

近十年地震预测的国际研究进展^{*}

姜丛¹, 蒋长胜^{1*}, 张琰¹, 毕金孟²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 天津市地震局, 天津 300201)

摘要: 跟踪和总结地震预测在国际上的研究进展, 是调整优化我国自主进行与地震预测相关的科学研究和推进学科建设的重要方式之一。为反映近 10 年来国际上地震预测研究的进展与变化趋势, 通过文献计量学分析、国际科学研究计划介绍和主要研究成果总结等方式, 给出我国地震预测相关研究在国际研究体系中可能的位置, 并概括了近 10 年来在全球性科学研究计划主导下国际上取得的主要科学进展, 包括预测模型研发、提升预测可操作性、拓展地震减灾应用等方面, 极大地丰富了地震预测相关学科的科学内涵并融入经济社会发展的成效, 这些将对我国地震预测相关科学研究有着重要的启发意义。

关键词: 地震预测; 减轻地震灾害风险; 预测模型; 统计检验

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0208-08

0 引言

预测 (forecast) 科学是基于观察值推断未来将要发生的合理值, 追溯到 1 000 多年前人类就已经开始的商业活动和政治活动中的预测科学研究。由于各类资源通常是相对稀缺的, 从理性上不应该浪费在虚假的认识或者未知上, 这构成了预测科学最为现实的目的。现今社会中的人口规模和性别演变、股市和各类经济趋势、疾病传播 (例如时下正在全球肆掠的 COVID-19) 等社会现象, 以及地震灾害、突发性天气气候、流域性大洪水、季节性干旱、巨型滑坡、冰雪冻融等自然灾害都需要进行科学预测, 然后才能在此基础上进行防御, 以期在最大程度上降低对人类社会的损坏。

地震预测科学进展研究是比较国内外科学发展差异、布局未来科学规划和持续推进学科建设的重要手段。在 2009 年意大利拉奎拉 $M_w 6.3$ 地震后, “国际地震预报专家委员会”提交意大利政府的《可操作的地震预测》研究报告 (Jordan *et al.*, 2011) 中, 在系统地总结了过去几十年全球在地震预测相关研究方面取得的进展以及存在的问题等基础上提出了可操作的地震预测 (Operational

Earthquake Forecasting, 简称 OEF) 技术路线。张琰等 (2019) 通过对 3 个不同历史时期的地震预测文献计量学分析, 揭示了地震预测科学研究议程的演变规律, 即在关键时间节点上受到重大事件的影响显著。这表明地震预测作为一种动态发展的学科, 及时把握地震预测研究的阶段性和即时性等科学议程具有重要意义。

近年来, 我国包括地震科技在内的各学科发展迅猛, 全球科学研究面貌也发生较大变化, 及时准确把握国际上相关学科的发展趋势和动态对进一步的科学发展较为关键。为揭示近 10 年来国际上关于地震预测研究的进展, 本文将分别从科技论文的文献计量、国际科学研究计划、地震前兆异常新发现、地震预测模型研发、地震预测关键问题的新认识、预测在减灾中的应用拓展等多种角度, 尝试分析地震预测相关的科学研究在近十年来的演变面貌。

1 文献计量给出的研究趋势和国内外比较

利用文献计量的方式分析学科领域的研究趋势是目前开展战略研究和学科趋势预测的常用手

^{*} 收稿日期: 2020-04-25.

基金项目: 国家科技基础资源调查专项 (2018FY100504) 和中国地震局重大政策理论与实践问题研究课题 (CEAZY2020ZL06) 联合资助.

✉ 通讯作者: 蒋长胜 (1979-), 博士生导师、研究员, 主要从事地震监测技术和地震预测理论研究.

E-mail: jiangcs@cea-igp.ac.cn.

