

地震预测预报 相关的重要科技挑战

(2018年)

“地震预测预报二十年发展设计”工作组

地震出版社

地震预测预报 相关的重要科技挑战

(2018年)

“地震预测预报二十年发展设计”工作组



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震预测预报相关的重要科技挑战. 2018 年 / “地震预测预报二十年发展设计” 工作组编著. -- 北京: 地震出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5028-4921-4

I. ①地… II. ①地… III. ①地震预测—研究—中国
②地震预报—研究—中国 IV. ①P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 323166 号

地震版 XM4087

地震预测预报相关的重要科技挑战 (2018 年)

“地震预测预报二十年发展设计” 工作组

责任编辑: 董 青

责任校对: 孔景宽

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印有限公司

版 (印) 次: 2018 年 1 月第一版 2018 年 1 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 92 千字

印张: 6.75

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 978-7-5028-4921-4/P(5624)

定价: 45.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

目 录

- 一、地震预测预报的现状和发展目标 1
- 二、地震预测对观测仪器和观测系统的新的需求与挑战 10
- 三、地震预测预报领域公共服务的科技挑战和政策挑战 23
 - 附录 1：地震预测预报用语规范（试行） 38
 - 附录 2：《国家地震科技创新工程》的“解剖地震”计划 55
 - 附录 3：防震减灾“十三五”专项规划《地震监测预报规划》 58
 - 附录 4：《国际地震动态》“地震预测预报20年发展设计研讨专栏”
文章目录（截至2017年12月） 93
 - 附录 5：我国地震预测预报工作的一个评估 94
- 后 记 99

一、地震预测预报的现状和发展目标

（一）各类地震预测预报的定义和作用

长期地震预测通常是指时间尺度为十年的预测。与其他科学分支（例如气象学）中的“长期预测”的定义不同，长期地震预测通常不是指一个较长的时间以后的一个时间范围内发生地震的概率，而是从现在开始起算的一个较长的时间里发生地震的概率，因而，通常所说的由于非线性效应（例如“确定性混沌”或“自组织临界性”）而引起的长期预测的实质性的困难，并不简单地适用于长期地震预测的情况。在我国，长期地震预测直接为十年或十五年尺度的“地震重点危险区”的确定，并进而为“地震重点监视防御区”（简称“重防区”）的确定服务，因而对减轻地震灾害损失风险具有重要的应用价值。

中期地震预测通常是指时间尺度为年的预测。我国中期地震预测的两个重要的服务形式，一是三年时间尺度的“地震大形势”估计，二是年时间尺度的“年度地震趋势会商”，这两种地震趋势估计对于有重点地加强防震减灾准备非常重要，并且因其是一项长期坚持的、真正意义上的“向前预测”检验，而具有不可取代的科学价值。

一次强震发生后对地震序列类型的判断和在“主震-余震型”序列的情况下对余震趋势的预测（包括余震持续时间、最大震级、最可能地点等的预测），具有相当的科学基础，对震后紧急救援行动的部署和震后重建的规划等均有十分重要的意义。

短临地震预测，包括短期预测（即对3个月内将要发生地震的时间、地点、震级的预测）和临震预测（即对10日内将要发生地震的时间、地点、震级的预测），目前还是一个科学难题。类似于1975年海城地震那样具有明确的“前兆

信息组合”的地震，仅占全部地震的一个非常小的比例。在一些罕见的幸运情况下，依靠现有的观测手段和预测预报经验，可以对一些类型的地震进行某种程度的短临预测预报。中国科学家不放弃这种几率很低的预测机会，是为了最大限度减轻人民生命财产损失。

近年来科学上的一个重要进展是，对于一项短临预测研究成果究竟在科学上有什么价值，已形成规范的检验标准。其中最为重要的三个概念，一是环境干扰排除的规范，二是异常信息识别的判据，三是预测预报效能的检验。按照科学规范的检验标准，通过震情会商，考察“疑似”的“异常”是否可能具有科学价值和实际意义，从而在出现一些“异常”或“预测意见”的情况下能够做到科学分析、理性判断、及时处置、有序应对，也是社会对地震预测预报业务的一个重要需求。

