

# 数值地震预测的关键物理问题\*

马腾飞 吴忠良<sup>†</sup>

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

2012-11-27 收到

<sup>†</sup> Email: wuzl@cea-igp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130403

## Physical and seismological challenges in numerical earthquake forecasting: a discussion on the key issues in the physics of earthquakes

MA Teng-Fei WU Zhong-Liang<sup>†</sup>

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**摘要** 数值地震预测是地震物理研究中的一个重要课题, 具有基础性的科学意义和潜在的应用价值。文章介绍了数值地震预测的三个关键物理问题——地震发生率与应力变化的关系、地震断层的摩擦函数、地球中应力的传递问题, 讨论了这些问题的意义、研究现状和发展趋势。

**关键词** 数值地震预测, 应力变化, 地震断层, 状态—速率摩擦函数

**Abstract** Numerical earthquake forecasting is one of the outstanding problems in the physics of earthquakes, with significant implications for fundamental science and potential application. Identification of the physical and seismological challenges is one of the critical steps in the approach to numerical earthquake forecast. This article reviews some key issues in the physics and seismology related to numerical earthquake forecasting, including the relation between earthquake rate and stress change, the rate-and-state friction along an earthquake fault, and the transfer of stresses within the Earth. Their significance, status-quo, and future perspectives are discussed.

**Keywords** numerical earthquake forecast, stress change, earthquake fault, rate-and-state friction

\* 地震行业科研专项(批准号: 201008001)  
资助项目

## 1 引言

数值地震预测现在还处在一个技术成熟度(technical readiness level)较低的发展阶段。但一些原型(prototype)已经开始形成, 相关的研究也很活跃<sup>[1, 2]</sup>。讨论数值地震预测中的一些关键物理问题, 对于数值地震预测的发展具有基础性意义。

关于地震预测, 国内报道中颇多误导。因此, 即使是针对一些基本概念的讨论, 至少在现阶段也不是可有可无的。例如, 一个广为流传的说法是, 国际同行一般不研究地震预测问题。实际上, 这是一种文化差别: 中文中的“地震预测”或“地震预测研究”, 与英文中的 earthquake forecast/prediction (study) 并不一一对应。国外研究地震危险性(seismic hazard), 但不一定叫“长期地震预测”; 国外研究“时间相依的”地震危险性(time-dependent seismic hazard), 但不叫“中长期地震预测”; 国外研究余震概率(aftershock probability)或地震相互作用(earthquake interaction), 却不用“地震类

型和强余震趋势预测”的提法; 国外有人发展地震预测的统计检验, 但认为这是和地震预测对着干的。从更宽的领域看, 国外专家搞的地震构造、地震物理、地震活动性分析, 在中文的分类中, 都属于“地震预测研究”, 但国外很多做这些工作的专家, 却断然否认自己的研究属于地震预测。还有一个近年来迅速发展的综合了地质、地球物理、大地测量研究的领域, 有时不太简洁地称为“地震孕育全过程的面向预测的模拟”(predictive modeling of seismic cycle), 事实上也属于我们所说的“地震预测研究”。所以, 看“实”不看“名”, 就像我们中国的(吉祥的)“龙”实际上并不是西方(长翅膀的、凶恶的)“dragon”, 说国外地震研究领域事实上很多人都在搞“地震预测研究”, 也不是夸张之语。

数值地震预测也属于这样一个领域, 从表面上看, 直接以“数值地震预测”为题的论文和项目并不多——尽管像亚太经合组织(APEC)地震模拟合作项目(ACES)<sup>1)</sup>这样以数值地震预测为最终目

1) ACES, APEC Cooperation for Earthquake Simulation, 见 <http://quakes.earth.uq.edu.au/>

标的项目还是颇有影响的,但很多方面的工作,实际上是在以一种“渗透式”的方式,逐步逼近数值地震预测的科学目标。

国内的报道中还有另一个广为流传的误导,即认为地震预测“没有理论”,因此现阶段的地震预测,最多是经验性和统计性的。实际上,正如在还没有数值天气预报的时代,人们对大气的运动就已经开始有所认识一样,尽管现在数值地震预测的目标似乎还很遥远,但试图在一个比较清晰的物理背景下理解地震现象的理论研究,还是在不断尝试之中的<sup>[3]</sup>。本文试图介绍的就是面向地震预测的地震理论的一个方面。

