

CSEP 2.0 重点工作导向

■ 张盛峰 张永仙

地震数值预测研究和传统方法评估试点项目

地震监测站网评估试点项目

人工智能地震监测分析系统完善与应用

地震危险区精细调查和地震现场综合科学考察试点项目

预报员访学试点项目

地震信息专题图试点

地震重点监视防御区公共服务试点

地震短临预报专群结合研究

CSEP 2.0 重点工作导向*

张盛峰** 张永仙

前言

2000年由美国南加州地震中心(Southern California Earthquake Center, SCEC)和美国地质调查局(U. S. Geological Survey, USGS)共同支持的RELM(Regional Earthquake Likelihood Models)工作组以及由此进一步发展而来的“地震可预测性国际合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP)计划开始之后,一大批地震预测模型和与评估其预测效能的统计检验方法加入进来,在设立相同的预测规则和使用统一的数据来源下,通过全球设立不同测试中心的方式,共同参与到对地震可预测性问题的系统研究中来。2007年至2018年是CSEP计划的第一阶段(CSEP1.0),2018年之后发展至目前的2.0阶段(CSEP2.0),为使读者了解与这几项国际合作研究相关的工作主旨和历程,并为我国CSEP2.0工作的有序开展提供参考,本文在调查相关文献的基础上,以两篇报告的形式总结了RELM相关工作和过去十年CSEP1.0阶段的发展过程,以及描述了下一步2.0阶段的重点导向。这里是第二篇内容。

一、CSEP2.0 阶段

2018年SCEC学术年会CSEP专题研讨会,初步决定2018年9月启动CSEP2.0计划,整合现有的

CSEP检验中心,进一步推进地震预测国际合作,并于2018年国际著名期刊SRL出版特辑,该专辑包含对CSEP1.0相关工作进行梳理的9篇文章,并有1篇文章对CSEP2.0的工作进行了展望(Akinci *et al.*, 2018; Bird, 2018; Christophersen *et al.*, 2018; Hainzl *et al.*, 2018; Jackson, 2018; Katsura *et al.*, 2018; Michael and Werner, 2018; Schorlemmer *et al.*, 2018; Strader *et al.*, 2018; Taroni *et al.*, 2018)。CSEP1.0的工作流程已无法满足于当前地震学家们针对最新科学方法和模型的期望水平,主要表现为(1)目前的预测规范过于严格;(2)目前的工作流程灵活度不高;(3)新的且计算成本高的模型目前已经可用,且尚未应用到CSEP1.0工作中,如统一的加利福尼亚州地震破裂预测第3版(UCERF3)、三维+有限破裂尺度传染型余震序列(3D+Finite ETAS)模型。当前,由美国、中国、日本、欧洲等不同测试中心共同参与的CSEP2.0计划试图发展新的地震预测模型,包含美国地质调查局(USGS)倡导的可操作的余震预测模型和California倡导的统一的加利福尼亚州地震破裂预测第3版-传染型余震序列(UCERF3-ETAS)模型(Schorlemmer *et al.*, 2018)。本文在系统梳理相关文献的基础上,总结了CSEP2.0阶段备受关注的工作内容及研究方向,如图1所示。

在2020年9月份召开的SCEC年会上,与

* 支撑新时代防震减灾事业现代化建设试点任务之一“地震数值预测研究和传统方法评估试点项目”成果,和地震数值预测联合实验室开放基金(2020LNEF04)、国家自然科学基金(42004038)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费(2020IEF0501)、科技部国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0109700)、山东省重点研发计划(2018GSF120002)项目成果。

** 中国地震局地震预测研究所,北京,100036, shengfengzhang8711@gmail.com。

CSEP2.0 阶段相关的地震可预测性问题讨论、软件研发及不同预测模型评估等学术报告吸引了众多关注 (<https://www.scec.org/meetings/2020/am>), 如 Werner (2020) 根据 CSEP 计划中采用的严格统计检验方法, 针对地震前观测或计算得到的若干前兆指标的评估进

行了讨论, 如图 2 所示为该报告的视频会议截图, 其中包含了 Werner 教授提到的做好这项工作所需的若干条件; Savran (2020) 针对采用 UCERF3-ETAS 模型对 2019 年 Ridgecrest 地震序列的分析进行了评估;