段。为总体反映地震预测研究近 10 年来的科技状况和进展,本文采用文献计量的方式进行了简要分析。按照关键词“earthquake forecast”“earthquake prediction”以及“earthquake forecasting”,在 Web of Science 数据库中检索了 2010 年以来发表的收于 SCI-E 数据库中的研究论文,合计 778 篇。采用文献计量在线分析平台^①对上述文献进行了多个方面的分析。

在年度发文量上,近 10 年来每年维持在 56 ~ 96 篇,未呈现出明显的加速和减缓趋势,表明地震预测研究在学科方向上趋于稳定。在国家发文总量上,中国(200 篇)、美国(150 篇)、意大利(116 篇)、俄罗斯(95 篇)、日本(63 篇)排在前 5 位。不同国家间的合著论文方面,美国、意大利 50% 以上的论文是与其他国家合著,日本和俄罗斯的跨国合著论文比例超过 1/3,而中国的比例在 20% 以内、更多的是本国学者的内部协作。

在研究机构的国际合作关系和影响力上,美国南加州大学(USC)、意大利地球和火山科学研究所(INGV)、瑞士联邦理工学院(ETH)、新西兰地质与核科学研究所(GNS)、美国地质调查局(USGS)等机构占据地震预测国际合作网络的中心位置并具有较高的国际影响力,中国地震局(CEA)也位于相对核心位置但影响力相对小。研究机构发文量排在前 3 位的分别是:俄罗斯科学院(RAS)、中国地震局(CEA)、意大利地球和火山科学研究所(INGV)。但从总被引用次数上排在前三位的则为:美国南加州大学(USC)、意大利地球和火山科学研究所(INGV)和瑞士联邦理工学院(ETH),中国地震局(CEA)排第 8。

对地震预测的热点关键词分析表明,地震前兆、氡、地震危险性、概率预测、地震相互作用、地震活动性、 b 值是近 10 年地震预测领域较为关注的热点。文献计量在线分析平台还给出了与这些热点关键词关联紧密的“拓展关键词”,包括地震断层、模型、变形、动力学、异常。上述的热点关键词与学者们普遍认识的研究热点一致,而拓展关键词则给出了与地震预测关系相对紧密的其他研究方向的线索。

2 与地震预测有关的国际科学研究计划

在过去的 10 年中,地震预测的国际科学计划得到大规模的开展。美国南加州地震中心(SCEC)2007 年开始发起的全球“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability,简称 CSEP)计划^②是其中最具代表性的科学计划。CSEP 计划在可比较的、统一的数据来源、固定的计算规则、严格的第三方统计检验约束下,获取地震可预测属性,循序渐进地提升地震预测预报的科学认识水平和实际预测能力(Jordan, 2006)。根据统计模型的预测时空尺度的要求,用于 CSEP 实验研究的区域包括美国加州、西北太平洋、日本、意大利、新西兰和全球尺度范围共 7 个,预测时间尺度涉及 1 天、1 年和 5 年等多个时间尺度。已投入运行的分布式检验中心包括南加州地震中心、新西兰(地质和能源研究协会)、瑞士(苏黎世联邦理工学院)和日本(东京大学地震研究中心)共 4 个。Schorlemmer 等(2018)总结了项目执行的十余年来获得的认识,包括:CSEP 已发展了数百种地震预测模型、十余种预测效能检验方法,小震级($M2+$)事件的参与计算可获得更多的预测信息,地震破裂预测模型(例如 UCERF2)和应变速率模型(Bird *et al*, 2015)的应用可获得更好的预测效果,而不断改进的库仑模型等物理预测模型展现了重要的发展潜力(Cattania *et al*, 2018)。CSEP 计划的研究方式也对其他计划有重要启发意义,例如诱发地震活动(Kiralyproag *et al*, 2016)和地震预警(Böse *et al*, 2014)等研究。

2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉 $M_w 6.3$ 地震及其轰动世界的“地震学家诉讼案”,直接催生了“可操作的地震预测”(Operational Earthquake Forecasting,简称 OEF)概念及其科学研究的快速发展(Jordan *et al*, 2011)。与一般意义上的地震预测预报有所不同,OEF 的核心目标是,向公众提供权

① <https://bibliometric.com/>.

② <http://www.cseptesting.org>.

