doi:10.3799/dqkx.2026.254

地震短临预测的关键科学问题

李营[1]，何鸿毅[1,2*]，张宇[1*]，邵维晔[3]，高梓涵[1,4]，黄志铿[1,4]，邢高媛[1]，张盛峰[1]，王振宇[1]，赵国强[1]，熊攀[1]，刘兆飞[1]，刘华[5]

1. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036
2. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
3. 云南省地震局，昆明 650224
4. 中国地震局地质研究所，北京 100029
5. 中国科学技术信息研究所，北京 100038

* 通讯作者，E-mail: Hongyiace@163.com（何鸿毅），zyflyingfish@163.com（张宇）

摘 要：地震短临预测是有效减轻震灾损失的关键手段，但受限于地球内部动力学过程的极端复杂性、非线性及地壳介质的不可入性，其仍是全球地球科学领域尚未攻克的重大难题，也是地学研究的热点问题. 目前地震短临预测研究有所进展，但在构建高可靠性的短临预测方法上仍面临诸多瓶颈.本文在系统梳理国内外地震短临预测研究现状的基础上，凝练了重力、地壳形变、地震学、空间电磁、地电及流体地球化学等核心学科在地震短临预测研究中面临的关键科学问题. 同时，本文结合 1966 年邢台地震后我国地震监测预报体系的形成、“七五”至“十五”等阶段性攻关，以及海城、唐山、宁洱、汶川等典型震例，分析短临预测问题从经验前兆识别向可检验综合判据演进的历史逻辑.这些共性难题主要包括：孕震过程的物理机理与前兆成因机制尚不清晰，如重力—流体耦合、岩石圈—大气层—电离层耦合等跨圈层物理过程缺乏定量描述；前兆异常信号精准识别，在强背景噪声和复杂环境干扰下，微弱前兆信号的提取存在多解性与不确定性；观测数据时空分辨率不足、深部信息受限及多参数同步观测能力薄弱等技术瓶颈；以及现有预测模型多依赖经验统计，缺乏普适性的物理基础.针对上述挑战，本文指出：未来应致力于构建立体协同监测体系，提升物理—化学场数据，即物理性质与化学组成同步的获取与融合能力；加强多学科融合的交叉研究，推动预测方法从经验统计向物理机制驱动转变；并融合大数据与人工智能技术，挖掘地震前兆的特异性指标，以期为地震预测研究中各学科把握研究方向，开展集中攻关，建立新一代地震短临预测理论与方法体系，推动地震预测研究进展.

关键词：地震短临预测；关键科学问题；物理—化学场耦合；立体监测体系；前兆机制

中图分类号：P65　　收稿日期：2026-1-19

Key Scientific Issues regarding Short-term and Imminent Seismic Forecasting

Li Ying[1], He Hongyi[1,2*], Zhang Yu[1*], Shao Weiye[3], Gao Zihan[1,4], Huang Zhikeng[1,4], Xing Gaoyuan[1], Zhang Shengfeng[1], Wang Zhenyu[1], Zhao Guoqiang[1], Xiong Pan[1], Liu Zhaofei[1], Liu Hua[5]

1. *Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing* 100036, *China*
2. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
3. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming* 650224, *China*
4. *Institute of Geology, China Earthquake Administration*, Beijing 100029, *China*
5. *Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing* 100038, *China*

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC3012005）、国家自然科学基金项目（U25A20563）、地震地球化学学科发展项目（CEAIEF20260901）及 IGCP-724 项目
第一作者简介：李营（1978—），男，博士，研究员，研究方向：流体地球化学. E-mail: liying@ief.ac.cn；ORCID: 0000-0001-8522-9020；
***通讯作者简介：**何鸿毅（1997—），男，博士研究生，研究方向：流体地球化学. E-mail: Hongyiace@163.com；张宇（1984—），女，博士，副研究员，研究方向：震地电观测方法和技术. E-mail: zyflyingfish@163.com

Abstract: Short-term and imminent earthquake forecasting is a critical approach for effectively mitigating seismic disaster losses. However, constrained by the extreme complexity and nonlinearity of geodynamic processes within the Earth, as well as the inaccessibility of crustal media, it remains a major unresolved challenge in global Earth sciences and a focal point of geoscientific research. Although progress has been made in this field, numerous bottlenecks persist in establishing highly reliable forecasting methodologies. Based on a systematic review of the current research status of short-term and imminent earthquake forecasting both domestically and internationally, this paper identifies the key scientific issues faced by core disciplines-including gravity, crustal deformation, seismology, space electromagnetism, geo-electricity, and fluid geochemistry. It also examines the historical evolution of China's earthquake monitoring and forecasting system since the 1966 Xingtai earthquake, the staged national research efforts from the Seventh to the Tenth Five-Year Plan periods, and representative earthquake cases such as Haicheng, Tangshan, Ning'er, and Wenchuan, thereby clarifying the transition from empirical precursor recognition to testable integrated criteria.

These common challenges primarily include: (1) the lack of clarity regarding the physical mechanisms of earthquake preparation and precursor genesis, specifically the absence of quantitative descriptions for cross-sphere physical processes such as the coupling between gravity and fluids, and the interaction among the lithosphere, atmosphere, and ionosphere; (2) difficulties in the precise identification of precursory anomalies, where the extraction of weak signals under strong background noise and environmental interference suffers from non-uniqueness and uncertainty; (3) technical limitations such as insufficient spatiotemporal resolution of observational data, restricted access to deep-earth information, and inadequate capabilities for synchronous multi-parameter observation; and (4) the reliance of existing forecasting models on empirical statistics rather than a universal physical foundation.

Addressing these challenges, this paper proposes that future efforts should focus on constructing a three-dimensional collaborative monitoring system to enhance the acquisition and fusion of physicochemical field data, thereby synchronizing the analysis of physical properties and chemical compositions. It is essential to strengthen interdisciplinary research to drive the transition of forecasting methods from empirical statistics to physical mechanisms. Furthermore, integrating big data and artificial intelligence technologies is necessary to mine specific indicators of earthquake precursors. These measures aim to guide research directions across various disciplines, facilitate concentrated breakthroughs, establish a new generation of theories and methodological systems for short-term and imminent earthquake forecasting, and advance the overall progress of seismic forecasting research.

Keywords: short-term and imminent earthquake forecasting; key scientific issues; physicochemical field coupling; three-dimensional monitoring system; precursor mechanism.

引言

地震作为最具破坏性的自然灾害之一，其突发性对人类生命和财产构成严重威胁. 地震预测作为地震研究领域长期以来备受关注的挑战，旨在提前识别地震发生的时间、地点和震级，以便采取有效减灾措施（Wood and Gutenberg, 1935；Rikitake, 1968；Scholz, 1977；Yu et al., 2024）. 根据预测时效的不同，地震预测通常分为长期、中期、短期和临震预测（Wood and Gutenberg, 1935；Rikitake, 1968；陈运泰，2007，2009a）. 其中，短期和临震预测（通常指未来数小时至数月内的预测）因其在为减灾和应急准备提供关键时间窗口方面的重要意义，成为当前地震预测研究的焦点（Shebalin et al., 2006；Uyeda et al., 2009；Hayakawa and Hobara, 2010；李营等，2023）. 只有实现可靠的短临预测，才能有效地组织人员疏散、强化应急响应、加固关键基础设施，从而最大限度地降低地震带来的损失（Molchan

and Kagan, 1992；Geller et al., 1997；Uyeda et al., 2009；Wu and Chen, 2023）. 然而，尽管付出了巨大努力，地震短临预测至今仍是一个悬而未决的难题，其复杂性远超预期（Geller et al., 1997；Wyss, 1997）.

尽管充满挑战，全球科学家从未放弃对地震短临预测的探索. 许多研究致力于寻找地震发生前的可观测前兆信号（Scholz, 1977；Bakun and Lindh, 1985；King, 1986；Uyeda et al., 2009；Hayakawa and Hobara, 2010；Moustra et al., 2011）. 这些前兆信号可能表现为多种地球物理和地球化学异常现象，涵盖地壳形变、地电、地磁、重力场变化、地下流体性质及含量改变等（陈运泰等，2013；张学民等，2016；赵永红等，2017；江在森等，2020；李营等，2023；刘喜亮和高雅婧，2023；张茂省等，2023；Akhoondzadeh, 2024）. 围绕 1975 年辽宁海城 *M*7.3（陈运泰等，1980；陈棋福，2005）、1976 年唐山 *M*7.8（虢顺民等，1977；梅世蓉和梁北援，1989）、2008 年四川汶川 *M*8.0（Zhang et al., 2008；王卫民等，2008；徐锡伟等，2008）、1995 年日本阪神 *M*7.2（Han et al., 1996）、1999 年土耳其伊兹密特 *M*7.6（Ozalaybey et al., 2002）、2004 年苏门答腊 *M*9.2（Hughes et al., 2010）、2011 年日本东 *M*9.0（Suzuki et al., 2011；Enescu et al., 2012）与 2016 年新西兰凯库拉 *M*7.8（Cesca et al., 2017；Shebalin and Baranov, 2017）等典型地震，中国与国际研究团队在短临前兆识别中形成了多学科交叉的研究体系.

这些震例研究表明，短临预测不能停留于异常现象罗列，而需要进一步回答异常组合是否可重复、物理解释是否成立、区域适用条件是否清晰以及预测效能能否接受检验等问题（Adams, 1976；陈运泰等，1980；左兆荣等，1995；Wang et al., 2006；车用太等，2008；张肇诚和张炜，2016）. 岳明生（2005）统计了中国 1975~2001 年成功预测或一定程度上成功预测的地震. 结果表明，流体观测数据是地震预测最重要的依据，在 24 个成功预测的地震中以流体为依据的 15 个，占所有震例的 62.5%，同时流体也是异常出现比例最高的学科（岳明生，2005）.

日本阪神地震前，神户大学团队以甚低频电磁阵列、地电偶极-偶极连续测深与 GPS 基线时间序列识别出震前数小时至数周 0.1–0.5 Hz 的电磁辐射增强（Hayakawa et al., 1996；Heki and Tamura, 1997）；针对伊兹密特地震，美-土联合实验通过 InSAR 形变、跨马尔马拉海海底压力计与井水位同震/震前联合反演，捕捉震前 44 分钟断层预滑信号（Bürgmann, 2018）. 苏门答腊与东日本地震后，JAMSTEC 与 GFZ 利用海底 GPS/Acoustic 阵列、海底电磁 OBEM 网与卫星总电子含量 TEC 反演，发现震前 5–40 天俯冲带界面出现显著的电磁扰动与重力/形变耦合变化（Lay et al., 2005；Heki et al., 2006）；新西兰凯库拉地震则通过 GeoNet GNSS 实时应变率、沿岸连续重力仪与深井孔隙水压监测，首次记录到震前 2 周慢滑移事件（SSE）与地磁脉冲的时空对应关系（Wallace et al., 2018；Warren-Smith et al., 2018）. 此外，利用先进的人工智能和神经网络技术，特别是长短期记忆网络（LSTM）及其变体，已经被探索用于分析包括氡浓度、电离层总电子含量（TEC）、气压、温度等多参数时序数据，以提

升短期地震预测的潜力（Joshi et al., 2024；Wang et al., 2024；Zhang and Wang, 2024）. 这些探索性的研究案例表明，虽然地震短临预测尚未实现业务化运行，但多学科交叉和新技术应用为这一领域带来了新的希望.

本文旨在综述地震短临预测领域当前亟待解决的关键科学问题. 尽管已有研究在特定区域或特定地震事件中取得了一些积极进展，但构建一个具有普遍适用性和高可靠性的短临预测体系，仍然存在诸多瓶颈. 这些瓶颈并非局限于某一单一学科，而是跨越了传统的地球物理学、地球化学、地质学等领域，涉及多物理场耦合、前兆识别与机理解释、预测模型构建与验证等方面. 例如，对地壳形变的精确监测与解释需要结合大地测量学和构造地质学的知识（Bevilacqua et al., 2022；Remitti et al., 2024）. 地电地磁异常作为潜在前兆的研究需要深入理解岩石圈与磁场的相互作用以及电离层响应（Uyeda et al., 2009；Hayakawa and Hobara, 2010；Jouniaux and Zyserman, 2016）. 地下流体地球化学的变化可能反映地下应力状态和裂隙导通性的改变，这与地震孕育过程紧密相关，需要地球化学和水文学的联合研究（陈建业和杨晓松，2012；车用太和鱼金子，2014；段庆宝等，2015；李营等，2023；天娇等，2024）. 尽管这些学科提供了丰富的观测手段和理论基础，但如何有效地整合不同来源的、具有高度非线性和时空变异性的前兆信息，并从中提取可靠的预测信号，是当前面临的共性难题.

综上所述，地震短临预测作为一项具有重大科学意义和社会影响的挑战，凝练其中的关键科学问题，是锚定攻关方向、厘清研究现状、实现预测能力跃升的前提和基础. 近年来，随着各学科观测方法和分析技术的发展，在地震异常成因、时空迁移规律及其与地震三要素关系等方面的研究不断推进. 虽然尚未建立有效的地震预测方法，但已有进展和关键科学问题仍需持续总结凝练，为后续科学研究和方法建立提供参考. 本文旨在系统梳理国内外研究文献和典型震例的基础上，总结各学科在地震预测研究中取得的进展和关键科学问题.

1 地震短临预测的研究现状、进展及国内外研究思路

1.1 国内外地震短临预测研究现状与研究进展

1.1.1 我国地震短临预测研究现状与进展

我国地震短临预测研究起步较早，自 20 世纪 70 年代邢台地震后持续开展地震预测科学研究，逐步形成了覆盖多学科观测、震例积累、专家会商和减灾服务的综合研究体系（刘耀炜等，2006；陈运泰，2007；刘春国等，2022；李营等，2023）. 在预测理论与方法研究方面，我国建立了“长-中-短-临”渐进式预报思路和工作程序，形成了具有中国特色的地震预测体系（张国民，2002；陈运泰，2007）. 这一体系综合运用地震学、地球化学、大地测量、重力、空间电磁、地电地磁等多学科观测手段，建立了一批地震短临预报方法，推进了地震预测向着基于客观、多方面科学判据的方向发展（赵国泽等，

2007；赵永红等，2014；李营等，2022，2023；姚琪等，2023）. 这一庞大的监测网络为地震短临预测提供了坚实的数据基础，使我国在数据积累和综合监测能力方面处于国际领先水平.

我国地震短临预测研究并非由若干观测方法的简单累积而成，而是在重大震害事件、观测台网建设、震例清理和国家科技攻关的共同推动下逐步形成. 1966 年邢台地震后，我国开始大规模地震预测研究与实践，并逐渐建立测震、形变、重力、地电地磁、地下流体和宏观异常相结合的多学科观测体系. 这一阶段首先解决的是观测布设、异常记录和震例积累问题，也使短临预测研究从个别经验现象识别转向有组织的连续观测与综合分析（刘耀炜等，2006；赵永红等，2014；孟宪森，2023）.

1977 年以来，我国地震预报研究由震例总结和方法清理逐步转向实用化、规范化与新技术条件下的持续攻关. 20 世纪 80 年代开展的震例系统总结、前兆与预报方法清理、仪器质量评价和实用化研究，构成“六五”震例清理与“七五”实用化攻关的主要基础；“八五”“九五”阶段进一步强调短临和中短期预报方法、单学科基础问题以及有物理基础的综合预测研究（中国地震局科学技术委员会办公室，2002；张国民等，2005；中国地震局地震预测研究所，2020）. 进入“十五”时期，国家数字地震台网、GPS 和数字前兆观测等新技术条件得到应用，研究重点扩展到宽频数字地震资料中的新信息提取，以及地震学、形变、电磁、流体和综合分析等多方向的中短期预报探索；与此同时，能够统一整合地震活动性与多学科前兆观测的综合预报方法仍未成熟（张晓东等，2003；张国民等，2005）.

上述历史脉络表明，我国短临预测研究经历了由观测体系和震例资料积累，向方法清理、实用化和中短期技术攻关，再向数字化观测和多源综合分析发展的过程. 相应的关键问题也由“能否记录到异常”逐步转向“异常能否可靠识别、是否具有稳定信息量、不同测项之间是否存在物理联系，以及预测意见能否接受独立检验”. 因此，当前瓶颈既来自单项学科对异常机理和适用范围约束不足，也来自多源资料如何在统一时间尺度、空间尺度和评价标准下转化为可检验的预测依据（中国地震局科学技术委员会办公室，2002；张晓东等，2003；张国民等，2005；赵永红等，2014）.

地震学资料是短临预测中刻画震源区活动状态最直接的数据来源之一. 我国围绕地震活动性、震源物理过程和统计预测模型开展了长期研究，形成了以震例分析、时间序列分析和活动性参数异常识别为基础的研究框架（袁德宝等，2020；杨晶等，2021）. 其中，b 值变化、能量释放加速、震源区应力集中、空间活动性迁移、基于地震活动加速模型（Accelerating Moment Release，AMR）、地震空区和活动带迁移等指标或方法，为识别震源区由相对稳定状态向临界失稳状态演化提供了经验和统计依据（石特临和郭大庆，1995；顾瑾平，2000；蒋长胜和吴忠良，2009；吴中海和赵根模，2013；冯亮亮和邵辉成，2020；裴玮来等，2021；袁道阳等，2023；尹晓菲等，2024）.

大地测量观测为短临预测提供了区域构造加载和震前形变异常的背景约束. 长期的 GNSS 观测及研究表明，地壳运动会出现偏离线性运动的趋势，这类变化特征对短临地震预测具有一定的指示意义. 假设正常情况下时序变化具有线性趋势，通过识别地壳相对运动时序变化异常，出现显著偏离线性趋势则视为异常，偏离线性运动趋势可表现为相对于线性趋势的减缓或者加速. GNSS 时序动态变形特征与强震孕育过程的关系包括：（1）在大震前数月至年尺度，跨大型走滑断层的地壳相对运动可能减缓，指示正常相对运动“受阻”或是在大尺度构造动力加载增强状态下，存在发震断层近震源区弹性变形弱化现象. 2001 年昆仑山口西地震和 2008 年汶川地震前的 GNSS 观测表明，此类动态形变特征有助于识别构造加载状态的调整和重点危险区紧迫性的增强（江在森等，2006，2009）.

在空间电磁短临预测研究方面，我国的研究策略已从早期地面探索，系统性发展到以卫星为核心的天基观测，并正朝着构建空天地一体化的立体监测体系迈进. 这一进程的标志性进展是中国自主研发并成功发射的电磁监测试验卫星“张衡一号”系列. 继 01 星于 2018 年入轨后，“张衡一号”02 星也于 2025 年成功发射，通过双星组网协同工作，显著提升了全球电磁场和电离层等离子体数据的时空分辨率与覆盖能力，为我国地震电磁监测研究奠定了坚实的数据基础（申旭辉等，2022）. 在震例的分析与前兆信息提取方面，我国学者依托在地震危险区布设的长期系统性观测网络，积累了大量的震前电磁异常数据（赵国泽等，2007，2022），并在具体的震例研究上取得了显著进展. 例如，针对 2013 年芦山 M_w6.6 地震，研究人员采用改进的 DE-DDTFA 方法对电磁信号进行分解，发现在震前一周内，信号的本征模态函数（IMF）数量比平时增加了 200%，同时信号能量也增长了约 10-20 倍，这些量化指标清晰地揭示了震前电磁环境所发生的显著变化（Hao et al., 2021）. 这些分析工作与“张衡一号”等国产电磁监测试验卫星获取的高分辨率数据相结合（申旭辉等，2022），共同推动了先进信号处理技术在微弱前兆信息识别中的应用，为从复杂的背景噪声中分辨和确证地震前兆提供了关键的震例支持与技术储备.

在地电阻率短临预测研究方面，经过近 60 年的连续观测与实践积累，我国地电观测在地震前兆识别方面形成了较为丰富的资料基础. 地电阻率台网记录到唐山 7.8 级、汶川 8.0 级、芦山 7.0 级、积石山 6.2 级等多次强震前的异常变化，其主要表现为震前地电阻率趋势性下降，变化幅度多为百分之几至百分之十几，异常分布通常可延伸至震中周边约 200 km-300 km；震后近震中台站的下降趋势往往出现转折，如缓慢回升、恢复或趋于停止，这为判别异常与地震活动之间的关联提供了重要依据. 与此同时，自 1966 年开展地电场观测以来，我国已建成 120 多个观测台站，并在汶川 8.0 级、芦山 7.0 级、九寨沟 7.0 级、文安 5.1 级等地震前记录到较典型的地电场异常. 围绕短临预测，研究者发展了地震电信号（seismic electric signals, SES）、波形分析、日变形态畸变分析、极化方位计算、时频分

析及大地电场优势方位角等多种方法. 相关实验与模型研究表明，地电异常可能与岩石进入后期破裂阶段时裂隙扩展、定向排列以及裂隙水渗流状态变化有关，其中“大地电场岩体裂隙水渗流模型”可利用地电场潮汐波幅度反演裂隙水主体渗流方向及其逐日变化，为跟踪岩体裂隙结构演化和开展短临前兆分析提供了新的思路.

在地球化学短临预测研究方面，我国发展了多种基于前兆机理的预测模型和方法. 李营等（2023）系统综述了地震流体地球化学短临预测的研究进展，介绍了国内建立的多种预测模型，包括基于氡浓度异常的预测方法、地下水化学成分变化监测方法等. 学者们利用<中国震例>数据对主要预测模型进行了检验分析，评述了各方法的适用性和效能（顾瑾萍等，2004；郑兆苾等，2006；蒋海昆等，2009；李营等，2023）. 在川滇地区，基于 6 个流体监测站 10 年的地下水溶解氡连续数据分析，研究者计算了各台站数据的年波动变化的赫斯特指数，并根据各监测站捕获的地震事件，圈定了流体监测站的地震响应区，开展了地震尝试性预测（Zhao et al., 2021）. 此外，我国还发展了“动态圆分析法”，通过科学布设台阵，结合气体地球化学异常响应地震的震中距与震级经验公式 $\rho=10^{0.43M}$（Dobrovolsky et al., 1979）〔式中，ρ 为地震准备区半径，单位为 km；M 为震级〕，利用辅助圆判定研究区可能发生地震的区域和震级（李营等，2022）.

在模型构建和智能分析方面，我国研究者将断层加载、震间应变积累、震源破裂参数化和库仑应力计算引入地震孕育及触发过程研究，用以解释震前活动性异常和震后应力调整（张贝等，2015；黄禄渊等，2017；瞿武林等，2017；贾科和周仕勇，2022；刘雷等，2024）. 近年来，机器学习和模式识别方法也被用于高频微震活动、震群时空分布和前震触发链特征提取，推动临震异常识别由人工经验判断向自动化、定量化方向发展（熊熊等，2023；徐锡伟等，2023）.