防震减灾科技中，一般将预测作为科学界内部关于地震趋势的判断，将预报作为根据科学判断通过政府传递给社会的信息，这个约定与其他领域不尽相同。值得指出的是，在地震预测预报业务的“需求侧”，经济社会的发展和技术的进步，给地震预测预报的应用带来新的发展空间。例如，在没有“灾害情境构建”技术的条件下，公众对地震预测预报信息的应用只能是“大而化之”的。在没有地震预警（earthquake early warning）技术的条件下，人员疏散是对短临地震预测预报的最有效的响应对策，但同时虚报的负面影响也随之而来，并且随着经济社会的发展而愈加严重。然而，随着新技术的发展，这种情况开始出现根本性的变化。信息时代，“精准信息”与“精细信息服务”之间的区别愈加明显，就是说，恰当地使用不够精准的信息，仍可以根据服务对象的需要提供精细的信息服务；相反，精准的信息如果使用不当，也达不到精细服务的要求。近年来，随着我国经济社会的快速发展，公众对减少地震造成的损失的要求、对减轻地震灾害损失风险的要求越来越高，对各类地震预测预报信息

的针对性、时效性、科学性和透明度的要求越来越高，地震预测预报相关的社会治理和公共服务的体系化、精细化、个性化，已成为可以预见的发展趋势。

（二）与地震预测预报相关的科学认识和科技进展

地震预测预报问题一直是国际地震科技领域密切关注的科学问题之一。国际地震学与地球内部物理学协会（IASPEI）分别于1991年和1997年通过决议，支持国际合作地震预报实验场项目。2005年，IASPEI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，IASPEI通过决议，支持地震预测预报研究和地震预测预报方法的科学检验。

当代地球科学的学科交叉和集成，带动了地震科学技术的不断创新，也为向地震预测预报这一世界性科学难题发起新的冲击创造了条件。新的观测技术和实验技术，给地震预测预报研究不断注入新的生机和活力。地震科学经过一个多世纪的发展，已成为一个以观测为基础、理论体系较为完整、紧密结合实际的科学领域。地球过程观测的长期优势开始显现，为做出新发现和回答很多久已提出的科学问题提供了良好的条件。“实验”的概念大大扩展，面向地球的大尺度可控实验与主动探测和密集观测之间的界限开始突破。高性能计算成为科学数据处理和地球过程模拟的重要手段。所有这些，都为地震预测预报的研究和实践提供了新的发展的基础。

就全球尺度看，绝大多数强震分布在板块边界带上；就中国大陆的尺度看，绝大多数强震分布在活动块体边界带上，这说明关于地震和地震预测预报问题，是可以有科学认识基础的。但是，教科书中给出的地震的“弹性回跳”模型，只是一个高度简化的情况，如果现实世界果真如此，那么地震的预测预报问题将会简单得多。按照目前的认识，从物理上看，与中长期地震预测预报

有关的因素，至少要考虑板块相互作用、区域应力场、地壳形变分配、地壳中的韧性转换带、地震断层带及其上的“闭锁带”、历史地震和古地震的情况等；与短临地震预测预报有关的因素，则至少要考虑地震断层带的结构和“性能”、地震断层带上流体的作用、地震的“触发”、“寂静地震”的作用、与区域孕震模型相适应的可能的“前兆”现象、可能的“前兆”机理等。这些认识构成了目前地震预测预报研究的科学基础，也同时说明了地震预测预报研究的限度及这种限度的原因。重要的是，围绕上述关于地震成因和地震预测预报的科学认识，可以有针对性地设计和实施具体的观测和监测项目，以约束模型、检验假说、实施监测、探索预测预报的可能性，并基于现有的预测预报能力为社会的防震减灾服务。

关于地震预测预报问题，近年来在科学认识、探测技术、观测积累等方面都有显著进展，但在一些关键环节上，例如，地震破裂是如何“决定自己的大小”的、地震断层带上的流体究竟扮演着什么角色、地震过程中能量是如何分配的，等等，现在还没有满意的答案。解决这些问题的根本方法，是面向地球的观测研究。近年来发展的宽频带地震台阵、主动源探测、地震科学钻探和深部观测台阵、连续GPS测量、深源气体观测等新的技术，与此相关的“尾波相关干涉”方法（C3）、“重复地震”方法、地震各向异性、地震“应力触发”计算等新的方法，与此相关的“间歇性滑动与颤动”（ETS，或“寂静地震”）、地震断层“润滑”（fault lubrication）效应、“固定凹凸体”（persistent asperity）现象等新的发现，都是试图解决这一问题的新的技术、新的方法和新的发现。值得一提的是，在国际地震科学的分类中，这些内容常常并不属于（狭义的）“地震预测预报研究”，但这些科学进展却是地震预测预报研究所必备的基础。