威的随时间变化的地震危险性权威信息,其主要应用在于,指导社会公众对潜在的破坏性地震提前做好防震工作,以实现有效的地震减灾(Jordan *et al*, 2010, 2014)。与“可操作的天气预测”的概念(Inness, Dorling, 2013)类似, OEF 应具有类似天气预报中的“operational fitness”的三个标准,即质量——较高的实际预测效能;一致性——对不同的时空尺度的地震可预测效果具有一致性;价值——预测结果能实质性地对防震措施的实施做出贡献(Jordan *et al*, 2010)。国际上关于 OEF 的概念、关注的重要科学议题,构建 OEF 系统的技术基础和实现,以及在减轻地震灾害发挥科学效益的途径等,均对当前地震预测预报发展的“瓶颈”阶段带来了重要的借鉴价值。当前 OEF 研究的重要议题,包括引入“概率增益”技术解决低地震发生率地区地震危险性概率实际问题(Marzocchi *et al*, 2009; Zhuang, 2011),考虑社会风险和灾害可承受水平的地震预报发布阈值(Marzocchi *et al*, 2014)、地震动危险概率(Herrmann *et al*, 2016)、地震应急疏散成本效益分析(van Stiphout *et al*, 2010)、震后的恢复重建决策(Field *et al*, 2016)等,将以往的“银弹”式(silver bullet)的预报地震事件本身、无法链接虚报造成的可能更高的社会风险难题,引入到可操作的层面。

3 地震前兆异常现象的研究

揭示与地震孕育发生有关的前兆现象是地震预测研究的重要内容,是进一步发展量化的预测模型和地震危险性分析技术的重要基础。Chien (2020) 获得了中国台湾地区的地温前兆异常距离未来地震发生地点的距离关系,即约为地震破裂长度的 20~25 倍。Singh (2020) 研究了温泉钻孔中的过氧化氢浓度,认为与活动断裂带深部的岩石应力和地壳变形活动相关。断层带中的超压和超临界 CO₂ 流体以及孔隙压与渗透率变化被考虑后,可显著提高地震破裂成核的时间尺度和空间尺度识别精度,被认为对地震的短期和长期预测有重要意义(Snell *et al*, 2020)。Hashemi 等(2013) 发展了地震的地球化学前兆尤其是氢浓度

变化的新算法,用来估计未来发生地震的位置和震级。对 2015 年尼泊尔 8.1 级大地震,有研究认为横河平原的地下水人为开采显著影响了喜马拉雅主逆冲断层(MHT)的水平压缩应力(Kundu *et al*, 2015),对促进此次地震的发生有重要影响。长期以来, GPS 等资料给出的地表变形信息被用于中长期地震危险性预测中,但 Li 等(2020) 发展了提取连续 GPS 信号异常并用于地震的短临预测的新技术。地震成核过程不同阶段所伴随的电磁辐射现象,被认为可识别并用于数小时的临震预测(Frid *et al*, 2020)。Břizová 等(2019) 在地震的电离层前兆异常研究中,发展了振幅时间序列的自相关和随机矩阵处理技术,认为可用于识别 4 级以上浅源地震的前兆变化。

4 地震预测模型的研发

建模是地震预测研究的重要领域,新的地震预测模型尤其是多学科交叉的预测模型在近 10 年中得到快速发展。一些基于大地测量学的新的地震预测模型得到发展(Strader *et al*, 2017),包括利用 GPS 给出的应变率与地震活动平滑模型组成的混合模型(Strader *et al*, 2018),以及将大地测量的地震预测模型结果转化为地震发生率预测的技术(Rhoades *et al*, 2017)。Hong 等(2018) 发展了基于 GNSS 的地震短临预测指标方法,该项技术主要利用了地球物理场效应模型校正以及对数据周期性变化校正来识别位移场的异常变化。针对破裂空间展布尺度较大的强震的余震触发各向异性问题,Guo 等(2017) 发展一种新的时空传染型余震序列模型(ETAS),可对此类强震给出更为科学合理的余震发生率估计。

工业开采活动诱发地震的预测模型是近年来快速发展的热点领域。由于注水等工业活动和断层活化的进程具有明显的非平稳性,多种短期地震预测模型得到研发(Petersen *et al*, 2015; Dost *et al*, 2017)。Langenbruch 和 Shapiro (2010) 使用了修正的 Omori 定律来预测俄克拉荷马州地区的诱发地震活动。Bachmann 等(2011) 利用 $R-J$ 和 ETAS 模型研究了对瑞士的诱发地震背景地震活动率。在流体侵入等动力作用下的震群、诱发地震