近年来，地震预报也在科技方法及机制体制上进行着不断的改革和创新，在 2022 年青海门源 6.9 级、四川泸定 6.8 级、2024 年新疆乌什 7.1 级等地震前，地震部门捕捉到了一些地震前兆信息. 以 2022 年四川泸定 6.8 级地震为例，在回顾过程中，发现中期预测上，2022 年 5 月四川省地震局年中地震趋势会商会已明确研判，需持续跟踪川滇菱形块体东边界地震重点危险区，判定该区域发震紧迫性进一步增强，泸定 6.8 级地震恰好发生在该预测区域内，中期地点预测效果显著. 短期预测中我们进行了震情等级升级研判与精准区域锁定，2022 年 8 月月会商将震情预期由“6 级左右”提升至“6-7 级”，8 月 31 日震情专题会商进一步明确四川及邻区短期发生 6-7 级地震的紧迫性显著增强，结合热红外、地壳形变等学科异常，精准指向甘孜至石棉段为高风险区域，同时跟踪到地震活动、地球物理场短期异常同步转折的关键信号.

而在这一次地震预报实践中，在震前发现了包括测震学异常 8 项，定点形变异常 3 项，跨断层形

变异常 8 项，流动重力异常 1 项，电磁异常 4 项，地下流体异常 1 项，电离层扰动异常 1 项，热红外异常 3 项、GNSS 站点异常 2 项和宏观异常 2 项在内的共 33 项异常. 其中测震学存在 3 项短期异常，地球物理观测存在 13 项短期异常，短期异常数量的集中增加对发震时间形成了良好指示. 在论证过程中，按照长中短临渐进式预报思路，综合分析测震、形变、电磁、热红外、流体等多学科异常的时空演化特征，结合川滇菱形块体东边界构造背景与历史震例规律，定量计算综合异常概率指数，通过动态跟踪、现场核实、滚动会商形成闭环研判，最终把握了地震趋势，相关研判结论为省政府提前部署强震防范与应急准备工作提供了核心依据，切实发挥了防震减灾的实际效能.

此外，近年针对 2021 年玛多 M_S7.4 地震和 2023 年积石山 M_W6.1 地震的震源构造、地震动模拟与区域危险性研究，进一步说明近震例精细分析可为重点危险区识别、预测结果解释和震后验证提供约束（Hu et al., 2025；Li et al., 2025）.

1.1.2 国外地震短临预测研究现状与进展

相比之下，国外地震短临预测研究呈现出不同的特点和发展路径. 国外地震短临预测研究总体上更强调概率表达、模型检验和风险沟通，对确定性短期预测保持审慎态度. 意大利国际民防地震预报委员会关于短期预测可靠性的评估，以及拉奎拉地震事件后的反思，推动国际研究更加重视概率地震预报和可检验预测框架（Roeloffs and Langbein, 1994；陈运泰，2007；Uyeda et al., 2009；Alexander, 2010；Jordan et al., 2011）. 因此，国外相关研究的突出特点不是建立统一的确定性短临预报体系，而是围绕概率模型、试验场观测、第三方检验和业务化风险产品不断完善方法体系.

在概率预报方法研究方面，国外特别是美国发展了较为成熟的余震预测系统. 美国地质调查局开发了 UCERF3-ETAS 模型（Field et al., 2015, 2017），该模型将 ETAS（epidemic-type aftershock sequence）统计模型与基于断层的背景率模型结合，并加入弹性回跳效应，在加利福尼亚州范围内与长期国家地震危险图保持一致. 该模型可生成随机事件集、超越概率的空间分布图以及预期损失计算，还能提供基于断层的概率，如特定断层段的成核或参与概率. 虽然 UCERF3-ETAS 模型需要高性能计算且运行耗时数小时，目前仅按需运行，但其在理论框架和技术实现上代表了国际概率预报的先进水平. 意大利的运行性地震预报系统（OEF）在过去 10 年的运行中，每天发布周度地震预测，并成功通过了标准测试以评估其性能（Spassiani et al., 2023）. 在短期贝叶斯 ETAS 时空预测框架中，可以观察到预测地震活动性随着时间的变化，以及不同震级地震发生的概率. 例如，针对 2008 年冰岛奥尔福斯 6.3 级地震的余震序列研究显示，在震后不同时间段内，ETAS 模型能够预测特定震级地震（如 M≥3.5、M≥4.5、M≥5.5 甚至 M≥6.5）发生的概率（Darzi et al., 2022）.

人工智能和机器学习已成为国外地震预测研究的重要技术方向，主要用于前兆异常识别、地震率

建模和地震参数快速估计. 相关方法从规则模型、浅层机器学习发展到深度神经网络（DNN）、长短时记忆网络（LSTM）、卷积神经网络（CNN）和神经点过程模型，并被用于地震电信号识别、震级快速估计和地震率预测等任务（Negarestani et al., 2002；Zmazek et al., 2002；Kanarachos et al., 2017；Q. Wang et al., 2020；Bhatia et al., 2023；Zlydenko et al., 2023；Stockman et al., 2023；Dascher Cousineau et al., 2023）. 这些研究的共同趋势是利用海量地震目录和多源观测资料提高异常识别的自动化水平，并通过模型对比检验其相对于传统统计模型的预测增益.

在地球化学及相关短临前兆观测方面，国外也开展了若干探索性研究，但总体上研究较为分散，尚未形成统一的理论框架和业务化方法体系. 地球化学研究主要集中于氡浓度、地下水微量元素等观测资料的异常识别与环境干扰剔除. 例如，分层神经网络（LNN）、模型树回归（MT）、箱线图及气象参数分析等方法，被用于区分环境因素变化与地震活动可能引起的氡浓度异常（Negarestani et al., 2002；Zmazek et al., 2002）；主成分分析（PCA）和变化点检测（CP）也被用于地下水微量元素浓度序列分析，以识别可能与地震活动有关的水文地球化学异常（Barbieri et al., 2021）. 此外，Soldati et al.（2020）利用变点分析与检测算法（DA）及贝叶斯变化点算法处理意大利中部连续氡浓度观测资料，并报告了与 2016 年 10 月 30 日意大利诺尔恰 M_{W} 6.5 地震相关的异常识别结果；Hashemi et al.（2012）则提出基于氡监测网估计地震地点和震级的方法，即在研究区至少两个监测点出现异常的条件下，通过多个影响圆的重叠区域圈定可能震中范围. 除地球化学观测外，部分研究还尝试利用震前电离层扰动或重力场变化开展短临预测. 例如，1995 年日本神户 *M*7.2 地震前后曾报告可能与地震活动相关的甚低频（VLF）亚电离层传播异常；Molchanov and Hayakawa（1998）进一步分析神户地震等 10 次 M>6 地震资料，认为周期约 510 天的瞬态亚电离层振荡可能在强震前数日出现，并在震后数日至数周内逐渐衰减，其机制可能与地震孕育或发生过程中激发的长周期重力波在 70-90 km 高度增强有关. Shahrisvand et al.（2014）则基于四分位距法构建 GRACE 卫星重力时间序列异常判据，识别出 2010 年智利 *M*8.8 地震、2011 年日本 *M*9.0 地震和 2012 年印度洋 *M*8.6 地震前 2-5 周的显著异常事件. 总体来看，这些研究为地震短临预测提供了多源观测和数据分析思路，但多数仍停留在个例分析或方法验证阶段，其物理机制、适用条件和预测稳定性仍需进一步检验.

综上所述，我国地震短临预测研究长期依托系统化、多学科综合的研究路径，形成了较为完整的观测网络和预测工作体系，积累了丰富的震例经验和观测数据；国外研究则更重视概率预报、模型检验、试验场观测以及人工智能和深度学习等技术应用. 未来，将多学科连续观测、物理机理约束、概率预测框架和智能分析方法结合起来，是提升地震短临预测科学性和可检验性的重要方向.

1.2 国内外地震短临预测思路、方法总结

地震短临预测是地震科学研究领域的世界性难题（Kagan and Knopoff, 1987；Kanamori, 2003；李营等，2022；Yu et al., 2024），各国学者基于不同的科学理念、观测技术和地球物理/化学原理，在强震多发区，如中国、美国、日本、意大利和土耳其等地，发展了多样化的预测思路和方法，并在多个典型震例中积累了宝贵的经验数据（Uyeda et al., 2009；Hayakawa and Hobara, 2010；B. Wang et al., 2018）. 各国学者普遍将地震前兆异常视为实现短临预测的关键科学依据，认为这些异常反映了震源区及周边岩石临近破裂时的应力状态变化（Rikitake, 1968；陈运泰，2007；李营等，2023）. 国际上广泛部署了多学科综合观测手段，涵盖地下流体地球化学（如氡浓度、水化学成分）、地球物理场（地应变、重力、磁场、电场）以及大地测量（如 GPS 形变）等（Wakita et al., 1980；Igarashi et al., 1996；赵永红等，2014）. 在众多前兆手段中，地下水氡浓度监测是各国共同采用的重要技术路径，自 20 世纪中叶起，中国、美国、日本、意大利、土耳其、伊朗等国相继建立了监测网络（Hauksson, 1981；Igarashi and Wakita, 1990；Ramola et al., 1990）. 基于长期的观测实践，研究者提出了一系列经验统计关系，如 Dobrovolsky et al. (1979)给出的前兆异常区半径与震级的关系（$\rho=10^{0.43M}$）〔式中，ρ 为地震准备区半径，单位为 km；M 为震级〕以及 Rikitake et al. (1987)建立的前兆持续时间与震级的关系（logT=0.59M-1.08）〔式中，T 为前兆持续时间，单位为 d；M 为震级〕，这些公式在不同地区得到了应用与验证，为预测提供了定量判据（Talwani, 1979；Ilić et al., 2005）.

在数据处理方面，有效区分地震前兆与环境干扰是共同的技术难题. 国内外学者均致力于发展先进的异常识别算法，广泛应用了分层神经网络（LNN）、模型树回归（MT）、箱线图、主成分分析（PCA）和变化点检测（CP）等统计学与机器学习方法（Negarestani et al., 2002；Zmazek et al., 2002；Bhatia et al., 2023）. 例如，意大利学者利用变点分析等算法成功预测了 2016 年诺尔恰 MW6.5 地震（Soldati et al., 2020）；中国学者则发展了 HMAD-HS 方法以提升地磁异常信号的识别能力（刘欢等，2023）. 随着大数据与人工智能技术的发展，智能化、自动化已成为国内外地震预测研究的共同趋势. 支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、人工神经网络（ANN）以及深度学习网络（如 CNN、LSTM、RNN）等先进算法被广泛应用于地震前兆特征的自动提取和隐藏模式的挖掘（Külahcı et al., 2009；Asim et al., 2016；Q. Wang et al., 2020；王锦红和蒋海昆，2022）.

尽管在技术路径上存在诸多共识，但受限于地震构造背景、历史震例积累、科研体制及预测理念的差异，各国在具体的预测思路上存在比较明显的差异. 最根本的差异体现在预测理念和目标定位上：中国地震预测研究长期以来强调“确定性预测”，致力于对未来地震的时间、地点、震级“三要素”作出明确预测，并通过政府部门依法发布预报以指导防震减灾实践（张国民，2002；陈运泰，2007）. 这一理念源于 1966 年邢台地震后的国家需求及“专群结合、土洋结合”的方针（王国治，1996），

1975 年海城 7.3 级地震的成功预测更是坚定了这一信心，但海城震例更应被理解为特定构造背景、显著前震序列、多源异常和组织会商共同作用下的短临预报典型震例，而不宜简单泛化为强震短临预测已可稳定复制的证据（Adams, 1976；左兆荣等，1995；Wang et al., 2006；张肇诚和张炜，2016）. 中国地震预测遵循“长-中-短-临”的渐进式工作程序，形成了强调多学科综合判断和群测群防相结合的预测体系（梅世蓉，1993）.

与中国不同，国际上（特别是美国、日本等）在经历了一系列预测尝试，尤其是美国帕克菲尔德（Parkfield）M~6 级地震预报的重大失利（预测 1988 ± 4.3 年发生，实际发生于 2004 年）之后，逐渐转向了“概率性预测”的理念（Roeloffs and Langbein, 1994；陈运泰，2007）. 日本在 2011 年东日本 9.0 级大地震后，进一步认识到前兆现象的复杂性，将研究方向转变为“使用物理模型、基于观测数据了解地震发生机制并预测地壳活动”（张琰等，2024）. 这些国家目前更侧重于基于概率统计的地震危险性评估，而非追求确定性的短临预测. 这种理念差异也导致了预测方法体系和技术路线的不同. 中国的预测方法体系具有鲜明的综合性与实用性特征，依托覆盖全国的多学科综合观测网络（流体、地球物理、大地测量、地震活动性等），发展了如加卸载响应比、地磁逐日比等一系列具有本土特色的预测方法，并形成了基于经验统计和专家会商的决策机制（李营等，2023；刘欢等，2023）. 而国外研究则更强调物理模型和数值模拟的作用，如美国在帕克菲尔德试验场布设精密仪器以验证震前滑移假说（陈运泰，2007），日本则利用数据同化技术构建断层滑移监测系统以评估大地震风险（张琰等，2024）. 此外，在预测模型检验与效能评估方面也存在差异. 国际上在"地震可预测性合作研究"（CSEP）计划框架下，发展了第三方统计检验方法体系（Zechar et al., 2010；Savran et al., 2020, 2022），意大利、新西兰等国建立了业务化地震预报系统（OEF）发布概率性预测产品（Becker et al., 2019）. 相比之下，中国地震预测研究过去更注重实际震例的回顾性总结与实用化攻关（顾瑾萍等，2004；陈棋福，2005；陈运泰等，2013），近年来也开始重视利用<中国震例>数据对预测模型进行定量化检验（蒋海昆等，2009；李营等，2023）. 在观测网络布局上，中国形成了“国家-省-市-县”四级监测体系和专业与群测相结合的格局（陈运泰，2007，2009a）；日本则在板块俯冲带建立了高密度的海陆一体化观测系统（Hayakawa and Hobara, 2010）；美国则侧重于在圣安德烈斯断层等关键区域建立高精度试验场（Schwartz and Coppersmith, 1984）. 尽管取得了诸多进展，但地震孕育过程的极端复杂性、地球内部的"不可入性"以及前兆与地震非一一对应关系等难题，使得地震短临预测的总体水平仍有待提高（Geller et al., 1997；陈运泰，2007）.

1.3 重大历史震例对地震短临预测关键科学问题的启示

我国地震短临预测的关键科学问题，需要结合不同历史震例的观测背景、异常表现和预测实践加

以理解. 1966 年邢台地震后，我国开始大规模现场监测预报实践，逐步形成多学科观测、长中短临分期和会商制度（张国民等，2005）. 1975 年海城 *M*7.3 地震的短临研判，与此前的中长期危险性认识、显著前震序列、多源异常和会商判断密切相关（Adams, 1976；左兆荣等，1995；张国民等，2005；Wang et al., 2006）；1976 年唐山 *M*7.8 地震前缺少显著前震，华北地区同期发生的多次地震活动相互叠加，使异常背景更加复杂，已有经验难以判别所见异常究竟是前期地震的调整效应还是未来大震的前兆，因而未形成明确短临预报意见（张国民等，2005）. 两个震例说明，短临预测不仅取决于能否观测到异常，还取决于异常能否在特定构造背景和震情演化过程中得到稳定解释并转化为可操作判据. 同类观测量在不同震例中也可能具有不同表现和物理含义（陈运泰等，1980；张肇诚和张炜，2016），其科学价值需要结合区域背景、多学科一致性和判据适用条件综合判断.

2007 年云南宁洱 *M*6.4 地震和 2008 年汶川 *M*8.0 地震为认识预测能力边界提供了另一组参照. 宁洱地震前，2005-2006 年滇西南地区近同步出现中小地震活跃、调制小震频发、震源深度加深和 *b* 值由高转低等中短期变化；进入 2007 年后，云南 3 级地震平静、滇西南 3 级震群密集、震源区及附近中小地震活动增强等现象被用于短临跟踪（李永莉等，2007；刘丽芳等，2007）. 但 2007 年 5-6 月老挝、宁洱和缅甸在短时间、近距离范围内连续发生 4 次 M>5 地震，使前一地震的震后异常与后续地震的孕震异常相互重叠，异常区分和临震时间判定较为困难. 云南 38 组 M≥5 震例统计也表明，小震增频较为常见，但异常持续时间与震级并不存在稳定线性关系，相关指标应限定在区域样本和具体构造背景下使用（付虹等，2008）. 《地震预测预报相关的重要科技挑战》将宁洱地震列为年度危险区预测和短期预报成功的震例，同时指出汶川 *M*8.0 地震前未作出短期预报（“地震预测预报二十年发展设计”工作组，2018）. 对汶川震例，车用太等（2009）将未形成预测意见的原因归纳为危险性认识不足、缺少 *M*8 级震例经验、观测资料受干扰及数字化过渡影响、异常核实与综合判断困难等. 因而，两次震例共同指向的关键问题，是如何明确区域经验的适用条件，区分背景变化、震后效应与新孕震信息，并通过独立震例和前瞻性检验评价异常组合的实际信息增益.

2 地球科学各学科面向地震预测的关键科学问题

2.1 重力观测在地震预测研究中的应用

地球重力场能够反映地球内部密度结构、质量迁移及相关动力学过程（Sun and Okubo, 2004）. 在地震孕育过程中，震源区应力积累、地壳变形、流体运移和物质再分布可能共同引起局部重力变化. 因此，重力观测服务于短临预测的核心价值，主要体现在从复杂背景变化中识别与孕震过程有关的重力异常，并评估其对潜在震源区圈定、异常演化阶段判定和震级尺度估计的约束作用.

2.1.1 重力观测在地震预测中的研究现状

国际重力实时变化观测研究始于 20 世纪 20 年代，中国自 1966 年邢台地震后，开始了流动重力观测和区域重力场随时间变化的监测预报研究，重力观测技术在地震预测中的应用取得显著进展. 传统陆基重力测量通过捕捉震前、同震和震后的重力变化，揭示了地震周期中的质量迁移规律（图 1）. 近年来，随着中国大陆观测网的完善，对 2013 年芦山 7.0 级等中等以上强度地震进行了较准确的中期预测（祝意青等，2013）.

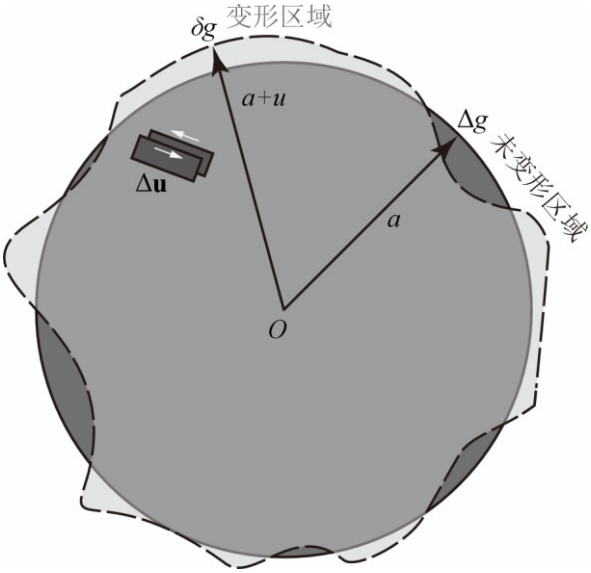


图 1 与地震活动相关的重力变化示意图（改自孙文科，2012）

Fig. 1 Schematic diagram of gravity changes associated with seismic activity (modified from Sun, 2012).

重力学科在地震预测中的应用主要体现在震前异常识别方面. 流动重力测量通过密集观测网络捕捉区域重力场动态演化. 祝意青等（2013）发现，强震前区域重力场常出现大范围有序变化，震源区附近形成局部异常区，并沿活动断裂带呈现高梯度带特征. 超导重力仪则通过高频信号分析识别震前瞬态扰动（张克亮等，2013）. 重力变化与地震前兆的关联研究推动了地震预测方法的创新，如通过识别震前瞬态重力信号（Prompt Elasto-Gravity Signals, PEGS）实现地震短临预测（Vallée et al., 2017）. 人工智能技术的引入加速了微弱重力信号的自动识别，例如 PEGSNet 算法可通过分析震前瞬态重力扰动实现震级与位置的快速判定（Licciardi et al., 2022）.

重力学科在地震预测中地点判定优势最为突出，其通过捕捉地壳质量迁移与形变引起的重力异常，且重力异常的空间分布与活动断裂带密切相关，能够通过区域重力场梯度变化或局部异常区锁定潜在震源位置. 例如，2017 年九寨沟 *M*7.0 地震前，重力场呈现“四象限”分布，震中位于异常梯度带转折区（祝意青等，2017）. GRACE 卫星数据进一步验证了这一机制，2011 年日本东北地震前，震中附近出现持续重力负异常（Han et al., 2011）. 震级评估依赖重力异常时空尺度，理论模型表明，震级与异常范围呈正比（Okubo, 1991）. 时间预测方面，受限于异常信号的持续性与多解性，通常仅能提供数月到数年的中期预测窗口，如 2008 年于田 M_s7.3 地震前 2 年出现区域性重力上升（张国庆等，

2018），2016 年意大利中部 M_w6.2 地震前，连续重力台站记录到震前 3 个月的重力下降（Carbone et al., 2017）. 在短临预测方面仍需探索孕震机制原理和前兆捕捉技术.

2.1.2 重力观测在地震预测中的关键科学问题

基于弹性和粘弹性地球模型的变形理论，包括地震波运动和地震位错理论，已经得到了充分的发展和完善（唐河和孙文科，2020）. 但以下问题需要进一步研究.

1）孕震过程重力变化理论建模的局限性

现有的位错理论有效地描述了同震和震后变形模式，但在孕震过程中重力变化的理论建模和重力观测研究却很有限. 除了 Savage (1983)针对俯冲带地震提出的反向滑动模型、Kuo and Sun (1993)和 Kuo et al. (1999)的综合扩张模型以及 Kabirzadeh et al. (2022)观测到的震间重力变化外，缺乏更为成熟的理论或观测结果. 且现有模型多基于准静态假设，未能充分耦合断层闭锁-蠕滑转换的动力学过程（Segall, 2010），重力变化与孕震过程之间的物理关系尚不清楚.

2）多场耦合理论的不足与复杂性

多场耦合，特别是与流体运动耦合的地震诱发重力变化理论亟待深化. 大量研究表明，断层带的演化受断层带流体和围岩力学性质的显著影响，孔隙压扩散可改变断层有效应力，诱发质量迁移（Wibberley et al., 2008）. 现有的重力变化模型需更细致地考虑孔隙弹性效应（Detournay and Cheng, 1993），此类过程需结合渗流力学与位错理论，构建多相介质耦合方程. 数值模拟方面，有限元方法虽能处理复杂边界条件，但多场耦合求解仍面临计算效率与参数不确定性的挑战.

