迁移愈易，且发生迁移的几率随时间增大。长时间内发生的原子迁移或扩散，会破坏岩石各组元的初始微观结构状态。地壳岩石存在了亿万年，在地表下足够深处的原始岩石，横向切应力必定与 $\sigma_n(h)$ 趋于相等，即 $\sigma_s(h)=\sigma_n(h)=\rho gh$ ，泊松比为0.5，不会存在差应力。这与岩石实验观察到的情形完全不同。与此相关的另一个概念是“万物皆流”<sup>[69]</sup>，由流变学知识得知，当剪切速率很低时，即在很大时间尺度内的持续作用力，会使固体表现出流体特性，这也难以在实验室观测到。

另一方面，美国著名理论物理学家 V. F. Weisskopf 在 1986 年发表文章，给出了固体自重导致的从弹性体到塑性体转变计算方法<sup>[70]</sup>。以 SiO<sub>2</sub> 为例，地壳岩石中 SiO<sub>2</sub> 的弹性—塑性转变深度最大不超过 14 km。前面已讨论过长期作用可造成原始岩石微观结构状态的改变，此外，地下温度的升高以及岩石本身的气孔、含水以及微观的杂质、缺陷等因素均可使得岩石中的弹性—塑性转变变得更加容易。可以肯定地说，地壳岩石的一部分在不到 10 km 深度上就已经处于塑性状态了。观测发现，有些岩石在约 6—7 km 的深处

就开始发生部分塑性转变<sup>[71—73]</sup>。

实验测量还发现岩石强度与样品尺寸密切相关<sup>[41, 74]</sup>，小样品的强度比大样品高得多，可以想见实际地壳岩石强度会比实验室测量值低很多。地壳岩块尺度可达数十公里以上，岩石种类、成分、密度、结构、节理等特征均有差别，各处强度很不均匀，必定存在某些低强度区域。

根据以上讨论，我们可以大致给出原始地壳岩石的剪切强度随深度的分布 $\tau_s(h)$ ，如图 8 中蓝色线条所示。从地表向下，岩石脆性破裂时剪切强度由库仑定律表述，为 $\tau_s(h)=\tau_0+\mu\sigma_n(h)$ ， $\mu$ 为摩擦系数。取地表处岩石强度 $\tau_0\approx 50$  MPa<sup>[75—77]</sup>，这应是岩石剪切强度平均值的上限。若 $\mu=0.6$ ，在 6 km 深处， $\tau_s(h)$ 可达约 150 MPa。当深度增加到约大于 7 km 时，岩石中某些部分开始发生塑性转变。根据弱相连通原理<sup>[78, 79]</sup>，岩石的平均剪切强度主要由低强度物相决定。当出现部分塑性成分时，则塑性特征起支配作用。因此，在约 7 km 深度以下，岩石破坏将是塑性滑移的过程。塑性体是非牛顿流体，剪切强度 $\tau_s(h)$ 可近似表述为 $\tau_s(h)\approx\tau_p(h)+\mu_p\sigma_n(h)$ ，其中 $\mu_p$ 为等效摩擦系数。由于温度升

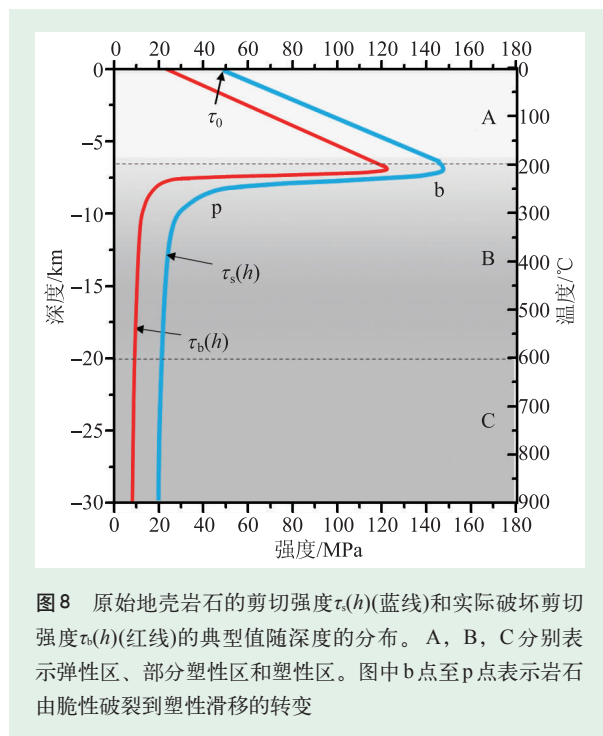


图 8 原始地壳岩石的剪切强度 $\tau_s(h)$ (蓝线)和实际破坏剪切强度 $\tau_b(h)$ (红线)的典型值随深度的分布。A, B, C 分别表示弹性区、部分塑性区和塑性区。图中 b 点至 p 点表示岩石由脆性破裂到塑性滑移的转变



