

吴忠良, 王龙, 李丽, 张晓东, 邵志刚, 李营, 孙珂, 车时. 2021. 中国地震科学实验场: 地震预测与系统设计. 地球与行星物理论评, 52(6): 679-683. doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-028

Wu Z L, Wang L, Li L, Zhang X D, Shao Z G, Li Y, Sun K, Che S. 2021. China Seismic Experimental Site (CSES): Earthquake forecast and system design. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(6): 679-683. doi:10.19975/j.dqyxx.2021-028

中国地震科学实验场: 地震预测与系统设计

吴忠良^{1*}, 王 龙¹, 李 丽², 张晓东¹, 邵志刚¹, 李 营¹, 孙 珂¹, 车 时³

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3 中国地震局, 北京 100036

doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-028

中图分类号: P315

文献标识码: A

地震预测是中国地震科学实验场的重要科学议程之一(《中国地震科学实验场科学设计》编写组, 2019). 围绕这个科学议程存在诸多争论, 甚至在一个时期, 地震预测是否仍作为实验场的科学目标, 也有反复. 回避这些争论是不客观的. 这些争论不能、也不可能通过简单化的方式加以解决.

地震科学实验场首先要强调科学. 对地震预测研究的信心只能建立在科学的基础上. 一般认为, 地震预测研究突破的主要障碍, 来自地球内部的不可入性、强地震的非频发性、地震孕育与发生过程的复杂性(例如, 陈运泰, 2009). 本文主要从这三个困难的角度, 讨论实验场的地震预测问题.

1 地球内部的不可入性与实验场

地球内部的不可入性是一个空间维度的问题, 即我们不可能到达地球内部 20~30 km 的深度, 对那里的震源附近的物质结构和性质进行直接测量. 但从地震预测的角度看, 这个问题实际上是时间维度的问题, 即问题的实质不在于我们对地球内部结构的了解需要达到什么程度, 而在于从对地球内部结构的直接或间接的了解出发, 我们究竟有多少能力来把握地震孕育和发生的时间过程.

这个问题, 其实就是著名的“Keilis-Borok 之问”(Keilis-Borok, 1990)¹⁾: 如果地球具有一种“层次性”的结构: 板块、构造块体、断层带……, 那么这种“层次性”的结构, 会“产生”什么样的地震活动? 进一步, 为了了解这种地震活动的规律, 我们需要把握这个系统中的哪些“关键”参数? 再进一步, 我们知道我们对地球的了解是有限的, 那么靠这种有限的了解, 我们究竟能在地震预测这个方向上走多远?

这个问题, 其实是一个重要而基本的物理问题. 在物理中, 把握一个体系的变化, 未必需要了解这个体系的全部细节. 一个极端的例子是, 如果试图预测一杯水是不是会结冰, 我们并不需要了解这杯水中的每个水分子的运动(就是说我们不必了解很多细节), 同样也不需要知道这个杯子的形状和性能(就是说我们并不需要那些没有直接关联的信息). 我们做出预测需要关注的, 是决定水的状态的最重要的参量, 即温度和气压.

在对地球内部有限观测的基础上, 地震预测的“科学能力边界”究竟在哪里, 这是任何一个负责任的地震预测理论都无法回避的问题. 这个问题之基本、之深刻, 已在很大程度上超越了地震研究本身. 不得不承认, 随着 Keilis-Borok 这些“大师级”科学家的退出²⁾, 这种深刻的思考, 一时颇显后继

收稿日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-04-21

*通讯作者: 吴忠良 (1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地震学与地震监测预测研究. E-mail: wuzl@cea-igp.ac.cn

1) 今年是 V. I. Keili-Borok 院士的百年诞辰, 其所创立的俄罗斯科学院地震预报理论与数学地球物理研究所 (IEPT RAS) 计划于 9 月举办第二届俄罗斯全国“地震危险性评估与地震预报的现代方法”国际性科学大会 (Second all-Russian Scientific Conference with International Participation on Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction) 作为纪念.