数据空间的扩展	<ul style="list-style-type: none"> • 数据空间的扩展: 其他具有良好地震目录的地区+余震序列+古地震记录 • 数据质量的提高: 发震时刻、震中位置误差、震级的不确定性 • 解决实验最短持续时间问题: 基于各分量的检验/模型重构
模型空间的扩展	<ul style="list-style-type: none"> • 3D模型: 日本关东地区3D实验场 • 混合/杂交模型: 模型组合/增加新变量 • 基于断层的模型: 对UCERF3进行检验 • 基于事件的模型: 每次事件后进行预测更新, 而非按照常规时间间隔更新 • 基于物理的模型: 类似RSQsim模拟器, 加入断裂物理学概念 • 完整的概率模型: 利用模型对所有不确定性进行完整描述 • 地震动和危险性模型: 利用权威来源的破裂参数, 首先针对日本国家地震危险性模型 • 前兆模型: 评估类似大地测量、电磁异常等可能的前兆模型 • 外部预测: 如政府机构发布的可操作预测或无法安装在内部的前兆模型预测
关键假设和问题的检验	<ul style="list-style-type: none"> • 大地震与小地震在丛集性、尺度或长期行为上的本质区别 • 单一断层上的地震震级分布特征 • 强震发生对附近其他主震发生概率的影响 • 中等强度地震对大地震的触发概率 • b值的预测能力 • 小地震空间位置对未来大震位置的指示作用 • 前震识别

图 1 本文总结的 CSEP2.0 阶段的重要工作方向和内容

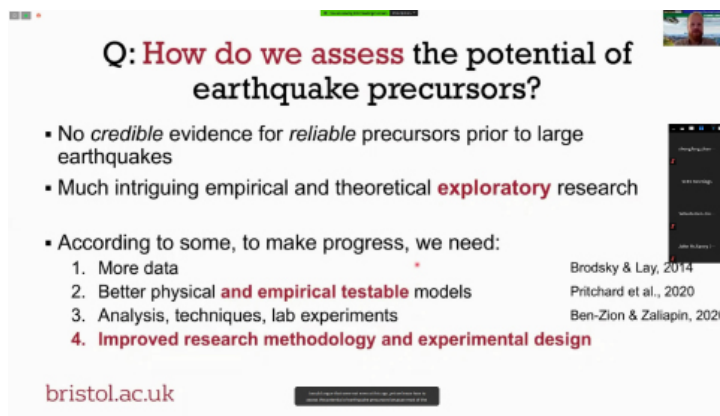


图 2 CSEP 中心专家 Werner 教授在 SCEC2020 年会上作针对地震前兆预测进行评估的主题报告 (Werner, 2020)

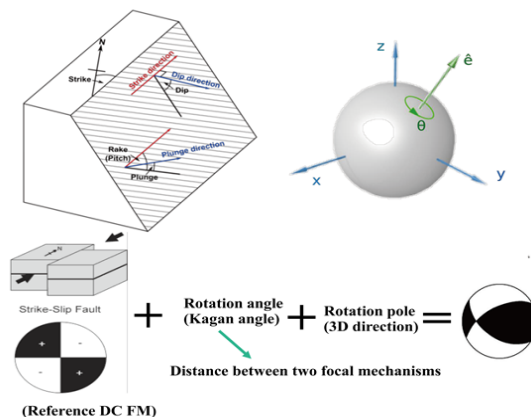


图 3 含震源机制解成分 ETAS 模型中背景地震活动和触发事件震源机制解的重构过程 (Zhuang, 2020)

Shcherbakov (2020) 利用 Bayesian 方法对与余震预测与检验的工作进行了讨论；Ogata and Omi (2020) 使用统计地震学方法对地震发生早期进行实时监控以及早期预测；Zhuang (2020) 介绍了最新研发的加入震源机制解成分的 ETAS 模型，以期更好的符合实际地震的空间展布情况，如图 3 所示。可以看出，无论在针对某一问题的具体应用方面，还是在针对某种模型

