

## • 自然灾害防治面临的挑战与应对 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0039

# 强震风险预测面临的挑战与对策<sup>\*</sup>

张会平<sup>1\*\*</sup> 张培震<sup>2</sup>

1. 中国地震局地质研究所 地震动力学与强震预测全国重点实验室,北京 100029
2. 中山大学 地球科学与工程学院,珠海 519080

**[摘要]** 地震是全球最严重的自然灾害之一。我国历史上曾多次遭受大震巨灾,1949年以来地震灾害致死人数占自然灾害总死亡人数超50%,强震风险预测对减少人员伤亡和经济损失意义重大。当前,强震风险预测面临三重核心挑战:科学层面,地震孕育机理不清、震源区基础数据匮乏、深部探测程度有限;技术层面,现有技术手段在监测、模拟与验证环节均存在显著瓶颈,有效获取危险性、暴露度、易损性等参数不确定性高;社会层面,预测“概率性结论”与防灾“确定性需求”仍然存在矛盾,需将不确定性转化为可操作策略。有效应对上述强震风险预测挑战,需以“多学科交叉融合”重构认知框架,以“前沿技术革命”突破观测瓶颈,以“韧性化转型”实现预测价值的落地。在科学模型构建方面,加强定量化、精细化三维地震构造模型,多技术融合识别大震危险源;在探测观测领域,推动高精度、高密度观测与多学科综合研究,以技术革新实现观测突破;在区划与情景构建中,推进多尺度宽频带强地面运动模拟工作;预警技术则需发展多源信息融合,实现灾情实时感知与应急响应。未来,强震风险预测需加速关键技术迭代,促进科学与社会高效协同,加强国际合作与数据共享。以科技创新为引擎,推动“地球科学+信息科学+工程科学+管理科学”四位一体研究范式转型,实现从单一学科突破到“地球系统科学”认知跃迁,从静态风险评估到实时动态监测技术跃迁,从灾害应对到社会韧性构建价值跃迁,最终达成强震风险的有效识别、动态评估、精细防控与高效治理,为社会可持续、高质量发展提供坚实保障。

**[关键词]** 强震巨灾;风险预测;挑战;对策

我国地震频度高、强度大、分布广、震源浅、灾害重,历史上发生过一系列造成重大人员伤亡和经济损失乃至影响社会稳定的大地震。20世纪以来我国地震造成死亡人数占同期全球地震死亡总人数的53%,我国因地震死亡人数超过所有自然灾害死亡总人数的54%。依据现行地震危险区划,我国1/3以上的国土、近1/2的城市、近2/3的百万以上人口城市位于VII度以上的地震高烈度区<sup>[1]</sup>。随着经济社会高速发展、城市化进程不断加快,以及一系列国家重大战略、工程的实施和建设,我国面临的地震灾害风险将更加严重。着力防范重大地震

灾害风险,有效减轻地震造成人员伤亡,是国家自然灾害防治与维护公共安全的重大战略需求。

党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视包括防震减灾工作在内的防灾减灾救灾工作,党的二十大报告将防灾减灾救灾工作纳入总体国家安全观和社会治理体系进行统筹谋划<sup>①</sup>。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确提出“提高防灾减灾抗灾救灾能力”<sup>②</sup>。2016年7月习近平总书记在唐山抗震救灾和新唐山建设40周年之际对防灾减灾工作做出“要坚持以防为主、防

收稿日期:2025-08-25;修回日期:2025-10-18

\* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:huiping@ies.ac.cn

本文受到国家重点研发计划项目(2024YFC3012900)和国家自然科学基金项目(42488301)的资助。

① [http://www.qstheory.cn/yaowen/2022-10/25/c\\_1129079926.htm](http://www.qstheory.cn/yaowen/2022-10/25/c_1129079926.htm).

② [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).

**引用格式:** 张会平,张培震. 强震风险预测面临的挑战与对策. 中国科学基金,2025,39(6):968-974.

Zhang HP, Zhang PZ. Challenges and countermeasures in strong earthquake risk forecasting. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6):968-974.(in Chinese)

抗救相结合,坚持常态减灾和非常态救灾相统一,努力实现从注重灾后救助向注重灾前预防转变,从应对单一灾种向综合减灾转变,从减少灾害损失向减轻灾害风险转变”的重要论述<sup>①</sup>。2018年5月习近平总书记致信汶川地震十周年国际研讨会时强调,人类对自然规律的认知没有止境,防灾减灾、抗灾救灾是人类生存发展的永恒课题。科学认识致灾规律,有效减轻灾害风险,实现人与自然和谐共处,需要国际社会共同努力<sup>②</sup>。2019年11月习近平总书记强调,“我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一,灾害种类多,分布地域广,发生频率高,造成损失重,这是一个基本国情”<sup>③</sup>。2023年土耳其7.8级双震发生后,习近平总书记提出“我国大震在哪里,如何防”的“大震之问”,为我国防范化解大震巨灾风险指明了前进方向,提出了明确要求。