2.1.3 解决方案与思路

基于以上论述，重力学科在地震短临预测尚有发展空间，表现在深化孕震机理认识、夯实地震监测基础、提高前兆识别能力等方面，具体包括：

发展多场耦合本构模型： 将孔隙弹性、热弹性与化学渗透效应整合到位错理论中，建立包含流体输运方程的重力-形变耦合模型，并利用 GRACE、GNSS 和 InSAR 数据优化完善该模型（Zhou et al., 2018）.

强化多尺度观测技术、多传感器融合： 超导重力仪与宽频地震仪联合观测系统（Hinderer et al., 2007）通过频率域信号分离，可有效抑制降水干扰. 部署量子重力仪网络（Stray et al., 2022）与分布式光纤传感系统（Carbone et al., 2020），实现从米级到千米级的连续监测，降低观测成本.

推进多物理场数据融合与人工智能应用： 构建基于物理约束的神经网络，融合重力、形变与地球化学数据，提升前兆信号识别的稳定性和抗干扰能力（Kong et al., 2018）.

2.2 地壳形变监测在地震预测研究中的应用

2.2.1 GNSS 技术在地震预测中的研究现状

GNSS 观测及其派生产品为识别震前形变异常提供了必要的背景场. 通过数年至数十年的连续观测，可获得地壳运动速度场和应变率场，如主应变率、最大剪应变率、面膨胀率等，用以刻画区域构造加载和应变积累状态（Li et al., 2012；Angelica et al., 2013；江在森等，2020；Gao et al., 2021；Kowalczyk et al., 2021；Maurya et al., 2022）. 对于短临预测而言，这些长期背景结果的意义在于为识别震前数月、数天尺度的加速、减速、方向改变或局部应变率异常提供参照；同时，高频 GNSS 资料还可服务于震级快速估算和地震预警应用. 例如 Angelica et al. (2013)在对意大利地区的研究中，通过综合分析 GPS 观测的大地测量应变率和地震目录的地震应变率，评估了不同区域的地震潜势，认为高应变积累的区域与地震危险性密切相关. Gao et al. (2021)在研究 2021 年中国玛多 M_w 7.3 级地震时，利用高频 GNSS 数据获取了峰值地面位移和峰值地面速度，并以此为基础建立了适用于地震早期预警的震级快速估算模型.

结合弹性位错理论或更复杂的粘弹性模型，GNSS 位移数据还可用于反演活动断层面的闭锁程度和滑动亏损速率，为评估未来地震的潜势和复发周期提供关键信息（Qiao et al., 2021；朱绪林等，2021）. 通过对 GNSS 观测数据的长期积累和分析，研究者们也能够识别和研究地震周期中地壳形变的完整特征，特别是震前数年到数月甚至数天内观测到的地表位移场的加速、减速、方向改变或应变率场的异常变化（顾国华和王武星，2020；Golriz et al., 2021；顾国华，2023）. 高频 GNSS 数据也能够实时捕捉地震波（P 波和 S 波）引起的地面瞬时运动，快速估算地震震级，为地震预警系统争取宝贵时间（Melgar et al., 2019；Gao et al., 2021；Meilano et al., 2022）. 近年来，机器学习和人工智能技术也开始被引入 GNSS 数据分析，用于识别复杂的、非线性的前兆模式（Dittmann et al., 2022；Yáñez-Cuadra et al., 2023）. 将 GNSS 数据与其它地球物理观测手段（如地震活动性分析结果与 InSAR 形变数据等）进行多源数据融合（Guns et al., 2022；Gunti et al., 2022；Lyu et al., 2022），以及基于物理过程的地震数值模拟并同化 GNSS 观测数据（Kano et al., 2020），正成为地震预测研究的重要发展趋势.

2.2.2 地壳形变学科在地震预测中的关键科学问题

尽管 GNSS 观测极大地推动了我们对地壳形变的认知，但在将其应用于可靠的地震预测实践时，仍面临一系列深刻的科学理论问题. 这些问题超越了观测技术本身，触及了我们对地震孕育物理机制理解的根本局限.

一个核心的科学挑战在于如何从连续的、大背景的地壳变形场中，准确识别出与特定强震孕育直接相关的、具有前兆意义的形变信号. 地壳形变是一个多尺度、多因素驱动的复杂过程，包含了长期板块运动、区域构造应力调整、火山活动、地表负载变化乃至人类活动等多种影响（顾国华和王武星，

2020；顾国华，2023）．当前，我们尚缺乏一套普适的理论标准来区分这些背景变形与真正的震前异常．例如，观测到的位移场加速或应变率变化，究竟是孕震过程进入关键阶段的标志，还是构造应力场正常波动的一部分，其物理判据仍不清晰（Stevens and Avouac, 2021）．

其次，震前形变与地震三要素（时间、地点、震级）之间的定量物理关系尚不明确．虽然已有研究指出了震前形变异常的持续时间、幅度、空间尺度与震级之间可能存在的关联（图 2，顾国华，2023），但这些关系大多是基于有限震例的经验性总结，缺乏坚实的物理基础．我们尚不清楚断层从稳定蠕滑或闭锁状态向失稳破裂转变的完整动力学过程，特别是难以从地表形变观测中精确反演震源区内部的应力状态、摩擦性质和能量积累的临界条件（Avouac, 2015；Yang et al., 2018；申文豪等，2018）．这导致我们难以建立从可观测的地壳形变参数到未来地震三要素的确定性物理预测模型（Bizzarri, 2011；Sgrigna and Conti, 2012；Rundle et al., 2021）．

第三，地壳介质的非线性、非均匀性及其在孕震过程中的演化机制，是制约形变预测模型的关键科学瓶颈．传统的位错理论大多基于弹性或简化的粘弹性介质假设（Kunin, 1968；Pollitz et al., 2001），然而震源区及其周围的介质在强应力作用下亦会表现出显著的非弹性和损伤演化特征（Carcione, 1993；Mitchell, 1995；Bryan et al., 2025）．如何将岩石物理实验中观察到的微破裂、孔隙流体压力变化、摩擦滑动失稳等非线性行为，有效地融入到大尺度的地壳形变模型中，并解释 GNSS 观测到的复杂前兆现象（如加速变形、预滑等），仍然是一个巨大的理论难题．

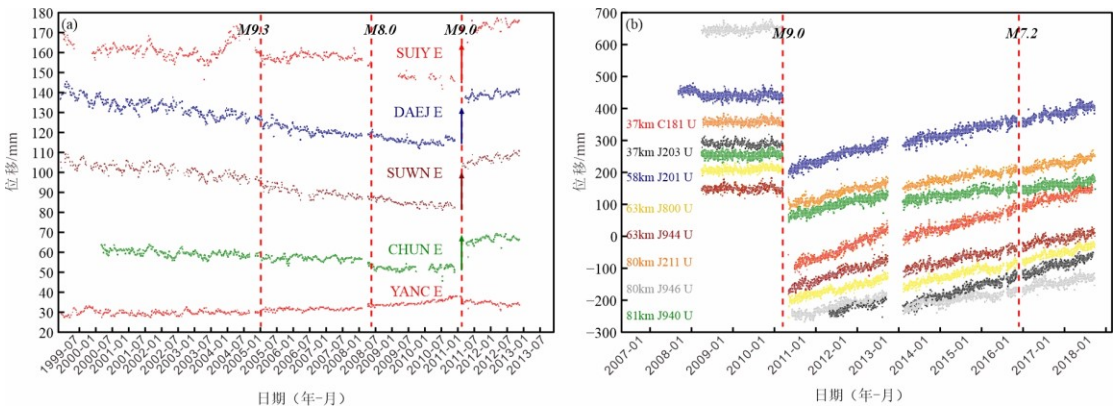


图 2 2011 年 3 月 11 日东日本 9.0 级大地震 GPS 远场连续站观测到的水平位移和近场连续站观测到的垂向位移前兆现象（据顾国华，2023）

Fig. 2 Precursory horizontal displacements observed at far-field continuous GPS stations and vertical displacements at near-field stations prior to the M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake on March 11, 2011 (modified from Gu, 2023).

最后，不同构造环境、不同类型的地震，其前兆形变模式是否存在普适规律，抑或表现为高度的特异性，这是一个悬而未决的根本问题．例如，走滑断层、逆冲断层和正断层的孕震机制存在显著差异，它们在震前产生的地表形变信号模式完全不同（顾国华和王武星，2020；顾国华，2023）．如果每次地震的前兆都具有独特性，那么依赖于从过往震例中寻找重复模式的预测方法将面临根本性的困

难. 因此，厘清哪些前兆特征是具有物理普适性的，哪些是受局部构造环境控制的，是实现可重复、可靠预测的关键所在.

2.2.3 解决方案与研究思路

为应对上述关键科学挑战，未来的研究需采取系统性的解决思路，即以深化物理机制理解为核心，以多技术融合观测为基础，以先进数据分析和数值模拟为工具，逐步从经验性预测向基于物理约束的概率化、可检验预测转变.

首先，总体的解决思路是从“现象描述”转向“机制驱动”的预测研究. 这意味着我们不仅要记录和分析震前地壳形变变化的“是什么”，更要深入探索其“为什么”，即建立地表观测到的形变异常与震源区物理过程之间的直接物理联系. 这需要将地壳形变研究置于一个更广阔的地球系统科学框架内，综合考虑固体地球动力学、岩石力学、流体动力学等多重物理过程.

具体而言，针对前兆信号识别的挑战，需要发展基于物理模型的信号提取方法. 通过构建能够模拟各种背景变形（如板块运动、冰后回弹、水文负载等）的精细物理模型，从 GNSS 观测数据中剥离这些已知效应，从而凸显与孕震相关的主体信号（Jin et al., 2015；江在森等，2020）. 同时，应加强对不同噪声源（如大气延迟、仪器噪声）物理特性的研究，开发更具针对性的噪声压制算法.

为建立震前形变与地震三要素的定量关系，必须加强基于物理过程的数值模拟研究. 利用先进的数值模拟工具，构建包含复杂断层几何、非均匀介质和真实构造加载条件的地震孕育与发生多场耦合模型（Field, 2019；Kano et al., 2020）. 通过将 GNSS 等观测数据同化到这些模型中，可以反演震源区的应力状态、摩擦参数等关键物理量，并探索其随时间的演化规律，从而为预测地震的发生时间和地点提供物理约束.

而攻克地壳介质非线性行为的难题，则需要加强实验室岩石物理实验与大尺度地球物理观测的结合. 通过实验研究不同温压条件下岩石的变形、破裂和流体渗透行为，为构建更符合实际的、包含孔隙弹性、热弹性和化学渗透效应的重力-形变耦合本构模型提供依据（Lee and Ghassemi, 2009；Duan et al., 2024；Chen et al., 2025）. 这些更真实的本构关系是数值模拟能够准确再现震前非线性变形过程的基础.

最后，为探寻前兆模式的普适性与特异性，应大力推动多技术融合观测和全球范围的震例对比研究. 通过加密和优化 GNSS 观测网络，并与 InSAR、重力测量（如 GRACE、量子重力仪）、分布式光纤传感等技术相结合，构建一个多尺度、多参数的综合形变监测体系（Angelica et al., 2013；江在森等，2020；Del Soldato et al., 2021；Rundle et al., 2021；Yan et al., 2022a）. 在此基础上，利用人工智能、机器学习等先进数据分析技术，从海量多源数据中系统性地挖掘和识别不同构造环境下地震前

兆的共性和差异，从而建立更具针对性和可靠性的预测指标体系（Bignami et al., 2024；Pan et al., 2025）.

2.3 地震学观测在地震预测研究中的应用

地震学关注震源过程、地震活动性演化和地震波传播特征，是刻画震源区临界状态变化的核心观测手段之一（陈运泰，2009a；许绍燮等，2011）. 在短临预测中，地震学资料的关键价值在于利用高精度地震目录、震源机制解、波速结构和重复地震等信息，识别震源区活动性、应力状态和介质性质的异常变化，并为发震时间、地点和震级研判提供定量依据（张国民，2002；赵永红等，2014）.

从研究内容来看，地震学对短临预测的支撑体现在多维度分析中：震源区微震活动性、震源机制张量演化、地震应力场反演、波速与速度比变化、重复地震及震群识别等均是其核心方向（张文文等，2021；Iwamori et al., 2025）. 这些研究本质上是通过捕捉地壳介质在应力积累至破裂过程中的细微变化，为临震征兆识别建立理论基础.

2.3.1 地震学在地震预测中的研究现状

大震前震源区微震活跃性常出现显著变化，如地震频率上升、震级分布改变或震群爆发，而基于 Gutenberg-Richter 关系的 b 值演化分析是最常用的方法之一. 震前 b 值持续下降被认为与震源区应力升高及破裂临界状态临近相关（陈运泰，2009a；陈学忠等，2022），例如 1975 年海城地震前，震源区 b 值显著下降，为短临预测提供了关键依据（赵永红等，2018）. 除 b 值外，η 值（震群活动标准化指标）、震中迁移及地震空区等指标也被广泛应用（吴忠良等，2021），但需注意的是，这些指标的异常信号可能受区域构造背景影响，需结合具体地质环境分析.

震源机制解序列的时间演化能为推测震源区应力状态变化提供关键线索，部分大地震前，震源机制解的主应力方向会出现系统性旋转，或张性、走滑、压性机制依序出现（许才军和王乐洋，2010；Iwamori et al., 2025）. 如 2008 年汶川地震前，龙门山断裂带附近震源机制解显示主压应力方向逐渐向 NE-SW 偏转，与区域构造应力场调整一致（陈运泰，2009a），基于这些机制解进行应力张量反演，可监测震前应力集中趋势，但应力场反演需结合断层几何形态与介质非均匀性，否则可能导致结果偏差.

震源区介质波速结构在震前可能发生变化（图 3），尤其是 P 波与 S 波速度比（V_p/V_s），2011 年日本东北地震前，噪声层析成像观测到震源区 V_p/V_s 逐渐升高，推测与裂隙扩展、流体渗透相关（Iwamori et al., 2025；Paris et al., 2025），类似现象在汶川地震前也被重复地震互相关技术捕捉到（武振波等，2024）. 波速比变化与介质微结构演化的关联是研究热点，但实验室中观测到的裂隙-流体作用规律，在天然地壳复杂环境中的适用性仍需验证.

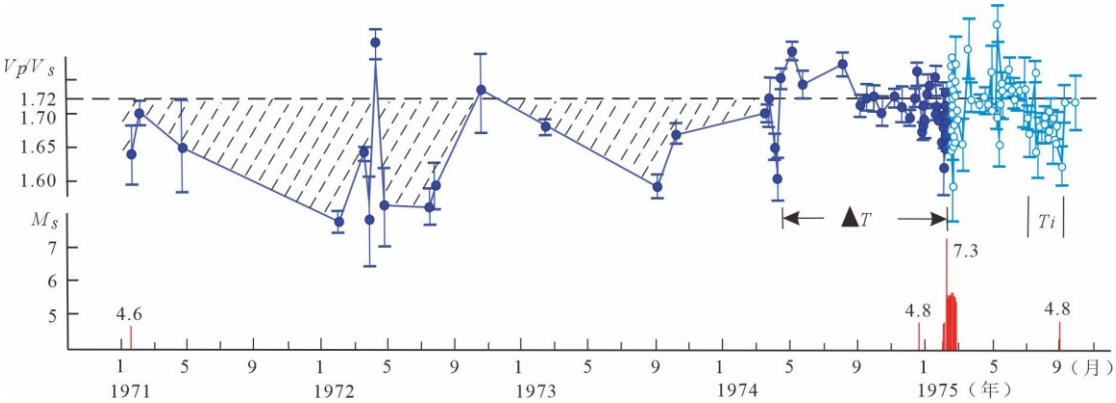


图 3 海城地震前后地震波速比的变化（据冯锐等，1976）

Fig. 3 Variations of V_p/V_s ratio before and after the Haicheng earthquake (modified from Feng et al., 1976).

震前震群活动增强（如震群、震对）是重要短临信号，通过 ETAS 模型残差分析、时空聚类算法等可从地震目录中识别前震序列（张国民等，2001；许绍燮等，2011）. 例如汶川地震前，龙门山地区自 2007 年起微震活动增强，震前 1 个月小震向主震震中迁移，呈现典型震群演化特征（Lei et al., 2024），1995 年阪神大地震前也有类似震群活动报道（Nanjo et al., 2022），不过，震群活动的随机性与复杂性使得其与主震的因果关系难以明确，需结合统计模型与物理机制综合判断.

重复地震（相同断层面、路径的地震对）是检测地壳微小变化的有效工具，部分大震前，重复地震的 P 波或 S 波走时会出现系统性延迟，反映震源区介质结构改变，该技术已成功应用于 2013 年芦山地震、巫山地震等震前异常监测（赵永红等，2014；汪建等，2018）. 但重复地震的识别依赖高密度台网与长时序数据，且走时变化可能受多种因素干扰，需结合多参数验证其异常可靠性.

2.3.2 地震学在地震预测中的关键科学问题

尽管地震学方法在短临预测中取得了显著进展，但仍面临以下核心科学问题：

1）震前异常的可重复性与可靠性不高：在地震学研究中，“有异常无震”与“有震无异常”的现象普遍存在，这一问题本质上源于地震孕育的复杂性. 地壳介质非均匀性、断层几何形态差异等因素，使得震前异常表现形式各异，导致预测指标可操作性降低（陈运泰，2009a），例如部分地震前无明显 *b* 值异常，而某些 *b* 值异常区域并未发生强震，因此如何在不同构造环境中识别具有物理普适性的异常指标，成为突破预测可靠性的关键.

2）震源区物理机制尚不清晰：当前多数预测指标仍依赖统计经验，缺乏统一物理模型解释，以波速比变化为例，其与流体迁移的定量关系尚未明确（张文文等，2021；Iwamori et al., 2025）. 实验室中岩石破裂的微裂隙演化规律，在天然断层系统中因尺度效应（从厘米级样品到千米级地壳）和环境复杂性（多期构造运动改造）难以直接应用，这种理论缺失导致预测指标缺乏物理根基，难以从机制层面解释震前演化过程.

3）有效信号的识别存在困难：震前小震异常信号常被背景地震活动掩盖，尤其在地震频发区，短临信号识别难度大（吴忠良等，2021），同时 b 值、η 值等指标的"异常阈值"在不同构造区差异显著，缺乏统一标准（邵志刚等，2008）. 例如华北地区与西南地区的地震活动特征不同，同一指标的异常判据需因地制宜，这不仅增加了预测方法的区域适配难度，也制约了多区域预测结果的可比性.

4）参数阈值的区域适应性不足：随着观测技术发展，虽可获取地震活动性、波速结构、地壳形变等多源数据，但现有地震学预测多依赖单一或少数指标，尚未形成多参数协同的预测体系（许才军和王乐洋，2010）. 由于地震活动性参数与波速比变化的时空关联机制不明确，导致多指标联合分析时难以确定权重与组合规则，如何建立不同参数间的物理联系、构建综合预测模型仍是挑战.

5）多源信息融合能力不足：更深层次的问题在于，短临前兆信号的物理可靠性与可重复性不足，尽管观测到大量疑似震前异常，但许多现象的物理机制存在多解性，如地下流体异常可能由地震孕育或水文环境变化引起. 此外，断层系统的复杂滑动行为（如“寂静地震”）及外部触发因素（潮汐应力、水库蓄水）可能干扰前兆信号表达（吴忠良和陈运泰，2002），例如库仑应力变化理论表明，微小外部扰动可能在断层临界状态时触发地震，但这种触发效应与自然孕育过程的前兆信号如何区分，仍需深入研究（张彬等，2007）.

2.3.3 解决方案与研究思路

为提高预测准确率，需突破单一指标局限，综合小震活动性（b 值、η 值）、震源机制变化及波速结构扰动等多参数，利用多元统计与机器学习等方法构建集成模型（陈运泰，2009a；张文文等，2021）. 例如基于历史震例，借助机器学习学习不同参数的异常组合模式，并通过贝叶斯推断或神经网络确定参数权重与组合规则，实现多参数协同约束（Yang and Sun, 2020）.

获取高质量前兆数据是提升预测精度的基础，因此需提高地震台站密度与仪器灵敏度，建设震源区密集观测实验场（如中国地震局“临震短临监测试验场”）（赵永红等，2018；武振波等，2024）. 未来观测需注重多物理场融合，除地震波外，同步监测地壳形变、地磁地电及地下流体等参数，例如布设超密集台阵并联合 InSAR 技术，实现震源区状态的多维刻画.

构建震前破裂临界状态的物理模型需采用多尺度研究思路，以断层摩擦、微裂隙演化与流体迁移为核心，结合岩石力学实验、数值模拟及野外观测数据（Iwamori et al., 2025；Paris et al., 2025），建立从微观扩展到宏观地震的跨尺度理论框架，重点关注流体-固体耦合作用下断层摩擦特性的演化及应力集中过程中的介质非线性响应.

建立典型震例数据库与评估体系，能够为预测研究提供实证支撑，通过系统分析全球典型大震的震前地震学异常，整合不同构造环境下的震例数据，包括地震活动性、波速结构、震源机制等多参数

异常特征（陈运泰，2009a；Nanjo et al., 2022）. 通过统计分析总结不同类型地震的前兆共性与差异，建立科学的评估标准，对现有预测方法进行定量评价，为模型优化提供方向.

除此之外，推动跨学科融合是突破地震预测瓶颈的重要路径，地震学需要与地球物理、电磁学、气体地球化学、人工智能等领域深度融合，将地震学参数嵌入多学科综合模型（Lei et al., 2024）. 例如结合 AI 算法处理海量多源数据，识别传统方法难以捕捉的异常模式；或通过地球化学手段（如氢同位素分析）监测深部流体迁移，为波速比变化提供物理解释（赵永红等，2018），这种交叉研究有望推动预测范式从经验统计向物理机制驱动转变.

2.4 空间电磁在地震预测研究中的应用

空间电磁学是地球科学的一个重要分支，主要研究地球空间环境中的电磁现象，这包括电离层、磁层以及它们与太阳风之间的复杂相互作用.

地震的孕育和发生是一个涉及地壳介质剧烈物理、化学变化的过程. 在强震发生前，地壳岩石在应力积累作用下发生变形、微破裂乃至宏观破裂，这些过程能够产生多种形式的电磁辐射（张学民等，2016）. 这些源于岩石圈的电磁信号，可能通过不同的物理化学途径，例如电磁波直接传播、气体逸出导致的大气电导率变化、声重力波等，从地壳传播到大气层，并进一步影响到电离层，引起电离层的参数扰动，如电子密度、总电子含量（TEC）等的变化（朱元清等，1991；Parrot et al., 2007）. 因此，空间电磁学的定义本身就揭示了其研究对象的复杂性，它天然地涉及从岩石圈到大气层，再到电离层乃至磁层的多圈层耦合过程，而非单一领域的孤立现象. 在短临预测框架下，空间电磁研究的重点是判定这些扰动是否具有稳定的震前时空特征，能否从太阳活动、地磁暴和电离层背景变化中可靠分离，并能否与震源区构造活动建立可检验联系.