加以扩展方面，与 CSEP2.0 相关的工作内容有了新的研究进展。

二、不同阶段总体设计

CSEP 计划发展至目前，其规划设计大致被划分成了三个阶段，一是单服务器阶段（2007-2017），即形成了具有统一计算流程和代码库的单服务器 CSEP

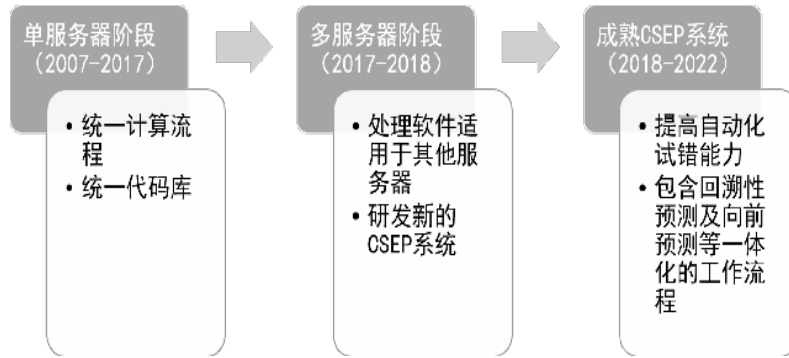


图 4 CSEP 计划发展规划的大致发展阶段

检验系统；二是多服务器阶段（2017-2018），这是第一阶段与第三阶段的过渡期，即保证在不同的服务器上可以运行相同的处理软件，并产出类似的结果，发布在多服务器上可以产出独立预测结果的 CSEP 新系统；三是发展具有成熟多服务器工作流程的 CSEP 系统（2018-2022），这一系统将提高自动化的容错能力，可便捷地获取和处理输入数据，并能同时包含回溯性预测、向前预测及效能评估一体化的工作流程，如图 4 所示。

三、其他测试区工作展望

与 CSEP 项目类似的国际合作计划离不开全球不同研究单位的广泛参与，世界上的多个国家和地区与 SCEC 具有良好的科技合作关系，尤其在 CSEP 这一具有国际参与背景的合作框架下，与地震预测和检验评估工作相关的科研单位也积极参与了进来，与 SCEC 具有合作关系的研究单位如图 5 所示。中国

SCEC Institutions



图 5 与 SCEC 具有合作关系的国际研究机构（具体信息可见 <https://www.scec.org/institutions>）

作为 CSEP 计划的积极参与者，于 2009 年开始加入 CSEP1.0 工作，在针对我国南北地震带进行了若干预测模型和检验方法的研究试验之后，虽取得了一定的认识，但在不同预测模型和评估方法应用的丰富度或者针对某一模型的研究深度方面尚有发展的空间。因此在当前不同测试中心 CSEP2.0 工作慢慢步入正轨之际，针对中国地震科学实验场区域，除了努力发展与我国地震活动特点相适应的自有预测模型和检验方法以外，与国外同行开展广泛的科技合作，学习借鉴优

秀的模型提出、发展和应用的思路经验，对于我国 CSEP 计划工作的下一步开展将具有重要意义。

本文作者通过参加 SCEC 年会听取报告，并与国外 CSEP 专家积极讨论，总结归纳了意大利、日本、新西兰三个 CSEP 测试区 CSEP2.0 阶段的工作内容，如表 1 所示。其中，意大利 CSEP 测试中心下一步工作主要针对加入多种模型的复合模型进行研究，形成可操作的地震预报的工作流程，并紧跟国际 CSEP 研

表1 不同国家 CSEP2.0 主要工作方向

国家	CSEP 2.0 工作内容
意大利	1) 针对 2014-2019 期间进行的复合模型预测试验开展测试评估; 2) 基于 RISE (Real-time earthquake risk reduction for a resilient Europe) 项目发展新的测试工具; 3) 基于 RISE 项目发展新的地震预测模型; 4) 形成具有可操作地震预报的工作流程; 5) 移植所有的系统代码。
日本	1) 针对时间、空间、震级等不同地震要素发展不同的评估方法以测试相应预测模型的效能; 2) 加强不同单位合作, 根据自动化目录处理, 进行实时预测; 3) 深入在 Kanto 地区的 3D 模型研究, 包含 3D 球形模型、3D 时空 ETAS 模型和 3D HIST-ETAS 模型。
新西兰	1) 深入理解已有模型包含参数的意义; 2) 进一步发展 EEPAS(Every Earthquake a Precursor According to Scale) 模型。