我国西部构造变形复杂,地形高差大,活动断裂分布广,强震频度高,地震灾害严重<sup>[2]</sup>。近40多年来,我国大陆7级以上大震均发生在西部地区,特别是2008年5月12日汶川8级强震造成重大人员伤亡和经济损失<sup>[3,4]</sup>。随着国家经济社会高速发展,我国逐渐形成了以东部大城市/城市群与西部能源基地、重要产业基地密切相连的国家发展新格局,同时也形成了一系列连接东部和西部的国家战略基础设施,这些战略基础设施大多穿越大地震易发区和大型活动断裂带,一旦遭遇大地震破坏,功能失效且长时期不能恢复,将对东部大城市/城市群乃至整个国家的政治、经济和社会产生巨大的冲击和影响,其间接灾害损失可能会远远大于地震造成的直接灾害损失<sup>[5,6]</sup>。例如,2022年1月8日青海门源6.9级地震<sup>[7]</sup>,对兰新高铁穿越祁连山段的线路、桥梁、隧道结构造成破坏,导致兰新高铁中断9个月。我国东部地区同样具有大震构造环境,1966至1976年间,华北连续发生了邢台7.2级、渤海湾7.4级、海城7.3级、唐山7.8级四次7级以上地震<sup>[8]</sup>。历史上还曾发生过1668年郯城8.5级地震、1679年三河平谷8.0级地震等。东部地区经济发达,大城市/城市群密集,遭遇城市直下型地震概率较高,从而可能造成严重人员伤亡和巨大经济损失,大城市/城市群基础功能失效进而会引起社会不稳定。

显然,新发展阶段国家重大发展战略和重大基础设施的布局使得我国的防震减灾任务显示出新的特点和新的需求。无论是西部人口稀少地区大地震的发生,还是东部城市直下型大地震的发生,都将对东部城市群和大城市乃至整个国家的政治、经济和社会产生巨大的冲

击和影响。因此,开展强震风险预测,最大限度地减轻地震灾害是国家经济社会发展的重大安全保障与迫切需求。由于地球内部的“不可入性”以及构造变形和演化的复杂性,目前对地震发生条件和机理的认识仍然有限,影响地震形成灾害的因素众多,从而制约着地震灾害预测和减灾技术的发展。因此,地震发生机理和成灾机理、地震发生概率和灾害预测以及灾害风险防范技术等,均是具有挑战性的世界前沿科技问题。

## 1 强震风险预测的核心挑战

对大地震的科学预测是保障人民生命安全的重要途径<sup>[4]</sup>。有效减轻强震风险,需开展强震危险性分析,减少承灾体暴露度和降低易损性等措施,然而在现实情况下:(1)在危险性方面,基础观测数据不足、模型精度不够、不确定性高<sup>[9-11]</sup>;(2)在暴露度方面,仍然存在数据更新不及时、动态变化难以捕捉、评估标准不统一等问题<sup>[12]</sup>;(3)在易损性方面,也存在评估体系不完善、数据分散、减灾措施成本高等一系列有待改进的不足<sup>[13-15]</sup>。基于地震区划的建筑物抗震设防是减少地震人员伤亡最有效的手段<sup>[6,16]</sup>,多尺度、宽频带、多概率地震区划可为实现建筑物“大震不倒、中震可修、小震不坏”的目标提供科技支撑,从而有效防范人员重大伤亡<sup>[17]</sup>。综合而言,强震风险预测的核心挑战仍然存在科学、技术与社会的多重困境,使得强震风险预测始终在理想目标与现实约束间艰难求索。

### 1.1 科学层面的复杂性

强震风险预测的核心挑战首先源于地球内部系统,即岩石圈基本数据、地球动力学数据等的科学认知局限<sup>[4]</sup>。地震孕育过程涉及岩石圈、地幔甚至地核的多空间尺度相互作用,从断层微观破裂(毫米级)到板块运动(数千公里),时间跨度涵盖数年至数十万年,这种跨尺度、非线性的动力学过程难以用单一理论完全描述<sup>[4,18]</sup>。尽管“活动地块模型”成功解释了中国大陆80%以上7级地震的分布规律<sup>[1]</sup>,但对复杂构造区深部动力耦合机制、多尺度断裂系统以及流体—岩石相互作用等方面的认识仍不明确<sup>[19]</sup>。历史地震记录的局限性(如多数强震复发周期超千年)与现代仪器观测仅百年的数据积累,使得统计模型的样本量严重不足,难以捕捉长周期规律,进一步加剧了科学认知的模糊性<sup>[20]</sup>;活动断裂关键参数(滑动速率、复发周期、闭锁段几何形态)与强震孕育的耦合机制也不清晰,就目前研究成果来看,往往直观理解为

① <http://www.banyuetan.org/chcontent/zx/yw/2016729/205036.shtml>.