2.4.1 空间电磁观测在地震预测中的研究现状

自 20 世纪五六十年代起，国际上几乎同步启动了利用电磁观测进行地震短临预测的研究（Reddy et al., 1976；Varotsos and Alexopoulos, 1987；Uyeda et al., 2002）. 中国在这一领域也开展了系统性的工作，特别是在地震危险区开展了空间电磁观测，积累了大量的震前电磁异常数据（赵国泽等，2007，2022）. 在长期的实践与探索中，研究者们提出了一系列地震电磁效应理论，试图解释观测到的现象，其中包括压磁效应（Stacey, 1964；Nagata and Tazuke, 1972）、压电效应、流体扩散或岩石膨胀引起的膨胀磁效应、感应磁效应（祁贵仲，1978）、流变磁效应以及热磁效应等地震电磁效应理论.

观测技术的进步，特别是卫星遥感技术的发展，极大地推动了空间电磁观测研究. 2004 年，法国发射了世界上首颗专门用于地震电磁监测的微小卫星 DEMETER（Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions）. 紧随其后，中国也在此领域取得重要进展. 其首颗电

磁监测试验卫星"张衡一号"01 星于北京时间 2018 年 2 月 2 日 15 时 51 分成功发射升空，该卫星在完成在轨测试后，开始正式的科学观测，旨在获取全球电磁场和电离层等离子体数据. 为进一步构建天基电磁监测网络，中国的后续星“张衡一号”02 星于北京时间 2025 年 6 月 14 日 15 时 56 分发射升空，并顺利进入预定轨道. 作为中国首颗地球物理场探测业务卫星，“张衡一号”02 星与 01 星在同一轨道协同工作，通过双星组网观测，有效提升了数据的时空分辨率（Bleier and Freund, 2005；申旭辉等，2022）. 这些天基平台的投入使用，显著拓宽了地震电磁观测的技术途径，获取了全球范围的电离层和近地空间电磁场数据，加速了空天地一体化地震电磁立体监测体系的发展. 目前，空间电磁观测已经形成了包括电磁辐射、电离层参数（如 TEC、电子密度、离子密度、电离层电子温度等）以及卫星电磁探测在内的多种观测手段和参数体系. 为便于对主要观测平台与参数体系进行对比，表 1 对空间电磁观测常用手段、关键参数及其优势与局限进行了概括.

电磁方法在地震预测中的应用主要集中在三个方面：一是识别地震发生前的各类前兆异常；二是反演震源区及其邻近区域的地下电性结构，为理解发震构造和孕震环境提供约束；三是分析地震孕育过程中多圈层耦合的物理机理. 大量研究报道了与强震相关的空间电磁异常现象. 2011 年日本东北 M_w9.0 特大地震发生前约一小时内，利用 GPS 观测的 TEC 数据显示，震中附近上空的 TEC 出现异常增强，且异常区域的形态与发震断层的走向具有高度吻合性（Heki, 2011）. DEMETER 卫星在 2004 年苏门答腊 M_w9.1 地震前数天，在其轨道经过震中区域上空时，也检测到电离层电子密度的突然降低，其空间分布与震源区表现出显著的相关性（Akhoondzadeh et al., 2010）. 针对 2013 年中国芦山 M_w6.6 地震，有研究采用改进的 DE-DDTFA 方法分解 ENPEMF 电磁信号，发现在震前一周内，信号的本征模态函数（IMF）数量比平时增加了 200%，信号能量也增长了约 10-20 倍，指示了震前电磁环境的显著变化（Hao et al., 2021）.

表 1 空间电磁观测主要手段、关键参数及特点概括

Table 1 Summary of main methods, key parameters, and characteristics of space electromagnetic observation

观测平台/手段	关键观测参数	典型震前异常表现	优势	主要局限/注意事项	文献来源
GNSS（GPS/北斗）	TEC、ROTI 等	TEC 异常增/减、局地结构变化	全球覆盖、时间分辨率高	强受太阳活动/地磁扰动影响；需背景建模与地磁暴筛选	（Liu et al., 2004）
电磁监测卫星（DEMETER、张衡一号等）	电/磁场谱、等离子体密度/温度、粒子通量	E/B 扰动、Ne 异常降低、粒子沉降增强	近地空间原位多参数观测	轨道重复覆盖受限；需剔除人源与空间天气干扰	（Zhang et al., 2013；Zeren et al., 2025）
地基电离层探测（测高仪、雷达等）	foF2、hmF2、Ne 剖面	层峰高度/临界频率异常、日变化结构改变	连续观测、便于长期统计	站点稀疏；代表性受区域与台址条件限制	（Liu et al., 2000； De Santis et al., 2021）

观测平台/手段	关键观测参数	典型震前异常表现	优势	主要局限/注意事项	文献来源
地基电磁台站（ULF/ELF 磁场、电场）	磁场变化、谱特征、极化参数	ULF 增强/衰减、极化变化、脉冲扰动	高采样率、适合重点构造带加密布设	工频与文化噪声强；需严格质控与多台站一致性检验	（Fraser-Smith et al., 1990）
VLF/LF 电波传播监测	振幅/相位、传播路径特征	传播异常、突变/扰动（与下电离层变化相关）	覆盖长路径、对低电离层敏感	受发射源变化、雷电等影响；需多路径交叉验证	（Hayakawa et al., 2011）

回顾空间电磁观测在地震预测领域的研究现状，可以清晰地看到一个从早期探索，逐步发展到利用卫星进行大范围覆盖，并最终向空天地一体化的立体监测体系演进的趋势. 这一发展轨迹不仅是观测技术能力的巨大提升，更深层次地反映了科学界对地震孕育过程是一个复杂系统性过程这一认识的不断深化. 地震的影响并非局限于地壳内部，而是能够穿透多个圈层，在广阔的空间范围内产生效应.

然而，尽管取得了显著进展并积累了大量震例，但将这些回顾性的观测成果转化为具有前瞻性、高可靠性的地震预测能力，仍然面临巨大挑战. 许多报道的异常是在地震发生后进行数据回溯分析时发现的，而要在震前实时、准确地识别并用于预警，则困难得多. 正如一些批判性研究所指出的，地震电磁前兆研究在科学验证、区分非震干扰、评估虚警率和漏报率等方面仍存在诸多问题（Geller et al., 1997）. 从“观测到异常”到“可靠预测地震”之间，依然存在着一道需要通过艰苦的科学研究来跨越的鸿沟.

2.4.2 空间电磁学科在地震预测中的关键科学问题

空间电磁方法主要关注的是地震发生前电离层及更广阔空间环境中的异常现象，这些现象被认为是地震孕育过程的某种反映. 然而，该领域的研究仍面临一系列关键的科学问题，这些问题不仅制约着我们对现象本质的理解，也限制了其在地震预测实践中发挥更有效作用的能力.

2.4.2.1 震磁耦合机理与能量传输

1）震源区电磁信号的激发机制与源区特征认知不清

在地震孕育的不同阶段，岩石圈内部的应力积累、应变发展、微破裂扩展直至宏观断裂等复杂物理过程，其激发可观测电磁信号的主导物理机制（例如，压电效应、压磁效应、动电效应、岩石中束缚电荷的释放与移动、气体逸出及其电离效应、地下流体运移、声重力波激发等）尚不完全明确. 同时，这些初始产生的电磁信号在其源区的基本特征（如频谱范围、能量强度、极化方向、时空尺度等）也有待进一步厘清（Hayakawa and Hobara, 2010；Picozza et al., 2021；张学民和申旭辉，2022；赵国泽等，2022）.

2）电磁扰动从岩石圈到电离层的跨圈层传播与耦合路径不明

从岩石圈震源区产生的各类电磁扰动（包括电磁波、粒子流、化学物质等）如何通过地壳、大气

层等具有不同物理化学性质的介质并最终有效地耦合到电离层乃至磁层，其具体的物理机制、传输效率、能量损失以及在不同地质构造、震源深度、大气和电离层背景条件下的主导作用尚不清晰. 这一多路径传输过程（例如，通过大气直流电场的变化、电磁波的直接穿透传播、大气化学成分改变引起的电导率变化、声学重力波的上传扰动等）的细节仍需深入研究（Pulinets and Ouzounov, 2011；张学民和申旭辉，2022）.

3）多圈层耦合物理过程（如 LAIC 模型）的定量描述与验证难题

当前广受关注的“岩石圈-大气层-电离层耦合”（LAIC）模型等理论为解释多种观测现象提供了一个统一的框架，但其中涉及的各个圈层之间相互作用的关键物理过程（如大气边界层电导率的改变机制、地表逸出气体如何影响大气电场、大气电场如何穿透并影响电离层动力学过程、等离子体不稳定性的触发条件等）及其定量的数学物理描述仍不完备，且缺乏充分的观测验证. 能量和物质在这些圈层间进行有效传输、转化和相互反馈的具体机制是当前研究的难点（Hayakawa and Hobara, 2010；Pulinets and Ouzounov, 2011）.

4）多样化空间电磁前兆现象的统一物理解释与内在关联的缺失

目前观测到的种类繁多、特征各异的空间电磁前兆现象（例如，从极低频/甚低频（ULF/VLF）电磁波辐射增强或衰减、电离层总电子含量（TEC）的异常增高或降低、电子/离子密度和温度的扰动，到高能带电粒子在磁异常区的沉降增强等），其是否源于同一种或少数几种核心的岩石圈孕震活动，或者是否为不同孕震阶段、不同类型地震所对应的独特响应，尚缺乏统一的物理解释. 这些多样化的现象之间是否存在内在的物理关联、演化序列或共同的驱动源，是亟待解决的问题（Hayakawa and Hobara, 2010；Picozza et al., 2021）.

2.4.2.2 空间电磁异常的识别、确证与解释

1）空间电磁异常的可靠性、一致性评估与现象差异性来源的困惑

科学、客观地界定和评估空间电磁异常的“可靠性”和“一致性”面临挑战. 实际观测中，并非所有大地震前都能观测到明确且显著的电离层或其他空间电磁异常，而已报道的异常在出现时间、强度、空间分布范围和形态等方面表现出巨大的差异性. 这些差异是由震源机制的特殊性、区域地质构造的控制、观测条件的限制、背景环境的干扰，还是其他尚未被认识的因素所主导，仍是困扰研究者的难题（Geller et al., 1997；Bleier and Freund, 2005）.

2）强背景噪声干扰下微弱空间电磁异常的识别与提取挑战

电离层本身是一个高度动态的系统，其状态受到太阳活动、地磁暴、亚暴以及低层大气向上耦合等多种非地震因素的强烈影响. 在这些复杂且往往强度远大于潜在地震信号的背景扰动中，有效、可

靠地识别和提取出与地震孕育过程相关的、通常表现为微弱扰动的空间电磁信号，是一项重大挑战. 这需要发展先进的信号处理和模式识别算法，以有效抑制各类噪声干扰，同时最大限度地保留和增强微弱前兆信息（Lim and Leong, 2019；Picozza et al., 2021）.

3）空间电磁前兆特征参数的普适性及其与地震三要素定量关联的缺乏

空间电磁前兆异常的特征参数（例如，异常出现的提前时间范围、异常的持续时长、异常影响的空间尺度和几何形态、异常扰动的幅度和变化率、异常信号的优势频率或频段等）是否具有一定的普适性规律，或者是否存在可供分类的模式，目前尚无定论. 这些特征参数与地震本身的参数（如震级大小、震源深度、发震断层的几何与运动学性质、震源机制类型等）之间是否存在明确的、具有统计意义的、可用于地震参数预测的定量或半定量关系，是当前研究的薄弱环节（Hayakawa and Hobara, 2010；Pulinets and Ouzounov, 2011）.

2.4.2.3 空间电磁观测技术与数据应用的局限性

1）现有空间电磁观测网络在覆盖、分辨率及多参数同步观测能力上的瓶颈

现有的天基（如各类电磁监测卫星、导航卫星等）和地基（如电离层观测站网等）空间电磁观测网络，在空间覆盖的完备性（尤其对海洋、偏远地区）、时间采样的连续性与分辨率、空间探测的精细度（尤其对异常源的定位能力）、以及多参数（如电场、磁场、等离子体密度、温度、漂移速度、中性大气参数等）同步、同址、共轭点观测能力方面，存在明显的技术瓶颈和布局上的不足. 这些不足具体限制了对震前空间电磁异常现象的全面捕捉、精确描述和深入理解（申旭辉等，2022；张学民和申旭辉，2022）.

2）单一空间电磁观测手段的局限性与多源数据有效融合及综合分析方法的不足

有效克服单一观测平台（如仅依赖卫星或仅依赖地面台站）或单一参数观测（如仅分析 TEC 或仅分析磁场数据）所带来的局限性，是当前研究的重点. 发展能够有效融合来自不同平台（天基、空基、地基）、不同参数（电磁场、等离子体、中性大气、地表形变、地下流体等）、不同尺度（全球、区域、局部）的多源观测数据，并结合地球物理先验知识的综合分析方法与物理一致性模型，仍有较大提升空间（赵国泽等，2022）.

这些关键科学问题的梳理揭示了地震空间电磁研究领域从现象的初步描述向深层次机理解释和最终实现科学预测目标过渡过程中所面临的系统性挑战. 其核心在于各种“不确定性”：物理机理本身的不确定性导致我们不完全清楚信号是如何产生的；信号识别和提取过程中的不确定性使得我们难以将微弱的地震信号从强烈的背景噪声中剥离出来并确认其与地震的唯一关联；现有观测技术和数据分析模型的能力局限则导致了我们对现象的认知不完整和模型预测结果的不精确. 这些不确定性因

素相互交织，共同构成了当前研究的主要障碍.

进一步分析这些问题可以发现，它们之间存在着强烈的内在逻辑关联和相互依赖性. 例如，对震磁耦合机理的清晰阐明（类别一的问题）是有效识别、确证和科学解释所观测到的电磁异常信号（类别二的问题）的根本前提. 如果对地震如何影响电离层的具体物理过程缺乏深入理解，就很难确定应该在何时、何地、寻找何种特征的信号，也难以将观测到的任何异常现象与特定的地震孕育活动建立起可靠的因果联系. 同样，观测技术的进步和数据处理能力的提升（类别三的问题）则是支撑前两类问题研究的基础保障. 如果无法获取高质量、高时空分辨率的观测数据，或者不能从混杂的数据中有效提取出有用的信息，那么即使理论上存在某种物理机制，也难以在实际观测中得到验证和确认，物理模型的建立和改进也将缺乏坚实的数据基础. 这种相互依赖关系表明，地震空间电磁领域的重大突破，不太可能通过单点攻关实现，而更需要多学科交叉、多方面协同的持续努力. 而这些尚未解决的关键科学问题，也自然而然地为未来的研究方向和技术发展需求指明了具体的路径.

2.4.3 解决方案与研究思路

未来空间电磁学的地震预测研究，需系统性地应对当前挑战. 核心在于深化对地震孕育过程中电磁信号产生、传播及其与电离层耦合机制（如岩石圈-大气层-电离层耦合模型）的物理认知（丁鉴海等，2006；Pulinets and Ouzounov, 2011；何康等，2016），这需要结合实验室模拟、野外观测和多物理场数值模拟. 同时，面对观测数据中地震信号微弱且易被强烈背景噪声淹没的难题（Geller et al., 1997；Picozza et al., 2021），必须发展更先进的信号处理技术与人工智能算法. 这包括利用深度学习、大数据分析等手段，从海量多源数据中智能识别潜在的地震前兆特征，并有效排除太阳活动、地磁活动等非地震因素的干扰（Lim and Leong, 2019），以提高异常识别的可靠性.

面向地震预测应用的研究路线可概括为从多源协同观测、背景建模到异常识别、机理验证与评估应用的闭环流程，如图 4 所示.

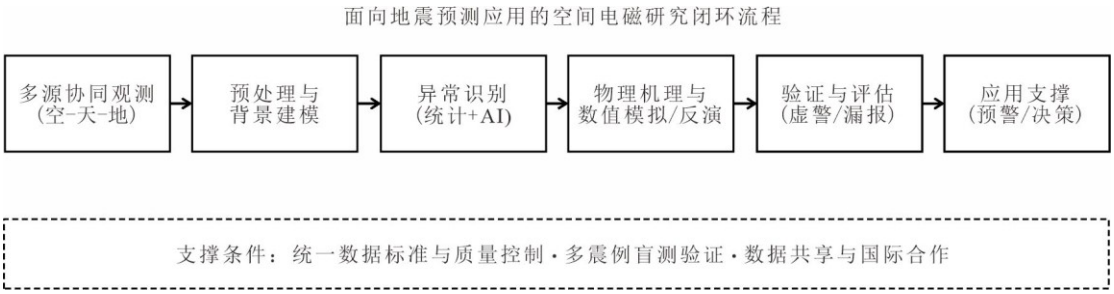


图 4 面向地震预测应用的空间电磁研究闭环流程

Fig. 4 Closed-loop workflow of space electromagnetic research oriented towards earthquake prediction applications

为支撑上述研究，构建和优化空天地一体化协同观测体系至关重要. 这不仅意味着发展更高精度、更宽频带、多参数探测能力的新一代电磁监测卫星 （申旭辉等，2022），并推动其组网观测以提升

时空覆盖率和分辨率，也包括加强地面电离层监测网络的建设与数据融合. 此外，加强全球范围的数据共享、深化国际合作（Hayakawa and Hobara, 2010），对于积累案例、验证理论模型、发展新的预测方法具有不可或替代的作用. 通过这些多学科交叉、多技术融合的努力，有望逐步提升空间电磁方法在地震预测中的科学性和应用潜力.

2.5 地电观测在地震预测研究中的应用

2.5.1 地电观测在地震预测中的研究现状

我国自 1966 年邢台地震后逐步建立地电阻率与地电场观测网，目前已拥有 120 余个地电场台站和 80 余个地电阻率台站. 地电阻率观测方面，国际上自 20 世纪 60 年代起的岩石实验表明，部分饱和岩样在受压初期电阻率下降、后期上升，为膨胀扩容模式提供了支持（Brace et al., 1965；Brace and Orange, 1966, 1968）. 我国自 20 世纪 80 年代开展大量实验，揭示了电阻率与应力、应变、流体、结构等因素的关系（钱家栋，1993）. 在实际观测中，在近 60 年的观测中，地电阻率方法记录到了多次强震前的异常变化（图 6），如 1976 年唐山 M_S7.8 级、2008 年汶川 M_S8.0 级、2022 年积石山 M_S6.2 级等地震（钱复业等，1982；杜学彬等，2015；解滔和卢军，2020），主要表现为趋势性下降，异常幅度为百分之几至十几，影响范围约 200－300 km，震后多有转折恢复（钱复业等，1982；解滔和卢军，2020）. 这一特征与岩石破裂后期裂隙广泛发育的结果相吻合（钱家栋等，2013）.

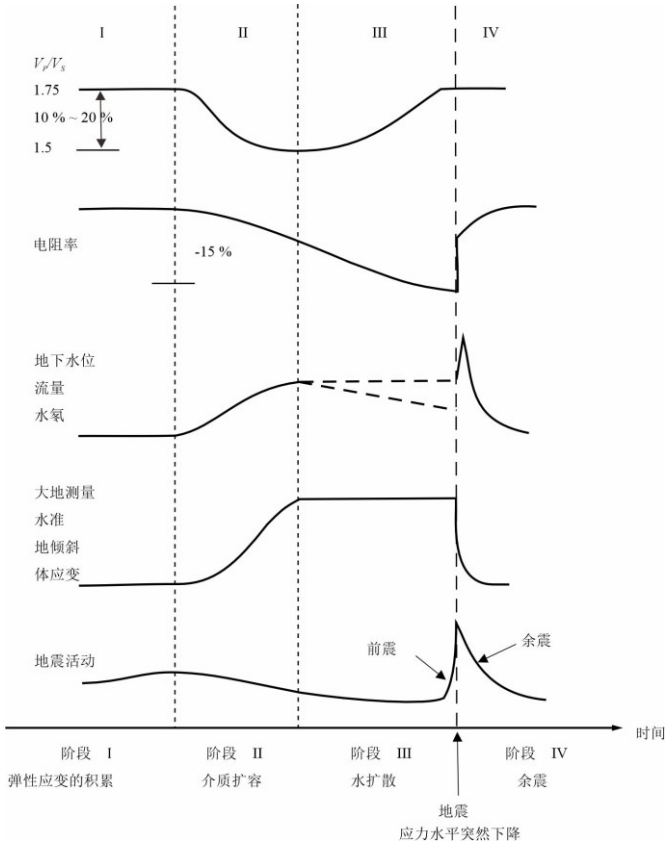


图 5 膨胀扩散模式中的电阻率变化（修改自 Scholz et al., 1973）

Fig. 5 Resistivity changes in the dilatancy-diffusion model (modified from Scholz et al., 1973)

地电场观测方面，国际上希腊 VAN 小组提出利用地震电信号（SES）的 VAN 方法（Varotsos and Alexopoulos, 1984），并在多次地震前记录到异常. 日本围绕沿海地区开展了系统观测，开发了 BAYTAP-G 程序用于资料处理（Ishiguro, 1984）. 我国自 1966 年起建设地电场观测网，目前已有 120 余个台站，积累了汶川 8.0 级、芦山 7.0 级、九寨沟 7.0 级等地震前的典型异常（范莹莹等，2010；马钦忠等，2013）. 为有效识别震前异常，我国学者发展了波形分析法、日变形态畸变分析、极化方位计算法、时频分析法以及基于“岩体裂隙水渗流模型”的优势方位角计算方法（谭大诚等，2019）.