事实上，长期的科技发展和学科演化，已使我国地震科技和防震减灾中所

说的“地震预测预报”，与国际上所说的earthquake prediction有了很大的不同。在我国，“地震预测预报”是包括长中短临预测预报和震后趋势估计的一个相当宽的范围，而“地震预测预报研究”则包括了从地震构造、古地震研究到震源区深部地球物理、地震断裂力学，从地震观测技术、地球物理场和地球化学观测技术到地球内部物性的地球物理探测、地震断层带物理的一个相当广泛的领域。关于国际地震预测预报研究的一个广为流传的、误导性的说法，即国际同行“大都不关注”地震预测预报问题，“只有”中国地震学家坚持开展地震预测预报研究，其主要成因，就是这一类似于“龍”和“dragon”的文化差异。这是在借鉴其他国家和地区的经验时应该注意的一个情况。

（三）地震预测预报的发展目标

形成和不断提升与现代科技发展水平相适应的地震预测预报能力，形成和不断提升与防震减灾国家目标相适应的各类地震预测预报信息的科学、精准使用能力，是防震减灾事业发展的一项重要任务，也是地震预测预报工作的主要发展目标。

从数量的角度说，两种类型的指标体系具有同等重要的意义。一是具体的数字，例如表征地震监测能力的震级下限；二是“黑/白式”的“地图”，例如表征是否已经开始提供社会的科技产品的“产品清单”。目前地震预测预报工作的主要问题是：在地震预测预报公共服务方面，还有很多内容上的“空白”亟待填补；在地震预测预报研究与实践方面，还有很多技术性的“空白”亟待填补。因此在未来二十年中，地震预测预报研究和地震预测预报工作发展的更有意义的指标体系，应主要是对这些“填补空白”工作的程度的度量。

要针对《中华人民共和国防震减灾法》规定的地震预测预报相关的各项法

律职责，全面部署地震预测预报研究。一要深入研究地震大形势预测的科学问题，给出地震大形势变化的科学判断的方法和指标体系；深入研究中长期地震预测方法，长期预测、10年预测、3年地震大形势预测以一定形式向社会发布；要针对重点监视区，实现地震孕育模型的有效约束、地震孕育过程和“预期前兆”的有效监测、对地震预测预报方法的有效检验；提出地震重点监视区强化跟踪监测规范。二要深入研究年度地震趋势会商的方法，规范年度会商的结果产出，改善年度会商的预测效果；考虑年度会商结果的公布及其合理使用问题。三要深入研究地震预测预报方法的检验问题，提出地震预测预报方法检验的技术标准，实现地震预测预报方法检验的规范化；要创新地震监测预报的体制机制，建立对地震预测预报具有潜在意义的地球观测数据的收集、评估和质量保证机制；要建立震情会商的理论基础和技术规范。四要深入研究震后趋势判断和余震预测的科学问题，建立针对地震序列类型判断和余震预测的技术系统。五要建立根据地震危险性概率进行风险决策的决策支持系统；建立地震预测预报意见发布的参考决策规范和地震预测预报意见取消的参考决策规范；建立应对特殊震情和特殊时段加强地震监测和震情跟踪工作的规范；建立地震震例总结和地震科学考察的规范。

要基于新的科技进展，提升地震预测预报能力、完善地震预测预报工作体系。一要全面部署“面向预测预报的监测和模拟”（Modeling and Monitoring for Prediction）工作。根据现有的科学认识和工作基础，对一个特定地区的面向预测预报的监测和模拟的能力，取决于针对该地区的“想定地震破裂”（scenario rupture），提出地震孕育和发生的（不同版本的）模型；针对地震孕育和发生的（不同版本的）模型，进行观测约束；根据地震孕育和发生的模型，确定“预期前兆”；针对地震的“预期前兆”，部署监测系统；根据当地的地震活动和地震监测的情况，提出预测预报工作方案。首先，应对全国各省、自治区、直辖市的

“重点监视防御区”和年度地震危险区，提出具体的预测预报工作方案。二要全面赶超地震预测预报研究方面的国际进展。全面掌握20世纪末、21世纪初出现的可能与地震预测预报直接相关的新概念和新技术，重点是：C3技术；地震断层带钻探技术；ETS观测技术；主动源探测技术；基于高性能计算的“地震模拟器”（Earthquake Simulator）技术。同时，部署必要的研究力量，进行基础研究和人才储备，保持对国际科技新进展做出快速反应的能力。三要有重点地消化、审视发展中国家地震学家在长期的地震预测预报探索实践中形成的思路和方法，并根据国际地震预测预报研究的进展，向国际同行系统介绍这些思路和方法。重点是：地震活动性分析方法；中长期地震预测预报方法；地震会商制度；震后调查和震例总结；地震前兆监测的质量控制；地震预测预报实践。