② <https://china.huanqiu.com/article/9CaKrnK8qt>.

③ <https://china.huanqiu.com/article/9CaKrnKo530>.

低滑动速率区强震应力积累时间需要更久、强震危险性也较低等,但汶川地震的发生也进一步提醒我们加强对低活动速率断层的关注<sup>[21]</sup>。除此之外,活动断层探槽揭示的古地震事件及断层活动性的确定,很大程度上也依赖于测年的准确度和精确度<sup>[22]</sup>。

### 1.2 技术层面的局限性

当前技术手段在监测、模拟与验证环节均存在显著瓶颈。在监测方面,地表形变虽可通过全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)、合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)等技术实现毫米级精度,但对发震断层深部的闭锁状态、滑动速率等关键参数仍依赖间接反演,误差仍然偏高,且无法穿透地壳遮挡直接观测孕震区应变状态<sup>[23]</sup>;地下探测技术受限于分辨率,难以识别小尺度断裂带的精细结构<sup>[24]</sup>。而在模拟方面,现有数值模拟虽能构建三维地震动力学模型<sup>[25]</sup>,但受限于计算能力与地质参数简化,对真实断层几何非均匀性的表征误差较大,导致破裂传播路径预测与实际情况偏差显著。在验证方面也存在一定的制约,强震的低频发性导致有效样本稀缺,没有足够的“自然地震实验”数据检验模型可靠性,强震事件案例的不可重复性更使得技术改进缺乏针对性反馈。除此之外,目前深部探测能力也制约着对孕震环境的全面认知<sup>[24]</sup>:(1)观测手段局限。现有地球物理方法(地震波、电磁、重力)在深部探测方面分辨率仍显不足。(2)动态监测缺失。传统台站间距偏大导致中小地震事件定位精度偏低,光纤分布式声波传感(Distributed Acoustic Sensing,DAS)技术虽能够实现米级—公里级动态应变监测,但信噪比在深部快速下降。(3)多场耦合数据不足。合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)、大地电磁(Magnetotelluric,MT)、流体地球化学等多源数据时空分辨率不匹配,难以构建统一孕震模型。

### 1.3 社会层面的现实性

强震风险预测在向社会公众传播的过程中,依然面临信任、资源与协同的多重挑战。从公众认知看,公众对常规地震预测(非风险预测)的期待常陷入“确定性幻觉”——将中长期概率预测误读为短期预警,而当预测未能兑现时又易引发信任危机,加剧社会对预测可靠性的质疑<sup>[26]</sup>;政策制定者面临短期减灾效益与长期科研投入的权衡困境,建设密集监测网络需较多财政投入,但强震发生概率的数学期望可能低于防灾成本,导致资源向应急响应倾斜而忽视基础研究。此外,跨部门统筹协调、跨区域协作机制的缺失进一步加剧难题<sup>[27,28]</sup>,由于活动断裂带常跨越省市等行政边界,但不同地区数据标准、监测网络与预警系统联通性还有待加强,信息共

享与协同响应效率偏低,需持续增强“政府—科研机构—企业—公众”协同机制。

## 2 应对挑战的创新路径

从国际地震科学技术的研究动态来看<sup>[29-31]</sup>,基于高精度、高密度观测和多学科综合手段研究地震发生机理与预测,发展新的观测和数据分析处理技术、物理实验和数值模拟技术,发展定量化、精细化的地震构造模型与大震危险源识别技术,发展基于宽频带强地面运动模拟的多尺度地震区划与灾害情景构建技术,以及发展多源信息驱动的地震预警与灾情实时感知及应急处置技术,是当前地震科技应对挑战的创新路径和发展趋势,需以“多学科交叉融合”重构认知框架,以“前沿技术革命”突破观测瓶颈,以“韧性化转型”实现预测价值的落地。

### 2.1 多学科交叉融合的协同创新

传统地震研究受限于学科壁垒,地质学侧重构造演化的几何学及其运动学<sup>[19]</sup>,地震学聚焦波形反演和壳幔结构变化<sup>[24]</sup>,但强震孕育涉及岩石圈动力学、地幔对流、地表荷载变化、人类工程活动等多尺度、多要素耦合作用,单一学科难以揭示其复杂机制。需要多学科交叉融合的协同创新,重构地震认知框架,以深浅圈层耦合为核心<sup>[32]</sup>,整合地球化学、实验岩石学、计算力学等多学科方法,通过“实验室—野外台站—数值模拟”的一体化布局<sup>[4]</sup>,建立“孕震机制—应力场演化—地震触发”的全链条模型,建设“高温高压岩石力学模拟系统”“多物理场耦合实验装置”,复现孕震环境的极端条件。