2) V. I. Keilis-Borok 于 2013 年去世.

乏人；一定意义上可以说，20 世纪关于地震和地震预测的一些基本问题的思考和争论，具有迄今仍未被超越的理论深度。

然而，正如新的科技进展使普通人也有机会在“数据驱动型”科技中有所创新，新的科技进展也为我们提供了回答这一问题的一个简单而重要的手段：试错。地震科学实验场的建设为地震预测理论方法提供了这样一种试错的机会，同时新的数值地震预测方案（石耀霖等，2018）使这一试错得以实现。正因为如此，中国地震科学实验场高度重视通过开放合作方式得到的地震科学“公共模型”（中国地震科学实验场，2020；《中国地震科学实验场数据年报（2019）》编写组，2021；吴忠良等，2021c）。在这些基础上，通过构建实验场区的地球动力学模型，检验预测模型对真实地震活动的把握能力，利用反复试错的结果反过来对观测提出要求（《中国地震科学实验场科学设计》编写组，2019）。

2 地震的非频发性与实验场

地震的非频发性，即我们在时间上与一次强震“相遇”的机会并不多，其实反映了空间维度上的困难——我们近距离地研究一次强震的机会并不多。地震预报实验场早有这样的教训：地震或者发生在实验场“严阵以待”的作业范围之外不远（例如 1996 年的丽江地震），或者发生在实验场的“工作时间窗口”之外不久（例如 2004 年的帕克菲尔德地震）。这些“遗憾”正是这一困难的直接表现，也是地震科学实验场系统设计中不得不面对的一个问题（地震预报发展规划工作组，2010）。与此相应，选择地震活动频繁的地区开展实验，或者把实验场区范围适度扩大都是应对问题的自然的对策（《中国地震科学实验场科学设计》编写组，2019）。而建设不同实验场以“协同分布式实验”（CDEs）的方式（Fraser et al., 2012）进行对比研究，提供了一种有效的辅助对策（Schorlemmer et al., 2018; Wu et al., 2019）。

“解剖地震”是地震预测的基础。实验场区是“解剖地震”的重要场所。对新近发生的地震进行野外科学考察是“解剖地震”的重要手段。地震的非频发性使得这种强化的观测研究更为珍贵。而当我们认真研究以前的若干重要地震的科学考察时，可以发现在时间上仍有很多“文章”可做。一个重

要问题是，很多地震的震后科学考察，如果像过去那样，必须经由建议、设计、论证、批准、组织实施等常规流程，则常常几个星期的时间被浪费（以下是一些近期地震的科考的时间进程：2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震，5 月 4 日科学考察启动会召开；2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震，5 月 16 日科考启动会召开；2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震，10 月 16 日中国地震局科学技术司发文启动系统性科考；2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震，9 月 7 日中国地震局科学技术司发文组织开展地震科考方案制订，科考工作在其后启动），而一些重要地震现象在这段时间内已经因自然的（如断层的“愈合”、震后的大雨和泥石流等）或社会的（如震后的救援和重建）原因变得不可见。另一个重要问题是，事后看一些地震的科考（例如，《芦山地震科学考察》编委会，2015），有些工作，例如发震断裂的考察、主震破裂过程的研究、余震序列的分析、地震破坏的调查等，固然只能等到地震发生之后才能开展，但有些工作，例如震源区深部构造背景探测、地震前的疑似前兆调查等，其实不必等到地震发生也可以开展。

现代应急管理中的“情境—预案”方法给我们以极大的启示。针对可能发生的“目标地震情境”进行地震科考预案的准备，地震发生之后自动启动地震科考，是一个切合实际的解决方案。同时，近年来地震观测研究的发展，使得在地震发生后主要以现有设施、数据等为主，迅速组织“虚拟科考”，也成为现场地震科考的一种重要补充。

