

CSEP 1.0 工作理念及十年工作成就

■ 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

CSEP 1.0 工作理念及十年工作成就*

■ 张盛峰** 张永仙

前言

上世纪九十年代由世界多个国家的地震学家围绕“地震可否预测”问题进行国际讨论后,人们开始思考适用于地震预测研究的规则应该有哪些,尤其是地震学家针对地震预测研究中所采取的途径和工作思路开始发生了变化。2007年开始的“区域地震似然模型”(Regional Earthquake Likelihood models, RELM)工作组和由此进一步而来的“地震可预测性国际合作研究”(Study of 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有关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,共同参与对地震可预测性问题的系统研究中来。当前CSEP计划已由开始的1.0阶段发展至2.0阶段,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,本文以两篇文章的形式总结了RELM相关工作和过去十年CSEP1.0阶段的发展过程,以及阐述了未来CSEP2.0阶段的重点工作导向。这里是第一篇内容。

一、RELM工作组

在美国南加州地震中心SCEC和美国地质调查局USGS的共同支持下,“区域地震似然模型”(Regional

Earthquake Likelihood Models, RELM)工作组构建了多种类型的地震概率预测模型,预测尺度均为5年,并且首次提出了“检验中心”的概念。地震危险性分析所需模型主要有两种,一种是通过破裂模型来给出未来一定时间段内地震发生的概率,另一种是利用强地震运动模型针对每一个地震给出台站所在位置震动的估计。2007年初,工作组组织出版了南加州区域地震概率模型最新研究进展的专辑(Field, 2007),这本专辑则主要针对第一种类型进行研究。在没有一个简单统一的时间相依的地震预测(Time-dependent earthquake forecast)模型的情况下,南加州地震中心(SCEC)用类似于竞技运动的方法,激励和发展多种地震预测模型。在这本专辑中包含有12篇文章,介绍了18个地震预测模型,其中以统计模型为主。这些模型包括NSHMP-2002(National Seismic Hazard Mapping Program)(Frankel *et al.*, 2002)一与时间无关的(Time independent)模型、WGCEP-UCERF1(Uniform California Earthquake Forecast version 1)模型(Petersen *et al.*, 2007)、“光滑地震活动性”(Smoothed-seismicity)模型(Kagan and Jackson, 1994; Kagan *et al.*, 2007)、ALM(Asperity-based Likelihood Model)模型(Wiemer and Schorlemmer, 2007)、“图像信息”(Pattern Informatics)模型(Holliday *et al.*, 2007)、基于大地测量的预测

* 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。

(Geodetic strain-based forecast) (Shen *et al.*, 2007)、SHIFT 模型 (Bird and Liu, 2007)、Ward 提交的五个不同的模型 (Ward, 2007)、STEP (Short Term Earthquake Probability) 模型 (Gerstenberger *et al.*, 2005)、ETAS (Epidemic-type Aftershock Sequence) 模型 (Console *et al.*, 2007)、EEPAS (Every Earthquake is a Precursor According to Scale) 模型 (Rhoades, 2007) 以及 Ebel 提交的两个模型 (Ebel *et al.*, 2007)。这一工作标志了一个思路上的

变化 (Jordan, 2006), 即地震预测预报研究从开始追求“终极目标”的做法 (silver bullet approach), 转变为可以使我们通过循序渐进的方式 (brick-by-brick approach) 对地震预测预报有一个更好地系统性的认识。图 1 给出了这一专辑中涉及的相关地震学专家提交的不同地震预测模型针对加利福尼亚地区五年尺度的预测结果。