### 2.2 前沿技术驱动的观测革命

传统地震观测依赖“点—线—面”结合的地面台网,仍然存在观测对象不明,空间覆盖不足,时间分辨率低,要素单一等短板,需要实现从“单点监测”到“全域感知”的范式升级,推进部署“空—天—地—井”立体观测网,从“被动接收”到“主动探测”,获取多尺度动态数据:(1)利用合成孔径雷达干涉(InSAR)反演地表毫米级形变,支撑断层闭锁段落及大震危险源识别;(2)激光雷达(LiDAR)与无人机测绘识别地表微地貌及同震变形,科学揭示活动断裂带变形空间分布及对震害的控制作用;(3)DAS技术实现高精度应变/振动监测,实时捕捉“慢地震”“断层蠕动”等信号;(4)开发“数字孪生”平台,模拟不同构造活动强度、人类工程扰动下的地震风险场景。

### 2.3 风险预测的韧性化转型

传统地震风险预测聚焦“概率—烈度”评估,难以回答“何时何地会发生破坏?”“关键设施能否承受?”“社会系统如何应对?”等核心问题。其局限性体现在:(1)时间尺度不匹配,长期预测难以指导短期防灾

决策;(2)空间分辨率不足,无法识别“高风险社区”“关键基础设施”的具体风险;(3)社会适应性弱,预测结果与应急管理、城市规划、保险金融等系统的衔接不足。风险预测的终极目标是提升社会系统的抗灾能力,要实现从“概率预测”到“韧性提升”的系统升级,提升公众的风险认知与自救互救能力。制定地震风险韧性规范,将预测结果纳入城市规划、工程建设技术规范;建立“政府—科研机构—企业—公众”协同平台,推动预测数据、应急资源、社会力量的共享,提升公众信任度。

### 3 未来展望

#### 3.1 关键技术的更新迭代突破

未来一段时间内,随着大数据、人工智能、空天海地井一体化观测等技术的发展,地震风险预测将从“概率性推测”迈向“确定性预警”,从“被动防灾”转向“主动韧性”,最终构建起“全链条、全要素、全社会”的地震灾害防控体系。大数据通过整合地震相关的多源信息,为地震风险的分析、建模和预测提供海量、全面的基础数据支撑,提升预测的准确性和时效性;人工智能等则通过多模态数据融合与自主学习能力,构建跨尺度地震孕育模型,从海量异构数据中提炼出具有物理一致性的预测特征<sup>[33]</sup>。空天海地井一体化观测网将整合卫星重力场监测、航空电磁探测、海底地震仪阵列、活动断层科学钻探等技术,形成覆盖岩石圈—软流圈—地幔的全维度观测体系,突破传统地面台网的时空局限。

#### 3.2 科学与社会的协同创新

地震风险防控的最终目标是将科学成果转化社会韧性<sup>[6,16,34]</sup>,打破知识生产与应用的断层。在政策层面,需推动地震风险预测纳入国土空间规划与重大工程审批流程,建立“预测结果—风险区划—韧性标准”的联动制度。在社区层面,需推广“韧性细胞”建设,通过智能传感器网络、应急物资智能调配系统等技术,实现灾害情景下的快速响应与自组织恢复。公众参与是协同创新的关键环节<sup>[26-28]</sup>,利用虚拟现实技术开展沉浸式防灾培训,通过手机APP推送个性化避险指南,并建立社区志愿者网络提升自救互救能力,提升社区应急响应效率。

#### 3.3 国际合作与数据共享机制

地震风险预测的全球性挑战要求构建开放协同、以技术创新为支撑的国际合作网络。当前,各国已通过跨国台站共建等模式初步实现数据互通,但数据共享依然存在一定的限制。未来需推动建立全球以及区域地震数据共享公约,明确数据主权与共享边界,构建标准化数据接口与质量评估体系。加强发展中国家能力建设,通过向地震高风险地区输出监测设备与预警技术,输出

标准规范,推广中国标准,缩小全球防震减灾能力鸿沟。

## 4 结语:从挑战到机遇的突破及对策

#### 4.1 地震风险预测的科技范式

强震风险预测需以科技创新为引擎,以跨学科、跨领域协作重构方法论,推动“地球科学+信息科学+工程科学+管理科学”四位一体研究范式转型。地球科学为理解地震孕育机理提供基础理论支撑,揭示强震发生的内在规律;信息科学则借助大数据、人工智能等技术,实现对海量观测数据的高效处理与深度挖掘,提升预测模型的精度与效率;工程科学聚焦于抗震设计、灾害模拟等应用层面,为风险防控提供技术方案与工程支撑;管理科学则致力于协调各方资源、优化决策机制,将科学结论转化为切实可行的防灾策略。