重要的是，如果我们使考虑问题的时间轴同时也涵盖“目标地震”发生之前，那么地震科考与震情强化跟踪监测（或地震预测）之间便有条件实现某种平稳“过渡”。就是说，当我们注意到某个地方有可能发生地震时，我们可以以当地的深部构造、地震地质研究为基础，构建“目标”地震的“情境”，然后根据这一“情境”来部署若干观测，同时对既有的“前兆”观测信息的演化情况进行系统考察。这样做，即使不能做出成功的短期预测，地震前后观测的对比也足以深化对地震预测问题的认识提供宝贵的基础资料。

3 地震孕育发生过程的复杂性与实验场

地震孕育发生过程的非线性和由此所导致的复杂性是 20 世纪地震预测问题国际争论的理论源头

之一 (Turcotte, 1992). 现在看来, 争论发生的时候, 争论双方都不同程度地迷失了方向. 从“反对派”的角度, 简单认为“地震动力系统”的“自组织临界性”(SOC) 直接导致了“地震不能预测”的结论 (例如, Geller et al., 1997), 实际上是没有正确地理解这一性质在地震预测中的意义. 从“支持派”的角度, 简单批评各类 SOC 模型对或不完善 (例如, Knopoff, 2000), 实际上也很难说是准确地把握了问题的实质.

现在看来, 地震的 SOC 模型必须根据地震的实际情况进行修改, 这是没有疑义的. 但无论是“自组织临界性”还是“自组织亚临界性”, 总体上、而不是细节上的成立也是毋庸置疑的, 因为 G-R 关系是客观的, 并且地震的 SOC 模型所试图刻画的是地震动力系统的整体性质和“大趋势”. SOC 模型对地震预测的支持, 其实远远超出其支持者和批评者从两个对立的角度所做的估计. 从时间维度看, 如果没有 SOC 这样一种长期“锁定”在稳定与非稳定的“边缘”的状态 (Bak and Tang, 1989), 那么地震研究中“将古论今”的思路便很难成立, 从而地震的统计预测从根本上是不可能的. 从空间维度看, 如果没有 SOC 及其与之相关的“长程关联”, 那么地震前兆异常便不可能出现在离“目标地震”较远的地方, 从而地震的经验预测将会受到极大的影响.

尤其是, 如果没有 SOC, 那么用简单的物理模型甚至“玩具式模型”来模拟地震活动性和单个地震的孕育过程, 从根本上就是不合理的, 从而地震的物理预测 (和数值预测) 的理论基础将全面动摇. 值得注意的是, 克服地球内部的不可入性、强震的非频发性所带来的困难, 其解决问题的钥匙恰恰存在于地震孕育和发生过程的复杂性之中, 因为在地球内部不可入的条件下, 用模型试错 (所用的模型与真实世界相比不得不是“简单”的) 来确认、改进预测能力成为唯一的选择; 在强震发生频率很低、从而经验总结存在天然困难的情况下, 把对模型地震 (序列) 的研究和对真实地震 (序列) 的研究结合起来, 便成为一个有效的研究策略.

地震孕育发生过程的复杂性不是地震预测问题的主要障碍. 地震孕育的特征时间尺度、特征空间尺度与人类活动的特征时间尺度、特征空间尺度之间的反差才是: 一个 7 级地震的震源尺度有几十千米, 其孕震区的范围就更大, 远远超出了人类的平均身高; 一个 7 级地震的复发周期在大陆地区甚至

可以是千年的数量级, 远远超出了人类的生命周期. 这是地震科学的难点, 也是地震科学的“奇伟瑰怪”之处. 越来越清楚的是, 地震预测作为一个“大科学”问题, 涉及至少几代人以合作的方式与地震之间的一种“博弈”, 或者说, 地震预测本身就是一个系统工程 (Jordan, 2006). 这个博弈过程在地震预测研究中的一个表现就是“地震前兆怪圈”: 要证明一个前兆手段是有效的, 必须经过长期的 (最好是密集的) 观测实验检验; 要组织长期的、密集的观测实验, 首先必须得到 (经费、条件、人力等方面的) 必要的支持; 要得到必要的支持, 不得不首先说明这一手段是有效的. 地震科学实验场的任务之一是为开放合作的观测实验提供骨架设施 (backbone)、背景信息 (background)、基准观测 (baseline). 这一“b³任务”可以为打破这个“怪圈”提供重要的、甚至是不可多得的条件.