## 2 地震物理问题的特殊性

数值模拟领域,对那些不够“物理”的地震模型,有一个说法:他们的确模拟了什么,但他们模拟的却不是地震(They did model something, but what they modeled are not earthquakes)。从一定意义上说,搞清楚数值地震预测的关键物理问题,是数值地震预测模型能够真正实现的前提条件。之所以叫“关键”物理问题,有两个原因,一是这些问题属于物理知识网络中的重要节点,二是这些问题并不能代表相关的物理知识网络的全貌。

搞清楚这些物理问题,归根到底还要靠观测(和实验)。但从物理学家的角度看,地球观测系统绝不是一个理想的观测系统。地震学以及与地震学相关的大地测量、地质调查等,只能在地球表面上进行观测;虽然有时可以“深入”到地下进行观测或“采样”,但与地震的深度(地壳中的浅源地震可达20—30km,发生在板块俯冲带上的深源地震则可达近700km)相比,这种“深入”(最多是10<sup>0</sup>—10<sup>1</sup>km的数量级)还是十分有限的。因此地震物理

的研究,不得不以这些有着不可克服的限度的观测资料和反演结果作为约束。这种情况颇类似于天文学和天体物理之间的关系。

地球也决不是一个理想的“实验室”:在地震学中,没有办法进行完全可控的实验。尽管近年来发展了很多间接的办法,比如,借助太阳和月亮的力量(看地球的一些性质随着固体地球潮汐的变化)、借助大型人工工程(看水库、矿山等对地震的影响)、在实验室中模拟地球内部的温度和压力环境(进行地球介质材料性能的实验)等,但限度还是很明显的。

不过,从另一个意义上说,克服这些困难,挑战这种科技能力极限,也许正是与地球相关的物理学之“美”——想想高斯时代用地面上有限而粗糙的地磁场测量结合漂亮的数学理论给出(相当于人类身高10<sup>7</sup>倍)的地球尺度的地磁场模型,这一点就毋庸置疑。

## 3 数值地震预测的关键物理问题

### 3.1 地震断层的受力状态与地震发生率之间的关系

地球内部的各种过程,包括板块相互作用、地球介质流变、邻近断层上发生的地震等,都能造成潜在的地震断层上受力状态的变化,导致地震提前或推迟发生。这种“受力状态”有时可以用“库仑破裂力”(CFF)变化来描述<sup>[4]</sup>,表示成作用于断层上的剪切力减去摩擦力,其中摩擦力用摩擦系数乘以作用在断层上的正压力表示,不过这里的“摩擦”系数是考虑了摩擦、流体等多种因素的作用之后得到的“等效摩擦系数”。

数值地震预测中不能绕过的一个方程,是地震断层的受力状态的变化(有时可表示成CFF的变化)与地震发生率之间

的关系<sup>[5]</sup>。数值地球动力学模型所能得到的一般只是应力场的变化情况。只有把应力变化与地震发生率的变化联系起来,才能达到地震预测的目的。另一方面,任何模型的结果,最后都要受到实际情况的检验,地震预测模型的结果,不管是统计的,还是经验的,还是“物理的”,都需要用实际地震发生的情况进行检验。对于一个数值地震预测模型来说,至少需要检验它所“预测”的地震是否与实际情况有相近的地震数(N-检验)、相近的空间分布(S-检验)、相近的概率分布(L-检验)、相近的最大震级(M-检验)等,同时模型的结果必须优于随机“预测”的结果<sup>[6]</sup>(与这个领域相关的“统计地震学”,近年来在理论上有着非常显著的进展<sup>2)</sup>,但国内对此重视不够,所以汶川地震后才出现了很多本不该出现、在国外也几乎不可能出现的思想混乱)。检验的前提是,数值地震预测模型需要根据地球动力学计算得到的“受力状态”变化,给出地震的发生率或者地震的“概率增长”。

近年来的工作表明,CFF计算加上一些经验考虑,可以对余震的过程做出较好的估计<sup>[7]</sup>。因此数值地震预测模型的一个现实的应用是在地震发生之后(预测“这个”地震,可能现在还做不到),通过地震引起的附近断层上的CFF变化,结合当地的地壳介质流变性质、地震序列性质等,对地震类型(震群型、孤立型或主震—余震型)及(主震—余震型的情况下的)强余震趋势做出预测,从而帮助进行抗震救灾。