活动过程中，背景地震活动发生率随着时间可能发生变化，因此考虑这种时间变化的 ETAS 模型得到发展。此类算法利用短步骤的迭代算法被用来动态地估算模型参数，已被应用于油气开采诱发地震等的地震危险性分析中（Lombardi *et al.*, 2010；Eto *et al.*, 2013；Llenos, Michael, 2016）。Dieterich 等（2015）利用基于速率-状态摩擦（rate-state friction）的地震模拟器（RSQSim），发现注水产生的诱发地震活动的时空模式对注前的断层应力非常敏感。上述研究，可为潜在诱发地震的概率危险性评估提供重要技术保障。

混合模型（hybrid model）是近年来快速发展的领域。由多种单一预测模型集成的新的混合模型，往往具有明显高于单一预测模型的概率增益，其本质上是采用筛选预测效能“最优”的预测模型，利用不同时间尺度或者相同时间尺度按照一定的权重系数进行“混合”，经过优化设计后作出针对性的地震预测模型。例如，Rhoades 等（2015）将预测时间尺度的大小作为权重设置的依据，以 HBG, PPE, PMF, PPI, FLT 等 5 种单一模型相互混合，得到 26 个新的混合模型。此外，混合模型的“集成”方式得到了新的探索（Rhoades *et al.*, 2015, 2016）。在构建 OEF 系统过程中，混合模型可显著提升“可操作”程度和地震危险性分析的增益，例如意大利 OEF 系统，将 ETAS 模型（Lombardi, Marzocchi, 2010b），ETES 模型（Falcone *et al.*, 2010），STEP 模型（Woessner *et al.*, 2010）等按不同的权重组合成新的 OEF 基础模型。新西兰 OEF 系统（Gerstenberger *et al.*, 2014；Rhoades *et al.*, 2016）中，采用基于多种预测模型构建的混合模型（EE）。事实上，混合模型的发展，也正是 CSEP 计划运行 10 年来所获得的大量的地震可预测性的一个重要成果。Stacy 等（2014）将 Coulomb 模型和 STEP 模型结合研究了 Canterbury 地震序列的余震发育情况，“混合可操作地震预报模型”（Hybrid Operational Earthquake Forecasting Model）的概念被提出，并被应用于克莱斯特彻奇城市的建筑标准决策及郊区建筑重建计划中（Gerstenberger *et al.*, 2014）。

地震物理预测在理论体系和模型方法研究上长期以来较为匮乏。地震物理预测在方法原理方

面主要集中在库仑破裂应力变化（ ΔCFF ）描述断层受力状态及其变化与地震发生率的关系、速率-状态摩擦定律（rate-state friction law）等方面。近 10 年中，对地震物理预测模型的预测性能、模型改进取得重要进展。Cattania 等（2018）对速率-状态摩擦定律和 Coulomb 模型等物理预测模型是否可有助于提升地震预测的可靠性，进行了震例检验和讨论。Segou 等（2013）系统地将 7 种不同版本的概率预测的 ETAS 模型和 21 种将库仑应力变化和速率-状态摩擦定理结合的物理预测 CRS 模型，在美国北加州地区进行了预测效能的比较。结果表明 ETAS 模型可以更好地预测近震源区的地震活动，CRS 模型在远离主震破裂区、主震发生后的短时间内表现更好，因此物理预测模型与统计地震学预测模型在地震预测效能上是很强的互补性。Stacy 等（2014）将库仑应力变化模型作为空间约束，与短期地震概率预测 STEP 模型进行“混合”应用，取得比两种模型单独预测更好的预测效果，并认为考虑库仑应力变化带来的物理约束，可以明显提高统计地震学预测模型的预测能力。

5 与地震预测有关的新认识和预测在减灾中的应用拓展

与地震预测有关的一些基础问题在近 10 年中得到解决。例如近年来广受关注的与俯冲带强震孕育发生过程相关的震颤（tremor）事件，为量化描述其时空迁移模式，Wang 等（2017）通过引入伯努利变量和连续变量，发展了新型的隐马尔可夫（hidden Markov）模型，并解决了对震颤事件在时间序列上稀疏分布、难以模拟的问题。针对震后早期阶段余震大量缺失、难以给出准确的余震概率预测结果的问题，Omi 等（2015）发展了基于连续检测率函数和贝叶斯方法余震概率计算方法。Zhuang 等（2017）发展了一种余震序列重新构建方法，并发现余震序列参数在震后早期阶段应具有较强的稳定性。地震序列未来是否会发生灾变性的强震或强余震，是地震预测中的核心问题之一，Shcherbakov 等（2017）利用地震序列中的早期事件（前震或早期余震）以及震级-频