4 结论和讨论

地震预测问题既是历史上很多实验场建立的初衷 (孙其政和吴书贵, 2007), 也是中国地震科学实验场当前的重要科学议程之一. 在前面关于中国地震科学实验场的系列讨论中, 我们涉及了地震预测的应用问题 (吴忠良等, 2021a) 和实验场地震预测研究的阶段性目标问题 (吴忠良等, 2021b), 作为这一讨论的继续, 本文集中于地震预测问题本身, 试图就更为基本的问题进行讨论, 关注两个最基本的概念: 时间和空间. 与实验场的地震预测有关的系统设计, 恰恰与时间和空间这两个基本概念的考量密切相关.

推进发展地震预测系统工程, 还有若干人的因素 (或者社会的因素) 需要考虑. (1) 地震预测预报研究领域一直存在一个“文化差异”: 如同中文的“龙”完全不同于英文的“dragon”, 中文的“地震预测/预报 (研究)”与英文的“earthquake forecast/prediction (study)”相比, 特别是与“earthquake prediction”相比, 实际上包含了更为丰富的内容. 这就回答了国际交流合作中一个颇为令人困惑的问题: 为什么看上去“只有”中国地震学家坚持和强调地震预测预报研究, 而多数国际同行似乎“很少”关注地震预测预报. 这一困惑, 一定意义上也是中国地震科学实验场是否应坚持将地震预测预报作为自己的科学目标的争论和反复的重要原因. (2) 地震预测虽然目前水平还不高, 但也

绝不是“百无一用”，只是我们现在还没有用好。事实上，应急管理体系和能力现代化给地震预测带来巨大的发展空间。与此相应，科学地定义地震预测的进步，是地震预测发展规划的基本问题。在传统的“长中短临”预测模式中，还需要考虑不同的空间尺度，形成“科技产品矩阵”。中国地震科学实验场可以在这方面先行一步。换句话说，实验场的“沿途下蛋”功能绝不仅仅是实验场地震预测研究的“副产品”。（3）地震预测是一个复杂的科学问题，基础研究成果转化成业务应用不可能一步到位。实践上，需要研究、形成技术成熟度水平不断提升、科技产品持续更新的机制。在其他领域，这一机制已有很多经验。在中国地震科学实验场尝试和完善这一机制，本身就是实验场的一项重要贡献。（4）21 世纪以来，中国地震科技的资源版图、人才版图已经十分接近欧美的情况。在现代社会、现代技术条件下，专群结合、群测群防有条件呈现新的形式、发挥更大的作用。地震科学实验场是在这一形势下推进形成地震预测核心科学技术攻关新型举国体制的理想平台，这是现阶段中国地震科学实验场的历史使命，也是中国地震科学实验场一个值得高度重视的发展机遇。