跨学科融合并非简单的学科叠加,而是通过构建协同创新平台,形成“理论研究—技术研发—应用推广—管理优化”的体系。在地震监测领域,地球科学的观测设备与信息科学的数据处理算法相结合,可实现对地震信号的实时捕捉与快速分析;工程科学的强地面运动模拟技术与管理科学的风险评估模型联动,能为城市规划提供精准的抗震设防依据。通过四位一体的研究范式转型,能够将分散的科研力量凝聚成系统合力,从根本上提升强震风险预测的科学性与实用性。

#### 4.2 实现突破挑战的三重跃迁

##### 4.2.1 从单一学科突破到“地球系统科学”认知跃迁

传统的强震风险研究多局限于单一学科领域,如断层活动分析<sup>[21]</sup>和地震波传播规律<sup>[24]</sup>,这种碎片化的研究模式难以全面揭示地震这一复杂地球系统现象的本质。而向“地球系统科学”的认知跃迁<sup>[32]</sup>,强调将地球视为多圈层相互作用构成的有机整体,从系统视角解析强震发生的动因与演化过程。地球系统科学视角下,强震的发生并非孤立事件,而是地壳内部能量长期积累与外部环境因素共同作用的结果。通过整合地质学、地球物理学、气象学等多学科数据,建立多圈层耦合模型<sup>[4]</sup>,能够更准确地刻画地震孕育的全过程。这种认知跃迁不仅可以拓展研究的广度与深度,还能有效弥补单一学科数据匮乏、机理认识片面的缺陷。

实现这一跃迁需要构建跨学科的观测网络与数据共享机制,推动不同学科从“各自为战”向“协同攻关”转变。通过部署覆盖地表、地下及空间的立体观测系统,同步获取地壳形变、重力场变化、电磁场异常等多维度数据,结合数值模拟技术,重现地震从能量积累到释放的动态过程。这种系统认知的深化,将为提升强震风险预测的前瞻性与准确性奠定坚实的理论基础。

#### 4.2.2 从静态风险评估到“实时动态监测”技术跃迁

静态风险评估主要基于历史地震数据与地质构造特征<sup>[17]</sup>,对特定区域的地震风险进行周期性评估,其结果具有一定的时效性局限,难以应对地震活动的动态变化。而向实时动态监测技术的跃迁,则需要通过引入高精度、高密度的观测技术与实时数据处理系统,实现对地震风险的动态感知与即时更新,大幅提升风险预测的时效性与精准度。在技术层面,这一跃迁依赖观测设备与信息处理技术的双重革新。布设密集的地震台网、GNSS监测站等<sup>[23]</sup>,可实时捕捉地壳微小形变与地震前兆信号;利用光纤传感、无人机遥感等新兴技术,能够快速获取震后灾情信息<sup>[35]</sup>。同时,5G通信、边缘计算等技术的应用,可实现观测数据的实时传输与高效分析,使风险评估模型快速动态调整预测结果。

实时动态监测技术的应用,可显著改变强震风险防控模式。震前通过持续监测断层活动状态,及时发布风险预警;地震发生过程中能快速定位震源、评估震级,为应急救援提供决策支持;震后可实时追踪次生灾害发展态势,指导灾后重建。这种从“静态评估”到“动态监测”的技术跃迁,能够使强震风险预测从“事后总结”转向“事前预警、事中响应、事后优化”的全链条管理,有望提升灾害应对的主动性与有效性。

#### 4.2.3 从灾害紧急应对到“社会韧性构建”价值跃迁

强震风险治理的传统模式以“灾害应对”为核心<sup>[5]</sup>,侧重于震后的救援救灾与损失补偿,而向“社会韧性构建”的价值跃迁<sup>[6,16]</sup>,则将治理重心前移,通过提升社会系统抵御、适应灾害与灾后恢复的能力,实现从“减少损失”到“增强适应”的深层转变。社会韧性构建涉及基础设施、社会组织、公众意识等多个维度<sup>[26,36]</sup>。在基础设施层面,通过推广抗震设计标准、建设韧性城市体系,提升物理系统的抗毁能力;在社会组织层面,完善跨部门应急协同机制,培育社区自救互助网络,增强组织系统的响应效率<sup>[28,37]</sup>;在公众意识层面,开展常态化防灾教育,组织应急演练,提高社会成员的风险认知与应对技能。这种价值跃迁体现出强震风险治理理念的根本变革——不再将灾害视为单纯自然事件,而是将其纳入社会系统可持续发展的框架中,通过主动构建适应风险的社会结构,实现人与自然的和谐共生,这既是应对强震风险的长远之策,更是推动社会高质量发展的内在要求。