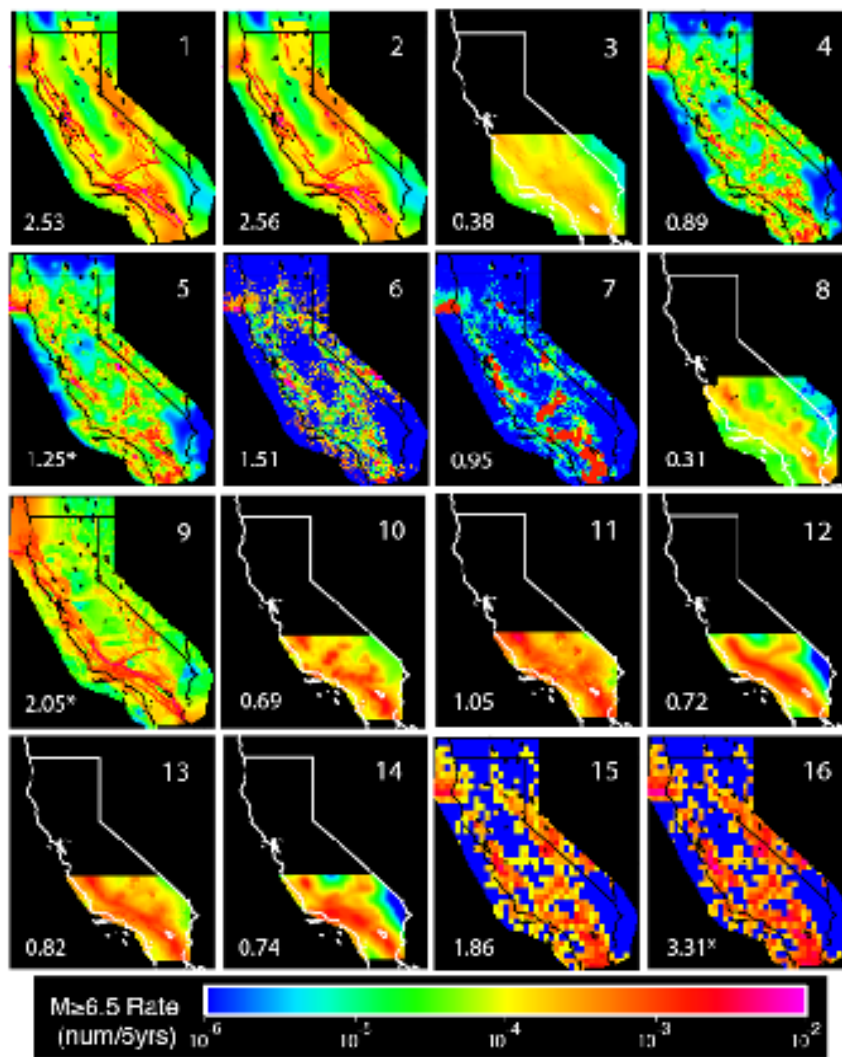


图 1 加利福尼亚地区未来 5 年发生 5 级以上地震的期望个数, 分辨率为 0.1×0.1 度。每一张子图左下角的数字代表未来 5 年发生 5 级以上地震的个数期望值, 星号表示余震序列被包含在了这个模型种。实际上, 每种模型给出的结果是对 4.95 级以上地震进行预测的结果。右上角每一数字表示的模型有: 1、NSHMP-2002(Cao *et al.*, 2007); 2、WGCEP-UCERF1(Cao *et al.*, 2007); 3、Kagan *et al.* (2007); 4、Kagan *et al.* (2007) 去除余震情况; 5、Kagan *et al.* (2007) 包含余震情况; 6、Wiemer and Schorlemmer (2007); 7、Donnellan *et al.* (2007); 8、Jackson *et al.* (2007b); 9、Bird and Liu (2007); 10、Ward (2007) 地震模型 $M_{\max}=8.1$; 11、Ward (2007) 大地测量模型 $M_{\max}=8.1$; 12、Ward (2007) 地质模型 $M_{\max}=8.1$; 13、Ward (2007) 综合模型 $M_{\max}=8.1$; 14、Ward (2007) 模拟模型 $M_{\max}=8.1$; 15、Chambers *et al.* (2007) 去除余震情况; 16、Chambers *et al.* (2007) 存在余震情况。

二、“地震可预测性合作研究” CSEP 计划工作理念

2.1 CSEP 计划的发起

目前关于地震可预测性研究最受关注的研究计划应属国际“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP) 计划 (<http://www.cseptesting.org>)。2006 年 1 月开始, 美国南加州