高，以及长时间地质作用，致使塑性岩石的屈服强度 $\tau_s(h)$ 肯定比 $\tau_0$ 低。塑性滑移的粘滞性来自原子间摩擦，等效摩擦系数 $\mu_p$ 很低，实际测量得到的 $\mu_p \leq 0.05$ <sup>[80, 81]</sup>，这比脆性破裂时的摩擦系数 $\mu$ 小一个数量级以上。因此，随深度增加，温度升高，塑性成分增多，岩石强度会逐渐降低。图8中蓝线表示的是岩石平均剪切强度随深度变化。地震是大范围岩石层的剪切破坏，由于岩石层组成复杂，不均匀是其基本特征，根据最小能量原理，断裂会沿岩石低强度路径发生。就如同堤坝被洪水冲破必定发生在最薄弱处一样。因此，岩石实际破坏剪切强度 $\tau_0(h)$ 要比 $\tau_s(h)$ 低很多。在岩石大范围剪切破坏中，取 $\tau_0(h) \approx \tau_s(h)/2$ 是一个较合理的选择。图8中的红线表示岩石破坏剪切强度典型值 $\tau_0(h)$ 随深度的分布，各地会有区别。

地壳岩石层上部为弹性区，剪切强度高，一般不易发生破裂。较深部岩石中的塑性转变，使剪切破坏强度大大降低，较小作用力就可引起岩石剪切滑移，造成地震。

### 5.2.2 引发地震的大地构造力作用特征

大地构造力是相对年轻的作用力，作为附加的外力作用于原始地壳岩石上。如图9(a)所示，构造力推动岩块逐次滞滑移动到达岩块A时，岩块A也发生滞滑移动，通过挤压断层泥将作用力传递给岩块B。断层泥是颗粒物质，等效弹性模量 $E_{en}$ 随所受压强 $\sigma_n(h)$ 增大而增大，可近似表示为

$E_{en} \propto \sigma_n(h)^{5/9[82-84]}$ ，即按照 $E_{en} \propto h^{5/9}$ 的规律随深度 $h$ 增大。岩块A移动时，断层泥受挤压后，施加在岩块B上的横向推力从上向下逐渐增大。在岩块B上的这种横向附加应力为 $\sigma_{s+}(h) \propto h^{5/9}$ ，其变化如图9(b)所示。在约10 km左右深度，断层泥转变成塑性状态后则类似塑性岩石， $\sigma_{s+}(h)$ 不再会随深度显著增大。岩块A不断滞滑移动，若岩块B不动，作用于B上的横向应力 $\sigma_{s+}(h)$ 呈台阶式单调上升，如图9(b)插图(1)所示。当作用力达到一定程度，岩块B也会向右移动，使A和B岩块间的断层泥有时松弛。这样，岩块B所受到的横向应力 $\sigma_{s+}(h)$ 会出现高低起伏，如图9(b)插图(2)所示，总的趋势是 $\sigma_{s+}(h)$ 呈现起伏式增大。作用于岩石中的总横向应力 $\sigma_{s-t}(h)$ 为构造应力 $\sigma_{s+}(h)$ 与原始岩石自重引起的横向应力 $\sigma_s(h)$ 的叠加， $\sigma_{s-t}(h) = \sigma_{s+}(h) + \sigma_s(h)$ 。而在较深处， $\sigma_s(h)$ 与自重应力相等，即 $\sigma_s(h) = \sigma_n(h)$ 。我们将岩块中 $\sigma_{s-t}(h)$ ， $\sigma_{s+}(h)$ ， $\sigma_s(h)$ 随深度的变化示于图9(c)。注意，这里 $\sigma_{s-t}(h)$ 仅表示岩石中的总横向应力，在测量地下岩石应力时可观测，而构造推应力仍是 $\sigma_{s+}(h)$ 。在力链各岩块上均有类似的应力作用和变化规律。

上述分析表明，岩块所受到的横向构造作用力随深度逐渐增大，而深处岩石的实际剪切破坏强度又较低，致使地震往往发生在地壳较深处，大部分震源一般在10—20 km或更深。

岩石的弹性模量很大，典型值为20 GPa。断层泥等效弹性模量低得多，且随深度而增大，如在0.1 km和10 km深处，分别约为0.03 GPa和0.35 GPa，比岩石低数十到数百倍。构造力引起的形变主要表现在断层泥部分。岩石的形变量比断层泥的形变量小数十到数百倍。因此，构造力主要是使岩块产生滞滑移动，岩石本身的形变很小。