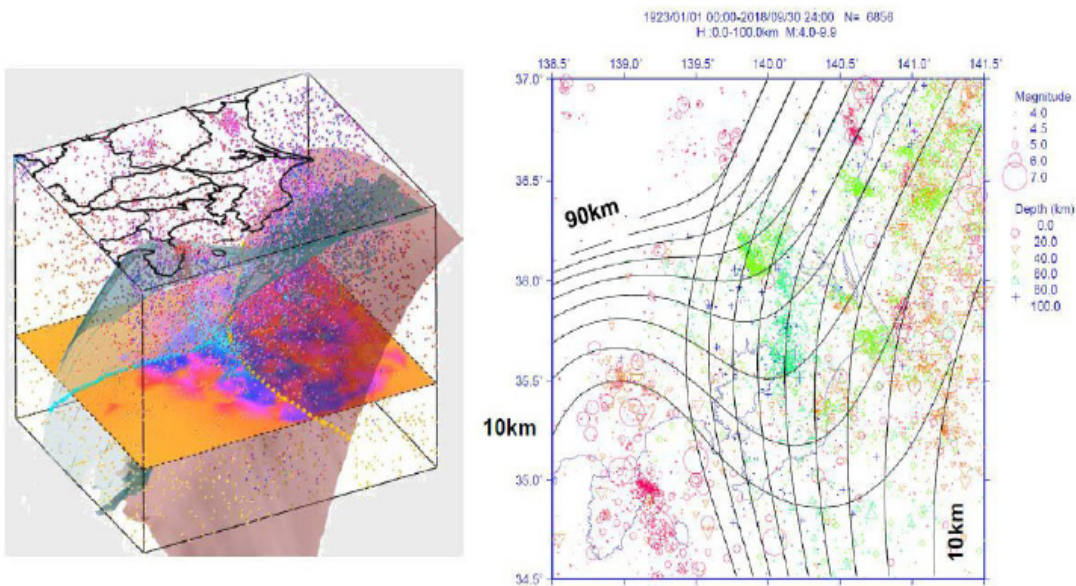


图6 左图表示日本 CSEP 研发团队针对大东京地区进行 3D-ETAS 构建的 Delaunay 网格划分格点, 二维色度平面表示 3D 模型中 b 值在这一截面上的投影; 右图表示使用的地震事件震中位置及深度等值线 (Ogata *et al.*, 2019)。

究趋势, 将 CSEP1.0 阶段的系统代码移植到新的开发平台; 日本 CSEP 中心则试图将研究对象进一步扩大, 即在原有基础上对地震的时间、空间和震级等不同要素发展相应的预测评估方法, 在提升系统自动化处理的同时, 大力发展基于三维空间的球形、ETAS 模型, 如图 6 给出了日本 CSEP 研发团队针对大东京地区进行 3D-ETAS 的构建过程; 新西兰 CSEP 测试中心则在原有工作基础上深入研究已有模型包含参数的物理意义, 进一步发展基于震前地震活动的预测模型。可见, 不同 CSEP 测试中心在下一步工作中提出了明确的研究目标, 并与 CSEP1.0 阶段做到了良好的工作衔接。

四、总结及思考

本文总结了 CSEP2.0 工作的由来、设计及国外不同测试区工作展望, 可以发现, 与 CSEP1.0 阶段工作相比, 研究思路总体框架并无发生很大变化, 仅是对不同测试区所包含的模型研究深度、系统计算能力及优化方面进行了升级。目前在国家重点研发计划的支持下, 由中国地震局地震预测研究所牵头的 CSEP2.0

研究团队计划构建新的 CSEP 测试中心, 目前已取得了一定成果。因此下一步工作中, 除对自有模型和方法进行基本建设以外, 增进与其他模型研发团队的学术交流, 借鉴先进的研究及管理经验, 将对顺利实现本项目的预期目标具有重要意义; 同时, 模型或方法的研发和建设通常会受到研发人主观因素的影响, 模型最终效果往往与选取的参数具有较强的依赖性, 因此, 研发过程中尽量减弱这些“非随机因素”的比重, 按照“一步一个脚印”的工作思路对模型原理和运行环境进行改进, 才能与本研究计划的工作理念和初衷相一致。

参考文献

- Akinci, A., Taroni, M. and Moschetti, M. P. 2018. Ensemble Smoothed Seismicity Models for the New Italian Probabilistic Seismic Hazard Map. *Seismological Research Letters* 89: 1277-1287.
- Bird, P. 2018. Ranking Some Global Forecasts with the Kagan Information Score. *Seismological Research Letters* 89: 1272-1276.