地震中心 (SCEC) 发起和组织了国际合作项目 CSEP 计划, 该计划是由多个国家共同参与的 earthquake prediction research, 同时也是众多科学家组成的大型国际组织, 计划采用一个更基础的方法来研究地震预测的问题, 并设法查明和了解地震系统可预测性的特点 (Jordan, 2006)。CSEP 计划的目标有以下五个方面: (1) 为注册的地震预测试验建立严格的工作流程, 其中包括不同版本的维护和传输, 制作和测试预测程序代码; (2)

为概率预测的评定和确定性“警报”预测树立公认的评定标准，包括与相关预报预测参照的工作；(3) 发展个人和研究团体可参与的地震预报试验中的软件和硬件设备，并使最终一定的成果产出成为可行；(4) 提供使用数据和成果监控的权限来进行地震预报试验，由生产厂家授权并进行算法的调整和测试；(5) 在断层系统等不同地质环境下开展更广范围的地震预报试验。

2.2 CSEP 计划工作理念

作为 RELM 工作 (Field, 2007; <http://www.relm.org>) 的继承和概念的贯彻，CSEP 计划的目标是建立虚拟的、分布式的实验室，在全球各区域或全球尺度进行更为广泛的科学预测试验。回答的问题主要有以下问题：(1) 怎样开展和测试地震预测试验？(2) 地震破裂过程的内在可预测性是什么？(3) 大地震的可预测性能否发展成为有用的预测经验，比如可操作的地震预测是否都是可行的？这些问题的提出在一定的意义上使人们达到了某种认识，即若有效的回答了之前的问题，则新问题就可以被有效地提出，从这一点

出发，对问题 (1) 采取有关措施是有很重要的意义的。与 RELM 工作不同的是，CSEP 计划采用更务实的态度研究地震预测预报问题，即利用可以比较的数据和统一的规则进行计算，并在严格的统计检验约束下获取地震可预测性的新认识，在真正的向前预测中进行检验 (Jordan, 2006; Schorlemmer *et al.*, 2010)，工作流程见图 2。而对于地震的预测预报研究工作，也越来越从一种试图“毕其功于一役”的路线 (silver bullet approach)，开始转变为一种试图“脚踏实地、一步一个脚印地前进”的研究路线 (brick-by-brick approach)，即通过不断加深对地震“可预测性” (predictability) 问题的科学认识，进而逐步地不断提升地震预测预报工作的科学认识水平以及实际预测能力 (Jordan, 2006)。2012 年，SCEC 完成了首批检验模型的 5 年期封闭式向前预测，获得了大量的模型运行经验与地震可预测性研究成果。同时，CSEP 的概念和运行模式直接启发了 GEM 等新的国际合作项目，CSEP 本身的预测模型也进一步向融合各类简单模型优点的“杂交”模型方向发展。

Conceptual CSEP Processing Model For Seismicity Based Forecasts

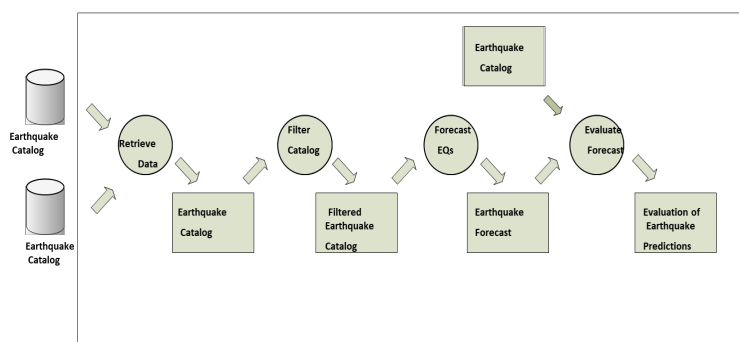


图 2 CSEP 计划的工作流程

三、CSEP1.0 阶段十年成就

3.1 CSEP 计划测试区

统计模型往往对预测的时空尺度有一定的要求，目前 CSEP 计划已在统计预测模型的构建、检验中心的建设等方面取得了较多阶段性的进展。用于试验的研究区域主要包括美国加州地区、西北太平洋地区、日本地区、意大利地区、新西兰和全球尺度范围，其中南加州地震中心最早于 2007 年 9 月 1 日投入建设并开始运行。目前正在积极筹备建设的检验分中心包括有意大利地区、冰岛地区 and 中国的南北地震带等地区，图 3 给出了目前全球范围内正在运行或建设的 CSEP 检验中心。截止 2016 年已包含 458 种“竞技”统计预测模型投入并使用，在美国加州地区、西北太平洋地区、日本地区、意大利地区、新西兰和全球范围等 7 个研究区进行了预测和统计检验，并可用于 1