度分布和地震发生率分布,构建了极端事件震级大小的贝叶斯预测分布,可用于考虑不确定度情况下的主震或强余震的震级预测。在地震活动参数计算中,传统的采用较为主观的地震空间选择规则,给参数计算结果带来较大的不确定性,Kamer 和 Hiemer (2015) 提出了基于数据驱动 (data-driven) 和惩罚似然方法的 b 值无参数计算新方法,利用数据本身来约束模型所允许的复杂度,并使用一组模型设置方案而不是采用单一的最佳模型,由此可实现无参数计算、显著避免了地震选择规则的主观性。地震预测中还有一类难点问题是,对强震孕育发生过程当前所处危险状态的预测,尽管与通常所说的面向未来一定时期的“预测”(forecasting) 概念不同,但在地震危险性分析中,这种即时性的危险状态判断或具有更为重要的现实意义。Rundle 等 (2016) 将宏观经济学中的“即时预测”(nowcasting) 概念引入地震危险性分析中,并基于统计地震学构建了无参数的分析方法,进行了有益的探索。

拓展地震预测的减灾效益、直接服务减轻地震灾害风险的决策部署上,地震预测技术逐渐发挥重要作用。意大利民防局采用了“可操作的地震预测”(OEF) 技术系统进行地震减灾决策,该系统主要基于多种统计地震学方法进行集成的混合模型预测模型 (Iervolino *et al.*, 2015)。在日本,实时的余震概率预测技术系统已正式运行,并为政府提供地震减灾决策参考信息 (Omi *et al.*, 2016)。统计地震学中的时空传染型余震序列 (ETAS) 模型,已被正式用于与“统一的地震破裂”模型 (例如美国加州的 UCERF3 模型) 相结合,开始在地震危险性评价上发挥作用 (Field *et al.*, 2016)。此外, Herrmann 等 (2016) 利用对理论地震目录的分析,模拟了对历史上发生过的 1356 年 Basel 地震进行减轻灾害风险决策与信息服务等问题。

6 结论和讨论

为反映近 10 年来国际上关于地震预测研究的进展,本文通过系统地调研了 2010 年以来的国际上科技论文的文献计量、与地震预测有关的国际

科学研究计划、地震前兆异常研究、地震预测模型研发与地震预测有关的新认识和预测在减灾中的应用拓展等方式,试图给出此 10 年期间地震预测相关研究进展的主要面貌。获得的主要认识如下:

(1) 通过对 Web of Science 数据库中近 10 年收录的论文的文献计量分析表明,地震预测作为相对成熟的学科在发展趋势上较为稳定,中国是论文发文量最多的国家,但在国家和机构影响力、国际化合作程度等方面与美国和欧洲部分国家还存在差距。此外给出了此期间的研究热点关键词。

(2) 在国际科学研究计划上,CSEP 计划完成 10 年期的第一阶段运行并进行了系统的科学总结,在预测模型研发、地震可预测属性研究、拓展地震预测的减灾应用和启发其他研究计划上取得重要成果。OEF 研究在解决地震预测的信息增益、服务减灾的有效性、发展可操作的地震模型与技术系统等方面取得显著进展。

(3) 在地震的前兆异常研究中,持续开展了电离层异常、流体水化学等领域的前兆异常探索,在预测指标、与预测的时空距离等基本要素的关系等方面取得一定进展。

(4) 在地震预测模型研发上,基于新型的多学科交叉手段的预测模型、可操作的地震预测模型和混合模型、基于地震物理预测的模型均得到大量的研发,还拓展到了工业开采诱发地震领域的预测建模。这些预测模型的研发与 CSEP 计划和 OEF 研究的推进密不可分。

(5) 在基础研究上,与地震预测有关的重要科学问题得到探索、大量新技术得到发展。在震后应急疏散、恢复重建等减灾风险决策与信息服务上,地震预测的应用得到极大拓展,这将促进地震预测科学更为紧密地融入经济社会发展进程中。