### 3.2 地震断层面上的摩擦函数

一次地震所释放的能量有3个主要去向:辐射地震波、形成新断层、克服断层面上的摩擦发生滑动。有时后面的两个过程也被抽象为地震断层的“摩擦函数”。这是一种类似于温度的“宏观”描述,除包括机械意义上的摩擦之外,一般还包括断层面上发生的化学变化,甚至包括辐射地震波的过程对断层性质的影响。

摩擦函数描述了断层的滑移和滑移速率(输出量)与作用在断层上的力(输入量)之间的相互影响<sup>[8]</sup>,这里,强调“相互影响”,而不是简单的“线性响应”,是重要的。地震物理中需要研究的问题,一是实验室实验得到的摩擦函数,它的微观机制是什么,特别是为什么在地震发生时,断层上的摩擦函数会出现(突然的)下降(或称“弱化”),从而使断层滑动成为可能,地震之后,断层上的摩擦函数又是怎样得到“恢复”(又称“愈合”),从而开始为下一次地震的发生做好准备的<sup>[9]</sup>;二是从地震观测、大地形变测量、地质调查的角度,研究如何约束摩擦函数中的那些重要的物理参数;并反过来研究,由这种(非

#### 断层受力状态变化与地震发生率的关系

断层受力状态变化与地震发生率的关系可由下式表示<sup>[5]</sup>:

$$R = \frac{r\dot{\tau}/\dot{\tau}_r}{\left[\frac{\dot{\tau}}{\dot{\tau}_r} \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{A\sigma}\right) - 1\right] \exp\left(\frac{-t}{t_a}\right) + 1}, \quad (1)$$

式中 $R$ 表示地震发生率, $r$ 为背景地震活动率, $\dot{\tau}$ 是剪切应力变化率, $\dot{\tau}_r$ 是背景应力变化率, $A$ 是断层本构参数, $\Delta\tau$ 为断层上的应力变化, $\sigma$ 表示有效正应力, $t_a$ 表示地震活动恢复到“正常背景”所需的时间, $t$ 为距断层受力状态突然变化(例如,邻近断层上发生了地震)的时间。

2) 参见: <http://www.corssa.org/>

## 速率—状态摩擦定律(rate-and-state friction law)

岩石摩擦滑移实验的结果给出, 正应力、滑动位移以及滑移速率与摩擦系数之间呈现非线性的依赖关系, 表示为速率—状态摩擦定律(rate-and-state friction law)<sup>[8]</sup>:

$$\tau = \left[ \mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0 \theta}{L}\right) \right] \bar{\sigma}, \quad (2)$$

式中  $\tau$  代表剪应力,  $\bar{\sigma}$  是有效正应力, 在方括号内的摩擦项中,  $V$  是滑移速率,  $V_0$  是参考滑移速率,  $\mu_0$  是  $V=V_0$  条件下的摩擦系数,  $a$ ,  $b$  是与岩石性质相关的常数,  $a$  和  $b$  之差决定了断层的稳定性,  $L$  是临界滑动位移,  $\theta$  是由下式所控制的“状态变量”:

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{\theta V}{L}. \quad (3)$$

由方程(2)和(3)出发, 可以对与地震孕育和发生过程中的“不稳定性”有关的现象做出解释。例如前面的断层“受力状态”变化与地震发生率的关系(方程(1)), 可以从这个函数出发“推导”出来<sup>[5]</sup>。但另一方面, 注意“费曼警告”——不要以为这个方程本身就是(地震破裂的)物理的全部——也许是重要的。

线性的)摩擦函数, 可以预测在地震观测中会“看到”什么现象——例如, 近年来讨论较多的“低频地震事件”, 有很多可以从这种“速率—状态摩擦定律”(rate-and-state friction law)出发得到解释<sup>[10]</sup>。

这些问题, 涉及物理学和地震学之间的一个交叉领域。值得注意的是, 所有的讨论, 都(应该)在与地球内部的温度和压力环境相近的环境下, 针对可能是地球物质的材料(及其表面)进行。想一想深源地震的问题, 就可以看到这个问题在物理学上和地学上的复杂性: 接近 700km 深度的温度和压力环境, 与接近地表处的温度和压力环境显然差异很大, 但在这种差异很大的环境里, 何以能产生(由地震学观测几乎难于区分的)十分相似的震源运动学特征(不确切地借用一句天体物理中“黑