天、1 年和 5 年等多个时间尺度，图 4 给出了 2007 年以来 CSEP 竞技模型数量随时间的增长情况。当然，这些不同模型既包含针对多种单一模型进行杂交的混合模型，同时也包含同一模型在不同模型参数下的变种模型，且经过研发人员长期的预测试验，这些模型的工作流程较好的适应了区域地震活动性特征。

3.2 多种统计检验方法

对于预测结果进行严格的统计检验是 CSEP 计划最重要的技术特点。根据模型预测内容和结果产出的不同，CSEP 试验中心选用了 6 种不同的统计检验方法对结果进行检验，并定期公布检验结果 (Schorlemmer and Gerstenberger, 2007)。常采用的统计检验方法有：地震数检验 (Number test, N-test) (Kagan and Jackson, 1995)、似然检验 (Likelihood test, L-test) (Schorlemmer *et al.*, 2007)、比率检验 (Likelihood R(ratio) test, R-test)、

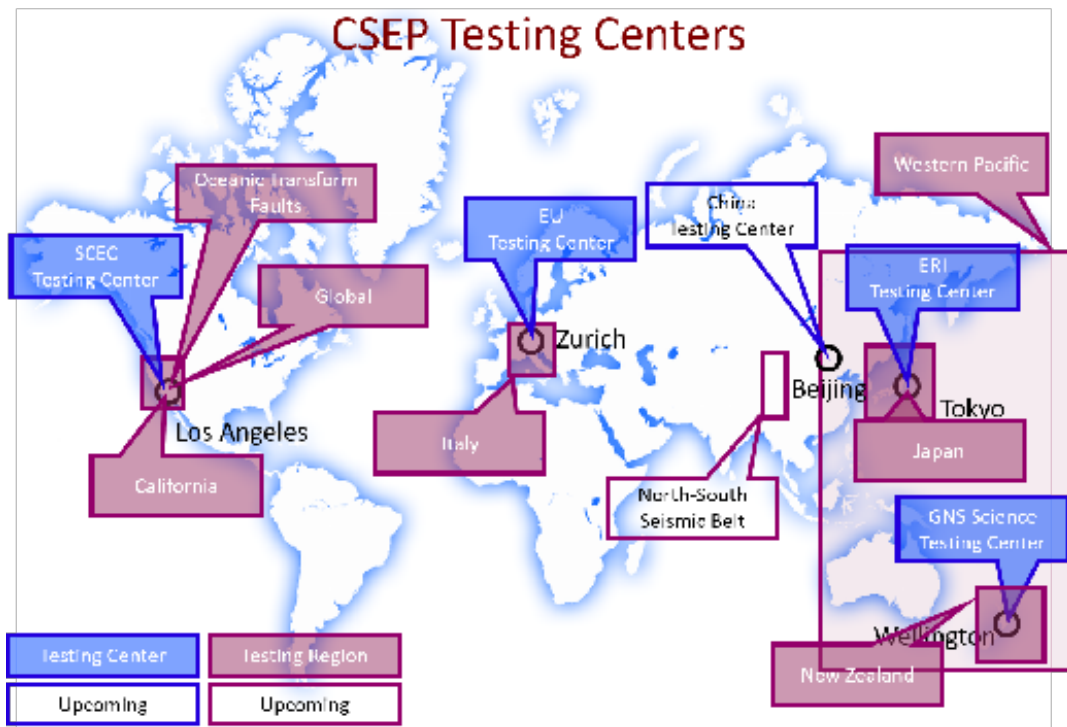


图3 在全球不同地区建立和运行的 CSEP 检验中心

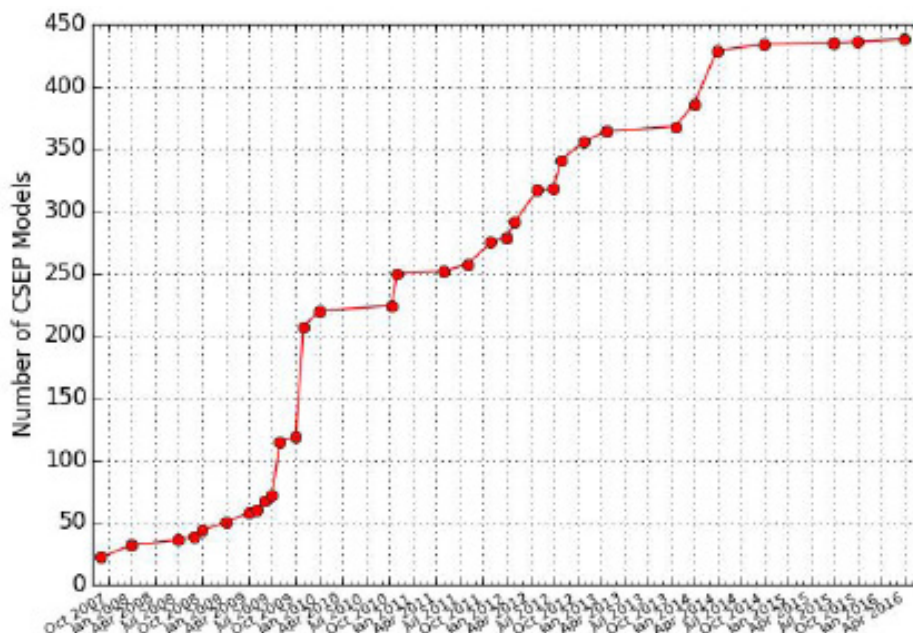


图4 CSEP 竞赛模型随时间增长情况 (截止 2016 年 4 月, 共有 458 种模型参与检验)