References

- Bak P, Tang C. 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 94: 15635-15637.
- Chen Y T. 2009. Earthquake prediction: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Science*, 39: 1633-1658 (in Chinese).
- China Seismic Experimental Site. 2020. Progress Report of China Seismic Experimental Site (2019)[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- China Seismic Experimental Site. 2021. Annual Data Report of China Seismic Experimental Site (2019)[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Fraser L H, Henry H A L, Carlyle C N, et al. 2012. Coordinated distributed experiments: An emerging tool for testing global hypotheses in ecology and environmental science[J]. *Frontier in Ecology and Environment Science*, 11: 147-155.
- Geller R, Jackson D, Kagan Y, Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted[J]. *Science*, 275: 1616-1617.
- Jordan T H. 2006. Earthquake system science in southern California[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, The University of Tokyo*, 81: 211-219.
- Keilis-Borok V I. 1990. The lithosphere of the Earth as a nonlinear system with implications for earthquake prediction[J]. *Reviews of Geophysics*, 28: 19-34.
- Knopoff L. 2000. The magnitude distribution of declustered earthquakes in Southern California[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97: 11880-11884.
- Schorlemmer D, Werner M J, Marzocchi W, et al. 2018. The laboratory for the study of earthquake predictability: Achievements and priorities[J]. *Seismological Research Letters*, 89: 1305-1313.
- Shi Y L, Sun Y Q, Luo G, et al. 2018. Roadmap for earthquake numerical forecasting in China—Reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 63: 1865-1881 (in Chinese).
- Sun Q Z, Wu S G. 2007. Development of the Earthquake Monitoring and Prediction in China during 1966~2006[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Team of the Field Investigation of the Lushan Earthquake. 2015. Field Investigation of the Lushan Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Turcotte D L. 1992. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Working Group for the Long-term Plan of Earthquake Forecast and Prediction (2010~2020), China Earthquake Administration. 2010. Earthquake prediction experiment site: Design, performance evaluation, and implementation[J]. *Earthquake Research in China*, 26: 1-13 (in Chinese).
- Working Group on the Scientific Challenges Report, China Seismic Experimental Site. 2019. China Seismic Experimental Site: Scientific Challenges[M]. Beijing: China Standard Press (in Chinese).
- Wu Z L, Zhang Y, Li J W. 2019. Coordinated distributed experiments (CDEs) applied to earthquake forecast test sites[M]//Li Y-G. Earthquake and Disaster Risk: Decade Retrospective of the Wenchuan Earthquake. Singapore: Higher Education Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd., 107-115.
- Wu Z L, Ding Z F, Zhang X D, et al. 2021a. China Seismic Experimental Site: Retrospective and prospective[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(2): 234-238 (in Chinese).
- Wu Z L, Wang L, Che S, et al. 2021b. China Seismic Experimental Site (CSES): Planning and test[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(3): 348-352 (in Chinese).
- Wu Z L, Li Q, Zhang X D, et al. 2021c. China Seismic Experimental Site (CSES): Start and trial[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(6): 675-678 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 39: 1633-1658.

- 地震预报发展规划工作组. 2010. 地震预报实验场: 科学问题与科学目标[J]. *中国地震*, 26: 1-13.
- 《芦山地震科学考察》编委会. 2015. 芦山地震科学考察 [M]. 北京: 地震出版社.
- 石耀霖, 孙云强, 罗纲, 等. 2018. 关于我国地震数值预报路线图的设想——汶川地震十周年反思[J]. *科学通报*, 63: 1865-1881.
- 孙其政, 吴书贵. 2007. 中国地震监测预报四十年 [M]. 北京: 地震出版社.
- 吴忠良, 丁志峰, 张晓东, 等. 2021a. 中国地震科学实验场: 历史与未来[J]. *地球与行星物理论评*, 52(2): 234-238.
- 吴忠良, 王龙, 车时, 等. 2021b. 中国地震科学实验场: 认识与实践[J]. *地球与行星物理论评*, 52(3): 348-352.
- 吴忠良, 李茜, 张晓东, 等. 2021c. 中国地震科学实验场: 起步与尝试[J]. *地球与行星物理论评*, 52(6): 675-678.
- 《中国地震科学实验场科学设计》编写组. 2019. 中国地震科学实验场科学设计 [M]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国地震科学实验场. 2020. 中国地震科学实验场工作进展 [M]. 北京: 地震出版社.
- 《中国地震科学实验场数据年报 (2019)》编写组. 2021. 中国地震科学实验场 2019 年度数据年报 [M]. 北京: 地震出版社.