要设计和完善地震预测预报服务于社会、吸纳和管理社会力量参加地震预测预报工作的公共服务产品和社会治理机制，提高地震预测预报对提升全社会的“地震灾害韧性”（earthquake disaster resilience）的贡献率。一要进行各类技术用于地震预测预报的潜力和能力的全面评估，提出相应的技术规范，包括：各类技术手段的组织实施规范；各类技术手段的数据汇交规范；各类技术手段的质量认证规范；前兆异常判定和预测效能检验规范；地震预测预报信息披露发布规范；出现一些异常后进行响应性的强化监测的规范；强地震发生后进行响应性的震后强化监测的规范。二要向社会推出各类地震预测预报产品，并确保这些产品的内容能够为社会所正确理解、能够在防震减灾中发挥作用。相关的科技产品包括：50年地震危险性预测结果；10年地震危险性预测结果；3年地震危险性预测结果；年度地震危险性预测结果；地震序列类型判断和余震趋势预测结果；地震背景场定期观测结果；背景地震活动定期观测结果；特定地区地震地质调查和深部地球物理调查结果；地震预测预报方法或预测预报意见的效能检验结果。

（四）地震预测预报工作的重点

我国造成20万以上人员死亡的4次地震（1303年洪洞8级地震、1556年华县8¼级地震、1920年海原8½级地震、1976年唐山7.8级地震）的震级均为接近8级或8级以上，1950年以来造成千人以上人员死亡的地震均为7级以上地震。从减轻地震灾害损失风险的角度，开展7级左右和7级以上地震的长中短临预测预报探索、并在能够达到的科学认识的条件下最大限度地为政府和社会的防震减灾服务，是地震预测预报工作的首要科学关切。

现今中国大陆构造变形以活动地块运动为主要特征，不同活动地块之间的运动、变形和深部结构等的差异主要集中在各活动地块之间的边界带上，该边界带是我国陆区最基本的和最重要的强震带，是强震孕育、发生的主体地带。根据有史以来地震记录的统计分析，100%的8级以上巨大地震发生在Ⅰ、Ⅱ级活动地块边界带上，86%的7~7.9级大地震发生在Ⅰ、Ⅱ级活动地块边界带上，显示了我国陆区的强震空间分布与活动地块边界带紧密相关、震级越高与活动边界的相关程度越高、高层次的地块控制高震级地震的显著特征。Ⅰ、Ⅱ级活动地块边界带是我国强震预测预报研究的重点，也提供了将针对强震的预测预报研究作为工作重点的科学上的可能性。

通常所说的“长中短临”，更多地是经验性的、从实际应用的角度考虑的时间尺度。物理上，更应该重视的应是地震孕育的“晚期”、“临近”地震发生的阶段所做出的预测预报。由于不同区域、不同震级地震的孕育时间不同，因此地震发生前“临近”阶段的时间尺度也不同。地震震级越高、发震构造运动速率越低，地震孕育过程就越长，相应的“临近”阶段的时间也就越长。经验表明，类似于“短临前兆”的“临近”前兆，对7级左右和7级以上地震，出现的时间远早于5级、6级地震；对7级左右和7级以上地震，其“临近”前兆可能的持续时间可达年尺度乃至更长时间。把针对强震的“临近”预测预报，以及