本文对上述 5 个方面的回溯性总结,可能难于概括与地震预测有关的研究全貌。实际上,在与地震预测有关的长期尺度地震危险性分析、地震风险评价等应用领域,本文并未深入涉及。此外,在描述某一方面进展时,遴选的成果是否真正具有代表性仍有主观性。从上述 10 年的研究进展看,CSEP 计划和 OEF 研究等全球性科学研究,极大地

促进了预测模型、检验评价、预测的可操作性、减灾应用拓展等方面的进步,成为主导国际上地震预测研究的主要推动力,对此类重大研究计划未来实施情况和进展的关注,将有助于判断今后一个时期的研究趋势。

研究中使用了文献计量在线分析平台 (<https://bibliometric.com/>),稿件得到云南省地震局付虹研究员的指导,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 张琰,吴忠良,李佳威. 2019. 地震预测预报研究议程的演变:文献计量分析的启示[J]. 地震,39(2):159–173.
- Bachmann C E, Wiemer S, Woessner J, *et al.* 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence; Introducing a probability – based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems [J]. *Geophysical Journal International*, 186(2):793–807.
- Bird P, Jackson D D, Kagan Y Y, *et al.* 2015. GEAR1: A global earthquake activity rate model constructed from geodetic strain rates and smoothed seismicity[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(5):2538–2554.
- Brizová L, Kriz J, Studnicka F, *et al.* 2019. Methods for the evaluation of the stochastic properties of the ionosphere for earthquake prediction—random matrix theory[J]. *Atmosphere*, 10(7):413.
- Böse M, Allen R, Brown H, *et al.* 2014. CISEN shakealert: an earthquake early warning demonstration system for California[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany: *Advanced Technologies in Earth Sciences*. 49–69.
- Cattania C, Werner M J, Marzocchi W, *et al.* 2018. The forecasting skill of physics – based seismicity models during the 2010–2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence [J]. *Seismological Research Letters*, 89(4):1238–1250.
- Chien S H J, Chi W C, Ke C C. 2020. Precursory and coseismic groundwater temperature perturbation: An example from Taiwan [J]. *Journal of Hydrology*, 582:124457.
- Dieterich J H, Richardsdinger K B, Kroll K A, *et al.* 2015. Modeling injection – induced seismicity with the physics – based earthquake simulator RSQSim [J]. *Seismological Research Letters*, 86(4):1102–1109.
- Dost B, Ruigrok E, Spetzler J. 2017. Development of seismicity and probabilistic hazard assessment for the Groningen gas field [J]. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5):235–245.
- Edward H F, Kevin R M, Jeanne L H, *et al.* 2017. A spatiotemporal clustering model for the third uniform California earthquake rupture forecast (UCERF3 – ETAS): toward an operational earthquake forecast [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3):1049–1081.
- Eto T, Asanuma H, Adachi M, *et al.* 2013. Application of the ETAS seismic statistical model to microseismicity from geothermal fields [J]. *GRC Transactions*, 37:149–154.
- Falcone G, Console R, Murru M, *et al.* 2010. Short – term and long – term earthquake occurrence models for Italy: ETES, ERS and LTST [J]. *Annals of Geophysics*, 53(3):41–50.
- Field E H, Jordan T H, Jones L M, *et al.* 2016. The potential uses of operational earthquake forecasting [J]. *Seismological Research Letters*, 87(2):313–322.
- Frid V, Rabinovitch A, Bahat D. 2020. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations [J]. *Physics Letters A*, 384(4):126102.
- Gerstenberger M C, McVerry G, Rhoades D A, *et al.* 2014. Seismic hazard modeling for the recovery of Christchurch [J]. *Earthquake Spectra*, 30(1):17–29.
- Guo Y, Zhuang J, Hirata N, *et al.* 2017. Heterogeneity of direct aftershock productivity of the main shock rupture [J]. *Journal of Geophysical Research*, 122(7):5288–5305.
- Hashemi S M, Negarestani A, Namvaran M, *et al.* 2013. An analytical algorithm for designing radon monitoring network to predict the location and magnitude of earthquakes [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(3):2249–2262.
- Herrmann M, Zechar J D, Wiemer S, *et al.* 2016. Communicating time – varying seismic risk during an earthquake sequence [J]. *Seismological Research Letters*, 87(2):301–312.
- Hong M, Shao D S, Wu T F, *et al.* 2018. Short – impending earthquake anomaly index extraction of GNSS continuous observation data in Yunnan, Southwestern China [J]. *Journal of Earth Science*, 29(1):230–236.
- Iervolino I, Chioccarelli E, Giorgio M, *et al.* 2015. Operational (short – term) earthquake loss forecasting in Italy [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4):2286–2298.
- Inness P M, Dorling S. 2013. *Operational weather forecasting* [M]. Oxford, UK: Wiley – Blackwell, 246.
- Jordan T H, Chen Y T, Gasparini P, *et al.* 2011. Operational earthquake forecasting: State of knowledge and guidelines for implementation [J]. *Annals of Geophysics*, 54(4):315–391.
- Jordan T H, Jones L M. 2010. Operational earthquake forecasting: Some thoughts on why and how [J]. *Seismological Research Letters*, 81(4):571–574.
- Jordan T H, Marzocchi W, Michael A J, *et al.* 2014. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness [J]. *Seismological Research Letters*, 85(5):955–959.
- Jordan T. 2006. Earthquake predictability, brick by brick [J]. *Seismological Research Letters*, 77(1):3–6.
- Kamer Y, Hiemer S. 2015. Data – driven spatial *b* value estimation with applications to California seismicity: To *b* or not to *b* [J]. *Journal of Geophysical Research*, 120(7):5191–5214.
- Kiralyproag E, Zechar J D, Gischig V, *et al.* 2016. Validating induced seismicity forecast models-induced seismicity test bench [J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(8):6009–6029.