Molchan 检验 (Molchan test) (Molchan, 1990, 1991; Molchan and Kagan, 1992)、区域技能评分检验 (Area Skill Score test, ASS-test) (Zechar and Jordan, 2008)、接收者操作特性检验 (The Relative/Receiver Operating Characteristic test, ROC test) (Swets, 1973; Molchan, 1997)。同时, 为了计算相比随机预测模型或者标准参考模型的效能增益, 基于概率增益的检验方法为评估模型之间的对比结果提供了很好的工具, 如图 5 所示。

3.3 中国参加情况

2009 年, 中国开始加入 CSEP1.0 计划 (这里指的是 CSEP 计划前十年工作), 由来自中国地震局地球物

理研究所和中国地震台网中心专家组成的“CSEP 计划中国检验中心”(Chinese CSEP Testing Center) 筹备工作组 (以下简称“筹备工作组”), 在中国地震局地球物理研究所构建了“CSEP 计划中国检验中心”原型系统。筹备工作组以中国南北地震带为研究区, 组织中国地震学家开展模型构建、国际交流合作、研究区监测能力评估和向前预测试验, 图 6 给出了 CSEP-CN 中心主要研究区和平台研发路线示意图。期间与美国南加州地震中心 (SCEC)、日本统计数理研究所 (ISM)、东京大学地震研究所 (ERI)、瑞士联邦理工学院 (ETH)、新西兰 GNS 等国际机构建立了良好的合作关系。中国 CSEP 计划检验中心通过对符合南北地

