

国际地震预测研究的一些情况*

关于地震预测研究的基本情况和进展,国内外都已有较为系统的评述和介绍¹。这里主要围绕20世纪60年代以来国外地震预测研究方面的一些重要项目和重要事件,进行简要的梳理。

一、日本的地震预测研究计划

日本的地震预测研究据信可追溯到1891年²,这一年发生了浓尾8.0级地震,震后设置的“震灾预防调查会”,以地震预测的可行性与建筑物抗震性能为主要研究对象开展工作。1923年关东大地震后,“震灾预防调查会”的工作由新成立的东京大学地震研究所继承下来。1965年,日本提出“地震预测——现状及其推进计划”,被称为日本地震预测的“蓝图”。该计划的执行,总体上可分为三个阶段。第一阶段:1965至1998年,把掌握和探究地震前的各种前兆和进行临震预测作为主要目标³,计划的实施促进了日本地壳、地幔运动监测系统的建立完善。但临震预测没有成功,主要原因是未能捕获到有价值的前兆。第二

阶段:1999至2008年,以研究地震发生前的物理现象为目的,强调揭示地震从孕育到发生的全过程,基于地壳和地幔的详细结构和运动状态,发展数值地震预测系统,开展日本列岛及周边地区十年尺度的强震预测,同时预测强震发生时强地面运动的分布。第三阶段:2009年以来,开始了一个新的地震与火山喷发综合预测计划,更强调在实时监测与地壳、地幔动力学建模的基础上,发展地震预测系统⁴。这一阶段,火山喷发预测成为地震预测研究的重要组成部分。日本地震预测研究计划相关的主要机构,包括日本地震学会、地震研究促进会,都在官方立场上表示他们既不可能也不想做短期地震预测。1995年神户地震后,日本决定放弃短期地震预测,这一立场在2011年东日本9级特大地震后得到进一步加强⁵。

20世纪以来,支撑日本地震预测研究的观测设施基本建设突飞猛进。其现有主要观测网络如下:1300个观测站组成的GNSS连续观测网GeoNet,1000个观测站

* 编写人员(按姓氏拼音排序):车时、戴娅琼、付广裕、邵志刚、孙珂、王伟君、王武星、吴忠良、闫坤、张学民、张晓东、赵翠萍、周晓成;报告评审:张国民。

1 Kanamori, H., 2003. Chapter 72: Earthquake prediction: an overview. In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C. and Kisslinger, C. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. London: Academic Press, 1205-1216. 陈运泰, 2009. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学(D, 地球科学), 39: 1633-1658. Hough, S., 2010. Predicting the Unpredictable: The Tumultuous Science of Earthquake Prediction. Princeton: Princeton University Press. Jordan, T. H., Chen, Y. T., Gasparini, P., Madariaga, R., Main, I., Marzocchi, W., Papadopoulos, G., Sobolev, G., Yamaoka, K. and Zschau, J., 2011. Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization. Annals of Geophysics, 54(4), doi:10.4401/ag-5350.

2 日本地震学会地震预测研讨委员会编, 许晏平译, 2009. 地震预测的科学(二). 世界地震译丛, 第二期: 65~79.

3 日本地震学会地震预测研讨委员会编, 许晏平译, 2009. 地震预测的科学(三). 世界地震译丛, 第三期: 59~81.

4 平田直, 2009. 日本の地震予知研究 - 地震予知のための観測研究計画 -, 地震, 61(2), 特集号, S592-S601.

5 Uyeda, S., 2015. Current affairs in earthquake prediction in Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 432-434.

组成的全国强震观测网 K-net, 800 个观测站组成的高灵敏度地震观测网 Hi-net, 700 个观测站组成的基础强震观测网 KIK-net (每个台站两台强震仪, 分别装在地表和井下), 84 个观测站组成的宽频带地震观测网 F-net, 还有正在建设中的 150 个观测站组成的海沟海底地震海啸观测网 S-net, 主要进行海底地震和海啸观测, 该网络的海底光缆总长约 5500km。基于上述密集观测, 日本地震学家在认识地震方面 (如低频地震研究方面) 取得长足进展。

日本地处太平洋板块、欧亚板块、北美板块和菲律宾海板块的交汇处, 强震频发, 不仅有大量的海沟型地震 (如 1995 年阪神地震、2011 年东日本特大地震), 而且有一定数量的板内地震 (如 2007 年新潟地震)。其中东海地区地处上述几个板块的连接处, 强震反复发生, 东海和东南海地震的发生间隔大致是 100~150 年, 自 1854 年安政东海地震之后, 东海地区一直未发生 7 级以上强震。据此, 日本地震学家在 20 世纪 60 年代就认为东海地区极有可能面临下一次地震的危险, 预计最有可能在东海骏河湾发生 8 级左右巨大地震, 并强化了地震和多学科前兆监测, 研究了短临预测指标, 成立了由一流科学家组成的东海地震判定会, 但地震迟迟没有发生。2009 年, 日本著名学者平田直等撰文指出, 未来 30 年内东京附近发生 7 级以上强震的概率为 70%, 引发巨大反响⁶。为了预测东海大地震, 在东海地区布设了由密集的地震仪 (包括海底地震仪)、应变仪 (体应变仪、三分量应变仪)、倾斜仪、伸缩仪、验潮仪、地下水水位仪、GNSS 站、重力站等构成的高灵敏度观测网, 力争捕捉东海大地震的前兆信息。该地 GNSS 站间距约为 15km, Hi-net 站间距约为 20km, 同时强化重力观测 (每年两期重力联合观测)。围绕东海地震, 在基础研究、观测体制、连续观测、异常标准、应对预案、信息共享、法律法规等方面均做出巨大努力⁷。迄今为止, 东海地区并没有发生“预期的”大地震, 但在其南部的大阪、神户发生了 1995 年 1 月 17 日 7.6 级大地震, 死亡 5000 余人, 损失 2000 亿美元; 在其北部发生了 2011 年 3 月 11 日东日本特大地震及海啸, 造成数万人伤亡。