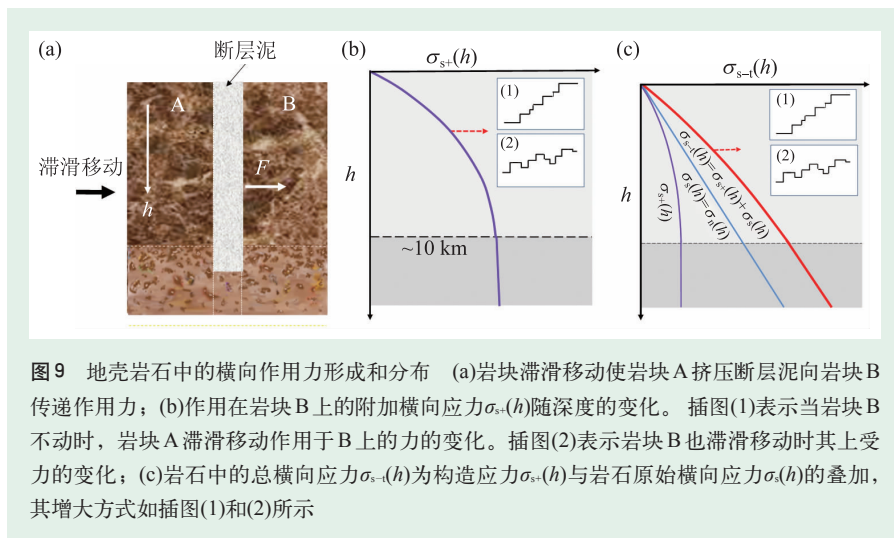


图9 地壳岩石中的横向作用力形成和分布 (a)岩块滞滑移动使岩块A挤压断层泥向岩块B传递作用力；(b)作用在岩块B上的附加横向应力 $\sigma_{s+}(h)$ 随深度的变化。插图(1)表示当岩块B不动时，岩块A滞滑移动作用于B上的力的变化。插图(2)表示岩块B也滞滑移动时其上受力的变化；(c)岩石中的总横向应力 $\sigma_{s-t}(h)$ 为构造应力 $\sigma_{s+}(h)$ 与岩石原始横向应力 $\sigma_s(h)$ 的叠加，其增大方式如插图(1)和(2)所示

### 5.2.3 地震发生的条件与机制

在由岩块组成的力链中,构造力通过推动岩块挤压断层泥以及岩块逐次产生滞滑移动的方式传播,也可多个岩块组合在一起同步滞滑移动。若传递方向前方遇到某些地质因素引起阻挡,岩块滞滑移动会受阻甚至停止。这导致相关岩块上构造作用力逐渐积累并持续增大。

当构造作用的推力超过岩石抗剪切破坏力和岩块运动所受阻挡力之和时,岩石就会塑性滑移,造成地震。因此,地震发生的条件是 $F \geq F_s + F_r$ ,其中 $F$ 为横向构造作用力, $F_s$ 为造成岩石剪切破坏所需的力, $F_r$ 为岩石滑移方向的阻挡力。更确切地说,由于岩石强度和构造力作用均与深度有关,应当考虑不同深度的应力、岩石破坏强度和阻挡的具体情况。若岩块不能突破前进方向受到的阻挡,即使推力很大,岩块也不会发生剪切滑移。因此,不可认为外加作用应力超过岩石破坏强度就会引发地震。

岩石滑移方向存在可扩张空间是突破阻挡的关键因素。这有四种可能:(1)沿断层边界向地表以上滑移,即发生在逆断层处;(2)岩块移动前方有地质空隙区或前上方有岩石薄弱层。若是突破岩石薄弱层向前上方滑移,则可造成新的断层;(3)各岩块滞滑移动并互相挤压产生新的局部地质空隙;(4)斜插板块或地幔岩块流前方的阻挡物由于温度上升等因素而变弱或消失。2008年汶川Ms 8.0级地震主要归类于类型(1)<sup>[85, 86]</sup>,而2004年印度尼西亚Ms 8.7级地震、2010年智利Ms 8.8级地震和2011年东日本Ms 9级地震等则主要归于类型(4)。深源地震归于类型(4)。

在颗粒物质体系中,克服阻挡而突发运动的行为,称之为堵塞—解堵塞转变(jamming—unjamming transition)<sup>[87-91]</sup>。这种转变被认为是新类型的相变,在离散态物质体系中经常会出现。由此可见,构造地震,无论是浅源地震还是深源地震,其发生机制都是岩块突破阻挡的塑性滑移或流动。岩块从相对静止到滑移过程的突变即是堵塞—解堵塞转变。因此,可用塑性滑移和解堵转变这八个字来概括地震发生机制。地震均是岩

块或岩块团突然向前滑移,而不是“回跳”。这样看来,地震如同火山爆发、塌方、泥石流等自然现象一样,都是突破堵塞释放能量的过程,与交通流、浮冰流等颗粒流现象一样可归结为堵塞—解堵塞的相变,有相似的物理机制和规律。

### 5.3 关于地震学现象的解释

利用前述关于地震原理的新认识,一些传统地震学无法理解的现象都可以合理地得到解释。

(1) 热流佯谬的消解。由于地震发生并非弹性回跳,而是岩石的塑性滑移和解堵转变。地震能量可以用岩块滑动释放的动能来计算。动能为 $E_k = mv^2/2$ ,其中 $m$ 为移动岩块的质量, $v$ 为平均位移速度。当然,也可用岩石破坏做功进行估算。由图8以及前面的讨论可知,地震发生处岩石的剪切屈服强度比脆性破裂的强度小得多,而且等效摩擦系数也很低,计算得到的滑移做功比脆性破裂做功要小近两个数量级。用动能和滑移做功两种方法的估算,获得的结果基本一致<sup>[58]</sup>。这就会与地震波探测得到的能量相近,不出现热流佯谬。

(2) 超声速破裂是假象。前面已经说明,在非高速撞击下,大块岩石弹性破裂速度不可能超过声速。地震机制是岩石的塑性滑移,就如同在地面推动物体克服摩擦力的移动。若是坚固物体,前后两端会同时起动。地震发生时,滑移岩石尺度可达数十公里或更大。如此大块的岩石肯定是不均匀的,必然包含松软部分,这导致滑移时起始端先动作,末端动作略有滞后,一般不会如推动小块固体那样两端同时动作。始端和末端的动作时间差取决于岩块的构成和尺度。过去由两端起动时间差计算得到的破裂速度,多数情况下低于剪切波速度<sup>[48]</sup>,表明岩块的确包含松软部分或阻力不均匀,导致始端和末端的动作有相当大的时间差。较坚固的岩块滑移时,前后端的时间差较小。若将此过程理解为弹性破裂,则会得出岩石超声速破裂此一与物理相悖的结论。因此,所