洞无毛”的说法——“深震无毛”); 为什么地震会终止于 700km 左右的深度而不是别的深度, 都是值得研究的问题。

与此相关, 数值地震预测模型还有另一个潜在的应用价值——在“假定”某个地质断层“开始”发生地震破裂(scenario rupture)的情况下, “预测”这一地震的破裂“应该是”什么样子的。这种“预测”虽然还不是物理上追求的“那种”地震预测, 却有着非常实际的应用价值。地震不是一个“点”, 地震断层也不是一个简单的几何面——2008年汶川地震, 从都江堰附近“起始”, 自西南向东北方向传播, 分别撕裂了两条长约 240km 和 70km 的断层, 整个过程的持续时间约 100s。重要的是, 这些特征, 在地震破裂的动力学中都可以得到物理的解释, 这些信息, 对确定灾害的分布从而帮助进行抗震救灾十分重要。决定这种动力学性质的因素, 一个是地壳介质结构和地震断层带的性质, 另一个就是地震断层面上摩擦函数的性质。应该说, 即使是这种针对假想情境(scenario)的“假如怎么样则将怎么样”(if-then)性质的预测, 目前也仍是一个挑战性的研究领域。一个困惑地震学家的问题是, 为什么地震破裂是向“这个”方向(而不是相反方向)传播的, 例如, 为什么 2001 年昆仑山大地震是自西向东传播而不是反来自东向西传播的; 还有, 在什么条件下地震破裂可以出现超剪切波速破裂(super-shear rupture)的情况, 地震学“看到”的“超剪切波速”破裂究竟是不是真正的“超剪切波速”(因为“断层聚合”也可以造成“超剪切波速传播”的假象), 也是一个有争论的问题。

## 3.3 应力的远程传递问题

数值地震预测模型中涉及的一个现在

还没有明确答案的物理问题，反映了数值模型的一个重要的性质，或者限度：一个模型只能模拟那些做模型的人知道的东西，做模型的人不知道的东西，只能在模型之外解决。

在地震研究中，一个目前还需要研究的问题是，前面提到的作用在一个断层上的应力变化，是如何传递过去又是如何发挥作用的。与此相关的观测现象与理论的不一致是，有些地震的影响似乎可以传递到很远的地方，以致现有的理论无法解释这种距离过远的“应力传递”。一种可能是，地震造成的“静态应力变化”和地震波所携带的“动态应力变化”同时起作用<sup>[1]</sup>，这样在距离较远的地方，地震波可以扮演传递应力的“信使”的角色。不过，即使在强地震之后的余震的分布特征的解释中，这也是一个有很多争论的问题。有一个现象也许对相关的研究有一定的启发意义，那就是火山和强地震之间似乎也是有联系的。

物理上还可以设想别的机制。一种可能的机制是，应力通过具有刚性的“构造块体”的整体性运动实现了“远程传递”，或者地壳中下部的“韧性层”可用来传递应力；还有人设想，是否存在类似于“应力波”的现象，使应力场可以像海啸那样以一种不同于地震波的速度“传递到”比较远的地方；此外，在地球动力系统处在“自组织临界状态”附近的情况下，“长程关联”也是一种可能性。现在的问题是，一来这些因素的作用如何能得到“实证的”观测资料约束，还没有特别有说服力的证据；二来也很难想象现阶段的数值地震预测模型能“全面地”把所有这些因素都纳入模型之中。因此，现在版本的数值地震预测模型主要考虑弹性地球介质或粘弹性地球介质，或包括间断(断裂)的连续地球介质，从而也就只

能模拟那些我们(似乎)已经知道的应力传递过程。

## 4 结论和讨论

我们讨论了数值地震预测研究中的几个关键物理问题，这些问题涉及地震学与物理学的交叉领域。从数值地震预测目前的发展阶段来看，讨论这些问题也许有些“超前”，并且数值地震预测的关键物理问题，也不是这几个问题所能全面概括的。但地震断层的受力状态及其与地震发生率之间的关系、地震断层面的摩擦函数、地球上应力的传递，既是数值地震预测研究中的关键问题(即这些问题的解决程度直接决定了数值地震预测可以实现到什么程度)，也同时是目前地震的物理研究中讨论很多、成果很多、值得特别关注的问题。