二、苏联的地震预测实验场

地震前兆的观测和识别, 是实现短期预测必不可少的重要一环, 但观测项目的选择、测点的部署都应与地震区划和对孕震过程的理论认识相协调, 以收到最佳效果。这一思想集中体现于苏联建立的各种类型的实验场: 既有单

一学科和单一方法的实验场, 如研究野生动物在空气压力、地下水气体和化学成分变化时的行为反应的生物学实验场, 也有综合观测实验场, 以多种前兆综合观测和发展综合预测方法为主要目的, 如中亚地区的加尔姆综合实验场、远东地区的堪察加实验场等。苏联曾经有各类实验场达 35 个。一些重要的前兆都是首先通过实验场的观测研究发现的⁸。苏联解体后, 这些实验场大多转入半运行状态。

(一) 塔吉克加尔姆实验场

塔吉克加尔姆实验场于 1955 年正式建成, 重点监测区域为 150km × 100km 范围, 主要目标是研究这个地区强震发生的原因, 进而在全面研究地壳内发生的地质、地球物理过程的基础上解决地震预测问题。主要观测手段包括地震学、地形变、地下水、土氦、地声、地电、地磁、生物异常等。该实验场总结了地震空区特征、波速变化特征和应力变化特征; 分析了实验场的局部形变、地表倾斜和地下水位变化特征。在实验场观测期间, 实验区内发生了 28 次 $M > 4.3$ 地震, 有 7% 的地震前在局部形变和倾斜记录上显示出临震前兆异常。实验场还发现观测区内的形变和倾斜资料具有近震和远震的临震前兆和中期前兆信息, 而水位变化只具有近震的前兆信息。

(二) 俄罗斯勘察加实验场

俄罗斯勘察加实验场于 1961 年建成, 重点监测区域为 300km × 200km 范围, 主要目的是研究该区的强震活动特征, 捕捉震前异常。主要观测手段包括地震观测、形变观测、水文地质观测、地热观测等。该实验场总结了与堪察加地震活动有关的一些大地电流异常效应; 依据太平洋西北部边缘地震特征的研究, 把大洋边缘的地震活动当作一个整体来认识; 分析了该区“视应力”水平与地震断层的关系。

(三) 哈萨克阿拉木图实验场

哈萨克阿拉木图实验场于 1966 年建成, 重点监测区域为 200km × 100km 范围, 主要目的是捕捉地震前兆。主要观测手段包括地震观测、地壳形变观测、地倾斜观测、地下水观测、地磁观测、地电观测、动物行为观测等。该实验场从不同震级的地震数比、震源深度、震源机制解的应力轴方位角变化等角度, 研究了弱震活动性参数的中期异常特征; 分析了北天山地区地磁变化的长期、季节、短期特征; 利用形变与倾斜资料研究了该区地壳

6 平田直·酒井慎一·佐藤比吕志·佐竹健治·纈纈一起, 2009. 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等」の概要, 东京大学地震研究所集報, 84: 41-56.

7 Mogi, K., 2004. Two grave issues concerning the expected Tokai Earthquake. Earth, Planets and Space, 56: li-lxvi. doi: 10.1186/BF03353074.

8 朱传镇, 1991. 日、美、苏地震预报研究的主要进展. 地震地磁观测与研究, 12(5): 37-47.

形变的性质；发现卡普恰克水库的存在减缓了阿拉木图地区的地震活动性。

(四) 吉尔吉斯北天山实验场

吉尔吉斯北天山实验场于 1968 年建成，重点监测区域为 300km × 200km 范围。实验场的基本目标是研究这个地区的强震活动特征，捕捉震前异常。主要观测手段包括地震观测、地磁观测、地电观测、地球化学观测、大地测量等。该实验场发现，实验区的地震具有周期性特征，表现为活动期和相对平静期的交替；强震具有沿北天山地震带迁移的特点，表现为地震震中从某一中心向东部迁移然后回退的特征。

苏联在广泛开展地震预测实验场研究的同时，也注重地震过程及其前兆的机理研究。在 1975 年以苏联科学院大地物理研究所 (IPE) 名义提出了孕震过程的裂隙扩展 - 雪崩不稳定模式 (简称 IPE 模式)，将震前观测到的地震活动性异常、地震波波速变化、地形变、地电阻率、地下流体等多学科前兆作统一的分析解释⁹。

三、地震预测实验：TDP 计划，帕克菲尔德地震预测实验场，PRENLAB 计划，iSTEP 计划

(一) TDP 计划¹⁰

土耳其地震实验场于 1979 年建成，主要观测手段集中在北安纳托利亚断层西部。实验场最初的目的是为了检验“扩容假说”，1984 年后通过“多参数观测”项目实施地震预测实验场计划，主要观测手段包括地震观测、地磁观测、土壤氡和泉水氡观测、大地测量、重力观测及多参数观测台。1991 年后，实验场基本停止运行。在实验场停止运行后的 1999 年，在实验场区域发生了伊兹密特 7.8 级地震。对地震区的库仑破裂应力 (CFS) 的计算结果正确地指出了地震的发生地点和强余震的地点。

(二) 帕克菲尔德地震预测实验场¹¹

帕克菲尔德地震预测实验场于 1985 年建成，范围约 60km × 60km，其中台站密集区域为沿断层带分布的

35km × 15km。主要进行地震观测、连续应变观测、蠕变观测、电磁观测、水氡观测、电阻率观测、声发射观测等，目的是捕捉 1988 — 1993 年间据信可能在实验场发生的 6 级左右地震的前兆异常变化。由于预测的地震没有如期而至，1994 年实验场“预报窗”宣布关闭，但实验场绝大部分仪器依然继续观测。2004 年实验场区发生了一次 6.2 级地震，实验场获得了震前、震时和震后十分有价值的观测资料。