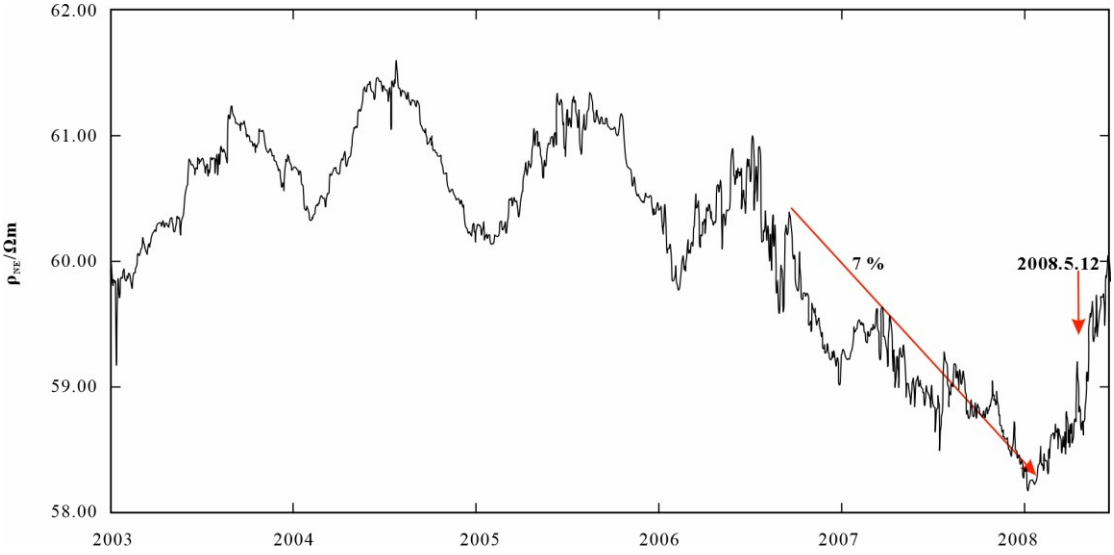


图 6 汶川地震前后郫县台北东方向地电阻率变化

Fig. 6 Variations of geo-electrical resistivity in the NE direction at Pixian station before and after the Wenchuan earthquake

2.5.2 地震地电学在地震预测中关键科学问题

2.5.2.1 介质电性变化的物理机制复杂

岩石物理实验表明，应力作用会引发微裂隙活动，导致电阻率变化（Brace, 1975；赵玉林等，1983），并在岩石破裂、黏滑等过程中产生与应变相关的电场脉冲信号（郭自强等，1988；Hadjicontis, 1996；Takeuchi and Nagahama, 2001；钱书清等，2003；郝锦绮等，2004），这构成了地电观测方法在地震监测领域的基础. 地震孕育过程中介质电性的变化，可从微观与宏观两个层面解释.

微观上，扩展的阿奇定律（Archie’s Law）为理解孔隙介质电阻率与孔隙度、饱和度等要素的关系提供了核心框架（Archie, 1942），是解释应力导致电阻率变化的关键理论工具（钱家栋，1993；杜学彬等，2007；解滔和卢军，2020），为岩石实验提供了理论解释. 宏观上，由于地表观测的是视电阻率，且受地下电性结构不均匀影响，需借助“影响系数”理论反演真电阻率变化，分析不同深度的影响（金安忠，1981a，1981b；赵和云等，1985；赵和云和钱家栋，1987）. 然而，面对复杂介质结构时，从微观机理到宏观响应的关联仍面临挑战和需要探索.

2.5.2.2 地电阻率探测范围的多因素制约问题

在多层介质条件下，传统物探的“探测深度”概念适用性有限. 为此，我国学者引入“探测范围”来表征不同装置对地下真电阻率变化的探测能力. 主要思路有两种：一是界定观测的上、下界面（赵和云和钱家栋，1987），在均匀介质中，下界面深度可达 1.5 倍极距（AB），实际范围还受电性结构影响（钱家栋等，1986；杜学彬，2008）；二是基于“影响系数”理论，多层介质中各层响应系数决定该层真电阻率变化对地表探测视电阻率的影响（杨明芝等，1986）. 目前，对于"探测范围"的研究主要集中在理论计算和数值模拟层面. 在实际工作中，影响探测能力的因素包括介质电性结构、真电阻率变化幅度与位置、装置参数及仪器分辨力等多种因素综合制约.

2.5.2.3 电性结构高精度反演方法欠缺

地下电性结构的非均匀性，使得单极距对称四极观测无法区分各层电阻率的贡献，不利于识别浅层干扰或提取深部孕震信息（钱家栋和赵和云，1988）. 多极距观测基于水平层状模型的反演，有助于抑制浅层干扰和提取各层真电阻率（赵和云和钱家栋，1987；王兰炜等，2011）. 但现有反演受模型（如水平分层和各向同性）限制，且反演精度（2%-5%）距地震监测所需精度（约 0.3%）尚有较大差距. 发展适用于实际非均质介质的高精度反演方法仍是亟待突破的难点.

2.5.2.4 地电场地震异常信号的有效识别

地电场信号微弱且易受干扰，从复杂背景中有效提取地震前兆异常是实际观测中最关键的问题. 目前的研究方法主要从时域与频域两方面展开. 时域上，聚焦日变波形、幅度等特征及区域性变化规律（黄清华和刘涛，2006；谭大诚等，2010，2013，2014；黄清华和林玉峰，2010）. 基于岩体裂隙渗流模型提出“大地电场优势方位角”方法，也是目前地电场前兆异常识别的重要方法之一（谭大诚等，2019；王玮铭和谭大诚，2020），频域上，应用多种信号处理方法分析功率谱和周期异常象（范莹莹等，2010；安张辉等，2011，2020）. 但异常频段、持续时间与地震事件间的关联尚不清晰，缺乏普适规律.

2.5.2.5 地电场异常的“选择性”机理不清晰

由于孕震复杂性、结构非均匀性及场地条件限制，地电场异常常表现出“选择性”，即异常仅被部分台站记录（黄清华和刘涛，2006；黄清华和林玉峰，2010；马钦忠等，2014；赵文舟等，2022），希腊 VAN 小组将此作为预报依据之一（Varotsos and Alexopoulos, 1984；Varotsos et al., 2005）. 研究表明，特定地下导电通道可能是成因（黄清华和林玉峰，2010），人工源实验也印证了“敏感点”效应（马钦忠等，2016；赵文舟等，2022）. 但其确切的物理机理仍需通过更多数值模拟与实验研究予以揭示.

2.5.3 解决方案与思路

我国地电观测方法在地震预测研究中已取得重要进展，从观测方法和观测设备的不断完善到异常信息提取方法的研究，为地震预测提供了重要的支撑. 但仍需进一步融合岩石物理实验与台网观测数据，深化地震地电学机理研究，以应对现阶段面临的关键科学问题.

针对物理机制复杂的问题，综合考虑地下介质非均匀性、电阻率变化幅度、观测装置参数及仪器性能等多因素，构建地下介质电性模型和响应方程，利用电磁场数值计算方法，计算目标变化与观测结果的关联，以及不同地质条件下的探测范围. 同时通过实验室微缩物理模型，验证理论并获取实际场景下的探测能力边界.

针对地电场地震异常信号识别难题，关键在于建设高质量的震例数据库与异常特征样本库. 在此基础上，应融合传统信号处理与人工智能技术，发展能有效分离干扰与潜在前兆信息的智能分析方法. 推动多参数协同分析，以提升异常识别的可靠性与自动化水平.

充分利用人工源等可控条件研究地电场异常的"选择性"机理，设计系列实验检验不同介质结构与通道模型下异常信号的产生与传播特征. 验证数值模拟提出的机理假设，并为修正和完善相关理论模型提供关键观测依据.

综上，通过数值模拟、物理实验、台网观测与人工智能分析，形成从机理、方法到实验验证的闭环研究，推动其向物理预测迈进..

2.6 流体地球化学观测在地震预测研究中的应用

2.6.1 流体在地震短临预测中的研究现状

2.6.1.1 地震流体地球化学发展历程

中国自 1966 年邢台地震起，正式开启有组织的地震流体前兆观测与预报研究. 在近 60 年的实践中积累了丰富数据，通过多个中强地震的震例研究，总结出地震流体前兆的空间集中性、时间阶段性、形态多样性等特征，发现震级与异常规模、持续时间的正相关性，为后续研究奠定重要经验基础（国家地震局，1982；车用太和鱼金子，2006；*M*7 专项工作组，2012；杜建国等，2018）.

国际地学领域对流体作用始于 20 世纪 70 年代的学科突破，该时期兴起水-岩相互作用研究，打破传统地质学仅关注固体物质的局限，认为水-岩反应可能成为多种地质作用的控制因素. Fyfe 等（1978）出版的《地壳中的流体》（Fluids in the Earth's Crust）一书（Fyfe et al., 1978），首次系统阐述流体在变质作用、构造变形与物质迁移中的重要作用. 80 年代以来，国际研究聚焦变质流体成分及其与岩石的相互作用，开始形成以流体为核心的多学科交叉趋势. 之后几乎所有国际性地学会议无一不涉及流体问题，第 27 届国际地质大会首次设立流体专题，此后历届大会均涵盖流体来源、成岩成矿、灾害关联、环境效应等前沿领域. 90 年代以来，中、美、英、日等国将流体研究列入了地学研究

计划或开拓性研究领域，标志流体从单一学科分支升级为地球系统科学的关键纽带. 至 90 年代，国际地学共同体已形成共识：地球流体作为圈层相互作用的媒介，其研究必须突破学科界限（车用太和鱼金子，2006）.

中国自 20 世纪 60 年代末加入到地震流体地球化学学科的创立与发展潮流中，开始建立地震地下流体观测台站，此后又先后推进地下流体台站数字化改造（1996-2000）与地下流体网络工程建设（2002-2007）等重大的工程建设（车用太和鱼金子，2006）. 2010 年中国地震局监测预报司首次组织召开了定点前兆学科（形变、流体、电磁）综合会商会，随后，地下流体学科年度会商会机制不断优化完善，形成了以年度异常梳理、异常信度判定及异常特征总结为核心的学科会商模式；自 2015 年以来，地震流体地球化学学科持续推进预测业务体系建设，逐步构建并完善了包含异常特征库、方法库和指标库的学科支撑体系（孙小龙等，2020）. 目前，地下流体学科的业务规划主要包括：一方面，完善现有观测手段，发展低成本、高密度断裂带流体监测技术，聚焦断裂带流体运移特征及其与地震孕育过程的关系；另一方面，构建学科地震预测指标体系，开发地下流体异常提取、识别和预测流程，构建基于地震大形势分析的前兆异常数据库和分析技术平台（邵志刚等，2025）.

2.6.1.2 地震流体地球化学前兆研究进展

地震预测是科学界面临的重大挑战之一，其潜在的社会效益巨大. 长期以来，科学家们一直在探索各种可能的地震前兆，其中流体地化学变化因其与地下构造活动密切相关而备受关注. 地壳应力累积和释放过程中，地下流体的运移、组分变化以及气体释放被认为可能为即将发生的地震提供预警信号. 这些流体，包括地下水、温泉水、温泉气和土壤气等，在构造活动区广泛存在，对地下应力应变的变化表现出敏感性（图 7）. 其化学和同位素组成、气体含量、温度和水位等参数的异常变化，可能反映了深部流体活动、岩石破裂、应力改变导致的渗透性变化等过程（Toutain and Baubron, 1999；Paudel et al., 2018）. 对这些流体地化学异常的系统监测和深入研究，不仅有助于理解地震孕育过程中的地球物理化学机制，也为建立有效的地震监测和预警系统提供了重要途径.

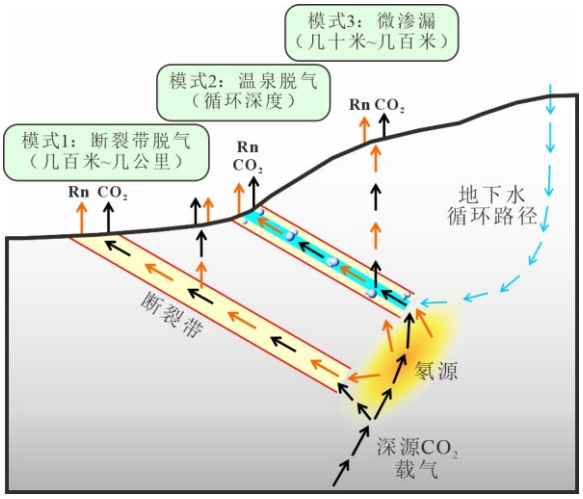


图7 断裂带流体运移模式图

Fig. 7 Schematic model of fluid migration in fault zones

前人研究显示，多种流体地化学参数在地震发生前表现出异常变化. 土壤气、地下水中的 Rn 和 CO_2 浓度被广泛研究作为地震前兆指标（Reddy and Nagabhushanam, 2011；Zhang et al., 2020）. 这些气体可能来源于深部地壳或上地幔，通过断裂带迁移至地表或近地表含水层. 应力积累可能导致岩石微破裂增加，从而促进深部气体的释放和运移（Kennedy et al., 1997；Li et al., 2024）. 地下流体对地壳应力应变的细微变化具有高度敏感性，其地球化学组成与物理性质的变化被认为是地震孕育过程中的重要前兆信号. 然而，这些信号产生的机制复杂多样，深入解析流体地球化学前兆的内在机理，正是将其有效应用于地震预测的关键前提. 目前提出的机制包括：应力扩容机理（Scholz et al., 1973；Etiope et al., 1999）、破裂混合机理（Camarda et al., 2016；Randazzo et al., 2021；Caracausi et al., 2022）、矿物脱水机理（武梅千等，2025）、深部流体混入机理（Janik and Mclaren, 2010；Liu et al., 2023a；Shao et al., 2024）、热变质机理（Martinelli and Dadomo, 2017；Ai et al., 2021）、地震波振动机理（Zafrir et al., 2009；Gresse et al., 2016；Liu et al., 2023b）等. 此外，地震活动可能引发地下水中气体的形成和生长，导致孔隙流体压力升高，这可能解释了同震钻孔水位上升和远程触发地震的机制（Crews and Cooper, 2014）（图 8）.

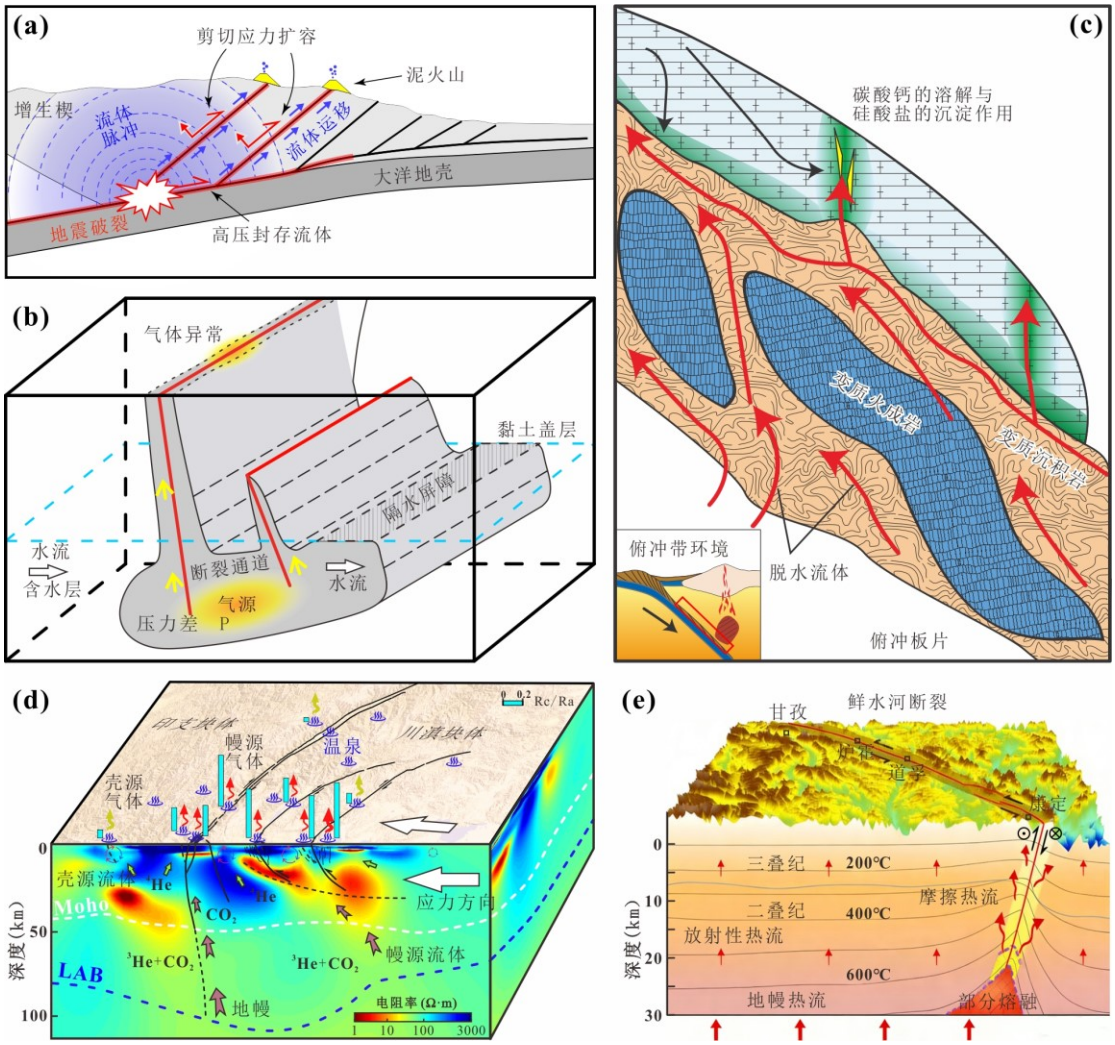


图 8 流体异常成因机理概念模型；（a）俯冲地震引发的地壳高压流体脉冲，沿更陡的分支逆冲断层上移，同时伴随剪切应力扩容，为高压流体渗流开辟通道（Bonini, 2019）；（b）地震诱发的地壳形变会增强压力梯度，促进气体突破不透水上覆层（如黏性盖层）的限制，沿断裂带运移（Ciotoli et al., 2005）；（c）来自俯冲板片、变质沉积岩或变质火成岩的脱水流体，为俯冲带地震的发生提供了有利条件（Ague and Nicolescu, 2014）；深切断裂的存在导致不同来源流体混合，幔源流体在小江和红河断裂带交汇区广泛出露（Shao et al., 2024）；青藏高原的运动导致鲜水河断裂带附近摩擦热流成为局部热异常的主导热源，形成热变质流体（Ai et al., 2021）.

Fig. 8 Conceptual model for the genesis mechanisms of fluid anomalies; (a) Crustal high-pressure fluid pulses triggered by subduction earthquakes migrate upward along steeper splay thrusts, accompanied by shear stress dilatancy, which creates pathways for high-pressure fluid seepage (Bonini, 2019); (b) Earthquake-induced crustal deformation enhances pressure gradients, facilitating gas to breach the confinement of impermeable overburden (such as viscous cap rocks) and migrate along fault zones (Ciotoli et al., 2005); (c) Dehydration fluids derived from subducting slabs, metasedimentary rocks, or meta-igneous rocks provide favorable conditions for the occurrence of subduction zone earthquakes (Ague and Nicolescu, 2014); the presence of deep-cutting faults leads to the mixing of fluids from different sources, with mantle-derived fluids widely discharging in the intersection zone of the Xiaojiang and Red River faults (Shao et al., 2024); and the movement of the Tibetan Plateau causes frictional heat flow near the Xianshuihe fault zone to become the dominant heat source for local thermal anomalies, resulting in the formation of thermal metamorphic fluids (Ai et al., 2021).

近年来，随着监测技术的进步，对地震流体地球化学前兆的研究取得了新的进展. 连续自动监测

系统能够实时获取地下流体的多参数信息，为捕捉短临地震前兆提供了可能（Fu et al., 2021；Yan et al., 2022b；天娇等，2024）. 微量元素也被认为对小型地震更敏感，但其在地震前兆研究中受到的关注较少（Shi et al., 2020；Chen and Liu, 2023）. 此外，利用机器学习和数据挖掘技术分析长时间序列的地球化学数据，有助于识别潜在的地震前兆模式. 例如，利用自组织映射方法分析 Kumamoto 地震前后地下水化学参数的时间特征（Nakagawa et al., 2020）. 针对中国东南沿海温泉水化学连续监测数据，利用基于多种机器学习算法的异常检测模型，极大提高了异常识别能力（Zhu et al., 2024）.

尽管流体地化学前兆研究取得了一定的进展，但仍面临挑战. 非地震因素，如气象水文条件的变化，也会影响地下流体参数，容易造成混淆（Arora et al., 2017；Paudel et al., 2018）. 因此，区分地震引起的异常与非地震干扰是提高前兆识别可靠性的关键. 一些研究尝试利用统计方法和机器学习算法来解决这个问题，例如决策树方法被用于识别地下水氡的地震前兆异常（Zhang et al., 2020）. 自动连续监测系统可以提高数据采集的效率和精度（Fu et al., 2021），建立密集、长期的流体监测网络对于捕捉地震前兆至关重要（Yuce et al., 2010）. 未来的研究应进一步深入机制研究，量化不同因素对流体地化学参数的影响，并发展更先进的数据分析方法，以提高地震前兆识别的准确性和可靠性. 结合多种地球物理和地球化学监测手段，构建多参数综合监测网络，将是提高地震预测能力的重要方向. 理解深部流体活动与地震孕育过程的耦合机制，特别是利用同位素等示踪剂来追踪深部流体来源和运移路径，以及将流体地化学研究与地震学、大地测量学、地热学等其他学科相结合，有望为地震预测带来新的突破.

2.6.2 流体在地震短临预测中的关键科学问题

2.6.2.1 流体前兆异常成因理论体系不完善导致的地震流体异常前兆解释难题

现有流体前兆异常成因理论体系尚不完善，虽已提出物质运移、介质状态变化、破裂力学三种成因机理，但未形成完整理论框架，难以合理解释地震流体地球化学异常（杨秋野等，2020）. 此外，流体运移机制极为复杂，然而现有模型常将其简化为单一机制，难以对真实的流体运移过程进行准确量化，使得观测异常与地震孕育过程的关系难以明确，增加了成因判断的难度（孙小龙等，2020；李营等，2023；施得旸和刘耀炜，2023）.

2.6.2.2 流体观测精度、时空分辨率与多参数同步观测能力的技术瓶颈

在观测精度与时空分辨率方面，传统观测手段如单点采样难以捕捉流体参数的瞬时变化和空间不均匀性. 同时，流体监测网络存在空间覆盖不均的问题，中国西部台网稀疏，东部也存在深海、高原内部等观测盲区，导致关键异常区域容易被遗漏，无法全面获取异常信息（天娇等，2024）. 此外，现有观测大多侧重单一测项，如仅关注Rn、Hg、CO_2等，缺乏流体化学、同位素、物理场（如应力、

温度）等多参数的同步观测，难以构建多维度前兆模型，无法充分反映流体与地震之间的复杂关系（孙小龙等，2020；杨秋野等，2020）.

2.6.2.3 流体异常非唯一性与非震干扰难排除导致的异常识别挑战

流体异常具有非唯一性特征，同一类型的异常可能对应不同震级或非地震事件，例如土壤气 CO_2 通量增加可能源于断裂活动、火山活动或气候变化等多种因素，这使得异常特征与地震参数的映射关系存在多解性，难以直接将某些流体异常作为可靠的地震前兆（Martinelli, 2020）. 在异常提取过程中，多因素干扰导致异常归因困难，分析预报人员虽尝试通过平滑滤波法、残差法等手段排除干扰、提取异常信息，但传统经验统计方法仍难以完全排除非震干扰，导致预测结果存在较大的不确定性（赵永红等，2017；施得旸和刘耀炜，2023）.