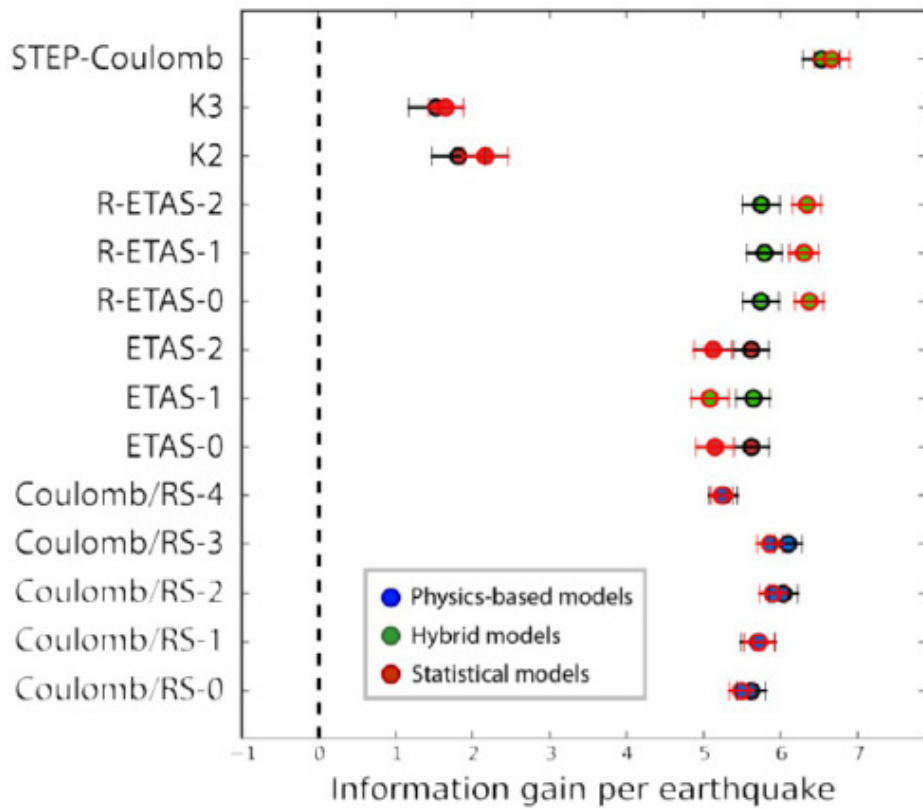


图 5 混合模型和基于物理的预测模型相比随机预测模型的概率增益检验 (Jordan *et al.*, 2016)

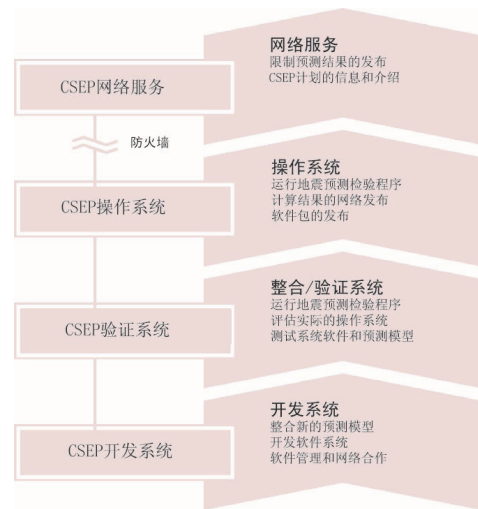
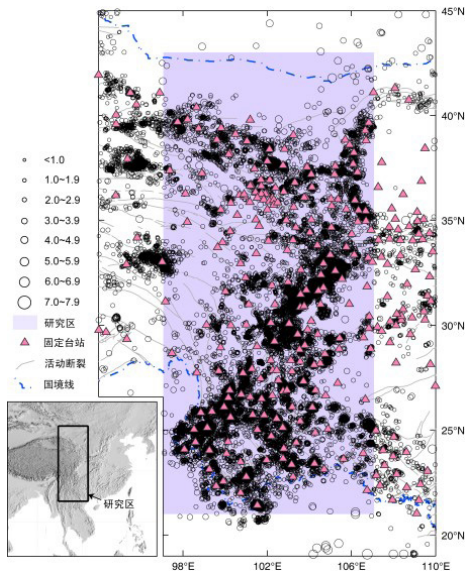


图 6 CSEP-CN 中心主要研究区南北地震带 (1.0 阶段) (左图) 和平台研发路线示意图 (右图)