谓地震发生时的岩石超声速破裂，是一种源于错误概念基础上计算得来的假象。

(3) 岩石同震应力降很低，应力场不均匀<sup>[7]</sup>。实际观测到的岩石中同震应力降在1—10 MPa范围<sup>[47]</sup>。由图9可知，在构造力作用下，岩块作滞滑移动挤压断层泥时，岩石上部应力比下部小得多。例如，断层泥挤压岩石的应力在10 km深处约比0.1 km处高13倍，在浅层岩石测量应力必然变化很小。同时，作用力以力链形式传播，力链上各岩石块所受构造作用力取决于各自所受阻力，与岩块大小和周围环境相关，各岩块受力肯定不同。若不在力链上或附近区域进行测量，则可能观测不到应力变化。

(4) 浅源地震的震源深度。一般地震均发生在10 km以下较深岩石层，例如1976年唐山地震震源深度23 km，2008年汶川地震深度19 km，而且大致是震级愈大震源愈深<sup>[92]</sup>。为什么地震不发生在浅层岩石中呢？用图8和图9就容易解释。岩块滞滑移动传递的应力随深度增大，而较深处岩石的强度低，因此地震会发生在较深处。浅层岩石强度高，构造力作用小，故一般不会发生地震。

(5) 地下水位的升降与跳变。将地壳作为连续介质看待，震前构造力挤压岩石层时，地下水位应当升高；震后岩石层松弛，地下水位应当下

降。然而，实际观测到的却是有的地方地下水位上升，有的地方下降。发生在不同国家的32次地震中观测到的地下水位变化示于图10<sup>[93]</sup>，其中多数地方是水位下降。值得注意的是，地下水位的变化经常表现为跳变<sup>[68]</sup>。根据地壳岩石层的离散态结构特点可知，受挤压时，密集岩块之间会变松散，导致地下水位下降，而在较松岩块区域则变密集，挤压造成地下水位上升。地下水位跳变则是岩块一步一步滞滑移动所致。岩石中观测到的应力—应变的跳变，也源于此。

(6) 深源地震成因<sup>[57]</sup>。中源和深源地震发生在地壳下的地幔区，不可能是岩石的脆性破裂或弹性回跳。我们将地幔作为软化岩块和熔融物组成的大尺度离散态颗粒体系，则容易理解其发生机制。构造力推动板块斜插或者地幔中的岩块在流动时，所受的阻挡使其保持缓慢的运动。若由于温度升高或其他原因使得前方的障碍物发生了变化，如岩块尺寸变小或通道变大，可使岩块突破阻挡突然发生流动，释放能量，即是深源地震。道理同河面上浮冰突破阻挡而发生流动一样。深源地震的发生机制与浅源地震一样，是岩块流动时发生的堵塞—解堵塞转变，其性质必然会与浅源地震相同。例如，都会产生剪切波，均为堵塞—解堵塞转变，统计行为符合SOC性质，显现G—R关系。

除以上讨论的六点以外，其他地震现象也容易根据新原理进行解释。例如，前兆信息可以出现在距离震源很远处、分布不均匀等现象，均是由于力链传播的特点和岩块分布造成的。力链延伸很长，力链附近的区域可出现前兆信息，力链以外的区域则受影响小。当力链上的岩块组合移动时，此区域内似乎观测不到任何变化，导致所谓的“震前平静”。岩石层的地质构造作用及其形成的力链结构会持续很久，导致同一地区历史上重复发生地震。力链上受挤压和阻挡岩块的解堵塞过程缓慢，形成多次小滑移，表现为慢地震<sup>[10]</sup>。

综上所述，我们获得的对地震原理的新认识是，地震孕育过程中构造力以岩石层块构成的力

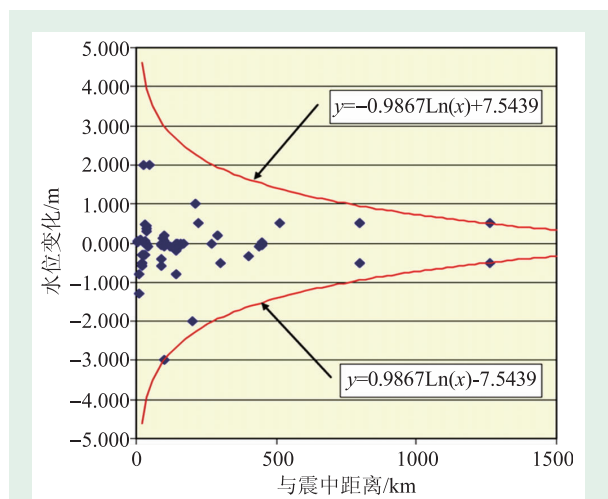


图10 地震前地下水位的变化，有升有降，红线为估计的水位最大变化值<sup>[93]</sup>



链和岩块滞滑移动方式传播，地震发生机制是岩块的塑性滑移和岩体运动的堵塞—解堵塞转变。与此同时，指出了用连续介质应力—应变关系描述地震孕育过程的错误，否定了目前公认的弹性回跳地震机制，以及相关的错误模型。所提出的新观点能够解释以前无法理解的很多地震学现象。

## 6 实现地震预测的途径

前面已经论述，地震不可预测论是对自组织临界性的误解，未能实现地震预测的原因是传统地震学对地震原理没有正确认识。实现地震的科学预测必须具备三个基本条件：一是正确认识地震孕育过程和地震发生机理；二是获得足够的、特征地震前兆信息；三是对所涉及区域的地质情况有深入了解。相较于正确认识地震原理，要掌握可靠的、特征的地震前兆信息以及详尽的地质资料却困难得多。为了实现地震预测的目标，建议在以下几个方面开展工作：