2.6.2.4 预测模型假设理想化、震例样本偏差与区域依赖性的适用性局限

现有预测模型存在诸多问题. 一方面，模型假设过于理想化，多基于均匀、连续、各向同性的地下介质假设构建，但实际地壳结构复杂，存在显著的非均质性和各向异性，导致模型与实际情况脱节（缪淼和朱守彪，2012）. 另一方面，震例样本存在偏差，由于地震“小概率、强随机性”的特征，样本量普遍不足，尤其缺乏 7 级以上大震的前兆数据，使得基于历史震例训练的模型难以准确反映大震的前兆规律（吴忠良等，2021）. 此外，异常持续时间、幅度与震级的关系具有区域依赖性，难以满足不同地区地震短临预测的需求（李营等，2023）.

2.6.3 解决方案与思路

2.6.3.1 多尺度实验研究：流体地球化学与地震活动的内在机制解析

在微观尺度上，利用高温高压实验设备模拟地球内部的物理化学环境，研究岩石在不同应力条件下流体的产生、释放和运移机制. 通过实验确定岩石矿物在变形过程中与流体的反应过程，以及流体在岩石孔隙和裂隙中的扩散系数等参数. 在宏观尺度上，在大型断裂带附近，开展大规模的流体地球化学测量，分析流体浓度、同位素组成等特征在空间上的变化规律，建立流体地球化学与地震活动的宏观关系模型. 通过多尺度实验研究，全面深入地揭示流体地球化学在地震预测中的内在机理.

2.6.3.2 多指标-多学科立体协同监测体系：搭建地震预测高效监测新架构

地震预测是一个复杂的科学问题，单一监测指标的可靠性有限，需开发多参数集成监测系统，同步获取流体的组分浓度及同位素数据，构建高时空分辨率的多指标监测网络，呈现流体在时间-空间维度上的演化特征. 此外，还需要多学科的协同合作. 加强地震流体地球化学与地震学、地质学、地球物理学、地球化学等学科的交叉融合，将流体地球化学数据与形变监测、卫星遥感、深层钻井等数据整合，构建 “空-天-地-井”一体化监测体系（图9）.

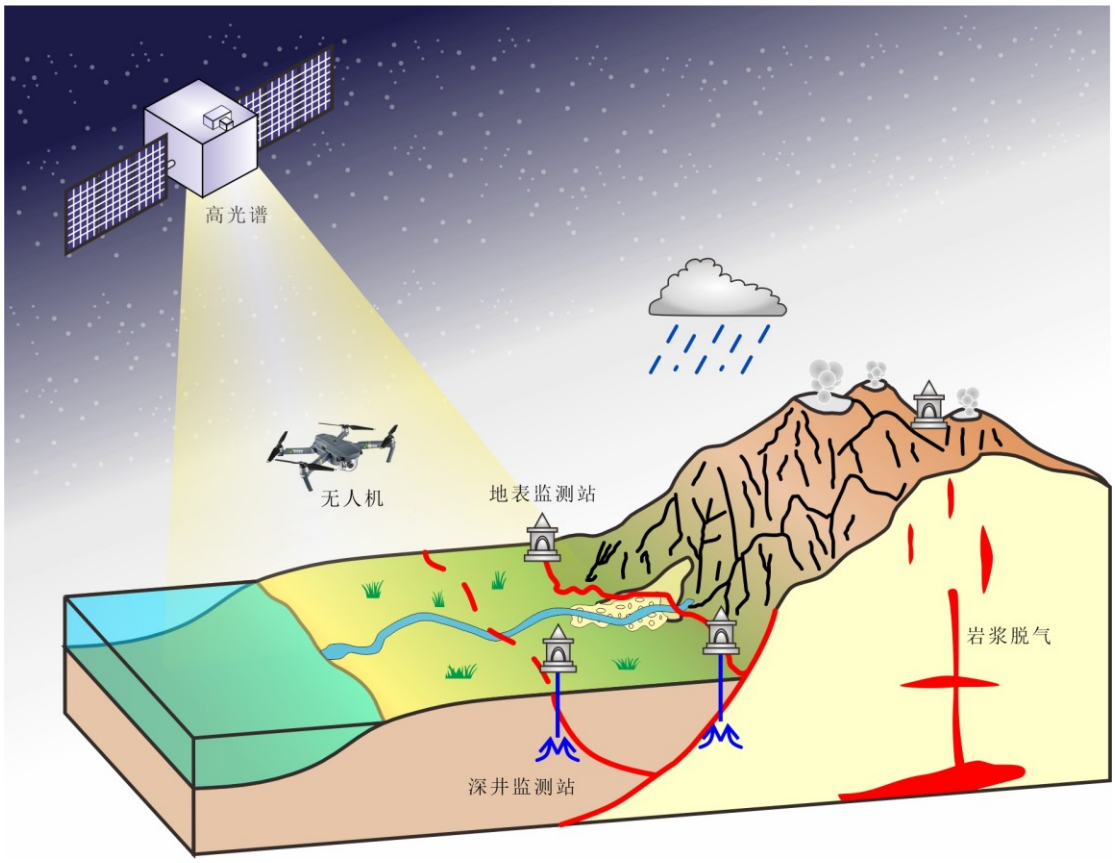


图9 “空-天-地-井”一体化监测体系

Fig. 9 "Space-Air-Ground-Borehole" integrated monitoring system

2.6.3.3 数值模拟技术：流体复杂运移过程的定量建模

利用有限元、有限差分等数值方法，建立不同构造背景下，流体在岩石孔隙介质中的渗流模型、流体与岩石相互作用的动力学模型，以及流体地球化学与地震孕育过程耦合的数值模型. 通过输入不同的地质参数、应力条件和边界条件，模拟流体在地震孕育过程中的动态变化过程. 将数值模拟结果与实际监测数据进行对比验证，不断优化模型参数，提高模型的准确性和可靠性.

2.6.3.4 基于人工智能异常识别：地震前兆的特异性指标挖掘

在地震前兆的特异性指标挖掘中，基于人工智能的异常识别方法通过干扰剔除、地震前兆特异性指标挖掘两大核心环节构建技术体系. 首先开发集成机器学习算法（如随机森林、神经网络）建立异常识别综合模型，利用深度学习自动提取非线性干扰特征. 在地震前兆的特异性指标挖掘环节，通过震例数据统计分析，挖掘流体异常时空演化模式（异常起始时间、幅度等）与震级、震中距的关联规律，构建分区域前兆指标体系；同时结合地壳形变观测（GPS、水准测量等），研究应力动态特征与流体响应关联性，强化流体-形变联合前兆的地震指向性，实现地震前兆特异性指标的深度挖掘与识别.

3 地震短临预测的研究方向与展望

地震孕育是地壳介质在构造加载作用下经历多阶段、多尺度非线性演化并最终失稳破裂的过程，涉及应力积累、介质损伤、流体运移、质量迁移、电性变化及跨圈层响应等多种物理化学过程. 由于地壳结构非均匀、震源区不可直接观测、前兆异常与地震之间并非一一对应，地震短临预测仍是地球科学中极具挑战性的难题（Geller et al., 1997；Kanamori, 2003；张国民等，2005；陈运泰，2009a）. 长期、连续和多学科观测是认识地震孕育过程的基础，但观测资料只有经过干扰排除、异常识别和预测效能检验，才可能转化为具有科学价值和实际意义的预测判据（Zechar et al., 2010；赵永红等，2014；Savran et al., 2020）. 因此，未来研究需要在保持多学科协同的基础上，进一步区分现阶段可推进的技术问题、未来 5-10 年的重点攻关任务和需要长期突破的基础科学问题.

3.1 地震短临预测的多阶段研究路线

前文各学科研究表明，短临预测的瓶颈并非单一监测手段不足，而是观测、机理、模型和检验之间尚未形成稳定闭环. 现阶段应优先提高既有资料的可靠性和可检验性，重点推进观测质量控制、非震干扰剔除、候选异常识别、典型震例复核以及监测—科研—预测之间的方法衔接. 对各类指标，应尽可能从原始资料开始开展独立统计检验，并比较指标出现后的地震条件概率与自然概率，避免把高对应率直接等同于有效预测信息（中国地震局科学技术委员会办公室，2002；Zechar et al., 2010；赵永红等，2014；Savran et al., 2020, 2022）. 云南区域震例中异常持续时间与震级关系并不稳定的结果，也说明经验指标必须接受区域外和独立震例检验（付虹等，2008）. 在此基础上，未来 5-10 年的攻关应依托不同构造背景的典型实验场，围绕同一孕震系统建立统一时间基准、背景场模型和评价方法，明确不同观测量之间的物理联系及其适用条件，而不是对多种异常进行机械叠加（张晓东等，2003；张国民等，2005）.

未来 5-10 年，地震短临预测研究应围绕关键观测、关键物理实验和可证伪预测假设形成相互衔接的研究路线. 在关键观测方面，可选择川滇菱形块体边界、青藏高原东北缘、天山及邻区、华北强震构造区等不同构造背景，建设若干多学科综合观测剖面或断裂带多场耦合观测单元. 观测内容应围绕同一断裂段或同一孕震系统展开，重点获取微震活动、震源机制、GNSS/InSAR 形变、连续重力、地电阻率、地电场、地磁、地下流体和深井应力应变等资料. 通过统一数据处理和背景场建模，形成可用于异常识别、震例对比和模型检验的连续观测序列（Schwartz and Coppersmith, 1984；赵国泽等，2022；刘春国等，2022；李营等，2023）.

在关键物理实验方面，应重点开展岩石破裂多物理场响应实验、断层摩擦-流体耦合实验和跨圈层电磁响应模拟实验. 岩石破裂实验可同步观测声发射、波速比、电阻率、电场、磁场、流体压力、气体释放和微量元素变化，以检验微裂隙扩展、流体渗流和电磁响应之间的关系；断层摩擦-流体耦

合实验可研究稳定滑动、慢滑移和失稳破裂前的力学、电性和化学响应；空间电磁相关实验和模拟则应重点检验震源区扰动能否在合理时间尺度和可观测强度上影响电离层参数（Scholz, 1977；Jouniaux and Zyserman, 2016；张学民和申旭辉，2022；李营等，2023）.

在可证伪预测假设方面，应围绕具体异常组合提出明确研究命题. 例如，强震孕育晚期是否存在“微震活动增强-*b* 值下降-波速比变化-形变异常-流体或电性异常”的阶段性组合；重力和形变异常能否稳定提高潜在震源区判定能力；流体异常是否只有在气体浓度、同位素组成和水位/水温同步变化时才具有较高地震指向性；地电异常是否需要满足多台站一致性、优势方位稳定和非震干扰剔除后仍显著等条件；空间电磁异常在剔除太阳活动和地磁扰动后，是否仍与震源区构造活动具有统计显著的时空对应关系. 这些假设应预先确定数据范围、异常阈值、预测窗口和评价指标，并接受前瞻性检验及基准模型比较（Geller et al., 1997；Zechar et al., 2010；Mignan, 2014；Savran et al., 2022）.

长期基础科学问题则指向孕震机理和诊断性前兆的判定标准. 已有研究显示，前震活动、地下流体、电磁扰动和形变异常均可能包含孕震信息，但其可重复性、非唯一解释、区域依赖性和虚警风险仍未根本解决. 国内研究曾尝试用“软包体模型”和临界点附近信息增强解释短临阶段异常数量、幅度和空间范围的变化（陈立德等，2008）；这类研究的价值在于把经验现象转化为可检验的机制假说，而不能直接视为普适规律. 长期研究需要把岩石破裂实验、断层摩擦—流体耦合、多物理场数值模拟和天然震例观测结合起来，阐明断层由稳定滑动或亚失稳状态转入快速破裂的条件，并检验是否存在能够同时约束时间、地点和震级的诊断性信息，逐步推动经验性异常归纳向物理机制约束和统计检验相结合的预测框架发展（Geller et al., 1997；Kanamori, 2003；陈运泰，2009a；Mignan, 2014）.

3.2 面向短临预测应用的可实现技术路径

可实现的技术途径首先体现在监测方法的协同设计. 面向短临预测应用，观测系统应从单测项异常记录转向连续化、自动化、同址或同步的多参数观测：以测震台网获取微震活动、震群迁移、*b* 值和震源机制变化；以 GNSS/InSAR 刻画地壳形变和断层闭锁/滑动亏损；以地磁、地电、重力和地下流体观测捕捉介质电性、质量迁移、孔隙流体和化学组成变化；以深井应力应变、温度、流体与电磁观测增强对近断层深部过程的约束. 各测项不宜简单并列，而应围绕同一孕震单元建立统一时间基准、统一质控规则和统一背景场模型，优先形成可连续计算的异常序列，为实时或准实时异常判定提供输入.

其次，台网布局应采用“区域背景观测+重点活动断裂加密+实验场验证”的分级结构. 区域背景观测用于长期刻画板块运动、区域应力积累和常态背景噪声；重点活动断裂带、强震危险区和人口及重大工程密集区应布设多学科同址或邻近观测点，补齐高原、海域边缘和断裂交汇区等观测薄弱环节；

实验场则用于检验台阵密度、观测组合和数据融合方法是否真正提高对短临异常的捕捉能力. 这种布局应吸收国内监测预报实践和地震实验场建设经验，并加强监测、科研与预测之间的衔接，将观测系统设计与可检验科学假说相绑定，而非仅追求测项数量增加（Schwartz and Coppersmith, 1984；中国地震局科学技术委员会办公室，2002；张国民等，2005；赵永红等，2014）.

第三，异常信息量评估应成为技术路线的核心环节. 对每个候选异常，需在扣除潮汐、气象、水文、太阳活动、人为干扰和仪器漂移等背景影响后，量化其背景模型残差、信噪比、异常幅度、持续时间、空间一致性、与活动断裂或潜在震源区的几何关系，以及不同测项之间的同步性和先后关系. 在预测效能层面，应采用独立震例集、滚动回溯检验和前瞻性检验计算虚警率、漏报率、命中率和概率增益；只有那些在多时段、多区域检验中具有稳定增益，并能被物理机制或多源观测共同支持的异常，才应进入短临预测指标体系（Zechar et al., 2010；Jordan et al., 2011；Savran et al., 2020, 2022）.

总体而言，地震短临预测研究仍处于从经验性异常总结向机制约束、概率表达和可检验模型转变的阶段. 未来工作应以重大震例复盘为基础，以多学科连续观测为支撑，以异常信息量和预测效能检验为约束，逐步厘清哪些异常具有区域适用性，哪些问题必须依赖长期基础研究突破. 只有在观测、机理、模型和检验之间形成闭环，地震短临预测研究才可能在科学可信度和减灾服务能力上取得实质进展.

致谢

衷心感谢审稿专家提出的建设性意见和宝贵建议，这些意见对完善论文内容、增强论述严谨性和提升稿件质量具有重要作用。在论文撰写与修改过程中，中国地震局地震预测研究所的张晓东研究员、张永仙研究员给予了大力支持和宝贵帮助，在此谨致以诚挚的谢意。

References

Adams, R. D., 1976. The Haicheng, China, Earthquake of 4 February 1975; The First Successfully Predicted Major Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(5): 423-437. doi: 10.1002/eqe.4290040502

Ague, J. J., Nicolescu, S., 2014. Carbon Dioxide Released from Subduction Zones by Fluid-Mediated Reactions. *Nature Geoscience*, 7(5): 355-360. doi: 10.1038/ngeo2143

Ai, Y., Zhang, J., Dong, M., et al., 2021. Heat Generation Effects from Shear Friction along Xianshui River Strike-Slip Fault in Western Sichuan, China. *Geothermics*, 89: 101936. doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101936

Akhoondzadeh, M., Parrot, M., Saradjian, M., 2010. Electron and Ion Density Variations before Strong Earthquakes (M> 6.0) Using DEMETER and GPS Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(1): 7-18. doi: 10.5194/nhess-10-7-2010

Akhoondzadeh, M., 2024. Earthquake Prediction Using Satellite Data: Advances and Ahead Challenges. *Advances in Space Research*, 74(8): 3539-3555. doi: 10.1016/j.asr.2024.06.054

Alexander, D. E., 2010. The L'Aquila Earthquake of 6 April 2009 and Italian Government Policy on Disaster Response. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 2(4): 325-342. doi: 10.1080/19390459.2010.511450

An, Z. H., Du, X. B., Fan, Y. Y., et al., 2011. A Study of the Electric Field before the Wenchuan 8.0 Earthquake of 2008 Using Both Space-Based and Ground-Based Observational Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(11): 2876-2884. (in Chinese

with English abstract).

An, Z. H., Du, X. B., Tan, D. C., et al., 2013. Study on the Geo-Electric Field Variation of Sichuan Lushan Ms7.0 and Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(11): 3868-3876. (in Chinese with English abstract).

An, Z. H., Du, X. B., Fan, Y. Y., et al., 2020. Characteristics of Geo-Electric Field Changes before the 2013 Lushan Ms7.0 Earthquake. *Earthquake*, 35(1): 91-99. (in Chinese with English abstract).

Angelica, C., Bonforte, A., Distefano, G., et al., 2013. Seismic Potential in Italy from Integration and Comparison of Seismic and Geodetic Strain Rates. *Tectonophysics*, 608: 996-1006. doi: 10.1016/j.tecto.2013.07.014

Archie, G. E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(1): 54-62. doi: 10.2118/942054-G

Arora, B. R., Kumar, A., Walia, V., et al., 2017. Assessment of the Response of the Meteorological/Hydrological Parameters on the Soil Gas Radon Emission at Hsinchu, Northern Taiwan: A Prerequisite to Identify Earthquake Precursors. *Journal of Asian Earth Sciences*, 149: 49-63. doi: 10.1016/j.jseaes.2017.06.033

Asim, K., Martínez-álvarez, F., Basit, A., et al., 2016. Earthquake Magnitude Prediction in Hindukush Region Using Machine Learning Techniques. *Natural Hazards*, 85(1): 471-486. doi: 10.1007/s11069-016-2579-3

Avouac, J., 2015. From Geodetic Imaging of Seismic and Aseismic Fault Slip to Dynamic Modeling of the Seismic Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 233-271. doi: 10.1146/annurev-earth-060614-105302

Bakun, W. H., Lindh, A. G., 1985. The Parkfield, California, Earthquake Prediction Experiment. *Science*, 229(4714): 619-624. doi: 10.1126/science.229.4714.619

Barbieri, M., Franchini, S., Barberio, M. D., et al., 2021. Changes in Groundwater Trace Element Concentrations before Seismic and Volcanic Activities in Iceland during 2010-2018. *Science of the Total Environment*, 793: 148635. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148635

Becker, J. S., Potter, S. H., Mcbride, S., et al., 2019. When the Earth Doesn't Stop Shaking: How Experiences over Time Influenced Information Needs, Communication, and Interpretation of Aftershock Information during the Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34: 397-411. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.12.009

Bevilacqua, A., De Martino, P., Giudicepietro, F., et al., 2022. Data Analysis of the Unsteadily Accelerating GPS and Seismic Records at Campi Flegrei Caldera from 2000 to 2020. *Scientific Reports*, 1(12): 19175. doi: 10.1038/s41598-022-23628-5

Bhatia, M., Ahanger, T. A., Manocha, A., 2023. Artificial Intelligence Based Real-Time Earthquake Prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120: 105856. doi: 10.1016/j.engappai.2023.105856

Bignami, C., Pignatelli, A., Romoli, G., et al., 2024. Artificial-Intelligence-Based Classification to Unveil Geodynamic Processes in the Eastern Alps. *Remote Sensing*, 16(23): 4364. doi: 10.3390/rs16234364

Bizzarri, A., 2011. On the Deterministic Description of Earthquakes. *Reviews of Geophysics*, 49(3). doi: 10.1029/2011RG000356

Bleier, T., Freund, F., 2005. Ground-Based and Space-Based Electromagnetic Monitoring for Pre-Earthquake Signals. *IEEE Spectrum*, 1-8.

Bonini, M., 2019. Seismic Loading of Fault-Controlled Fluid Seepage Systems by Great Subduction Earthquakes. *Scientific Reports*, 9(1): 11332. doi: 10.1038/s41598-019-47686-4

Brace, W., Orange, A., Madden, T., 1965. The Effect of Pressure on the Electrical Resistivity of Water-Saturated Crystalline Rocks. *Journal of Geophysical Research*, 70(22): 5669-5678. doi: 10.1029/JZ070i022p05669

Brace, W., Orange, A., 1966. Electrical Resistivity Changes in Saturated Rock under Stress. *Science*, 153(3743): 1525-1526. doi: 10.1126/science.153.3743.1525

Brace, W., Orange, A. S., 1968. Further Studies of the Effects of Pressure on Electrical Resistivity of Rocks. *Journal of Geophysical Research*, 73(16): 5407-5420. doi: 10.1029/JB073i016p05407

Brace, W. F., 1975. Dilatancy-Related Electrical Resistivity Changes in Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 113(1): 207-217. doi: 10.1007/BF01592911

Bryan, J., Frank, W. B., Audet, P., 2025. Crustal Stresses and Damage Evolve throughout the Seismic Cycle of the Ridgecrest Fault Zone. *Science*, 389(6766): 1256-1260. doi: 10.1126/science.adu9116

Bürgmann, R., 2018. The Geophysics, Geology and Mechanics of Slow Fault Slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 495: 112-134. doi: 10.1016/j.epsl.2018.04.062

Camarda, M., De Gregorio, S., Di Martino, R. M. R., et al., 2016. Temporal and Spatial Correlations between Soil CO2 Flux and Crustal Stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10): 7071-7085. doi: 10.1002/2016JB013297

Caracausi, A., Buttitta, D., Picozzi, M., et al., 2022. Earthquakes Control the Impulsive Nature of Crustal Helium Degassing to the Atmosphere. *Communications Earth & Environment*, 3(1): 224. doi: 10.1038/s43247-022-00549-9

Carbone, D., Poland, M. P., Diament, M., et al., 2017. The Added Value of Time-Variable Microgravimetry to the Understanding of How Volcanoes Work. *Earth-Science Reviews*, 169: 146-179. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.04.014

Carbone, D., Antoni-Micollier, L., Hammond, G., et al., 2020. The NEWTON-g Gravity Imager: Toward New Paradigms for Terrain Gravimetry. *Frontiers in Earth Science*, 8: 573396. doi: 10.3389/feart.2020.573396

Carcione, J. M., 1993. Seismic Modeling in Viscoelastic Media. *Geophysics*, 58(1): 110-120. doi: 10.1190/1.1443340

Cesca, S., Zhang, Y., Mouslopoulou, V., et al., 2017. Complex Rupture Process of the Mw 7.8, 2016, Kaikoura Earthquake, New Zealand, and Its Aftershock Sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, 478: 110-120. doi: 10.1016/j.epsl.2017.08.024

Che, Y. T., Yu, J. Z., 2006. Seismic Subsurface Fluidology. Meteorological Press, 1-498. (in Chinese with English abstract).

Che, Y. T., Liu, C. L., Yu, J. Z., et al., 2008. Underground Fluid Anomaly and Macro Anomaly of MS8.0 Wenchuan Earthquake and Opinions about Earthquake Prediction. *Seismology and Geology*, 30(4): 828-838. (in Chinese with English abstract).