围绕“临近”预测预报的各个时间尺度、根据现有的科学认识能力和技术水平所采取的防震减灾措施作为战略重点,是做好大震巨灾准备的必然要求。

尽管地震预测预报研究的最终目标是实现物理预测预报,但在目前地震预测预报的科学水平条件下,统计预测预报、经验预测预报、物理预测预报的并行发展、优势互补,仍是一个现实的发展路径。在统计预测预报方面,要深入研究地震活动概率的物理意义、确定方法与实际应用;深入研究地震预测预报方法的统计检验问题,缩小与世界先进水平之间的差距;开展“新参数地震目录”研究,把地震统计的对象从传统地震目录扩展到新的地震目录。在经验预测预报方面,要密切关注基础观测数据的可靠性问题,规范在分析观测数据时核实异常与排除干扰的方法;深入研究预测与决策理论、博弈论的基本问题,用于地震预测预报决策形成过程中的决策辅助;通过经验的总结、经验的量化、经验的统计检验,对现有经验进行提炼和加工;进一步总结“场兆”和“源兆”的行为特征,并建立相应的物理模型与分析方法;采用虚拟现实、可视化等新技术,优化经验的形成和经验的训练过程;提供地震背景场信息产品,服务于“异常”的识别;面向新的观测技术与方法,不断积累新的经验。在物理预测预报方面,要根据新的“地球物理实验”的概念,开展面向地震预测预报的科学研究,探索地震孕育的物理过程和不同阶段孕震特征;发挥观测优势和观测资料积累优势,密切关注时变(time lapse)地球物理过程的研究;面向地震断层带的物质结构和力学性能,结合地震震源区的结构和物性,联系震源区的流体和热过程,开展从微观到宏观的“广谱”观测研究,理解地震的机理,探索地震预测预报问题;通过数值模拟,研究多尺度、多单元相互作用的地震模型中地震活动和地震前兆的行为,为地震预测预报实践积累经验;根据不同地区的地震孕育和发生的具体模型,根据对前兆与应力场关系(“场兆”)、前兆与发震断层的“失稳”关系(“源兆”)的理解,确定“目标地震”的“预期前兆”的观测、监测和预测检验方案。

二、地震预测对观测仪器和观测系统的新需求与挑战¹

在2017年版《地震预测预报相关的重要科技挑战》“白皮书”中，讨论了目前地震监测预报工作的重要实践议程，包括：（一）以大陆强震动力学为基础的中国大陆7、8级地震中长期危险性预测；（二）旨在把握强震发展趋势的地震大形势预测；（三）以多学科地震“前兆”异常变化为基础的短临地震预测预报探索；（四）以序列类型判定和强余震趋势预测为基本内容的震后趋势预测预报；（五）针对重点监视防御区、年度危险区的“观测密集型”震情跟踪实验；（六）新的会商机制；（七）地震预测预报业务信息化。“白皮书”讨论了地震预测预报研究探索的重要科学议程，包括：（一）强震区深部地球物理场和地球化学参量的基本背景的探测、地球物理场和化学参量的动态演化特征；（二）主要发震断裂的分布特征与活动习性、中长期地震活动特征；（三）地震“前兆”机理与识别判据、地震孕育和发生过程的物理模型与数值模型；（四）水库诱发地震、矿山地震、火山地震研究与“新型地球物理实验”；（五）国家地震监测预报实验场；（六）分布式统一地震预报实验；（七）电磁卫星等空间对地观测的应用研究。“白皮书”还以附录形式介绍了《国家地震科学技术发展纲要（2007—2020年）》提出的与地震预测预报有关的重点领域、发展思路和优先主题（附录4）以及IRIS战略研究报告（2008）提出的与地震预测预报有关的重要科学问题（附录5）。

这里，主要讨论近年来提出的新的科学议程和科技挑战。对这些新的科学议程和科技挑战的回应，涉及地球物理、大地测量、地质学、地球动力学等基础学科及其与材料科学、信息科学、工程技术之间的交叉领域，需要各个学科

¹ 执笔人：房立华、王未来、袁道阳、张晓东、蒋长胜、武艳强、张晶、刘爱文。

专业、各类技术手段的共同努力。

(一) 数据密集型近震源观测实验

我国地震监测台网经过50多年的建设,实现了由模拟到数字、由稀疏到密集、由单一台网到“三网融合”的发展历程。“十三五”国家地震烈度速报与预警工程完成后,台网密度进一步提高,台站平均间距将优于20km。尽管如此,这种面上近乎均匀分布的台站布局,仍不能满足危险活动断裂带和地震重点危险区对微震检测与定位和中下地壳微弱信号提取的需求。

近年来,超密集台阵观测研究已成为断裂带结构探测和孕震机制研究的新的发展趋势。美国在长滩地区、圣哈辛托断层布设的密集台阵间距为10~100m量级,发现圣安德烈斯断层深部的颤动信号在地震成核前向震源处迁移²;发现长滩地区下地壳和上地幔存在大量0级以下的微震活动³;发现断裂带两侧的速度结构有明显差异⁴。这些新的结果对于认识地震成核和断层活动都具有重要意义。

在未来监测系统设计中,需要围绕危险活动断裂,依托固定台站,开展近断层、不同尺度的超密集台阵观测,提高微震监测下限,重点研究断层的几何形态、速度结构和应力状态,探测中下地壳的微震活动和断层深部变形机制,识别断裂带上的地震空区、凹凸体和不同段落上的结构差异,以及与断层深部

² Shelly D R. 2010. Migrating tremors illuminate complex deformation beneath the seismogenic San Andreas fault. *Nature*, 463(7281): 648-652.