美国地震预测研究中，一直十分注重地震预测物理基础的实验和理论研究。1973 年 C. H. Scholz 等在一系列岩石物理实验的基础上，提出了地震孕育发生的岩体膨胀 - 流体扩散模式 (即 DD 模式)，该模式给出了地震孕育发生过程中地震波速、地壳形变、电阻率、地下流体、氡射气等多种前兆的综合成因机理，对地震预测及多学科前兆的物理基础探索给出了有益的启示¹²。

(三) PRENLAB 计划¹³

冰岛地震预测实验场于 1988 年建成，包括南北两段，各形成 100km × 100km 的重点监测区。主要监测手段包括地震观测、GNSS 观测、SAR 观测、钻孔测量等。地震台网包括 52 个宽频带地震台站和 30 个连续 GNSS 台站。该实验场利用剪切波分裂对 1998 年 11 月 13 日发生的 5 级地震进行了成功的 (但有很大争议的) “应力预测”。

(四) iSTEP 计划¹⁴

台湾地区地震前兆综合研究 (Integrated Search for Taiwan Earthquake Precursors, iSTEP) 利用综合观测方法研究地震前兆。1999 年 9 月 21 日集集 7.6 级地震后，计划一期 (iSTEP-1, 2002-2006) 启动，主要包括 5 个专题，涉及地震学前兆异常变化研究、地磁场和重力场异常变化研究、地表形变异常变化研究、电离层电子密度异常研究及其他有统计意义的前兆性异常变化研究。一期计划完成后，又实施了一系列后续研究计划 (iSTEP-2: 2006-2012, iSTEP-3: 2012-2016, iSTEP-4: 2016-2020)。

9 Мячкин, В.И., Костров, Б.Н., Соболев, Г.А., Шамина, О.Г., 1975. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика Очага Землетрясения. М.: Наука, С.6-29.

10 Evans, R., Beamish, D., Crampin, S. and Ucer, S. B., 1987. The Turkish dilatancy project (TDP3): multidisciplinary studies of a potential earthquake source region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 91: 265-286.

11 Bakun, W. H. and Lindh, A. G., 1985. The Parkfield, California, earthquake prediction experiment. *Science*, 229: 619-624. Roeloffs, E. and Langbein, L., 1994. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Review of Geophysics*, 32: 315-336.

12 Scholz, C. H., Sykes, L.R., Aggarwal, Y.P., 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*, 181: 803-810.

13 Stefánsson, R., Bergerat, F., Bonafede, M., Boovarsson, R., Crampin, S., Einarsson, P., Feigl, K. L., Guomundsson, A., Roth, F., Sigmundsson, F. and Slunga, R., 1998. PRENLAB Final Report. Reykjavik; Stefánsson, R., Bergerat, F., Bonafede, M., Boovarsson, R., Crampin, S., Feigl, K. L., Roth, F., Sigmundsson, F. and Slunga, R., 2001. PRENLAB-TWO - final report. Veourstofa Islands Report.

14 Tsai, Y.-B., Liu, J.-Y., Shin, T.-C., Yen, H.-Y. and Chen, C.-H., 2018. Multidisciplinary earthquake precursor studies in Taiwan: A review and future prospects. In: Ouzounov, D., Pulnits, S., Hattori, K. and Taylor, P. (Eds.), *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Geophysical Monograph 234, Washington D. C.: American Geophysical Union, John Wiley & Sons, Inc.

四、地震前兆效能的国际评估, VAN 方法的争论

(一) 地震前兆效能评估

国际地震学与地球内部物理学协会 (IASPEI) 一直重视地震预测研究, 20 世纪 90 年代以来, 曾于 1991 年¹⁵ 和 1997 年¹⁶ 通过决议, 支持国际合作地震预测实验场项目。2005 年¹⁷ 通过决议, 支持监测地球介质动态变化的主动源监测工作。2009 年¹⁸ 通过决议, 支持地震预测研究和地震预测方法的科学检验。

IASPEI 地震预报委员会于 1989 年 2 月向全球征集可能的地震前兆震例, 1991 年发布了第一轮评估结果¹⁹。在 28 个前兆提名中, 涉及地壳形变、地震活动性、电磁现象、地震波传播、地球化学和气象等 6 个方面, 但仅有 3 个入选“显著前兆初步列表”(Preliminary List of Significant Precursors), 5 个无法确定, 其余 20 个被否定。1997 年发布了第二轮评估结果²⁰: 在 10 个提名中, 有 1 个在第一轮评估过, 其余 9 个中, 有 2 个入选, 2 个无法确定, 5 个被否定。两轮评估共选出 5 个“显著前兆”, 其中 3 个与地震活动性有关, 即主震前几个月至几小时的前震活动 (foreshock, 1975 年中国海城地震震例)、主震前几年至数月的早期地震活动 (preshock, 1988 年澳大利亚 Tennant Creek 地震震例)、强余震前的平静 (日本的多个震例); 1 个和地球化学特征有关 (1978 年日本 Izu-Oshima-Kinkai 地震前地下水氡聚集和温度下降); 1 个和地壳形变有关 (1985 年美国加州 Kettleman Hills 地震前地下水上升)。值得指出的是, 尽管两轮评估谨慎地使用了“显著”这样的统计术语, 这种基于事后总结、震例分析的“前兆”评估, 其限度是明显的。这一问题, 在后来更为系统的评估计划 (如 CSEP 计划) 中得到修正。

(二) VAN 方法的争论

VAN 方法因希腊三位物理学家 P.Varotsos, K.Alexopoulos 和 K.Nomicos 在 1981 年之后共同发表的一系列研究文章而得名。他们的研究称百公里内 5 级以上地震的预测成功率超过 70% 而在 20 世纪 80 ~ 90 年代被普遍关注。