### (1) 推介地震原理的新认识，抛弃陈旧观念

努力使从事地震研究和预测的人员了解关于地震原理的新认识及其相关的物理知识，抛弃弹性回跳理论，位错模型等“陈旧和不可信的范式”<sup>[54]</sup>，确立对地震原理的正确认识。否则，就不可能采取合适方法探测和判别地震前兆信息，也就不能有效分析地震前兆与地震发生之间的联系，无法实现地震的预测。

### (2) 根据新原理重新审视已有地震资料

用地震新原理重新审视过去积累的大量地震相关资料，总结不同地区地震前后所测量到的各种数据，及其与地震发生的联系和对应关系。寻找有确定物理意义的地震前兆信息和规律。这将对今后建立合适探测和分析方法，获取有效地震前兆信息有重要参考价值。也可以据此获得相关区域的有用地质环境资料。

(3) 以新认识为基础，建立前兆信息探测网，获取前兆信息

地震前兆是指从地震孕育到发生过程中所有

相关联的各种可观测信息。能明确指向地震发生、确立地震特征的前兆信息具有预测地震的价值。应在正确认识地震机理与确立地震前兆信息的基础上，建立合适和足够的地震前兆信息的探测网站，从不同角度采集地震前兆信息。目前可以想见的地震前兆信息探测方法包括：断层边界相对移动的测量，土层中的应变<sup>[94]</sup>，岩石中应力—应变，地下水位变化，氡释放，地层中电导率变化，以及电磁和声信号探测，等等。关键是，必须建立起这些观测资料同地震孕育和发生的联系，并分析它们之间的关联。我们特别强调，首选的方法是断层边界相对位移的测量，用于确定构造力传递的力链，获得各岩块的运动状况以判定作用力分布和传递路径，并可发现受阻挡情况。地震只可能发生在力链上或附近，其他区域不会发生地震。假如力链上各岩块发生较均匀滞滑移动，即岩块链运动前方受到阻挡不严重，此力链上暂时不会发生大地震。若力链前端受到阻挡，可能发生多岩块组合的同步滞滑移动，这些组合岩块间几乎没有相对位移，则需引起注意，此区域可能发生地震。断层边界相对位移探测采用传统上称之为蠕变的测量的方法，若在每个断层边界设置观测点，就可在各处获得图7所示岩块的相对位移情况。根据获得的各力链和所有相关岩块的位移数据，进行综合分析，则可得到有价值的地震前兆信息。这种位移测量精度应为 $\mu\text{m}$ ，数据采集时间间隔不大于分钟量级，图7数据的测量已达此标准。目前GPS的测量精度和获取数据速度还不能满足要求。

其他方法，如岩石中应力测量，土层中的应变，地下水等，也可提供力链和各岩块力传递的有用信息。一般在岩石中应力变化很小，滞滑移动的影响大体上只是叠加在固体潮信号上的“阶跃”或“毛刺”<sup>[67]</sup>而已。观测到岩石中的应力单调上升，表明岩块滞滑运动受到阻挡。若应力增大超过固体潮信号，甚至可达到约MPa量级<sup>[64]</sup>，则可能在附近地质薄弱处发生地震。此外，地震将发生时，应力和位移的双重影响，可能在震源附近岩石中出现塑性—弹性或弹性—塑性转变，

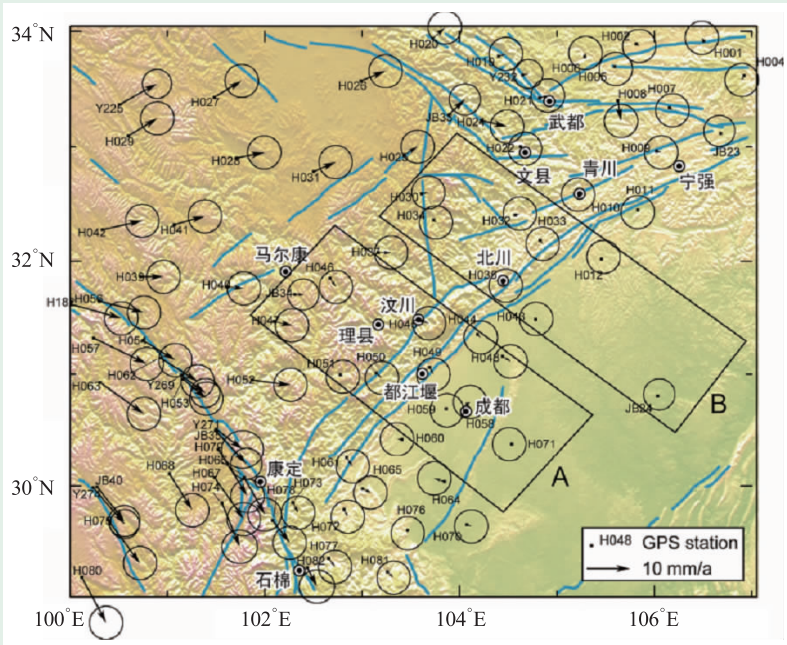


图11 2008年汶川大地震发生前附近地块运动的GPS图<sup>[95]</sup>。其中箭头表示地块移动的方向和距离

会产生声发射和电磁等效应，这也是有价值的临震前兆信息。

将2008年汶川地震作为例子来分析。图11所示是汶川地震发生前的GPS测量图<sup>[95]</sup>，可以看出，西藏地块以较大速率向东挤压，四川地块基本没有发生移动，正是西藏地块挤压和四川地块的阻挡，致使龙门山断裂带区域受力很大，而龙门山断裂带又是地质薄弱地区，最终导致汶川大地震发生。如果当时具有正确观念，在此区域事先布置合适的前兆探测网点，则有可能对该次地震做出某种预测。