- Kundu B, Vissa N K, Gahalaut V K. 2015. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo – Gangetic plains on the 25 April 2015 M_w 7.8 Gorkha, Nepal earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 42(24):10607 – 10613.
- Langenbruch C, Shapiro S A. 2010. Decay rate of fluid – induced seismicity after termination of reservoir stimulations [J]. *Geophysics*, 75(6):53 – 62.
- Li N, Kong X Z, Lin L. 2020. Anomalies in continuous GPS data as precursors of 15 large earthquakes in Western North America during 2007 – 2016[J]. *Earth Science Informatics*, 13(1):163 – 174.
- Llenos A L, Michael A J. 2016. Characterizing potentially induced earthquake rate changes in the Brawley seismic zone, southern California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5):2045 – 2062.
- Lombardi A M, Cocco M, Marzocchi W. 2010. On the increase of background seismicity rate during the 1997 – 1998 Umbria – Marche, central Italy, sequence: Apparent variation or fluid – driven triggering? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3):1138 – 1152.
- Lombardi A M, Marzocchi W. 2010. The ETAS model for daily forecasting of Italian seismicity in the CSEP experiment[J]. *Annals of Geophysics*, 53(3):155 – 164.
- Marzocchi W, Lombardi A M, Casarotti E. 2014. The establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy[J]. *Seismological Research Letters*, 85(5):961 – 969.
- Marzocchi W, Lombardi A M. 2009. Real – time forecasting following a damaging earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 36(21):L21302.
- Omi T, Ogata Y, Hirata Y, *et al.* 2015. Intermediate-term forecasting of aftershocks from an early aftershock sequence: Bayesian and ensemble forecasting approaches [J]. *Journal of Geophysical Research*, 120(4):2561 – 2578.
- Omi T, Ogata Y, Shiomi K, *et al.* 2016. Automatic aftershock forecasting: A test using real – time seismicity data in Japan [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6):2450 – 2458.
- Petersen M D, Mueller C S, Moschetti M P, *et al.* 2015. Incorporating induced seismicity in the 2014 United States National Seismic Hazard Model – Results of 2014 workshop and sensitivity studies[Z]. United States Geological Survey. Open – File Rep. 2015 – 1070.
- Rhoades D A, Christophersen A, Gerstenberger M C, *et al.* 2015. Multiplicative earthquake likelihood models based on fault and earthquake data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(6):2955 – 2968.
- Rhoades D A, Christophersen A, Gerstenberger M C, *et al.* 2017. Multiplicative earthquake likelihood models incorporating strain rates[J]. *Geophysical Journal International*, 208(3):1764 – 1774.
- Rhoades D A, Liukis M, Christophersen A, *et al.* 2016. Retrospective tests of hybrid operational earthquake forecasting models for Canterbury [J]. *Geophysical Journal International*, 204(1):440 – 456.
- Rundle J B, Turcotte D L, Donnellan A, *et al.* 2016. Nowcasting earthquakes: nowcasting earthquakes [J]. *Earth and Space Science*, 3(11):480 – 486.
- Schorlemmer D, Werner M, Marzocchi W, *et al.* 2018. The collaboratory for the study of earthquake predictability: achievements and priorities [J]. *Seismological Research Letters*, 89(4):1305 – 1313.
- Segou M, Parsons T, Ellsworth W L, *et al.* 2013. Comparative evaluation of physics – based and statistical forecasts in Northern California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 118(12):6219 – 6240.
- Shcherbakov R, Zhuang J, Ogata Y. 2017. Constraining the magnitude of the largest event in a foreshock – mainshock – aftershock sequence [J]. *Geophysical Journal International*, 212(1):1 – 137.