地震电信号 (SES) 及其选择性特征是 VAN 的基本方法。在他们的地电场观测中应用非极化电极, 在单个台站同一方向布设多对长短不一的电极距, 从数百米至数公里长, 并从电信号传播的物理学角度出发给出了识别噪声、确定地震电信号的准则。地震电信号的机理解释主要包括与应力相关的矿物岩石的压电效应、磁铁矿中的热电效应、与地下水相关的动电效应等。

VAN 方法受到来自世界各地科学家的检验和批评, 批评的主要意见集中在预测统计过程中所使用的地震目录错误、SES 可能是噪声、SES 传播机理与实测结果不吻合、预测成功率不像报道的那么高、电磁兼容性问题等方面。为此, 《地球物理研究通讯》(Geophysical Research Letters) 杂志于 1996 年出版了一期专刊, 发表 VAN 引发的各种争议及讨论²¹。在伦敦召开的“地震预测方法检验讨论会”和会后在《国际地球物理杂志》(Geophysical Journal International) 上出版的专刊²², 很大程度上与围绕 VAN 方法的争论有直接关系。

五、世纪之交地震预测问题的国际争论

部分地与围绕 VAN 地震预测方法的争论相关, 1997 年 R. Geller 等在《科学》(Science) 杂志发表题为《地震不能预测》的评论文章, M. Wyss 随即在《科学》杂志发文与之争论²³。1999 年 2 月, 《自然》(Nature) 杂志组织了关于这一问题的网上科学辩论²⁴; 由此, 围绕地震预测的可能性问题的争论引起广泛关注。地震活动是不是具有自组织临界性 (SOC)、地震前兆是否可靠, 是这场争论中涉及的两个重要科学问题²⁵。

关于地震预测问题的争论存在于地震预测研究的整个过程。1995 年 2 月, 美国国家科学院 (NAS) 就主办了“地震预测: 科学的挑战”专题讨论会。1996 年 4 月 L. Knopoff 等在《美国国家科学院院刊》(PNAS) 组织专刊, Knopoff 本人撰写了序言²⁶。专刊收录的论文大致分为两类: 一类是关于捕捉前兆进行地震预测研究的, 另一类是关于断层破裂模型研究的, 涵盖了对地震预测从悲观到

15 ftp://ftp.iaspei.org/pub/resolutions/resolutions_1991_vienna.pdf

16 ftp://ftp.iaspei.org/pub/resolutions/resolutions_1997_thessaloniki.pdf

17 ftp://ftp.iaspei.org/pub/resolutions/resolutions_2005_santiago.pdf

18 ftp://ftp.iaspei.org/pub/resolutions/resolutions_2009_cape_town.pdf

19 Wyss, M. (Ed.), 1991. Evaluation of Proposed Earthquake Precursors. Washington, DC: American Geophysical Union.

20 Wyss, M. and Dmowska, R. (Eds.), 1997. Earthquake Prediction: State of the Art. Boston: Birkhäuser.

21 Geller, R. J., 1996. Debate on evaluation of the VAN method: Editor's introduction. Geophysical Research Letters, 23: 1291-1293.

22 Evans, R., 1997. Assessment of schemes for earthquake prediction: Editor's introduction. Geophysical Journal International, 131: 413-420.

23 Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y. and Mulargia, F., 1997. Earthquake cannot be predicted. Science, 275: 1616-1617. Wyss, M., 1997. Cannot earthquakes be predicted? Science, 278: 487-488.

24 <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/>

25 Geller, R. J., 1997. Earthquake prediction: a critical review. Geophysical Journal International, 131: 425-450.

26 Knopoff, L., 1996. Earthquake prediction: the scientific challenge. Proceedings of the National Academies of Sciences, USA, 93: 3719-3720.

乐观的不同观点。为纪念创刊 125 周年,《科学》杂志于 2005 年 7 月提出了 125 个最具挑战性的科学问题,其中就包括“是否存在有助于预测的地震前兆”²⁷。

20 世纪 80 年代以来,非线性动力学的发展给很多领域提供了新的研究方法和新的视角,地震预测问题的国际争论很大程度上与这一背景有关。在相关领域,一个值得注意的系列活动是国际理论物理中心(The Abdus Salam ICTP)²⁸在 80 至 90 年代举办的两年一次的“非线性动力学与地震预报国际研讨班”(International Workshop on Nonlinear Dynamics and Earthquake Prediction)。其中发挥重要作用的机构之一,是苏联科学院(俄罗斯科学院)地震预报理论与数学地球物理国际研究所(International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics)。其所发展的用模式识别技术进行强震中期预测的方法,从 90 年代后开始转入“向前预测检验”阶段。重视“向前预测检验”,正是世纪之交关于地震预测问题的国际争论的一个重要成果。

20 世纪末关于地震预测的国际争论再次引起对地震预测相关的统计问题的重视。2010 年 9 月,“统计地震分析在线资源联盟(CORSSA)”²⁹上线,主要涵盖 6 个主题:概要性的背景介绍;地震活动的基本特征;地震分析用统计学基础;地震目录及评估;地震活动性分析的模型和技术;地震预测理论和相关的假设检验。

六、地震预测的社会影响: Brady 事件, Browning 事件, L'Aquila 事件

(一) Brady 事件³⁰: 地震预测的国际问题

B. T. Brady 是美国矿务局(USBM)的物理学家,在 20 世纪 70 年代发表了 4 篇系列文章,称观测到一种岩石破裂现象,能用于地震预测。美国地质调查局(USGS)的地球物理学家 W. Spence 与其合作开展了部分研究。根据对 1974 年 11 月 9 日秘鲁地震的研究,他们认为该地区具备大地震发生的条件。1979 年 Brady 和 Spence 在所参加的多次与防震减灾工作相关的会议上阐述了明确的预测意见,认为 1980 年 9 月开始至 1981 年 6 月的 9 个月期间将发生 13 次前震;1981 年 6 月将发生的主震震级可达 9.8,破裂将从利马南海岸向南延伸到智利;1982 年 4 月会发生 8.7 级余震。由于秘鲁是一个历史上地震多发的