- Christophersen, A., Rhoades, D. A., Gerstenberger, M. C., Liukis, M., Silva, F., Jordan, T. H., Marzocchi, W. and Werner, M. J. 2018. Highlights from the First Ten Years of the New Zealand Earthquake Forecast Testing Center. *Seismological Research Letters* 89: 1229-1237.
- Hainzl, S., Cattania, C., Werner, M. J., Marzocchi, W., Christophersen, A., Rhoades, D., Gerstenberger, M., Jordan, T. H., Savran, W., Liukis, M., Helmstetter, A., Jimenez, A. and Steacy, S. 2018. The Forecasting Skill of Physics - Based Seismicity Models during the 2010 - 2012 Canterbury, New Zealand, Earthquake Sequence. *Seismological Research Letters* 89: 1238-1250.
- Jackson, D. D. 2018. Testing the Classic 1988 Forecast. *Seismological Research Letters* 89: 1288-1297.
- Katsura, K., Ogata, Y., Tsuruoka, H. and Hirata, N. 2018. Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake. *Seismological Research Letters* 89: 1298-1304.
- 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.
- Ogata, Y., Katsura, K., Tsuruoka, H. and Hirata, N. 2019. High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area. *Earth Planet Sp* 71: 113.
- Ogata, Y. and Omi, T. 2020. Statistical monitoring and early forecasting of earthquake sequence: Case studies after the 2019 M6.4 Searles Valley Earthquake, California. Poster Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.
- Savran, W. H. 2020. Pseudoprospective Evaluation of UCERF3-ETAS Forecasts during the 2019 Ridgecrest Sequence. Oral Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.
- 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.
- Shcherbakov, R. 2020. Bayesian Framework for Aftershock Forecasting and Testing. Poster Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.
- Strader, A., Werner, M., Bayona, J., Maechling, P., Silva, F., Liukis, M. and Schorlemmer, D. 2018. Prospective Evaluation of Global Earthquake Forecast Models: 2 Yrs of Observations Provide Preliminary Support for Merging Smoothed Seismicity with Geodetic Strain-Rates. *Seismological Research Letters* 89: 1262-1271.
- Taroni, M., Marzocchi, W., Schorlemmer, D., Werner, M. J., Euchner, F., Heiniger, L., Wiemer, S. and Zechar, J. D. 2018. Prospective CSEP Evaluation of 1 - Day, 3 - Month, and 5 - Yr Earthquake Forecasts for Italy. *Seismological Research Letters* 89: 1251-1261.
- Werner, M. J. 2020. Experimental Design for Testing Hypotheses of Earthquake Precursors. Oral Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.
- Zhuang, J. 2020. An ETAS model incorporated with focal mechanisms. Poster Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.

加强科技创新支撑新时代防震减灾事业现代化建设
全国地震重点监视防御区公共服务
地震短临预报专群结合研究

试点 工作通讯

预报员访问学者导师聘任管理办法
“解剖地震”计划“十四五”实施方案
AI 开创的新地震学研究
CSEP 1.0 工作理念及十年工作成就
CSEP 2.0 重点工作导向

2021 年第 1 期 (总第 22 期)
2021 年第 2 期 (总第 23 期)
2021 年第 3 期 (总第 24 期)
2021 年第 4 期 (总第 25 期)
2021 年第 5 期 (总第 26 期)

编委会

王武星 王琳琳 田勤俭 汤毅 孙汉荣 吴忠良 李营 杨林章 张永仙 张晓东 邵志刚
赵翠萍 黄伟

编辑部:

中国地震局地震预测研究所科研管理部
E-mail:sycglb@ief.ac.cn