- Singh P, Mukherjee S. 2020. Chemical signature detection of groundwater and geothermal waters for evidence of crustal deformation along fault zones[J]. *Journal of Hydrology*, 582:124459.
- Snell T, De Paola N, van Hunen J. 2020. Modelling fluid flow in complex natural fault zones: Implications for natural and human – induced earthquake nucleation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 530:115869.
- Stacy S, Gerstenberger M C, Williams C A, *et al.* 2014. A new hybrid coulomb/statistical model for forecasting aftershock rates [J]. *Geophysical Journal International*, 196(2):918 – 923.
- Strader A, Schneider M, Schorlemmer D. 2017. Prospective and retrospective evaluation of five – year earthquake forecast models for California [J]. *Geophysical Journal International*, 211(1):239 – 251.
- Strader A, Werner M, Bayona J, *et al.* 2018. Prospective evaluation of global earthquake forecast models: Two years of observations support merging smoothed seismicity with geodetic strain rates [J]. *Seismological Research Letters*, 89(4):1262 – 1271.
- van Stiphout T, Wiemer S, Marzocchi W. 2010. Are short – term evacuations warranted? Case of the 2009 L’ Aquila earthquake [J]. *Geophysical Journal International*, 37(6):1 – 5.
- Wang T, Zhuang J C, Obara K, *et al.* 2017. Hidden Markov modelling of sparse time series from non – volcanic tremor observations [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 66(4):691 – 715.
- Woessner J, Christophersen A, Zechar J D, *et al.* 2010. Building self – consistent short – term earthquake probability (STEP) models: Improved strategies and calibration procedures [J]. *Geophysical Journal International*, 53(3):141 – 154.
- Zhuang J C, Ogata Y, Wang T. 2017. Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS parameters [J]. *Earth, Planets and Space*, 69:36.
- Zhuang J C. 2011. Next – day earthquake forecasts for the Japan region generated by the ETAS model [J]. *Earth, Planets and Space*, 63:207 – 216.

Progress of Earthquake Forecasting Research in the Last Decade in the World

JIANG Cong¹, JIANG Changsheng¹, ZHANG Yan¹, BI Jinmeng²

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(2. *Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China*)

Abstract

Tracking and summarizing the international progress in research related to earthquake forecast is an important way to adjust and optimize the scientific research of earthquake forecast in China and promote the construction of corresponding disciplines. In order to reflect the progress and trend of earthquake forecast research in the world for the past 10 years, this paper clarifies the possible “position” of earthquake forecast research of China in international research scale, by means of bibliometric analysis, introduction of international scientific research plan and summary of main research results; summarizes main international scientific progress in the past 10 years under the guidance of global scientific research project. Many aspects, including remarkable progress in the research, development of forecast model, improvement of Operational Earthquake Forecasting, expansion of application of earthquake disaster reduction, etc., greatly enriched the scientific connotation of earthquake forecast discipline and built the effect of integration into economic and social development. All of items mentioned above will have important and enlightening significance to the scientific research in earthquake forecast in China for the future.

Keywords: earthquake forecasting; mitigation of earthquake disaster risk; earthquake forecast model; statistical test