震带地震活动特点的地震预测模型进行回溯性检验及向前预测，一方面获取了基于研究区的地震可预测性研究成果，另一方面为区域地震危险性评估提供了经过严格检验的有效地震预测模型。预研工作中学习引进了图像信息 (PI) 算法、传染型余震序列 (ETAS) 等模型，发表了一系列研究成果 (Jiang and Wu, 2008, 2010, 2011; Zhang *et al.*, 2010, 2012; Zhang *et al.*, 2015a, 2015b)。

四、总结

本文总结了 RELM 工作组的相关工作及在此基础上发展起来的 CSEP 研究计划相关问题，包含研究理念和在 1.0 阶段取得的研究成果；同时，中国作为 CSEP 计划中的参与者也积极开展多项合作和预测试验，在国际合作项目的支持下，利用若干统计地震学方法和预测模型在南北地震带地区开展了诸多试验，初步在检验平台及与业务化工作结合方面进行了预研工作，为该计划未来的发展打下了坚实基础。

参考文献:

- Bird, P. and Liu, Z. 2007. Seismic hazard inferred from tectonics California. *Seismological Research Letters* 78(1): 37-48.
- Console, R., Morru, M., Catalli, F. and Falcone, G. 2007. Real time forecasts through an earthquake clustering model constrained by the rate-and-state constitutive law: Comparison with a purely stochastic ETAS model. *Seismological Research Letters* 78(1): 49-56.
- Cao, T., Frankel, A. D., Campbell, K. W. and Petersen, M. D. 2007. Time-independent and Time-dependent Seismic Hazard Assessment for the State of California: Uniform California Earthquake Rupture Forecast Model 1.0. *Seismological Research Letters* 78: 99-109.
- Chambers, D. W., Baglivo, J. A., Ebel, J. E. and Kafka, A. L. 2007. Non-Poissonian Earthquake Clustering and the Hidden Markov Model as Bases for Earthquake Forecasting in California. *Seismological Research Letters* 78: 57-65.
- Ebel, J., Chambers, D. W., Kafka, A. L. and Baglivo, J. A. 2007. Non-Poissonian earthquake clustering and the hidden Markov models as bases for earthquake forecasting in California. *Seismological Research Letters* 78(1): 57-65.
- Field, E. D. eds., 2007. Special Issue-Regional Earthquake Likelihood Models. *Seism. Res. Lett.* 78: 1-140.
- Frankel, A. D., Petersen, M. D., Mueller, C. S., Haller, K. M., Wheeler, R. L., Leyendecker, E. V., Wesson, R. L., Harmsen, S. C., Cramer, D. M., Pekins, D. M. and Rukstales, K. S. 2002. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps. USGS Open-File Report 02-420.
- Gerstenberger, M., Wiemer, S., Jones, M. L. and Reasenberg, P. A. 2005. Real-time forecast of tomorrow's earthquake in California. *Nature* 435: 328-331.
- Holliday, J. R., Chen, C., Tiampo, K. F., Rundle, J. B., Turcotte, D. L. and Donnellan, A. 2007. A RELM earthquake forecast based on pattern informatics. *Seismological Research Letters* 78(1): 87-93.
- Jackson, D. D. 2018. Testing the Classic 1988 Forecast. *Seismological Research Letters* 89: 1288-1297.
- Jiang, C. S. and Wu, Z. L. 2008. Retrospective forecasting test of a statistical physics model for earthquakes in Sichuan-Yunnan region. *Science in China Series D: Earth Sciences* 51: 1401-1410.
- Jiang, C. S. and Wu, Z. L. 2010. PI Forecast for the Sichuan-Yunnan Region: Retrospective Test after the May 12, 2008, Wenchuan Earthquake. *PAGEOPH* 167: 751-761.
- Jiang, C. S. and Wu, Z. L. 2011. PI forecast with or without de-clustering: an experiment for the Sichuan-Yunnan region. *Natural Hazards and Earth System Science* 11: 697-706.
- Jordan, T. H. 2006. Earthquake predictability, brick by brick. *Seism. Res. Lett.* 77 (1): 3-6.
- Jordan, T. H., Liukis, M., Werner, M. J., Schorlemmer, D., Yu, J., Maechling, P. J., Jackson, D. D. Rhoades, D. A., Zechar, J. D. and Marzocchi, W. 2016. Recent Achievements of the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016AGUFM.S21A2684J>
- Kagan, Y. Y., Helmstetter, A. and Jackson, D. D. 2007. High-resolution Time-independent Grid-based Forecast for $M \geq 5$ Earthquakes in California. *Seismological Research Letters* 78: 78-86.
- Kagan, Y. Y. and Jackson, D. D. 1995. New seismic gap hypothesis: Five years after. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100: 3943-3959.
- Kagan, Y. Y. and Jackson, D. D. 1994. Long-term probability forecasting of earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99: 13685-13700.
- Kagan, Y. Y., Jackson, D. D. and Rong, Y. 2007. A testable five-year forecast of moderate and large earthquake in Southern California based on smoothed seismicity. *Seismological Research Letters* 78(1): 94-98.
- Molchan, G. M. 1991. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. *Tectonophysics* 193: 267-276.
- Molchan, G. M. and Kagan, Y. Y. 1992. Earthquake prediction and its optimization. *J Geophys. Res.* 97: 4823-4838.
- Molchan, G. M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction. *Phys. Earth Planet Inter.* 61: 84-98.
- Molchan, G. M. 1997. Earthquake prediction as a decision-making problem. *Pure Appl. Geophys.* 149: 233-247.
- Petersen, M. D., Cao, T., Campbell, K. W. and Frankel, A. D. 2007. Time-independent and Time-dependent Seismic Hazard Assessment for the State of California: Uniform California Earthquake Rupture Forecast Model 1.0. *Seismological Research Letters* 78(1): 99-109.