国家,这项预测引起了秘鲁人的恐慌。USGS 大部分专家并不认同 Brady 的预测,但也无法直接否定 Brady 的理论。秘鲁方面,地震学家则在 1979 年大选后民主政府取代军人政府的形势下,利用这个机会试图更新地震台网,加强同美国的科技合作。

1981 年 1 月 26 日,美国国家地震预报评估委员会(NEPEC)召集会议对 Brady 的预测进行评估。这次会议引起了广泛的公众关注。虽然没有绝对的把握在预测的时间一定不会发生大地震,但是 NEPEC 的评审专家认为地震发生的概率非常低,不建议秘鲁采取任何特殊措施响应 Brady 的预测。虽然 NEPEC 的决议减少了一些秘鲁人对大地震的忧虑,但是仍有很多人相信破坏性地震会在不久的将来发生。1981 年 4 月 18—20 日期间秘鲁发生了地震,人们更相信将有大地震发生。1981 年 7 月 9 日,Brady 给秘鲁地震学家写信,取消了预测意见。

(二) Browning 事件³¹: 地震预测与应急管理之间的关系问题

Iben Browning 并不是地震学家。他于 1985 年开始进行地震预测,认为在密苏里州新马德里有 50% 的概率会发生 6.5~7.5 级地震,时间大致在 1990 年 12 月 2—3 日,误差在前后 2 天内,根据是固体地球上周期为 179 年的最大潮汐引力会在高构造应力地区触发地震。Browning 预测的密苏里州新马德里地区是一个历史上曾有三大地震的记录“稳定内陆区”,这一地区一直是地震研究的重点区域,发生 7 级地震未必不可能。但地震学家并不认为 Browning 的预测是有根据的。另一方面,媒体、应急管理人员和公众却很相信这一预测。1989 年 10 月 17 日发生的 Loma Prieta 地震造成了严重的灾害,被媒体大幅报道。而 Browning 声称他在地震的 10 天前就预测了这一事件。他还声称曾对 1970 至 1980 年的几次地震和火山喷发都进行了成功的预测。这些言论为媒体所广泛关注和报道。

1990 年 9 月 20 日,NEPEC 决定对 Browning 的结果进行评估。评估否定了其预测意见。但媒体报道继续发酵。联邦紧急事务管理局(FEMA)评估了新马德里大地震的风险,引起应急管理人员的重视。1990 年 9 月 26 日,在新马德里地震带附近发生了 4.7 级地震,更加引发了公众的恐慌。NEPEC 随后给出了一个评估报告,表明 Browning 的

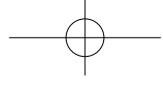
27 <http://www.sciencemag.org/site/feature/misc/webfeat/125th/>

28 <https://www.ictp.it/about-ictp.aspx>

29 <http://www.corssa.org/>

30 Olson, R. S., Podesta, B. and Nigg, J. M., 1989. The Politics of Earthquake Prediction. Princeton: Princeton University Press.

31 Spence, W., Herrmann, R. B., Johnston, A. C. and Reagor, G., 1993. Response to Iben Browning's Prediction of a 1990 New Madrid, Missouri, Earthquake. USGS circular 1083.



预测是无效的。但是公众总感觉是科学家“真的知道一些信息”，却“对公众保密”。很多学校都暂时关闭，即使不关闭出勤率也非常低。12月3日当天，密苏里应急准备办公室全力准备应对危机。各个家庭都进行了地震演习，如何缓解地震损失的宣传册大量发放。密苏里甚至有一种类似狂欢的气氛，来了很多好奇的媒体和游客。第三天，并没有出现地震活动，人们也逐渐失去了兴趣。

1993年，USGS对这一事件做了详细的总结，在总结报告中梳理了此次事件的启示，包括今后再面临大的自然灾害的预测时，不管预测是否有效，当它吸引了持续升级的媒体报道时，出版机构都应该提醒专门的科研管理机构对预测意见进行快速响应和评估。媒体和应急管理体系需要可靠和全面的信息，需要对预测意见进行核实，应急准备信息的发布必须经过预测评估的认可等。

（三）L'Aquila事件³²：地震预测的法律问题

2009年4月6日凌晨，意大利L'Aquila地区发生6.3级强震，导致309人丧生。2010年6月，时任意大利国家地球物理与火山学研究所（INGV）所长的Enzo Boschi在内的6位科学家和1位政府官员由于在地震前“未能予以民众充分的警告”而被L'Aquila检方指控犯有“过失杀人”罪。这一事件引发了全球性的关注和争论。2010年6月15日，意大利8位地震学家起草给意大利总统的公开信，到6月18日即有各国的3990多位地震学家签名。一些国际组织也发表声明，表达对此事的立场。在这些声明的起草过程中，争论很大。

L'Aquila所在地区为意大利地震频发的地区之一。L'Aquila地震活动从2009年1月开始增强，引起民众的关注。并不是地震学家的G. Giuliani甚至分别在2009年2月18日和3月30日预测Roio和Sulmona两个地方有可能发生地震。INGV和意大利民防局（DPC）试图平息相关的焦虑。3月31日，召开了科学家和官员的联席会议。会议结论“没有理由说小地震序列可被认为是一次强震的前兆”（“there is no reason to say that the sequence of events of low magnitude can be considered precursory to a strong event”）被行政部门和媒体简单化地解读为“不会发生强震”。一些原定在室外避震的人因为这一说法而回到室内，结果在地震中遇难。