前兆信息并非只在震源附近区域产生。一个力链可能达千公里或更长，在许多地方都可能获得有用的信息。不在力链范围区域也应当探测，判断各处是否发生变化，以及变化的异同，进行综合分析。在中国大陆区域内，有多个构造力链存在，进行大范围较长时间观测和积累，则可较全面掌握有价值的前兆信息资料，逐步实现地震的科学预测。

由前面阐述可知，地震发生前的大部分变化信息，如力链传播、滞滑位移、以及地层中的阻

挡等均可在地表反映出来，在地表或地下浅层岩石就能够获取相当丰富的特征地震前兆信息，而不必去追求无法探测的震源附近深处岩石的具体状况。对于深源地震，难以获取前兆信息，当前尚无法提出可行的预测的途径。

(4) 调查了解相关区域的地质状况

应尽量详细了解关键力链及其附近区域的地质状况，这对于地震预测十分重要。地震发生的条件是作用力大于岩石抗剪切破坏力和所遭遇阻挡力之和。岩石所受阻挡力足够小时才容易发生地震，如在逆断层，地质薄弱和低密度区，或者由于岩块挤压引起地质空隙等。地质

状态一般相对变化较慢，力链和阻挡等作用也可持续很长时间，但构造力的作用和岩块的滞滑移动会使某些区域变松或变紧。因此，一方面要掌握原始地质信息，同时也要持续监测地质状况的变化，这对判断地震是否发生和在何处发生是必不可少的。

(5) 开展多学科综合研究

多学科综合研究是深入认识地震原理和实现地震预测的必由之路。地震现象的研究主要涉及地球物理学、地质学、力学和物理学等诸多学科。要运用物理学新近的研究成果和知识，结合地震学积累的经验，认清地震机理，转变错误观念。需要对地震原理和所涉及的相关领域进一步深入研究，要注重改进或确立新的探测地震前兆的方法与技术，特别是针对我国大陆地震的特点和地质环境，更有效地进行与地震紧密相关的地质资料的调查。应组织和促进各学科的相关专家积极参与，如陈运泰所说“科学家应当倾其所能把代表当前科技最高水平的知识用于地震预测预报”<sup>[4]</sup>。

人类遭遇的大自然灾害，多数已能够做不同

程度的预测,可事先发出警报。地震的科学预测迄今还没有实现,主要原因是过去对地震发生机理没有认识清楚。地震预测是科学界面临的重大挑战,我们提出的对地震原理的新认识为达到这一目标打开了一扇门,可看到实现地震预测的希望。判断岩块力链的某个或几个断层区域内是否会发生地震,特别是大地震的预测,原理上应该是可行的。然而,地震的孕育和发生过程极其复杂,要准确地预测地震发生的地点、时间和震级是十分困难的,需要对地震过程更深入、全面、科学的认识;要建立地震前兆探测网,及时获取足够的特征前兆信息;此外,还要掌握详尽的地质资料。这不仅是一项科学研究项目,也必定是一项巨大的工程,需要投入大量的财力和人力,需要国家层面的强有力组织谋划。我们相信,随着对地震原理的深入认识,相关技术的飞速进步以及资料的积累,大约经过一代人的不懈努力,有可能逐步实现地震预测的目标。

## 7 结论

国际地震界的主流观点是地震不可预测,这一观点是源于对自组织临界现象的误解和对地震原理的错误认识。地震符合SOC规律,不可能作中长期预测。但是,无论是SOC原理本身,还是其他类型SOC事件(如天气等)的可预测实例,均表明地震的短期预测原则上是可能的。预测的条件是:对地震原理认识正确,获得足够的特征前

兆信息,以及对相关地质资料的详尽掌握。传统地震学以固体连续介质理论为基础,连续介质近似用于处理地震波传播问题是合适的,但对于地震孕育过程和地震发生机理,固体连续介质模型不再适用。弹性回跳理论在传统地震学中统治了一百余年,但这个基本认识与实际观测结果存在巨大的矛盾,无法解释很多地震现象,也无法将观测到的前兆与地震发生建立联系。依据这些传统认识,不可能实现地震预测。我们根据地壳分裂成岩石断层、断层间填充断层泥这一基本事实,将地壳岩石层看作离散态物质体系,用从颗粒物质研究获得的物理知识来认识构造作用力的传播规律,指出地震孕育过程中力传播和岩块运动的基本方式是力链传播和滞滑移动。同时,运用岩石自重导致的弹性—塑性转变观念,以及对断层泥力学性质的认识,深入分析地层岩石强度和构造作用力随深度变化的规律,得出地震发生机制是岩石的塑性滑移和岩块运动的堵塞—解堵塞转变的结论。这些对地震孕育和地震发生机制的新认识,纠正了长期笼罩地震研究的错误观点,可以解释传统地震学无法理解的诸多地震学现象,并以此提出了实现地震预测的途径和方法。地震是造成巨大损失的自然灾害,我国受地震灾害最为严重。基于物理学最新进展获得的对地震原理的新认识,为地震预测提供了科学依据。为了实现地震预测的最终目标,还有许多深入细致的工作要做,亟待相关领域科研人员的共同努力。