³ Inbal A, Ampuero J P, Clayton R W. 2016. Localized seismic deformation in the upper mantle revealed by dense seismic arrays. *Science*, 354(6308): 88-92.

⁴ Allam A A, Ben-Zion Y, Kurzon I, et al.. 2014. Seismic velocity structure in the Hot Springs and Trifurcation areas of the San Jacinto fault zone, California, from double-difference tomography. *Geophysical Journal International*, 198(2): 978-999.

变形有关的颤动信号等。在断裂带两侧建设固定台站，实现断裂带介质参数（如地震波速，S波分裂参数）的动态监测，为地震预测预报提供支撑。

（二）颤动事件的观测研究

颤动事件分为火山区颤动事件和非火山地震颤动事件。火山区颤动事件往往与火山深部岩浆活动有关，目前火山区颤动事件的监测可以用来描述火山区活动的等级，甚至被用来预测火山喷发的时间。非火山地震颤动首先是在俯冲带地区发现的，其时空分布状态可以很好地描述板块俯冲的动态过程，在一些区域颤动信号与板块非连续滑动存在对应关系；随后，在走滑型断裂带下方，例如美国圣安德烈斯断层和日本西部Tottori地震走滑断层，也发现了颤动信号。圣安德烈斯断层2004年M6.0地震前有颤动事件活动增强的现象。

对于颤动信号，国际上有较多研究，而国内相关的研究很少，这与以下因素有关：①火山区颤动事件与活火山活动有关，目前中国的火山基本处于休眠状态，没有强烈的岩浆活动；②中国大陆地区基本不涉及俯冲带的区域，而圣安德烈斯断层式的非火山区颤动事件在全球其他地区的实例亦较少；与地震事件相比，非火山区颤动事件信号较弱，其形态与风或人的活动引起的噪声很难区分，只有将一组地震仪的信号相互比较才能进行有效的识别，而目前国内地震台站基本上按照常规地震监测的目的建设，不能满足相关研究的需要。

在中国大陆地区开展相关研究需要注意的问题是：①观测地点的选择：目前有颤动事件发生的地区，往往都与流体活动或高泊松比等特征相关，另外圣安德烈斯断层是走滑型，因此在研究地区选择方面可能需要酌情考虑以上因素；②观测手段的设计：无论是火山区还是非火山区，要探究颤动事件是否存在及其机理，除密集地震台阵观测外，相应地还应有GPS、形变仪等，用来监

测深部是否存在慢滑移事件或者区域形变；另外，非火山区颤动信号很弱，较成功的观测基本是基于“台阵的台阵”（小孔径台阵由孔径百米级的若干台站组成，区域台阵由小孔径台阵组成）开展的。

（三）断层强度的度量与断层应力水平的度量

断层强度主要反映的是未来发生地震的震级上限，也有研究认为是断层发生地震时介质破裂的强度。断层应力水平达到断层介质的破裂强度（断层强度）时，断层就发生地震。因此，对断层强度的度量和断层应力水平的度量是地震科学中的重要核心问题之一。断层的力学性状主要表现为显著的滑移弱化和速度弱化，断层带物质在断层高速滑移过程中经历了各种复杂的物理化学变化，这些已有认识，对于研究和评估断层具有重要意义。

断层强度除受地壳物质组成、热流结构等的影响外，还与流体特征和应变速率相关⁵。目前，从地表地质的角度对断层强度的度量，可通过活动构造研究和GPS、InSAR及Lidar等形变监测方法获得。然而这些研究远无法在物理上定量刻画断层强度和断层应力水平。区域应力场（应力分布）或应力积累是地震预测相关的最基本的观测量，目前对应力积累的测量主要是测量时的应力值，而无法知道连续观测值。

从观测技术角度，一方面需要研发应力连续观测仪，开展压力、荷载和应变等参数测定，进而开展地壳运动和地震机制等方面的研究。这种仪器还可以用于观测活动断层可能存在的微动态，从而捕获对地震预测有益的信息。如能像地震台网那样，以几十千米的间隔，在不受人为噪声或气候影响的深部钻孔

⁵ Taira, T., Silver, P. G., Niu, F. L., Nadeau, R. M.. 2009. Remote triggering of fault strength changes on the San-Andreas fault at Parkfield. *Nature*, 461(1):636-640.