Che, Y. T., Yu, J. Z., Liu, C. L., 2009. On Wenchuan Earthquake Anomalies and Earthquake Predication. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 11(1): 1-5. (in Chinese with English abstract).

Che, Y. T., Yu, J. Z., 2014. Influence and Controlling of Fluid in the Crust on Earthquake Activity. *Recent Developments in World Seismology*, 35(8): 1-9. (in Chinese with English abstract).

Chen, J., Niemeijer, A., Spiers, C. J., 2025. An Extended Microphysical Friction Model for Variable Normal Stress Conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(7): e2025JB032033. doi: 10.1029/2025JB032033

Chen, J. Y., Yang, X. S., 2012. Permeability of Earthquake Faults. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 30-41. (in Chinese with English abstract).

Chen, L. D., Fu, H., Wu, C. D., 2008. Physical Bases of Common Characteristics of Short-Term and Impending-Earthquake Precursor Anomalies before a Strong Earthquake. *Journal of Seismological Research*, 31(2): 99-102. (in Chinese with English abstract).

Chen, Q. F., 2005. Prediction Review of the 1975 Haicheng Earthquake and Development of Earthquake Prediction. *Recent Developments in World Seismology*, (5): 154-155. (in Chinese with English abstract).

Chen, X. Z., Lu, X. J., Wang, H. M., 2022. B Value of the Seismically Active and Quiescent Periods and Research of Seismicity Tendency in China's Continent. *Earthquake*, 21(1): 59-62. (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Liu, J., 2023. Groundwater Trace Element Changes Were Probably Induced by the ML3.3 Earthquake in Chaoyang District, Beijing. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1260559. doi: 10.3389/feart.2023.1260559

Chen, Y. T., Gu, H. D., Lu, Z. X., 1980. Variations of Gravity before and after the Haicheng Earthquake, 1975 and the Tangshan Earthquake, 1976. *Acta Seismologica Sinica*, (1): 21-31. (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. T., 2007. Earthquake Prediction: Progress, Difficulties and Prospect. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, (2): 1-24. (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. T., 2009a. Earthquake Prediction: Retrospect and Prospect. *Science China Earth Sciences*, 39(12): 1633-1658. (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. T., Yang, Z. X., Zhang, Y., et al., 2013. From 2008 Wenchuan Earthquake to 2013 Lushan Earthquake. *Scientia Sinica Terrae*, 43(6): 1064-1072. (in Chinese with English abstract).

China Earthquake Administration, 1982. The 1976 Tangshan Earthquake. Seismological Press, 1-459. (in Chinese with English

abstract).

Ciotoli, G., Etiope, G., Guerra, M., et al., 2005. Migration of Gas Injected into a Fault in Low-Permeability Ground. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(3): 305-320. doi: 10.1144/1470-9236/03-058

Crews, J. B., Cooper, C. A., 2014. Experimental Evidence for Seismically Initiated Gas Bubble Nucleation and Growth in Groundwater as a Mechanism for Coseismic Borehole Water Level Rise and Remotely Triggered Seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9): 7079-7091. doi: 10.1002/2014JB011398

Darzi, A., Halldorsson, B., Hrafnkelsson, B., et al., 2022. Short-Term Bayesian ETAS Spatiotemporal Forecasting of the Ölfus 2008 Earthquake Sequence in Iceland. *Tectonophysics*, 839: 229522. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229522

Dascher Cousineau, K., Shchur, O., Brodsky, E. E., et al., 2023. Using Deep Learning for Flexible and Scalable Earthquake Forecasting. *Geophysical Research Letters*, 50(17): e2023GL103909. doi: 10.1029/2023GL103909

Del Soldato, M., Confuorto, P., Bianchini, S., et al., 2021. Review of Works Combining GNSS and InSAR in Europe. *Remote Sensing*, 13(9): 1684. doi: 10.3390/rs13091684

Detournay, E., Cheng, A. H. D., 1993. Fundamentals of Poroelasticity. Elsevier, 113-171.

Ding, J. H., Shen, X. H., Pan, W. Y., et al., 2006. Seismo-Electromagnetism Precursor Research Progress. *Chinese Journal of Radio Science*, 21(5): 791-801. (in Chinese with English abstract).

Dittmann, T., Liu, Y., Morton, Y., et al., 2022. Supervised Machine Learning of High Rate GNSS Velocities for Earthquake Strong Motion Signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(11): e2022JB024854. doi: 10.1029/2022JB024854

Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., Miachkin, V. I., 1979. Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones. *Pure and Applied Geophysics*, 117(5): 1025-1044. doi: 10.1007/BF00876083

Dong, B. W., Zhu, M., Gu, J. H., et al., 2025. Resource Optimization of Space-Air-Ground Integrated Network: Typical Issues and Research Prospects. *Telecommunications Science*, 41(2): 1-15. (in Chinese with English abstract).

Du, J. G., Li, Y., Cui, Y. J., et al., 2018. Seismic Fluid Geochemistry. Seismological Press, 1-272. (in Chinese with English abstract).

Du, X. B., Li, N., Ye, Q., et al., 2007. A Possible Reason for the Anisotropic Changes in Apparent Resistivity near the Focal Region of Strong Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(6): 1802-1810. (in Chinese with English abstract).

Du, X. B., Liu, J., Cui, T. F., et al., 2015. Repeatability, Similarity and Anisotropy Changes in Apparent Resistivity Recorded by Station Chengdu at near Distances before Two Great Earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(2): 576-588. (in Chinese with English abstract).

Duan, Q., Fagereng, Å., Chen, J., et al., 2024. Fluid Environment Controls along-Strike Variation in Slip Style: Midcrustal Geological Signatures from the Red River Fault, China. *Geology*, 52(6): 405-410. doi: 10.1130/G51865.1

Duan, Q. B., Yang, X. S., Chen, J. Y., 2015. Review of Geochemical and Petrophysical Responses to Fluid Processes within Seismogenic Fault Zones. *Progress in Geophysics*, 30(6): 2448-2462. (in Chinese with English abstract).

Enescu, B., Aoi, S., Toda, S., et al., 2012. Stress Perturbations and Seismic Response Associated with the 2011 M9. 0 Tohoku-Oki Earthquake in and around the Tokai Seismic Gap, Central Japan. *Geophysical Research Letters*, 39(13). doi: 10.1029/2012GL051839

Etiope, G., Beneduce, P., Calcara, M., et al., 1999. Structural Pattern and CO2-CH4 Degassing of Ustica Island, Southern Tyrrhenian Basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88(4): 291-304. doi: 10.1016/S0377-0273(99)00010-4

Fan, Y. Y., Du, X. B., Tan, D. C., et al., 2010. The Electromagnetic Phenomena before the MS8.0 Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(12): 2887-2898. (in Chinese with English abstract).

Fan, Y. Y., Jie, T., An, Z. H., et al., 2014. Electromagnetic Phenomena before 2008 Wenchuan Ms8.0 and 2010 Yushu Ms7.1 Earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 36(2): 275-291. (in Chinese with English abstract).

Feng, L. L., Shao, H. C., 2020. Temporal and Spatial Characteristics of Accelerating Release of Seismic Moments before Moderate Earthquakes in the Peripheral Area of Ordos. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 41(3):

12-22. (in Chinese with English abstract).

Feng, R., Pang, Q. Y., Fu, Z. X., et al., 1976. Variations of Vp/Vs before and after the Haicheng Earthquake of 1975. *Chinese Journal of Geophysics*, 19(4): 295-305. (in Chinese with English abstract).

Field, E. H., Biasi, G. P., Bird, P., et al., 2015. Long-Term Time-Dependent Probabilities for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A): 511-543. doi: 10.1785/0120140093

Field, E. H., Jordan, T. H., Page, M. T., et al., 2017. A Synoptic View of the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3). *Seismological Research Letters*, 88(5): 1259-1267. doi: 10.1785/0220170045

Field, E. H., 2019. How Physics-Based Earthquake Simulators Might Help Improve Earthquake Forecasts. *Seismological Research Letters*, 90(2A): 467-472. doi: 10.1785/0220180299

Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., et al., 1990. Low-Frequency Magnetic Field Measurements near the Epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17(9): 1465-1468. doi: 10.1029/GL017i009p01465

Fu, C., Lai, C., Yang, T. F., et al., 2021. An Automatic System for Continuous Monitoring and Sampling of Groundwater Geochemistry in Earthquake-Prone Regions of SW Taiwan. *Frontiers in Earth Science*, 9: 635913. doi: 10.3389/feart.2021.635913

Fu, H., Li, Y. L., Zhao, X. Y., et al., 2008. Statistical Characteristics of the Anomalies before the M≥5 Earthquakes in Yunnan Region. *Journal of Seismological Research*, 31(4): 335-339. (in Chinese with English abstract).

Fyfe, W. S., Price, N. J., Thompson, A. B., 1978. Fluids in the Earth's Crust. Elsevier Press, 1-383.

Gao, S. D., Tang, J., Du, X. B., et al., 2010. The Change Characteristics of Electromagnetic Field before to after Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(3): 512-525. (in Chinese with English abstract).

Gao, Z., Li, Y., Shan, X., et al., 2021. Earthquake Magnitude Estimation from High-Rate GNSS Data: A Case Study of the 2021 Mw 7.3 Maduo Earthquake. *Remote Sensing*, 13(21): 4478. doi: 10.3390/rs13214478

Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y., et al., 1997. Earthquakes Cannot Be Predicted. *Science*, 275(5306): 1616. doi: 10.1126/science.275.5306.1616

Golriz, D., Bock, Y., Xu, X., 2021. Defining the Coseismic Phase of the Crustal Deformation Cycle with Seismogeodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(10): e2021JB022002. doi: 10.1029/2021JB022002

Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., et al., 2016. Changes in CO2 Diffuse Degassing Induced by the Passing of Seismic Waves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320: 12-18. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.019

Gu, G. H., Wang, W. X., 2020. Case Studies on GPS Observations and Crustal Deformation Precursors to Strong Earthquakes. *Progress in Earthquake Sciences*, 50(10): 30-39. (in Chinese with English abstract).

Gu, G. H., 2023. Horizontal Deformations Detected by GNSS Observations as Precursory to Large Earthquakes. *Earthquake Research in China*, 39(4): 721-731. (in Chinese with English abstract).

Gu, J. P., 2000. The Application of Nonlinear Frequency Magnitude Relation to Short-Temporary Time Prediction. *Earthquake*, 20(z1): 51-57. (in Chinese with English abstract).

Gu, J. P., Zhang, X. D., Huang, F. Q., et al., 2004. The Statistic Property of Earthquakes in China and the Prediction Application Research. *Earthquake*, 24(2): 59-65. (in Chinese with English abstract).

Guns, K., Xu, X., Bock, Y., et al., 2022. GNSS-Corrected InSAR Displacement Time-Series Spanning the 2019 Ridgecrest, CA Earthquakes. *Geophysical Journal International*, 230(2): 1358-1373. doi: 10.1093/gji/ggac121

Gunti, S., Roy, P., Narendran, J., et al., 2022. Assessment of Geodetic Strain and Stress Variations in Nepal Due to 25 April 2015 Gorkha Earthquake: Insights from the GNSS Data Analysis and B-Value. *Geodesy and Geodynamics*, 13(3): 288-300. doi: 10.1016/j.geog.2022.01.003

Guo, S. M., Li, Z. Y., Cheng, S. P., et al., 1977. Discussion on the Regional Structural Background and the Seismogenic Model of the Tangshan Earthquake. *Scientia Geologica Sinica*, 12(4): 305-321. (in Chinese with English abstract).

Guo, Z. Q., Zhou, D. Z., Shi, X. J., et al., 1988. Electron Emission during Rock Fracture. *Chinese Journal of Geophysics*, 31(5):

566-571. (in Chinese with English abstract).

Hadjicontis, V., 1996. Electric Signals Recorded during Uniaxial Compression of Rock Samples: Their Possible Correlation with Preseismic Electric Signals. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(7): A308. doi: 10.1016/0148-9062(96)83462-0

Han, S., Sauber, J., Riva, R., 2011. Contribution of Satellite Gravimetry to Understanding Seismic Source Processes of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(24): n/a-n/a. doi: 10.1029/2011gl049975

Han, Z., Ren, F., Ogawa, Y., et al., 1996. Research on the Seismotectonics of the January 17, 1995 Hanshin M 7.2 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 9(4): 671-678. doi: 10.1007/BF02651058

Hao, G., Wang, P., Hu, X., et al., 2021. Time-Frequency Characteristics and Trend Feature of the ENPEMF Signal before Lushan M W 6.6 Earthquake via DE-DDTFA Method. *Natural Hazards*, 110(3): 1869-1885. doi: 10.1007/s11069-021-05016-w

Hao, J. Q., Liu, L. Q., Long, H. L., et al., 2004. New Result of the Experiment on Self Potential Change of Rocks under Biaxial Compression. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(3): 475-482. (in Chinese with English abstract).

Hashemi, S. M., Negarestani, A., Namvaran, M., et al., 2012. An Analytical Algorithm for Designing Radon Monitoring Network to Predict the Location and Magnitude of Earthquakes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(3): 2249-2262. doi: 10.1007/s10967-012-2310-0

Hauksson, E., 1981. Radon Content of Groundwater as an Earthquake Precursor: Evaluation of Worldwide Data and Physical Basis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B10): 9397-9410. doi: 10.1029/JB086iB10p09397

Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Ondoh, T., et al., 1996. Anomalies in the Sub-Ionospheric VLF Signals for the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. *Journal of Physics of the Earth*, 44(4): 413-418. doi: 10.4294/jpe1952.44.413

Hayakawa, M., Hobara, Y., 2010. Current Status of Seismo-Electromagnetics for Short-Term Earthquake Prediction. *Geomatics*, Natural Hazards and Risk, 1(2): 115-155. doi: 10.1080/19475705.2010.486933

Hayakawa, M., Raulin, J. -P., Kasahara, Y., et al., 2011. Ionospheric Perturbations in Possible Association with the 2010 Haiti Earthquake, as Based on Medium-Distance Subionospheric VLF Propagation Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 513-518. doi: 10.5194/nhess-11-513-2011

He, K., Zheng, H. G., Li, J. H., et al., 2016. Characteristics of Electromagnetic Anomalies Based on Earthquake Cases in China. *Earthquake*, 36(4): 144-152. (in Chinese with English abstract).

Heki, K., Tamura, Y., 1997. Short Term Afterslip in the 1994 Sanriku-Haruka-Oki Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 24(24): 3285-3288. doi: 10.1029/97GL03316

Heki, K., Otsuka, Y., Choosakul, N., et al., 2006. Detection of Ruptures of Andaman Fault Segments in the 2004 Great Sumatra Earthquake with Coseismic Ionospheric Disturbances. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9). doi: 10.1029/2005JB004202

Heki, K., 2011. Ionospheric Electron Enhancement Preceding the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(17). doi: 10.1029/2011gl047908

Hinderer, J., Crossley, D., Warburton, R., 2007. Gravimetric Methods-Superconducting Gravity Meters. *Planets and Moons*, 10: 65-122.

Hu, X. N., Yu, C., Liu, Z. J., et al., 2025. Ongoing Compressional Tectonism and Regional Seismic Hazard Revealed by the 2023 Mw6.1 Jishishan Earthquake. *Journal of Earth Science*, 36(1): 275-290. doi: 10.1007/s12583-024-0126-9

Huang, J. P., Wang, X., Yong, S. S., et al., 2019. Analysis of Electromagnetic Disturbance Anomaly Prior to the 2017 Ms7.0 Jiuzhaigou Earthquake. *Earthquake*, 39(3): 84-94. (in Chinese with English abstract).

Huang, L. Y., Zhang, B., Ju, W. L., et al., 2017. The Co-Seismic Effects of 2010 Maule Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(3): 972-984. (in Chinese with English abstract).

Huang, Q. H., Liu, T., 2006. Earthquakes and Tide Response of Geoelectric Potential Field at the Niijima Station. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(6): 1745-1754. (in Chinese with English abstract).

Huang, Q. H., Lin, Y. F., 2010. Numerical Simulation of Selectivity of Seismic Electric Signal and Its Possible Influences. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(3): 535-543. (in Chinese with English abstract).

Hughes, K. L., Masterlark, T., Mooney, W. D., 2010. Poroelastic Stress-Triggering of the 2005 M8. 7 Nias Earthquake by the 2004 M9. 2 Sumatra-Andaman Earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(3-4): 289-299. doi: 10.1016/j.epsl.2010.02.043

Igarashi, G., Wakita, H., 1990. Groundwater Radon Anomalies Associated with Earthquakes. *Tectonophysics*, 180(2-4): 237-254. doi: 10.1016/0040-1951(90)90311-U

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., et al., 1996. Ground-Water Radon Anomaly before the Kobe Earthquake in Japan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(3): A108. doi: 10.1126/science.269.5220.60

Ilić, R., Rusov, V., Pavlovych, V., et al., 2005. Radon in Antarctica. *Radiation Measurements*, 40(2-6): 415-422. doi: 10.1016/j.radmeas.2005.03.022

Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2020. Review of Earthquake Monitoring and Forecasting Plans from the Eighth Five-Year Plan to the Thirteenth Five-Year Plan [R/OL]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2020. https://www.ief.ac.cn/upload/a5fffe35-d881-45ac-98db-0dae5c0b3593/4.5-2%E2%80%9C%E5%85%AB%E4%BA%94%E2%80%9D%E8%87%B3%E2%80%9C%E5%8D%81%E4%B8%89%E4%BA%94%E2%80%9D%E4%BB%A5%E6%9D%A5%E5%9C%B0%E9%9C%87%E7%9B%91%E6%B5%8B%E9%A2%84%E6%8A%A5%E8%A7%84%E5%88%92%E5%9B%9E%E9%A1%BE.pdf. (in Chinese).

Ishiguro, M., 1984. Tidal Data Analysis-an Introduction to BAYTAP. *Proc. Inst. Stat. Math*, 32: 71-85.

Iwamori, H., Ogawa, Y., Okada, T., et al., 2025. Geofluid Mapping Reveals the Connection between Magmas, Fluids, and Earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 6(1): 373. doi: 10.1038/s43247-025-02351-9

Janik, C. J., Mclaren, M. K., 2010. Seismicity and Fluid Geochemistry at Lassen Volcanic National Park, California: Evidence for Two Circulation Cells in the Hydrothermal System. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3-4): 257-277. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.11.014

Jia, K., Zhou, S. Y., 2022. Fault Interaction and Earthquake Triggering Mechanisms: Progress and Prospects. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 54(5): 477-497. (in Chinese with English abstract).

Jiang, H. K., Miao, Q. Z., Wu, Q., et al., 2009. Analysis on Statistical Features of Precursor Based on Earth Quake Cases in China Mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 245-259. (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Yang, G. H., Wang, M., et al., 2006. On Crustal Movement in China Continent and Its Relationship with Strong Earthquakes. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(3): 1-9. (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Fang, Y., Wu, Y. Q., et al., 2009. The Dynamic Process of Regional Crustal Movement and Deformation before Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 505-518. (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Wu, Z. L., 2009. Accelerating Moment Release (AMR) before Strong Earthquakes: A Retrospective Case Study of a Controversial Precursor. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 691-702. (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. S., Wu, Y. Q., Zou, Z. Y., et al., 2020. Progress and Prospect of Earthquake Forecasting Based on GNSS Data in China. *Earthquake Research in China*, 36(4): 693-707. (in Chinese with English abstract).

Jie, T., Lu, J., 2020. Apparent Resistivity Anisotropic Variations in Cracked Medium. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(4): 1675-1694. (in Chinese with English abstract).

Jin, A. Z., 1981a. Preliminary Study of the Normal Changes of Earth's Electrical Resistivity. *Chinese Journal of Geophysics*, 24(1): 92-106. (in Chinese with English abstract).

Jin, A. Z., 1981b. A Preliminary Study on the Relation between Normal Temporal Variation of Earth Resistivity and the Geoelectrical Profile at the Station Site. *Acta Seismologica Sinica*, 3(4): 421-428. (in Chinese with English abstract).

Jin, S., Occhipinti, G., Jin, R., 2015. GNSS Ionospheric Seismology: Recent Observation Evidences and Characteristics.

Earth-Science Reviews, 147: 54-64. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.05.003

Jordan, T. H., Chen, Y., Gasparini, P., et al., 2011. Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization. *Annals of Geophysics*, 54(4): 315-391. doi: 10.4401/ag-5350

Joshi, A., Raman, B., Mohan, C. K., 2024. An Integrated Approach for Prediction of Magnitude Using Deep Learning Techniques. *Neural Computing & Applications*, 36(27): 16991-17006. doi: 10.1007/s00521-024-09891-9

Jouniaux, L., Zyserman, F., 2016. A Review on Electrokinetically Induced Seismo-Electrics, Electro-Seismics, and Seismo-Magnetics for Earth Sciences. *Solid Earth*, 7(1): 249-284. doi: 10.5194/se-7-249-2016

Ju, W. L., Zhang, B., Huang, L. Y., et al., 2017. Coulomb Stresses Induced by the 2004 Mw9.3 Sumatra Earthquake. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 1(34). (in Chinese with English abstract).

Kabirzadeh, H., Kim, J. W., Hadi Najafabadi, A., et al., 2022. Microgravity Effect of Inter-Seismic Crustal Dilatation. *Communications Earth & Environment*, 3(1): 268. doi: 10.1038/s43247-022-00586-4

Kagan, Y. Y., Knopoff, L., 1987. Statistical Short-Term Earthquake Prediction. *Science*, 236(4808): 1563-1567. doi: 10.1126/science.236.4808.1563

Kanamori, H., 2003. Earthquake Prediction: An Overview. *International Geophysics*, 81: 1205-1216. doi: 10.1016/S0074-6142(03)80186-9

Kanarachos, S., Christopoulos, S. G., Chroneos, A., et al., 2017. Detecting Anomalies in Time Series Data via a Deep Learning Algorithm Combining Wavelets, Neural Networks and Hilbert Transform. *Expert Systems with Applications*, 85: 292-304. doi: 10.1016/j.eswa.2017.04.028

Kano, M., Miyazaki, S. I., Ishikawa, Y., et al., 2020. Adjoint-Based Direct Data Assimilation of GNSS Time Series for Optimizing Frictional Parameters and Predicting Postseismic Deformation Following the 2003 Tokachi-Oki Earthquake. *Earth Planets and Space*, 72(1): 159. doi: 10.1186/s40623-020-01293-0

Kennedy, B. M., Kharaka, Y. K., Evans, W. C., et al., 1997. Mantle Fluids in the San Andreas Fault System, California. *Science*, 278(5341): 1278-1281. doi: 10.1126/science.278.5341.1278

King, C., Zhang, W., Zhang, Z., 2006. Earthquake-Induced Groundwater and Gas Changes. *Pure and Applied Geophysics*, 163(4): 633-645. doi: 10.1007/s00024-006-0049-7

King, C. Y., 1986. Gas Geochemistry Applied to Earthquake Prediction: An Overview. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12): 12269-12281. doi: 10.1029/JB091iB12p12269

Kong, Q., Trugman, D. T., Ross, Z. E., et al., 2018. Machine Learning in Seismology: Turning Data into Insights. *Seismological Research Letters*, 90(1): 3-14. doi: 10.1785/0220180259

Kowalczyk, K., Pajak, K., Wieczorek, B., et al., 2021. An Analysis of Vertical Crustal Movements along the European Coast from Satellite Altimetry, Tide Gauge, GNSS and Radar Interferometry. *Remote Sensing*, 13(11): 2173. doi: 10.3390/rs13112173

Külahcı, F., İnceöz, M., Doğru, M., et al., 2009. Artificial Neural Network Model for Earthquake Prediction with Radon Monitoring. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1): 212-219. doi: 10.1016/j.apradiso.2008.08.003

Kunin, I. A., 1968. The Theory of Elastic Media with Microstructure and the Theory of Dislocations. In: Kröner, E., ed., Mechanics of Generalized Continua. Springer, Berlin, Heidelberg, 321-329.