## 参考文献

- [1] Shoichi S. Nagoya Daigaku Shinbun, 1968, No. 300
- [2] Anderson P W. Science, 1972, 177: 393
- [3] Bak P. How Nature Works. New York: Copernicus Press. 1996 [李炜, 蔡勛译. 大自然如何工作. 武汉: 华中师范大学出版社, 2001
- [4] 陈运泰. 中国科学(D辑), 2009. 39: 1633
- [5] Geller R J. Jackson D D. Kagan Y Y *et al.* Science, 1997, 275: 1616
- [6] [http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/index.html?fox-](http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/index.html?fox-trotcallback=true)

- [trotcallback=true](http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/index.html?fox-trotcallback=true)
- [7] Shearer P M. Introduction to seismology. 2nd Ed. New York: Cambridge University Press, 2009
- [8] Hough S. Predicting the Unpredictable—The Tumultuous Science of Earthquake Prediction. Princeton: Princeton University Press, 2010
- [9] Hough S. Confusing Patterns with Coincidences. New York Times, April 11, 2009
- [10] Ichiro Kawasaki. What are slow earthquake. NHK Publishing



- Inc., 2006 [川崎一郎 著. 陈会忠, 黄伟, 黄建平 等译. 何为慢地震. 北京: 地震出版社, 2013]
- [11] 吴忠良. 中国地震. 1998, 14: 1
- [12] 马瑾. 科学通报. 2016, 61: 409
- [13] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 381
- [14] Bak P, Tang C. *J. Geophysical Research*, 1989, 94: 15635
- [15] Bak P, Christensen K, Olami Z. In: *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*. edited by William I *et al.* Washington, D. C: International Union of Geodesy and Geophysics and the American Geophysical Union, 1994. 69
- [16] Corral A. Clustering L T. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 108501
- [17] Huang Y, Saleur H, Sammis C *et al.* *Europhys. Lett.*, 1998, 41: 43
- [18] Rundle J B, Holliday J R *et al.* *Operational Earthquake Forecasting*, October 2015, DOI: 10. 13140/RG. 2. 1. 2632. 3920
- [19] Peters O, Hertlein C, Christensen K. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 88: 018701
- [20] Nagel K, Schreckenberg M. *J. Phys. I France*, 1992, 2: 2221
- [21] Kerner B S. *Phys. Rev. Lett.*, 1998. 81: 3797
- [22] Held G A, Solina D H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65: 1120
- [23] Altshuler E, Ramos O *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86: 5490
- [24] Aegerter C M, Günther R, Wijngaarden R J. *Phys. Rev. E*, 2003, 67: 051306
- [25] Aegerter C M, Lorincz K A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 058702
- [26] Schick K L, Verwee A A. *Nature*, 1974, 251: 599
- [27] Moriyama O, Kuroiwa N *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80: 2833
- [28] Lherminier S, Planeta R *et al.* *Revista Cubana De Física*, 2016, 33: 55
- [29] Huang Y, Saleur H, Sammis C *et al.* *Europhys. Lett.*, 1998, 41: 43
- [30] Garber A, Hallerberg S, Kantz H. *Phys. Rev. E*, 2009, 80: 026124
- [31] Ramos O, Altshuler E, Maløy K J. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 078701
- [32] 周仕勇, 许忠淮. 现代地震学教程. 北京: 科学出版社, 2010
- [33] 赵克常. 地震概论. 北京: 北京大学出版社, 2012
- [34] 朱良保. 基础地震学. 北京: 科学出版社, 2016
- [35] 万永革. 地震学导论. 北京: 科学出版社, 2016
- [36] Reid H F. Report of the State Earthquake Investigation Commission. Washington, D. C: Carnegie Institution of Washington, 1910. 192
- [37] Reid H F. *Bulletin of the Department of Geology*. 1911. 6: 413
- [38] Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P *et al.* *Annals of Geophysics*. 2011, 54: 315
- [39] 陈运泰. 热流伴谬// 10000个科学难题·地球科学卷. 北京: 科学出版社, 2010
- [40] Scholz C H. *The Mechanism of Earthquake and Faulting* (2<sup>nd</sup> Ed). Cambridge Univ. Press, 2002
- [41] 陈颙, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学. 中国科学技术大学出版社, 2009
- [42] Lachenbruch A H, Sass J H. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15: 981
- [43] Kano Y, Mori J *et al.* *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L14306
- [44] Fulton P M, Brodsky E E, Kano Y *et al.* *Science*, 2013, 342: 1214
- [45] Scott D R. *Nature*, 1996, 381: 592
- [46] Melosh J. *Nature*, 1996, 379: 601
- [47] Sholz C H. *Nature*, 1996, 381: 556
- [48] Kanamori H, Brodsky E E. *Rep. Prog. Phys.*, 2004, 67: 1429
- [49] 中国地震局监测预报司编. 2004年印度尼西亚苏门答腊8.7级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京: 地震出版社, 2005
- [50] 胡进军, 谢礼立. *地球科学进展*, 2011, 26: 39
- [51] Rosakis A J, Samudrala O, Coker D. *Science*, 1999, 284: 1337
- [52] Frohlich C. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1989, 17: 227
- [53] Green H W, Houston H. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1995, 23: 169
- [54] Geller R J, Mulargia F, Stark P B. Why We Need a New Paradigm of Earthquake Occurrence. In: Gabriele Morra *et al.* *Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters*. Geophysical Monograph 211. First Edition. 2016 American Geophysical Union, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2016
- [55] Ben-Menahem A. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85: 1202
- [56] Geller R J. *Nature*, 2011, 472: 407
- [57] 陆坤权, 厚美瑛, 姜泽辉 等. *物理学报*, 2012, 61: 119103
- [58] 陆坤权, 曹则贤, 厚美瑛 等. *物理学报*, 2014, 63: 219101
- [59] 杨树铎(主编), *地球科学概论*. 第2版. 杭州: 浙江大学出版社, 2001
- [60] 张培震, 邓起东, 张国民 等. *中国科学(D辑)*, 2003, 33: 12
- [61] 王琪, 张培震, 牛之俊 等. *中国科学(D辑)*, 2001, 31: 529
- [62] 陆坤权, 刘寄星. *物理*, 2004, 33: 629, 713
- [63] <http://cires.colorado.edu/~bilham/CREEPDATA/HaywardCreep-meterAccess.htm>
- [64] 蒋靖祥, 尹光华, 王在华 等. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23: 4072
- [65] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. *地质力学学报*, 2008, 14: 97
- [66] 范桂英, 拾礼勤, 李兰生. *地震学刊*, 2002, 22: 7
- [67] 邱泽华, 张宝红, 池顺良 等. *中国科学(D辑)*, 2010, 40: 1031
- [68] 张国民, 傅征祥, 桂望泰. *地震预报引论*. 北京: 科学出版社, 2001

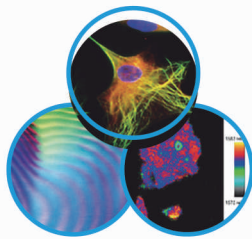
**Cobolt**  
a HÜBNER Group company

cobolt.se



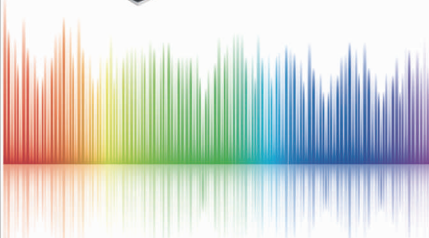
See  
things  
clearer

with Cobolt



### High Performance Lasers

- Single frequency
- UV-VIS-MIR
- CW & Q-switched
- Unprecedented reliability with HTCure™



**DynaSense**

北京鼎信优威光子科技有限公司  
地址: 北京市西城区太平桥大街力源中心B915室 电话: 010-8350 3853  
网址: www.dyna-sense.com 邮件: info@dyna-sense.com

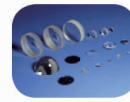


中国光学学会 激光专业委员会

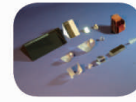
[69] Barnes B. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 1999, 81: 133  
 [70] Weisskopf V F. American Journal of Physics. 1986, 54: 110  
 [71] Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. J. Geophys. Research. 1995, 100: 17587  
 [72] Wintsh R P, Yeh M W. Tectonophysics, 2013, 587: 46  
 [73] Behr W M, Platt J P. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 303: 181  
 [74] Hoek E, Brown E T. Inter. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34: 1165  
 [75] Fulton P M, Brodsky E E, Kano Y *et al.* Science, 2013, 342: 1214  
 [76] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理学基础. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012  
 [77] Barton N J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5: 249  
 [78] Handy M R. Journal of Structural Geology, 1994, 16: 287  
 [79] Rosenberg C L, Handy M R. J. Metamorphic Geol., 2005, 23: 19  
 [80] Meade C, Jeanloz R. Phys. Rev. B, 1990, 42: 2532  
 [81] Duffy T S, Hemley R J, Mao H K. Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 137  
 [82] Makse H A, Gland N, Johnson D L *et al.* Phys. Rev. E, 2004, 70: 061302  
 [83] Mehta A. Granular Physics. London: Cambridge University Press, 2007. 263  
 [84] Agnolin I, Roux J N. Phys. Rev. E, 2007, 76: 061304  
 [85] 张勇, 许力生, 陈运泰. 地球物理学报, 2009, 52: 379  
 [86] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华 等. 地球物理学报, 2010, 53: 2321  
 [87] Liu A J, Nagel S R. Nature, 1998, 396: 21  
 [88] Biroli G. Nature Phys., 2007, 3: 222  
 [89] Liu A J, Nagel S R. Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 2010, 1: 347  
 [90] Keys A S, Abate A R, Glotzer S C *et al.* Nature Physics, 2007, 3: 260  
 [91] Olsson P, Teitel S. Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 178001  
 [92] 张国民, 汪素云, 李丽 等. 科学通报, 2002, 47: 663  
 [93] Cicerone R D, Ebel J E, Britton J. Tectonophysics, 2009, 476: 371  
 [94] 陆坤权, 厚美瑛, 王强 等. 科学通报, 2011, 56: 383  
 [95] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽 等. 地球物理学报, 2008, 51: 1066

### 标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片,  
超过700个品种规格的透镜,  
棱镜, 反射镜, 窗口,  
滤光片等常用光学器件;  
涵盖紫外, 可见,  
近红外,  
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段  
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216  
邮箱: optics@goldway.com.cn