**致谢** 论文在构思及成文过程中曾得到邵志刚研究员、魏本勇研究员帮助;部分内容也得益于全国重点实验室重组过程中与陈晓非院士、黄清华教授、马胜利研究员、单新建研究员、高孟潭研究员、俞言祥研究员等

专家的讨论,在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 张培震,王琪,马宗晋. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块. 地学前缘,2002,9(2):430—441.  
Zhang PZ, Wang Q, Ma ZJ. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 430—441. (in Chinese)
- [2] 张培震,沈正康,王敏,等. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学. 地震地质,2004,26(3):367—377.  
Zhang PZ, Shen ZK, Wang M, et al. Kinematics of present-day tectonic deformation of the Tibetan Plateau and its vicinities. Seismology and Geology, 2004, 26(3): 367—377. (in Chinese)
- [3] Zhang PZ, Wen XZ, Shen ZK, et al. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, 38:2010:353—382.
- [4] 石耀霖,孙云强,罗纲,等. 关于我国地震数值预报路线图的设想——汶川地震十周年反思. 科学通报,2018,63(19):1865—1881.  
Shi YL, Sun YQ, Luo G, et al. Roadmap for earthquake numerical forecasting in China—Reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(19): 1865—1881. (in Chinese)
- [5] 聂高众,高建国,马宗晋,等. 中国未来10~15年地震灾害的风险评估. 自然灾害学报,2002,11(1):68—73.  
Nie GZ, Gao JG, Ma ZJ, et al. On the risk of earthquake disaster in China in the coming 10~15 years. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(1): 68—73. (in Chinese)
- [6] 张效亮,钟慧,吴健. 摸清风险底数 提升防治能力——地震灾害风险普查进展情况. 防灾博览,2021(6):18—23.  
Zhang XL, Zhong H, Wu J. Investigating disaster risks and enhancing prevention capabilities: Progress report on seismic hazard risk survey. Overview of Disaster Prevention, 2021(6): 18—23. (in Chinese)
- [7] 牛鹏飞,韩竹军,郭鹏,等. 2022年青海门源 $M_S$  6.9地震地表破裂带宽度调查与启示. 地球物理学报,2024,67(2):548—570.  
Niu PF, Han ZJ, Guo P, et al. Investigation and implication of the surface rupture width of Menyuan  $M_S$  6.9 Earthquake in Qinghai Province, 2022. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(2): 548—570. (in Chinese)
- [8] 陈祖安,白武明,林邦慧,等. 1966年以来华北地区一系列七级大震破裂过程的数值模拟. 地球物理学报,2003,46(3):373—381.  
Chen ZA, Bai WM, Lin BH, et al. Numerical simulation for rupture processes of a series of strong earthquakes ( $M_S > 7$ ) in North China since 1966. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 373—381. (in Chinese)
- [9] 邓起东,闻学泽. 活动构造研究——历史、进展与建议. 地震地质,2008,30(1):1—30.  
Deng QD, Wen XZ. Activity tectonics research - history, progress and suggestions. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 1—30. (in Chinese)
- [10] 徐锡伟,吴熙彦,于贵华,等. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. 地震地质,2017,39(2):219—275.  
Xu XW, Wu XY, Yu GH, et al. Seismo-geological signatures for identifying  $M > 7.0$  earthquake risk areas and their preliminary application in China's mainland. Seismology and Geology, 2017, 39(2): 219—275.