Kuo, J., Zheng, J., Song, S., et al., 1999. Determination of Earthquake Epicentroids by Inversion of Gravity Variation Data in the BTTZ Region, China. *Tectonophysics*, 312(2-4): 267-281. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00201-2

Kuo, J. T., Sun, Y., 1993. Modeling Gravity Variations Caused by Dilatancies. *Tectonophysics*, 227(1-4): 127-143. doi: 10.1016/0040-1951(93)90091-W

Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., et al., 2005. The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308(5725): 1127-1133. doi: 10.1126/science.1112250

Lee, S., Ghassemi, A., 2009. Thermo-Poroelastic Finite Element Analysis of Rock Deformation and Damage. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium: ARMA*, 9.

Lei, X., Wang, Z., Ma, S., et al., 2024. Step-over of Strike-Slip Faults and Overpressure Fluid Favor Occurrence of Foreshocks: Insights from the 1975 Haicheng Fore-Main-Aftershock Sequence, China. *Earthquake Research Advances*, 4(1): 100237. doi: 10.1016/j.eqrea.2023.100237

Li, J., Liu, Z., Chen, Z., et al., 2024. The Role of Gas Emissions (He, Rn, and CO2) from Fault Zones in Understanding Fault and Seismic Activity. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1488690. doi: 10.3389/feart.2024.1488690

Li, Q., You, X., Yang, S., et al., 2012. A Precise Velocity Field of Tectonic Deformation in China as Inferred from Intensive GPS Observations. *Science China-Earth Sciences*, 55(5): 695-698. doi: 10.1007/s11430-012-4412-5

Li, R., Huang, J., Li, H., et al., 1997. The Mechanism of Regional Gravity Changes before and after the Tangshan Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 10(4): 497-500. doi: 10.1007/s11589-997-0058-3

Li, Y., Chen, Z., Hu, L., et al., 2022. Research Progress and Prospect of Seismic Fluid Geochemistry in Short-Imminent Earthquake Prediction. *Chinese Science Bulletin*, 67(13): 1404-1420. (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Fang, Z., Zhang, C. L., et al., 2023. Advances in Seismic Fluid Geochemistry and Its Application in Earthquake Forecasting. *Seismology and Geology*, 45(3): 593-621. (in Chinese with English abstract).

Li, Y. L., Mao, H. L., Fu, H., 2007. Dynamic Evolution of Seismological Anomalies before the 2007 Ning'er, Yunnan, Ms6.4 Earthquake. *Journal of Seismological Research*, 30(4): 318-323. (in Chinese with English abstract).

Li, Z. C., Ji, Z. W., Sun, J. Z., et al., 2025. High-Probability Ground Motion Simulation in Maduo County for the Maduo MS7.4 Earthquake in 2021: A Possible Supershear Earthquake. *Journal of Earth Science*, 36(2): 781-800. doi: 10.1007/s12583-024-0092-2

Licciardi, A., Bletery, Q., Rouet-Leduc, B., et al., 2022. Instantaneous Tracking of Earthquake Growth with Elastogravity Signals. *Nature*, 606(7913): 319-324. doi: 10.1038/s41586-022-04672-7

Lim, B., Leong, E., 2019. Challenges in the Detection of Ionospheric Pre-Earthquake Total Electron Content Anomalies (PETA) for Earthquake Forewarning. *Pure and Applied Geophysics*, 176(6): 2425-2449. doi: 10.1007/s00024-018-2083-7

Liu, C. G., Yan, R., Fan, C. Y., et al., 2022. Analysis and Prospect of Seismic Subsurface Fluid Monitoring in China. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 161-172. (in Chinese with English abstract). doi: 10.20015/j.cnki.issn1000-0666.2022.0032

Liu, H., Zhao, R. Z., Dong, H. B., 2023. Short-Impending Earthquake Prediction Method Based on High-Order Magnetic Anomaly Derivative and High-Order Statistic. *Earth Science*, 49(8): 2952-2960. (in Chinese with English abstract).

Liu, J., Du, X. B., Zlotnicki, J., et al., 2011. The Changes of the Ground and Ionosphere Electric/Magnetic Fields before Several Great Earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(11): 2885-2897. (in Chinese with English abstract).

Liu, J. Y., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., et al., 2000. Seismo-Ionospheric Signatures Prior to M≥6.0 Earthquakes in Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 27(19): 3113-3116. doi: 10.1029/2000GL011395

Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., et al., 2004. Pre-Earthquake Ionospheric Anomalies Registered by Continuous GPS TEC Measurements. *Annales Geophysicae*, 22(5): 1585-1593. doi: 10.5194/angeo-22-1585-2004

Liu, L., Chen, Z., Li, Y., et al., 2023b. Emission of Rn and CO2 from Soil at Fault Zones Caused by Seismic Waves. *Earth and Space Science*, 10(6): e2023EA003012. doi: 10.1029/2023EA003012

Liu, L., Li, Y. J., Ji, L. Y., 2024. Interaction Mechanism of Strong Earthquakes in the Tectonic Transition Zone: A Numerical Study of Four Ms 6.0 Yutian Earthquakes from 2008 to 2020. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(1). (in Chinese with English abstract).

Liu, L. F., Su, Y. J., Qin, J. Z., et al., 2007. 2007 Ning'er, Yunnan, Ms6.4 Earthquake Sequence Characteristics of Its Medium-, Short-Term Seismological Anomalies. *Journal of Seismological Research*, 30(4): 324-330. (in Chinese with English abstract).

Liu, W., Zhang, M., Chen, B., et al., 2023a. Hydrothermal He and CO2 Degassing from a Y-Shaped Active Fault System in Eastern Tibetan Plateau with Implications for Seismogenic Processes. *Journal of Hydrology*, 620: 129482. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129482

Liu, X. L., Gao, Y. J., 2023. Prospect on the Research Direction of Numerical Earthquake Prediction. *Seismological and*

Geomagnetic Observation and Research, 44(S1): 149-150. (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. W., Chen, H. J., Che, Y. T., 2006. Retrospect and Prospect of Observation and Study on Seismic Underground Fluid in China. *Recent Developments in World Seismology*, 7(3): 12. (in Chinese with English abstract).

Lu, C., Zhou, X., Chen, Z., et al., 2023. Earthquake Geochemical Scientific Expedition and Research. *Earthquake Research Advances*, 3(4): 100239. doi: 10.1016/j.eqrea.2023.100239

Lu, Y. Q., Qian, J. D., Liu, J. Y., 1990. An Experimental Study on the Precursory Features of Apparent Resistivity and Acoustic Emission of Large Scale of Granite Specimen during the Process of Slowly Dilatancy Rupturing. *Northwestern Seismological Journal*, 12(2): 35-41. (in Chinese with English abstract).

Lyu, M., Chen, K., Xue, C., et al., 2022. Overall Subshear but Locally Supershear Rupture of the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake from High-Rate GNSS Waveforms and Three-Dimensional InSAR Deformation. *Tectonophysics*, 839: 229542. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229542

Ma, Q. Z., 2008. Multi-Dipole Observation System and Study on the Abnormal Variation of the Geoelectric Field Observed at Capital Network before the 2006 Wenn'an, Hebei of China. *Acta Seismologica Sinica*, 30(6): 615-625. (in Chinese with English abstract).

Ma, Q. Z., Zhao, W. G., Zhang, W. P., 2009. Abnormal Variations of Geoelectric Field Recorded at Wenxian Station Preceding Earthquakes and Their Application to the Prediction of the 2001 Ms 8.1 Kunlun Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 31(6). (in Chinese with English abstract).

Ma, Q. Z., Fang, G. Q., Li, W., et al., 2013. Electromagnetic Anomalies before the 2013 Lushan Ms7.0 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 717-730. (in Chinese with English abstract).

Ma, Q. Z., Li, W., Zhang, J. H., et al., 2014. Study on the Spatial Variation Characteristics of the Geoelectric Field Signals Recorded at the Stations in the East Huabei Area When a Great Current Is Injected. *Acta Geophysica Sinica*, 57(2): 518-530. (in Chinese with English abstract).

Ma, Q. Z., Qian, J. D., Li, W., et al., 2016. Characteristics of the Spatial Variation of Geoelectric Field Signals Recorded at the Stations in Huadong Area in China When 4 Heavy Currents Are Injected. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(7): 2598-2614. (in Chinese with English abstract).

Ma, Q. Z., Li, W., Zhao, W. Z., et al., 2017. Regional Characteristics of Artificial Source Geoelectric Field Spatial Variations. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 455-468. (in Chinese with English abstract).

Mao, T., Xi, J. L., Wang, Y. Q., et al., 1999. The Variation Characteristics of the Telluric Field in the Process of Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(4): 520-528. (in Chinese with English abstract).

Martinelli, G., Dadomo, A., 2017. Factors Constraining the Geographic Distribution of Earthquake Geochemical and Fluid-Related Precursors. *Chemical Geology*, 469: 176-184. doi: 10.1016/j.chemgeo.2017.01.006

Martinelli, G., 2020. Previous, Current, and Future Trends in Research into Earthquake Precursors in Geofluids. *Geosciences*, 10(5): 189. doi: 10.3390/geosciences10050189

Maurya, V. K., Dwivedi, R., Martha, T. R., 2022. Site Scale Landslide Deformation and Strain Analysis Using MT-InSAR and GNSS Approach-a Case Study. *Advances in Space Research*, 70(12): 3932-3947. doi: 10.1016/j.asr.2022.05.028

Mei, S. R., Liang, B. Y., 1989. A Mathematical Simulation for Seismogenic Process of the Tangshan Earthquake. *Earthquake Research in China*, 5(3): 9-17. (in Chinese with English abstract).

Mei, S.R., Feng, D.Y., Zhang, G. M., et al., 1993. An Introduction to Earthquake Prediction in China. Beijing: Seismological Press.

Meilano, I., Susilo, S., Sarsito, D., 2022. Rapid Magnitude Estimation of the August 5, 2018, Lombok Earthquake Using High-Rate GNSS Data. *International Journal of GEOMATE*, 23(98): 57-65. doi: 10.21660/2022.98.3438

Melgar, D., Melbourne, T. I., Crowell, B. W., et al., 2019. Real-Time High-Rate GNSS Displacements: Performance Demonstration during the 2019 Ridgecrest, California, Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 91(4): 1943-1951. doi: 10.1785/0220190223

Meng, X. S., 2023. Discussion on Several Issues in Earthquake Prediction. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 44(Suppl. 1): S1.078. (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2023

Mignan, A., 2014. The Debate on the Prognostic Value of Earthquake Foreshocks: A Meta-Analysis. *Scientific Reports*, 4: 4099. doi: 10.1038/srep04099

Mitchell, B. J., 1995. Anelastic Structure and Evolution of the Continental Crust and Upper Mantle from Seismic Surface Wave Attenuation. *Reviews of Geophysics*, 33(4): 441-462. doi: 10.1029/95RG02074

Molchan, G., Kagan, Y., 1992. Earthquake Prediction and Its Optimization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B4): 4823-4838. doi: 10.1029/91JB03095

Molchanov, O., Hayakawa, M., 1998. Subionospheric VLF Signal Perturbations Possibly Related to Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A8): 17489-17504. doi: 10.1029/98JA00999

Mou, M., Zhu, S. B., 2012. The Impact of the Underground Fluid in the Process of Earthquake Preparation and Occurrence; A Review. *Progress in Geophysics*, 27(3): 950-959. (in Chinese with English abstract).

Moustra, M., Avraamides, M., Christodoulou, C., 2011. Artificial Neural Networks for Earthquake Prediction Using Time Series Magnitude Data or Seismic Electric Signals. *Expert Systems with Applications*, 38(12): 15032-15039. doi: 10.1016/j.eswa.2011.05.043

Nagata, K., Tazuke, Y., 1972. Short Range Order Effects on EPR Frequencies in Heisenberg Linear Chain Antiferromagnets. *Journal of the Physical Society of Japan*, 32(2): 337-345. doi: 10.1143/jpsj.32.337

Nakagawa, K., Yu, Z., Berndtsson, R., et al., 2020. Temporal Characteristics of Groundwater Chemistry Affected by the 2016 Kumamoto Earthquake Using Self-Organizing Maps. *Journal of Hydrology*, 582: 124519. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124519

Nanjo, K., Izutsu, J., Orihara, Y., et al., 2022. Changes in Seismicity Pattern Due to the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence and Implications for Improving the Foreshock Traffic-Light System. *Tectonophysics*, 822: 229175. doi: 10.1016/j.tecto.2021.229175

Negarestani, A., Setayeshi, S., Ghannadi-Maragheh, M., et al., 2002. Layered Neural Networks Based Analysis of Radon Concentration and Environmental Parameters in Earthquake Prediction. *Journal of Environmental Radioactivity*, 62(3): 225-233. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00165-5

Office of Science and Technology Committee, China Earthquake Administration, 2002. Major Scientific Problems, Scientific Thoughts, Technical Approaches and Suggestions Confronting Current Earthquake Prediction. *Recent Developments in World Seismology*, (8): 2-6. (in Chinese).

Okubo, S., 1991. Potential and Gravity Changes Raised by Point Dislocations. *Geophysical Journal International*, 105(3): 573-586. doi: 10.1111/j.1365-246x.1991.tb00797.x

Ozalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., et al., 2002. The 1999 Izmit Earthquake Sequence in Turkey: Seismological and Tectonic Aspects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1): 376-386. doi: 10.1785/0120000838

Pan, Z., Jin, Y., Hao, M., et al., 2025. Data-Driven Crustal Deformation Model in Southeastern Tibetan Plateau Using Unsupervised Machine Learning Techniques for GNSS Observations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 368: 107440. doi: 10.1016/j.pepi.2025.107440

Paris, N., Itoh, Y., Brenguier, F., et al., 2025. Coseismic Crustal Seismic Velocity Changes Associated with the 2024 MW 7.5 Noto Earthquake, Japan. *Earth Planets and Space*, 77(1): 51. doi: 10.1186/s40623-025-02177-x

Parrot, M., Sauvaud, J., Berthelier, J., et al., 2007. First in-Situ Observations of Strong Ionospheric Perturbations Generated by a Powerful VLF Ground-Based Transmitter. *Geophysical Research Letters*, 34(11). doi: 10.1029/2007GL029368

Paudel, S. R., Banjara, S. P., Wagle, A., et al., 2018. Earthquake Chemical Precursors in Groundwater: A Review. *Journal of Seismology*, 22(5): 1293-1314. doi: 10.1007/s10950-018-9739-8

Pei, W. L., Zhou, S. Y., Zhuang, J. C., et al., 2021. Application and Discussion of Statistical Seismology in Probabilistic Seismic Hazard Assessment Studies. *Science China Earth Sciences*, 51(12): 2035-2047. (in Chinese with English abstract).

Picozza, P., Conti, L., Sotgiu, A., 2021. Looking for Earthquake Precursors from Space: A Critical Review. *Frontiers in Earth Science*, 9: 676775. doi: 10.3389/feart.2021.676775

Pollitz, F. F., Wicks, C., Thatcher, W., 2001. Mantle Flow beneath a Continental Strike-Slip Fault: Postseismic Deformation after the 1999 Hector Mine Earthquake. *Science*, 293(5536): 1814-1818. doi: 10.1126/science.1061361

Pulinets, S., Ouzounov, D., 2011. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) Model-an Unified Concept for Earthquake Precursors Validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4-5): 371-382. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.03.005

Pulinets, S., Krankowski, A., Hernandez-Pajares, M., et al., 2021. Ionosphere Sounding for Pre-Seismic Anomalies Identification (INSPIRE): Results of the Project and Perspectives for the Short-Term Earthquake Forecast. *Frontiers in Earth Science*, 9: 610193. doi: 10.3389/feart.2021.610193

Qi, G. Z., 1978. On the Dilatancy-Magnetic Effect. *Chinese Journal of Geophysics*, 21(1): 18-33. (in Chinese with English abstract).

Qian, F., Zhao, B., Lu, F., 1997. Georesistivity Precursors to the Tangshan Earthquake of 1976. *Annals of Geophysics*, 40(2).

Qian, F. Y., Zhao, Y. L., 2005. Study on Geoelectric Field Method for Short-Term and Impending Earthquake Prediction. *Earthquake*, 25(2): 33-40. (in Chinese with English abstract).

Qian, J. D., Zhao, H. Y., Zhang, W. X., 1986. Calculation Formula of Apparent Resistivity of Horizontal Layered Medium with High Accuracy and Analysis of Their Error. *Northwestern Seismological Journal*, 8(2): 10-19. (in Chinese with English abstract).

Qian, J. D., Zhao, H. Y., 1988. Earth Resistivity Modelling and Observational System with Multi-Separation of Electrods. *Acta Seismologica Sinica*, 10(1): 77-89. (in Chinese with English abstract).

Qian, J. D., 1993. A Study on the Changes in Geoelectrical Resistivity Associated with Preparatory Process of Great Earthquakes in China. *Earthquake Research in China*, 9(4): 341-350. (in Chinese with English abstract).

Qian, J. D., Yu, X. J., Cao, A. M., et al., 2013. Modeling the Response Features of Apparent Ratio of Seismic Wave Velocity in Horizental Layered Medium. *Earthquake*, 33(1): 1-11. (in Chinese with English abstract).

Qian, S. Q., Hao, J. Q., Zhou, J. G., et al., 2003. Precursory Electric and Magnetic Signals at ULF and LF Bands during the Fracture of Rocks under Pressure. *Earthquake Research in China*, 19(2): 109-116. (in Chinese with English abstract).

Qiao, X., Qu, C., Shan, X., et al., 2021. Interseismic Slip and Coupling along the Haiyuan Fault Zone Constrained by InSAR and GPS Measurements. *Remote Sensing*, 13(16): 3333. doi: 10.3390/rs13163333

Ramola, R., Singh, M., Sandhu, A., et al., 1990. The Use of Radon as an Earthquake Precursor. Int. J. Radiat. Applic. *Instrum.*, Part E., 4(2): 275-287.

Randazzo, P., Caracausi, A., Aiuppa, A., et al., 2021. Active Degassing of Deeply Sourced Fluids in Central Europe: New Evidences from a Geochemical Study in Serbia. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 22(11): e2021GC010017. doi: 10.1029/2021GC010017

Reddy, D. V., Nagabhushanam, P., 2011. Groundwater Electrical Conductivity and Soil Radon Gas Monitoring for Earthquake Precursory Studies in Koyna, India. *Applied Geochemistry*, 26(5): 731-737. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.01.031

Reddy, I., Phillips, R., Whitcomb, J., et al., 1976. Monitoring of Time Dependent Electrical Resistivity by Magnetotellurics. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 28(2): 165-178. doi: 10.5636/jgg.28.165

Remitti, F., Festa, A., Nirta, G., et al., 2024. Role of Folding-Related Deformation in the Seismicity of Shallow Accretionary Prisms. *Nature Geoscience*, 17(7): 600-607. doi: 10.1038/s41561-024-01474-6

Rezaei, M., Farajzadeh, M., Mielonen, T., et al., 2019. Analysis of Spatio-Temporal Dust Aerosol Frequency over Iran Based on Satellite Data. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2): 508-519. doi: 10.1016/j.apr.2018.10.002

Rikitake, T., 1968. Earthquake Prediction. *Earth-Science Reviews*, 4: 245-282. doi: 10.1016/0012-8252(68)90154-2

Rikitake, T., 1987. Earthquake Precursors in Japan: Precursor Time and Detectability. *Tectonophysics*, 136(3-4): 265-282.

Roeloffs, E., Langbein, J., 1994. The Earthquake Prediction Experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32(3): 315-336. doi: 10.1029/94RG01114

Ruan, A. G., 1995. A Summarization of the Geoelectric Field Observation and Earthquake Prediction at Internal and Abroad. *Earthquake Research in Plateau*, 7(3): 26-30. (in Chinese with English abstract).

Rundle, J. B., Stein, S., Donnellan, A., et al., 2021. The Complex Dynamics of Earthquake Fault Systems: New Approaches to Forecasting and Nowcasting of Earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 84(7): 76801. doi: 10.1088/1361-6633/abf893

Savage, J. C., 1983. A Dislocation Model of Strain Accumulation and Release at a Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B6): 4984-4996. doi: 10.1029/JB088iB06p04984

Savran, W. H., Werner, M. J., Marzocchi, W., et al., 2020. Pseudoprospective Evaluation of UCERF3-ETAS Forecasts during the 2019 Ridgecrest Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(4): 1799-1817. doi: 10.1785/0120200026

Savran, W. H., Bayona, J. A., Iturrieta, P., et al., 2022. pyCSEP: A Python Toolkit for Earthquake Forecast Developers. *Seismological Research Letters*, 93(5): 2858-2870. doi: 10.1785/0220220033

Scholz, C., 1977. A Physical Interpretation of the Haicheng Earthquake Prediction. *Nature*, 267(5607): 121-124. doi: 10.1038/267121a0

Scholz, C. H., Sykes, L. R., Aggarwal, Y. P., 1973. Earthquake Prediction: A Physical Basis: Rock Dilatancy and Water Diffusion May Explain a Large Class of Phenomena Precursory to Earthquakes. *Science*, 181(4102): 803-810. doi: 10.1126/science.181.4102.803

Schwartz, D. P., Coppersmith, K. J., 1984. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7): 5681-5698. doi: 10.1029/JB089iB07p05681

Segall, P., 2010. Earthquake and Volcano Deformation. Princeton University Press.

Sgrigna, V., Conti, L., 2012. A Deterministic Approach to Earthquake Prediction. *International Journal of Geophysics*, 2012(1): 1-20. doi: 10.1155/2012/406278

Shahrisvand, M., Akhoondzadeh, M., Sharifi, M. A., 2014. Detection of Gravity Changes before Powerful Earthquakes in GRACE Satellite Observations. *Annals of Geophysics*, 57(5): A0543. doi: 10.4401/ag-6612

Shao, W., Liu, