

从半个世纪时间尺度看地震预测预报物理的研究进展 (代前言)

地震预测预报要讨论的东西实在太多太多，甚至地震预测预报这件事本身就是一个非常值得花时间花力气的研究对象，但在这个讨论中，我们只谈物理，只谈与地震预测预报有关的物理。我们讨论三个危险的话题：（一）为什么六七十年代关于地震预测预报会那么乐观？（二）为什么六七十年代的乐观并没有导致乐观的结果？（三）近年来地震预测预报研究没有进展吗？这些话题的中心是：今后的地震预测预报研究应该沿着什么方向走下去。

一、都说二十世纪六七十年代地震预测预报似乎是过于乐观了。从理论的层面看，那个时候想不乐观都不可能。

（一）地震学第一原理不但终结了过去几十年的一场（至少当时看来非常基本的）理论争论，而且说明仪器记录到的地震地面运动可以通过一个优美的定量化的理论体系去解释。

（二）板块构造学说在全球尺度上很好地解释了绝大多数地震的成因、分布、震源机制。

对地震科学来说，这绝对是两个核弹级的成果。

（三）地球介质的应力-应变关系（看上去）不但适用于地震发生的时间尺度，而且适用于地震孕育的时间尺度。一方面，即使简单的应力计算也可以解释很多岩石断裂现象；另一方面，当时正在迅速发展的断裂力学又展现出诱人的前景。

（四）开始注意到流体作用对摩擦性质的影响及

其在地震研究中的意义。

注意到上述重要进展、甚至历史性进展，它们发生时间不过是十年的尺度，注意到这些进展与地震预测预报之间如此直接的联系，二十世纪六七十年代关于地震预测预报的乐观的看法，不仅不是盲目的，而且甚至可以说是理性的。

二十世纪六七十年代关于地震预测预报的路线图，基本上是物理的。

当时尚未见到困难或曲折迹象的尝试之一：（与其说确认了一小批可能有希望的地震“前兆”，不如说是）批判性地检验和淘汰了一大批早有记载但并不靠谱的“疑似地震前兆”，因此地震预测研究开始变成了物理。而即使到今天，statistics-based, anomaly-based, ‘physics’-based（包括simulation-based, response-based），这个前兆分类的框架看来也基本上是正确的。

当时尚未见到困难或曲折迹象的尝试之二：试图以“膨胀模型+”在一个统一的物理背景下（至少是形式上）量化地解释各类地震前兆，因此地震预测研究开始变成了物理。

耐人寻味的是，海城的成功，一定意义上恰恰是由于对这个方向的一种自觉或不自觉的偏离：以现在的角度看，那个时候中国的一些做法，颇有“协同分布式实验（CDEs）”“大数据”这些21世纪才开始出现的概念的“味道”，甚至连“打招呼”这个说法也

很容易让人联想起今天的“可操作地震预测(OEF)”。

二、海城和唐山地震以来的新的认识

(一) 认识到地震断层上的“凹凸体”或“障碍体”对地震的孕育和发生具有重要意义(这是20世纪70年代的事情),但这种“凹凸体”或“障碍体”的成因在很多情况下不过就是断层的几何形状(这是21世纪的事情)。

(二) 认识到地震断层不是一个简单的“断层面”而是一个有结构的断层带,断层带外面还有一个类似于“损伤带”的区域。认识到地震之后的“愈合”过程可以通过观测去约束,而这个愈合过程的最重要的参数是特征时间。

(三) 认识到深部滑脱带在地震的孕育过程中扮演着重要角色,至少地表断层不是线性延伸到地下的。

(四) 更清楚地了解到地震波辐射的能量仅占地震释放的全部能量的一个不大的部分,更认真地思考这种能量对比对地震预测预报的意义。

(五) 开始把地震断层上的摩擦函数表述成一个非线性函数(rate-and-state friction law),但不是很理解地震过程中这个函数究竟是为为什么发生了变化。不过无论如何,地震决不是像折断一根竹棍那么简单。

(六) 可以用例如地震钻探的手段对动摩擦系数进行直接测量,结果得到很低的动摩擦系数。本来地震破裂过程的研究也有给出这方面约束的潜力,但现在看来我们也许需要再等十年左右的时间。

(七) 可以计算一次地震引起的库仑破裂应力(CFS)变化,并且通过摩擦定律将其与地震发生率联系在一起(“Dietrich公式”);静态触发和动态触发的角色还不是特别清楚;同时,CFS变化的数量级,被称为一朵“乌云”也许并不过分(作为参考,一个大气压是0.1MPa,通常所见的CFS变化的数量级是0.01MPa)。

(八) CFS变化倒是可以解释余震空间分布的绝大部分,同时余震的时间分布(大森-宇津定律)可以

用愈合过程解释其绝大部分。这样,对余震的规律性,应该说已经有了一定的把握能力。

(九) 但同时也了解到,余震看起来并没有什么(已知的、常规测定的)性质与主震明显不同,也许“后震”的说法更符合它的物理实质?一些地震学家甚至主张“算了,……”,于是概率性的去丛(例如ETAS模型)应运而生。

(十) 去掉了余震的主震序列在时间-空间分布上有什么主导性的规律,仍不清楚。所有关于这方面的模型(空区、平静、丛集性、活化、加速、前震、密集-平静、特征地震、时间可预测、震级可预测、周期性、“茂木圈”、 b 值……),都喜忧参半,并且存在向中期“转移”的趋势。地球在不断地“唠叨”,但我们能“听”懂的只是我们知道的東西。

(十一) 开始从物理上思考GR定律的原因(从上世纪五十年代到八十年代这么长时间居然没认真思考这件事,这倒是令人奇怪的),但这种思考不过是把一个问题变成了另外一个问题。同时,GR定律“失效处”,问题仍未解决,近年来变得格外引人注目。

(十二) 开始从“间歇性临界性”和“自组织临界性”的角度思考地震问题。随着时间的推移,“Geller宣判”越发显得极端,但“Keilis-Borok之问”却依旧振聋发聩。一个重要的认识是,简单模型,即使简单到BK模型那样的“玩具模型”,其重要性也需要重新认识。

(十三) 可以构造比较复杂的计算地球动力学模型来模拟地震。另一方面,我们是不是在使用“数值地震预测”的“正确”的方程组,是一个值得反思的问题:从数值天气预报的经验教训上看,一定意义上说,我们的错误也许恰恰是因为我们所用的方程太“正确”了。

(十四) 认识到深源地震的(已知的、常规的)震源参数与浅源地震并没有什么不同。这并不是在赞扬我们的地震观测和解释工作,或者说这个案子的一条线索看来是无可怀疑地中断了。

(十五) 认识到地震目录的“自由度”增加之后，也许可以得到一些新的信息。但目前的认识，仅仅是……也许。

(十六) 在评估地震预测效能的原则上争论各方取得基本共识，却主要是因为并没有很好地考虑效能检验的地震-地球动力学因素，而没能把六七十年代开始的前兆检验的那个重要方向继续推进下去：极端地说，迄今为止还没有一种前兆可以被彻底否定，也没有一种前兆得到了普遍接受的检验。因此，现在仍有很多争论；也因此，这个领域的发展还没有也不可能终结。

其中有一个事情在理论上清楚，但实践上强调不够：从前兆检验的角度，漏报是自然的，但虚报需要尽量减少。其实，这方面的知识尚未得到很好的应用。一个例子是，评估核监测系统的专家，似乎并不太关心统计地震学领域的一些甚至非常有用的工具；另一个例子是，都说震源区结构如何如何，但似乎并未见到有认真进行一番统计显著性论证的工作。

(十七) 基本理论的发展空间还表现在地震的“概率困惑”：你说的“概率”有多大概率与我说的“概率”是同一个意义上的“概率”？有些工作则有意地在回避概率本身而只强调概率的增长（如PI算法），甚至概率在增长（如TIP算法）。