地震后，意大利当局（President of the Council of

Ministers）于4月成立了一个国际地震预测委员会（International Commission on Earthquake Forecasting, ICEF），对相关情况进行调查。2009年10月2日，ICEF发布《可操作的地震预测：知识现状与应用指南》（“Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization”）的报告。报告全面评述了地震预测预报研究的国际动态，但对L'Aquila地震本身未置一词。报告发表后也引起争议。2011年，国际地震学与地球内部物理学协会（IASPEI）在争论中通过决议³³，支持ICEF报告中关于地震预测研究的内容，但对诉讼本身未置一词。

2010年6月3日，L'Aquila检察官办公室（Prosecutor's office）以过失杀人罪对地震一周前召开的联席会议的参加成员提起诉讼。2012年10月22日，一审判决被告有罪。2014年10月，被告向法院提出上诉。11月10日，意大利上诉法院法官判决6位科学家无罪，并将1位政府官员的刑期减至2年。2015年3月15日，检察院正式向最高法院提起三审程序。

七、南加州地震中心（SCEC），加州地震破裂预测统一模型（UCERF），地震可预测性研究国际合作计划（CSEP）

（一）南加州地震中心（SCEC）

南加州地震中心（SCEC）³⁴成立于1991年，由美国国家科学基金会（NSF）和美国地质调查局（USGS）联合资助，共经历了5个发展阶段（SCEC1, 1991—2001；SCEC2, 2002—2006；SCEC3, 2007—2011；SCEC4, 2012—2017；SCEC5, 2017—2022），主要任务是汇集南加州和其他地区的地震数据；整合基于物理解释和综合性地震现象的信息；加强社会和公众对地震知识的了解以减轻地震灾害风险和提高抗灾能力。SCEC关注的与地震预测直接相关的关键物理问题，一是从大尺度（板块）到小尺度（断层带）的应力转移；二是应力加载背景下的断层相互作用；三是地震滑动过程中断层滑动阻力（摩擦等）的变化；四是断层带和断层系统的结构与演化；五是瞬态形变（或“静地震”）的成因和影响。此外，SCEC还把地震强地面运动的模拟作为一个重要方向，从而使地震预测与防震减灾之间的关系更为直接，相关的工作成为ShakeOut地震应急演练等减灾备灾行动的直接支持。

SCEC注重从系统科学角度考虑问题（earthquake

32 Hall, S. S., 2011. Scientists on trial: At fault? Nature, 477: 264-269.

33 ftp://ftp.iaspei.org/pub/resolutions/resolutions_2011_melbourne.pdf

34 <https://www.scec.org/about>

systems science, system specific studies, earthquake and fault system dynamics 等是反复出现的提法), 围绕地震物理的几个关键要素——断层(F)、形变(G)、蠕变(R)、应力(S)、热(T)、速度(V), 以“统一模型”(community model)为纽带, 协调跨学科、多机构的地震学家开展研究。SCEC提出了“统一断层模型”(CFM)、“统一速度(结构)模型”(CVM), 将加州地壳的大量调查、探测的信息整合到一个统一的结构表示中; SCEC4期间启动的“统一大地测量模型”(CGM)和“统一应力模型”(CSM)为改进基于物理的地震预测提供了帮助。

(二) “加州地震破裂预测统一模型”(UCERF)

“加州地震破裂预测统一模型”(UCERF)是SCEC重要的地震预测科技产品³⁵, 目前公布的是其第三版, 其中包括UCERF-TI(与时间无关的震级和地点预测, 类似于我国的强震重点危险区预测)、UCERF-TD(基于UCERF-TI的时间相关的预测, 类似于我国的基于长期危险区开展的发震紧迫程度判定, 不过其预测时间尺度更长)、UCERF-ETAS(中短期预测)。UCERF-TI和UCERF-TD是基于弹性回跳理论的强震预测, 主要基于断层模型、变形模型、地震学等给出强震综合概率预测结果, 也作为强地面运动数值模拟的重要输入; UCERF-ETAS则是基于地震目录的统计预测, 是加州中短期地震预测的重要研究内容。

(三) 地震可预测性研究国际合作计划(CSEP)

地震可预测性研究国际合作计划(CSEP)³⁶是SCEC为不同地震预测方法提供的开放试验平台, 从2007年开始, 包括美国、日本、新西兰、瑞士等4个测试中心, 评估不同方法的地震预测能力。在美国加州、西北太平洋、日本、意大利、新西兰及全球等不同尺度的研究区, 针对1天、1年和5年等多个预测时间尺度, 对400多种预测模型进行评估检验, 相关方法和检验在《地震学研究通讯》(SRL)、《地球、行星、空间》(EPS)等刊物出版过专集³⁷。基于不同时间尺度预测模型的“混合”模型(Hybrid Model)的概念, 也是在CSEP的研究基础上提出的。CSEP更重

要的贡献, 则是提出了地震预测研究从“追求奇迹、试图毕其功于一役”的战略(silver bullet approach)向“脚踏实地、一步一个脚印前进”的战略(brick-by-brick approach)的转型³⁸。目前, 随着SCEC4向SCEC5转变, CSEP也在讨论向CSEP2.0的转变。

八、21世纪的地震预测研究国际合作计划: ACES计划、全球地震模型(GEM)、PRE-EARTHQUAKE计划

(一) ACES计划

亚太经合组织(APEC)地震模拟合作计划(APEC Collaboration for Earthquake Simulation, ACES)³⁹是一项多边合作研究计划, 由澳大利亚、中国、日本、美国等4个成员国始创于1997年, 参加者主要来自APEC成员国的地震模拟和地震预测研究团队。ACES旨在发展能够真实模拟地震孕育和发生过程的超算仿真模型, 探索新的地震观测方法, 并提供一个“虚拟实验室”以研究地震活动的行为。该计划每2年召开一次国际性工作会议, 参加者来自APEC成员国及欧洲等地的地球科学研究机构, 会议文集在《纯粹和应用地球物理》(PAGEOPH)杂志等刊物上刊登, 已出版多卷。2018年, ACES将其最后的“S”由“模拟”(Simulation)改成了“科学”(Science)。

地震的孕育和发生过程涉及一系列复杂现象和从微观到全球尺度的“跨尺度”行为。根据研究方向和目标的不同, ACES成立了7个工作组, 分别为: ①微观仿真, 旨在建立基于基本物理和化学过程的微观数值模型, 研究断层流变特性和本构关系, 了解灾变从微观尺度到宏观尺度的跨尺度特征; ②标度物理, 旨在更好地理解断层和断层系统发生突发灾变的潜在物理机制和非线性动力学过程, 并发展相关理论; ③强震过程和地震复发模拟, 旨在建立基于连续介质力学的宏观尺度的数值模型, 包括从构造加载、准静态破裂成核到动态破裂、震后愈合的完整过程, 以更好地理解地震复发和块体运动, 以及地震活动和断层相互作用的时空演化特征; ④大尺度动态破裂和地震波传播模拟, 旨在模拟发震宏观尺度下短时间内的动态过程, 包括动态破裂、地震波传播及强地面运动; ⑤计算环境和算法,

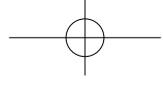
35 Field, E. H., Arrowsmith, R. J., Biasi, G. P., Bird, P., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Jackson, D. D., Johnson, K. M., Jordan, T. H., Madden, C., Michael, A. J., Milner, K. R., Page, M. T., Parsons, T., Powers, P. M., Shaw, B. E., Thatcher, W. R., Weldon II, R. J. and Zeng, Y. H., 2014. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3) - the time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104: 1122-1180. doi: 10.1785/0120130164.

36 Schorlemmer, D., Werner, M. J., Marzocchi, W., Jordan, T. H., Ogata, Y., Jackson, D. D., Mak, S., Rhoades, D. A., Gerstenberger, M. C., Hirata, N., Liukis, M., Maechling, P. J., Strader, A., Taroni, M., Wiemer, S., Zechar, J. D. and Zhuang, J., 2018. The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: achievements and priorities. *Seismological Research Letters*, 89: 1305-1313. doi: 10.1785/0220180053.

37 Michael, A.J. and Werner, M.J., 2018. Preface to the Focus Section on the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP): New Results and Future Directions. *Seismological Research Letters*, 89: 1226-1228.

38 Jordan, T. H., 2006. Earthquake predictability, brick by brick. *Seismological Research Letters*, 77: 3-6.

39 <http://www.aces.org.au/>



旨在发展数值模型和算法, 以及相应的超算工具库; ⑥数据同化和解释; ⑦模型应用, 旨在将新的模拟手段应用到地震预测、强地面运动预测、灾害情境构建等领域。

(二) 全球地震模型 (GEM)

2006年, 在经合组织(OECD)“全球科学论坛”(GSF)中的地球科学专题讨论会上, 几位知名学者提出建立全球地震模型(Global Earthquake Model, GEM)⁴⁰, 通过全球合作, 评估地震风险, 共同防范地震灾害。GEM与各国公立和私立组织及机构合作, 积极推动地震风险评估和风险管理, 其中慕尼黑再保险公司(Munich Re)是GEM的首个私立合作者和资助者。GEM提供OpenQuake Engine开源软件, 利用概率性地震危险性评估(PSHA)等多种灾害评估模型, 计算地震灾害风险, 并鼓励用户共享基础数据和计算结果。GEM希望通过开放透明和可靠的数据产品及服务, 为全球范围内的个人和组织提供地震风险预警, 及为应急救援和恢复重建提供帮助。作为这些工作的基础, 国际地震中心(ISC)、国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)等国际机构、国际组织, 在基础地震资料的汇集、标定、分析等方面做了扎实的技术支撑工作。GEM项目也反过来促进了地震学基础性工作的开展。

1999年, 作为国际岩石圈计划(ILP)的一部分, “全球地震危险性评估计划(GSHAP)”结束⁴¹。一定意义上, GEM的产品是GSHAP产品的“更新版”。

(三) 从 DEMETER 卫星到 PRE-EARTHQUAKE 计划

1964年, 苏联科学家在分析Alouette卫星电磁信号时, 注意到地震前的疑似低频电磁辐射现象。自1970年以来, 俄罗斯(苏联)连续发射了INTERCOSMOS系列卫星进行空间电磁监测, 并在勘察加地区开展了大型地震电磁实验, 取得了大量地震电磁异常和电离层扰动的数据⁴²。在进行多年的应用研究、取得大量成果后, 很多国家逐步制定了专用于地震电磁、电离层等观测的卫星发展计划, 如俄罗斯的Vulkan星座、乌克兰的IONOSATS星座、欧空局的ACE+计划、英国的SSTL计划、意大利的ESPERIA计划、日本的ELMOS计划等。实际发射成功的有美国

2003年发射的QuakeSat小卫星, 用于圣安德烈斯断层带的地震监测, 主要搭载ELF频段的电磁场观测。更为典型的是法国于2004年6月成功发射的DEMETER(Detection of Electro-Magnetic Emission Transmitted from Earthquakes, “对来自地震区的电磁辐射的检测”)卫星, 星上搭载电磁场、原位等离子体和高能粒子等5种科学载荷, 专门用于研究与地震、火山喷发等有关的电磁异常和电离层扰动以及与人类活动有关的全球电磁环境, 在其6年的运行周期结束后, 迄今利用该卫星观测资料发表的论文有130余篇⁴³。

在DEMETER卫星数据的应用研究中, 有三种代表性的研究思路: 震例分析、统计分析、多手段综合分析。目前确实发现地震电磁异常在地面和电离层中的时空分布有一定的重合, 但不同参量在不同的地震孕育阶段有各自的敏感度。到目前为止, 除了对同震或者震后异常信号的追踪, 还未确认在震前观测到存在天地同步的同一信号。