- 275. (in Chinese)
- [11] 徐锡伟. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题. 震灾防御技术, 2006, 1(1):7—14.
- Xu XW. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(1):7—14. (in Chinese)
- [12] 朱玉群, 肖东升. 面向城市地震风险评估的人口空间分布研究. 测绘科学, 2023, 48(9):262—272.
- Zhu YQ, Xiao DS. Study on population spatial distribution for urban seismic risk assessment. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(9):262—272. (in Chinese)
- [13] 周奎, 李伟, 余金鑫. 地震易损性分析方法研究综述. 地震工程与工程振动, 2011, 31(1):106—113.
- Zhou K, Li W, Yu JX. Review of seismic fragility analysis methods. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2011, 31(1):106—113. (in Chinese)
- [14] 温留汉·黑沙, 张永山, 汪大洋. 工程结构地震易损性与经济损失评估研究现状. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(6):17—29.
- Wenliuhan HS, Zhang YS, Wang DY. Review on seismic vulnerability and economic loss assessment of engineering structures. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 32(6):17—29. (in Chinese)
- [15] 尹之潜. 结构易损性分类和未来地震灾害估计. 中国地震, 1996, 12(1):49—55.
- Yin ZQ. Classification of structure vulnerability and evaluating earthquake damage from future earthquake. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(1):49—55. (in Chinese)
- [16] 张令心, 钟江荣, 林旭川, 等. 区域与城市地震风险评估与监测技术研究项目及研究进展. 地震科学进展, 2020, 50(3):1—19.
- Zhang LX, Zhong JR, Lin XC, et al. Project plan and research progress on regional and urban earthquake risk assessment and monitoring technology. *Progress in Earthquake Sciences*, 2020, 50(3):1—19. (in Chinese)
- [17] 时振梁, 李裕澈. 中国地震区划. 中国工程科学, 2001, 3(6):65—68.
- Shi ZL, Li YC. Seismic zonation in China. *Engineering Science*, 2001, 3(6):65—68. (in Chinese)
- [18] Alao JO. The emerging roles of 3D and 4D geophysical and geological modelling in evaluating seismic risks: A critical review. *Earthquake Research Advances*, 2025:100399.
- Zhou ZK, Yu N, Wang TQ, et al. Episodic earthquakes controlled by the migration of crustal fluids and fault valve behavior. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(6):e2024GL114093.
- [19] 陈璇, 刘静, 姚文倩, 等. 基于地震矩守恒的断裂带最大震级及复发周期估算方法. 大地测量与地球动力学, 2025. doi: 10.14075/j.jgg.2024.12.569.
- Chen X, Liu J, Yao WQ, et al. The estimation method of maximum magnitude and return period of fault zones based on seismic moment conservation. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025. doi: 10.14075/j.jgg.2024.12.569. (in Chinese)
- [20] Zhang PZ. Beware of slowly slipping faults. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5):323—324.
- [21] 刘勇康, 王虎, 杨会丽, 等. 中国大陆古地震研究的关键技术与案例解析(4)——古地震定年技术的样品采集和事件年代分析. 地震地质, 2014, 36(4):939—955. (in Chinese)
- Ran YK, Wang H, Yang HL, et al. Key techniques and several cases analysis in paleoseismic studies in China's mainland(4)-Sampling and event analysis of paleoseismic dating methods. *Seismology and Geology*, 2014, 36(4):939—955. (in Chinese)
- [22] Li YC, Shan XJ, Qu CY, et al. Earthquake potential across the north-south seismic belt of China. *Science Bulletin*, 2024, 69(2):179—182.
- [23] 杨顶辉, 董兴朋, 黄建东, 等. 高分辨率全波形地震成像研究——进展、挑战与展望. 中国科学(地球科学), 2025, 55(2):319—347.
- Yang DH, Dong XP, Huang JD, et al. High-resolution full waveform seismic imaging: Progresses, challenges, and prospects. *Science China Earth Sciences*, 2025, 55(2):319—347. (in Chinese)
- [24] 孙玉军, 董树文, 范桃园, 等. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. 地球物理学报, 2013, 56(9):2936—2946.
- Sun YJ, Dong SW, Fan TY, et al. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9):2936—2946. (in Chinese)
- [25] 庄涛. 我国地震防灾减灾科普教育的瓶颈及对策分析. 国际地震动态, 2013, 43(4):30—34.
- Tao Z. Bottleneck and countermeasures of the popular science education on earthquake disaster prevention and mitigation in China. *International Seismological Dynamics*, 2013, 43(4):30—34. (in Chinese)
- [26] 王慧彦, 王建飞, 刘晓静, 等. 基于情景构建的强震后京津冀地区协同应急机制研究. 地震研究, 2023, 46(1):138—146.
- Wang HY, Wang JF, Liu XJ, et al. Study on regional cooperative emergency response mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei region after strong earthquakes based on scenario construction. *Journal of Seismological Research*, 2023, 46(1):138—146. (in Chinese)
- [27] 刘晓静, 王慧彦, 王建飞. 应急管理新体制下京津冀地震巨灾应急协同机制关键问题研究. 中国地震, 2023, 39(4):742—750.
- Liu XJ, Wang HY, Wang JF. Key problems and solutions of earthquake emergency coordination in Beijing-Tianjin-Hebei region under new emergency management system. *Earthquake Research in China*, 2023, 39(4):742—750. (in Chinese)
- [28] 吴凡, 汪明, 刘宁. 美国地震风险评估中灾害模型的探讨. 灾害学, 2012, 27(2):109—113.
- Wu F, Wang M, Liu N. Discussion of the Geo-Hazard Model in US earthquake risk assessment. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(2):109—113. (in Chinese)
- [29] 朱林, 连尉平, 陈洪波, 等. 美国国家地震减灾计划近况及新战略规划. 地震科学进展, 2024, 54(2):140—146.
- Zhu L, Lian WP, Chen HB, et al. Introduction to the National Earthquake Hazards Reduction Program and the latest strategic plan. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(2):140—146. (in Chinese)
- [30] Du A, Wang XW, Xie YZ, et al. Regional seismic risk and resilience assessment: Methodological development, applicability, and future research needs—An earthquake engineering perspective. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 233:109104.
- [31] 郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 地球系统科学研究态势. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(10):3065—3090.
- Zheng YF, Guo ZT, Jiao NZ, et al. A holistic perspective on Earth system science. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(10):3065—3090. (in Chinese)
- [32] Hu SL, Guo T, Alam MS, et al. Machine learning in earthquake engineering: A review on recent progress and future trends in seismic performance evaluation and design. *Engineering Structures*, 2025, 340:120721.
- [33] 刘吉夫, 陈颙, 史培军, 等. 中国大陆地震风险分析模型研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(5):520—523.