总结一下：为什么六七十年代关于地震预测预报会那么乐观：在如此迅速而重要的理论进展的背景下，任何一种理性思考都不可能导致不乐观的结果。社会原因也不是没有，但，对于科学问题，那毕竟不是基础性的（外因和内因，还不是一回事）。

为什么六七十年代理论上的乐观并没有导致乐观的实际效果：后面四十年出现的更多的认识上的进展（和困惑）表明，六七十年代的重要理论进展，如果能直接“短路”到实践上的飞跃，那反倒是不可理解的了。

海城和唐山地震以来地震预测预报研究没有进展吗：看来至少从量上还不能这么认识。从质的方面，则有一个重要的物理现象需要考虑，就是emergence：

的确，六七十年代的理论都是正确而重要的，但是，对指导地震预测是不够的。

今后的地震预测预报研究应该沿着什么方向走下去：除了已经看到的理论层面的延伸之外，更值得关注的是观测技术的进展。毕竟地震科学是一门观测科学。

三、海城和唐山地震以来出现的新观测技术与新的发现

唐山地震以来，在观测实验方面出现突飞猛进的发展：大地测量进入空间时代，地震观测进入数字时代，地震监测实验进入数据密集（data intensive）时代；地震预测实验进入“野外实验室”时代。

(一) 虽仍不能准确确定很多地震的绝对位置，却可以精确地确定地震的相对位置，尽管精定位目录对地震预测是帮忙还是添乱并不清楚，但把地震丛集“看”得更清楚绝对不是坏事。重要的是，这不是实验室里的模拟地震，而是天然的真实的地震。

(二) 发现“重复地震”具有相当的普遍性，因此可以把Kostrov方法用于很小的范围，或者说可以把类似于GNSS的形变测量放到深部去做。波速比是不是可以对重复地震丛集做？而更重要的是，用波形相似性可以把地震探测的阈值进一步下降。小地震中所包含的信息，永远也不要忽视——解决向中期“转移”的问题，这恐怕是一个重要的途径。

(三) 利用波形相关可以以比较高的精度给出地球结构的变化。这个故事刚刚开始（而且很不容易讲），但值得关注。实际上，六七十年代的一些梦想，现在开始得到实现或检验。

(四) 主动震源开始具有非常好的重复性，这个故事刚刚开始（也没有想象的那么容易讲），但值得关注。原因很简单：不掌握时间变化，怎么做预测？

(五) 发现噪声成像可以给出两台间的格林函数，因此不必再等待地震作为“照亮地球内部的明灯”，这样对震源区结构的认识能力就获得了某种“解放”。

(六) 发现在地震记录的噪声部分可能存在类似

于火山震颤的信号，它们可能与不辐射地震波的“静地震”有关，而“静地震”在大地测量领域已经成为可观测的东西。另一方面，它们的分布特征及其与地震的关系，还要等相当一段时间后才能得到系统的结论。需要什么条件？观测，或者简单地，加密观测。

（七）在“技术空间”里，地震前兆的“搜捕行动”仍在延伸，甚至用上了卫星这样的高科技。但“地震前兆陷阱”依旧存在：要想确认一个地震前兆，就需要大量的观测投入；但在这个地震前兆得到确认之前，大量的观测投入基本上是不可能的。这个博弈论问题的经典解答似乎是，最初并不是为地震前兆观测而设置的观测系统，其运转的效果和可持续性显著地好于专用于地震前兆观测而设置的观测系统；

但是，在“大数据”时代，是否有可能发现新的解答？

四、讨论和结论

我们讨论了三个问题：二十世纪六七十年代地震预测预报研究乐观的理论背景；海城和唐山地震以来与地震预测预报有关的重要科学认识；海城和唐山地震以来与地震预测预报有关的重要技术进步及新的发现。

今后应该怎么做？比画路线图更重要的，是画好地图。十年尺度上地震预测预报的重要科技挑战和重要科技发展议程，一定程度上应是过去几个十年的科技发展议程的延伸。当然，这种延伸肯定不是线性的。

□文 吴忠良