鉴于卫星探测的全球覆盖性, 基于多卫星星座联合、天地一体化、多学科综合等研究思路开展研究逐渐成为国际合作的主流方向。2011年, 由欧洲委员会“团体研究与发展信息服务处”(CORDIS)资助PRE-EARTHQUAKES(Processing Russian and European Earth Observations for Earthquake Precursors Studies)项目⁴⁴, 旨在: ①提高对于地震孕育阶段及其可能的前兆现象的认识; ②推进作为全球观测体系(GEOSS)重要组成部分的全球地震观测系统(EQuOS)的建设; ③整合各种独立观测和新的数据方法, 搭建集成平台并提供给国际科学共同体, 从而集合各种地震现象并进行交叉检验, 除了地基还充分利用了欧空局(ESA)和俄罗斯ROSKOSMOS等多颗卫星的数据资源。目前PRE-EARTHQUAKE项目主要参与国家有美国、俄罗斯、意大利和日本⁴⁵, 2015年通过国际空间科学学会(ISSI)平台资助, PRE-EARTHQUAKE科学家团队与中国科学家开展了基于空间探测的圈层耦合机理校验的共同研究⁴⁶, 2018年意大利通过地平线2020计划与中国地震局启动联合项目申报, 将中国川滇地区及张衡一号电磁卫星资料作为其重要的数据支撑平台引入PRE-EARTHQUAKE计划中。

40 <https://www.globalquakemodel.org/>

41 Giardini, D., Gruenthal, G., Shedlock, K. and Zhang, P., 2003. Chapter 74: The GSHAP global seismic hazard map. In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C. and Kisslinger, C. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. London: Academic Press, 1233-1239.

42 Pulinet, S. A. and Boyarchuk, K. A., 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer.

43 https://demeter.cnes.fr/en/DEMETER/A_publications.htm

44 https://cordis.europa.eu/result/rcn/57410_en.html

45 <http://www.pre-earthquakes.org/index.php?lang=en>

46 <https://eos.chapman.edu/laimc-issj-bj/resources.ph>

以上，简要梳理了国外地震预测研究的一些情况。他山之石，可以攻玉。认真研究地震预测科技发展的国际动态，可以给我们多方面的启示。

目前媒体中和非地震专业中关于地震预测预报研究的国际动态，颇多误导。其中一个广为流行的说法是：国际上并不关心或从事地震预测预报研究，而地震预测预报研究在 20 世纪 90 年代的争论后即走入低谷，这是一个误导性信息。事实上，地震预测预报一直是国际地震科技领域密切关注的科学问题之一。一方面，地震预测预报研究目

前正面临新的突破，如何在下一个十年中抓住这一发展机遇，是对中国地震预测预报研究的一个挑战；另一方面，如何针对“自然灾害防治”对地震预测预报的新要求，在现有科技能力的基础上，充分发挥长中短临及震后趋势预测预报对于减轻地震灾害风险的综合效益，是对中国地震预测预报工作的另一个挑战。国际同行也面临类似的问题，并有很多经验教训可以借鉴。我们应该在应对这两个挑战的过程中，发挥自身优势、化挑战为机遇，力争有所作为、有所贡献、有所突破、有所创造。

水库的存在减缓了阿拉木图地区的地震活动性。

三、地震预报实验：帕克菲尔德地震预报实验场，TDP 计划，PRENLAB 计划，iSTEP 计划

(一) 帕克菲尔德地震预报实验场¹⁰

帕克菲尔德地震预报实验场于 1985 年建成，范围约 60km×60km，其中台站密集区域为沿断层带分布的 35km×15km。主要进行地震观测、连续应变观测、蠕变观测、电磁观测、水氦观测、电阻率观测、声发射观测等，目的是捕捉 1988-1993 年间据信可能在实验场发生的 6 级左右地震的前兆异常变化。由于预测的地震没有如期而至，1994 年实验场“预报窗”宣布关闭，但实验场绝大部分实验仪器依然继续观测。2004 年实验场区发生了一次 6.2 级地震，实验场获得了震前、震时和震后十分有价值的观测资料。

(二) TDP 计划¹¹

土耳其地震实验场于 1979 年建成，主要观测手段集中在北安纳托利亚断层西部。实验场最初的目的是为了检验“扩容假说”，1984 年后通过“多参数观测”项目实施地震预报实验场计划，主要观测手段包括地震观测、地磁观测、土壤氦和泉水氦观测、大地测量、重力观测，及多参数观测

前苏联在广泛开展地震预报实验场研究的同时，也注重地震过程及其前兆的机理研究。在 1975 年以苏联科学院大地物理研究所 (IPE) 名义提出了孕育过程的裂隙扩展—空腔不稳定模式 (简称 IPE 模式)，将震前观测到的地震活动性异常、地震波速度变化、地形变、地电阻率、地下流体等多学科前兆作统一分析解释。

美国在地震预报研究领域，一直十分注重地震预报物理基础的实验和理论研究。1973 年肖尔茨在一系列岩石物理实验的基础上，提出了著名的地震孕育发生的岩体膨胀—流体扩散模式 (即 DD 模式)。该模式给出了地震孕育过程中地震波速、地壳形变、电阻率、地下流体、氦射气等多种前兆的耦合成因机理，对地震预报及多学科前兆的物理基础探索给出有益启示。

¹⁰ Bakun, W. H. and Lindh, A. G., 1985. The Parkfield, California, earthquake prediction experiment. *Science*, 229: 619-624. Roeloffs, E. and Langbein, L., 1994. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Review of Geophysics*, 32: 315-336.
¹¹ Evans, R., Beamish, D., Crampin, S. and Ucer, S. B., 1987. The Turkish dilatancy project (TDP3): multidisciplinary studies of a potential earthquake source region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 91: 265-286.

张国民老师修改稿件