- Liu JF, Chen Y, Shi PJ, et al. On seismic risk assessment in China's mainland. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2008, 44(5): 520—523. (in Chinese)
- [35] 刘耀辉. 面向地震风险评估的高分辨率遥感影像建筑物信息提取与研究. *测绘学报*, 2022, 51(9): 1977.
- Liu YH. Extraction and research on building information from high-resolution remote sensing image for seismic risk assessment. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(9): 1977. (in Chinese)
- [36] 杨红樱, 周煊超. 浅谈防震减灾科普现状. *国际地震动态*, 2019, 49(8): 166—167.
- Yang HY, Zhou XC. A brief discussion on the current status of earthquake prevention and disaster reduction science. *Recent Developments in World Seismology*, 2019, 49(8): 166—167. (in Chinese)
- [37] 刘静伟, 王振明, 谢富仁, 等. 大华北地区地震灾害与风险评估. *地震工程学报*, 2014, 36(1): 134—143.
- Liu JW, Wang ZM, Xie FR, et al. Seismic hazard and risk assessments in North China based on the historical intensity observations. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(1): 134—143. (in Chinese)

## Challenges and Countermeasures in Strong Earthquake Risk Forecasting

Huiping Zhang<sup>1\*</sup> Peizhen Zhang<sup>2</sup>

1. National Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Forecasting, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China  
2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, China

**Abstract** Earthquakes are among the most severe natural disasters globally. Since 1949, the number of deaths caused by earthquake disasters in China has accounted for more than 50% of the total deaths from natural disasters. China has suffered from major earthquake catastrophes many times in history. Therefore, strong earthquake risk prediction is of great significance for reducing casualties and economic losses. Currently, strong earthquake risk prediction faces three core challenges: (1) At the scientific level, the mechanism of earthquake generation is unclear, the basic data in the epicenter area is scarce, and the deep observation technology is limited. (2) At the technical level, existing technical means have significant bottlenecks in monitoring, simulation and verification links, and the uncertainty of effectively obtaining parameters such as hazard, exposure and vulnerability is high. (3) At the social level, the contradiction between “probabilistic conclusions” and the “deterministic demand” for disaster prevention is prominent, and it is necessary to transform uncertainty into operable strategies. To address the above challenges, breakthroughs are needed in multiple aspects: (1) In the construction of scientific models, strengthen quantitative and refined three-dimensional seismic structure models, and integrate multiple technologies to identify major earthquake hazard sources. (2) In the field of detection and observation, promote high-precision, high-density observation and multidisciplinary comprehensive research, and achieve observation breakthroughs through technological innovation. (3) In zoning and scenario construction, promote the simulation of multi-scale and wide-frequency strong ground motion. For early warning technology, it is necessary to develop multi-source information fusion to realize real-time perception of disaster situation and emergency response. In the future, strong earthquake risk prediction needs to accelerate the iteration of key technologies, promote efficient collaboration between science and society, and strengthen international cooperation and data sharing. With scientific and technological innovation as the engine, promote the transformation of the four-in-one research paradigm of “earth science + information science + engineering science + management science”, realize the cognitive leap from single-discipline breakthrough to “earth system science”, the technological leap from static risk assessment to real-time dynamic monitoring, and the value leap from disaster response to social resilience construction. Finally, achieve effective identification, dynamic assessment, refined prevention and control, and efficient governance of strong earthquake risks, providing a solid guarantee for sustainable and high-quality social development.

**Keywords** strong earthquake catastrophes; risk prediction; challenges; countermeasures

张会平 中国地震局地质研究所研究员、副所长, 地震动力学与强震预测全国重点实验室常务副主任, 中国地震学会副理事长、中国青藏高原研究会理事。研究领域为构造地貌与活动构造。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金青年科学基金项目(A类、B类)及国际(地区)合作研究项目等。入选中组部万人计划青年拔尖人才。曾获第十届青藏高原青年科技奖。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

\* Corresponding Author, Email: huiping@ies.ac.cn