- Rhoades, D. A. 2007. Application of the EEPAS model to forecasting earthquake of moderate magnitude in Southern California. *Seismological Research Letters* 78(1): 110-115.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C., Wiemer, S., Jackson, D. D. and Rhoades, D. A. 2007. Earthquake Likelihood Model Testing. *Seismological Research Letters* 78: 17-29.
- Schorlemmer, D., Zechar, J. D., Werner, M. J., Field, E. H., Jackson, D. D. and Jordan, T. H. 2010. First Results of the Regional Earthquake Likelihood Models Experiment. *PAGEOPH* 167: 859-876.
- Shen, Z. K., Jackson, D. D. and Kagan, Y. Y. 2007. Implications of geodetic strain rate for future earthquakes, with a five-year forecast of M5 earthquakes in Southern California. *Seismological Research Letters* 78(1): 116-120.
- Swets, J. A. 1973. The relative operating characteristic in psychology. *Science* 182: 990-1000.
- Ward, S. N. 2007. Methods for Evaluating Earthquake Potential and Likelihood in and around California. *Seismological Research Letters* 78: 121-133.
- Wiemer, S. and Schorlemmer, D. 2007. ALM: An Asperity-based Likelihood Model for California. *Seismological Research Letters* 78: 134-140.
- Werner, M. J. 2020. Experimental Design for Testing Hypotheses of Earthquake Precursors. Oral Presentation at 2020 SCEC Annual Meeting.
- Zechar, J. D. and Jordan, T. H. 2008. Testing alarm-based earthquake predictions. *Geophys. J. Int.* 172: 715-724.
- Zhang, S. F., Wu, Z. L. and Jiang, C. S. 2015a. Signature of Fault Healing in an Aftershock Sequence? The 2008 Wenchuan Earthquake. *PAGEOPH* 173: 73-84.
- Zhang, S. F., Wu, Z. L. and Jiang, C. S. 2015b. The Central China North-South Seismic Belt: Seismicity, Ergodicity, and Five-year PI Forecast in Testing. *PAGEOPH* 173: 245-254.
- Zhang, Y. X., Zhang, X. T., Yin, X. C. and Wu, Y. J. 2010. Study on the forecast effects of PI method to the north and southwest China. *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 22: 1559-1568.
- Zhang, Y. X., Zhang, X. T., Wu, Y. J. and Yin, X. C. 2012. Retrospective Study on the Predictability of Pattern Informatics to the Wenchuan M8.0 and Yutian M7.3 Earthquakes. *PAGEOPH* 170: 197-208.

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

试点 工作通讯目录

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

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)

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