从“信息增益”的角度说，本文除不完整地介绍已有的进展外，没有任何新的内容。但本文试图针对中国地震预测研究的现状和目前关于这一领域的报道，根据相关领域的国际进展，做出两个也许是重要的、但注定是有争议的评论。一是，地震预测决非“根本没有理论”，尤其是，针对这些理论问题的讨论，已经可以落实到观测、实验和数值模拟；现有的理论显然是不完善的，但我们已经知道问题出在哪里，关于如何解决这些问题的方法的讨论，也是实实在在的物理，而不是抽象的哲学。二是，尽管地震预测的目标本身现在还有很长的距离，这一距离在一定程度上可以反映在本文所讨论的三个关键物理问题上，但数值地震预测的一些阶段性成果，例如强余震概率的预测、地震破裂过程的动力学模拟，已经有条件以一定形式服务于防震减灾和抗震救灾的实践，所以这一研究领域，即使距离取得最后成功还

很遥远，在现阶段也还是有很实际的应用价值的。

国际地震预测研究近年来开始从追求“毕其功于一役”的“奇迹”的发展战略(silver bullet approach)逐步转变成“脚踏实地、一步一个脚印”的发展战略(brick-by-brick approach)<sup>3)</sup>。这一思路对数值地震预测可能也是适用的。这一发展思路，对于汶川地震后国内比较浮躁的关于地震预测问题的讨论(围绕这一问题的深刻研究之多、无稽议论之不着边际<sup>4)</sup>，确实给人留下深刻印象)也不失为一剂有助于保

持头脑清醒的良药。至少，清楚地认识到地震预测研究现在实际上已有很多扎实进展，“国际上不搞地震预测研究”的说法是不成立的，世纪之交关于地震预测问题的国际争论“使主流科学界放弃了地震预测研究”的说法是不可信的，这有助于避免在认真调研之前轻率地指点江山的情况。

**致谢** 与石耀霖院士、Alik Ismail-Zadeh教授、T. Jordan教授的讨论对形成本文有很大启发，特此致谢。

**参考文献**

[1] 石耀霖. 物理, 2013, 42(4):237  
 [2] Tullis T E. Seismol. Res. Lett., 2012, 83(6): 957  
 [3] Marone C. Annu. Rev. Earth Pl. Sc., 1998, 26: 643  
 [4] Lin J, Stein R S. J. Geophys Res., 2004, 109: B02303  
 [5] Dieterich J. J. Geophys. Res., 1994, 99: 2601  
 [6] Schorlemmer D, Gerstenberger M C, Wiemer S *et al.* Seismol. Res. Lett., 2007, 78: 17

[7] Parsons T, Ji C, Kirby E. Nature, 2008, 454: 509  
 [8] Scholz C H. Nature, 1998, 391: 37  
 [9] Li Q, Tullis T E, Goldsby D *et al.* Nature, 2011, 480: 233  
 [10] Shibasaki B, Shimamoto T. Geophys. J. Int., 2007, 171: 191  
 [11] Voisin C, Cotton F, Di Carli S. J. Geophys. Res., 2004, 109: B06304

3) 参见: CSEP, Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, www.cseptesting.org  
 4) 此处借用物理学家郝柏林的说法



### QKDEdu-S 量子密码教学科研系统

系统组成



— 单模光纤 — 经典网络  
— 同轴电缆 — USB数据线

组件清单

名称	数量
QKDEdu-T量子信号发射机	1
QKDEdu-R量子信号接收机	1
QKDEdu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

### QEPS小型纠缠源系统

系统组成



QEPS小型化纠缠源系统实物图

技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	<10
单路光子亮度 (cps.)	>100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	>10k
H, V偏振对比度	>25:1
P, N偏振对比度	>7:1
Bell不等式破坏程度	S>2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备  
 物理专业: 探测端、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。  
 通信专业: BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址: 合肥市创新产业园D3楼  
 电话: 400-885-0929  
 0551-65333590

销售: 13395515356  
 13395515359  
 邮编: 230088

传真: 0551-65368589  
 邮箱: feng.liu@quantum-info.com  
 网址: http://www.quantum-info.com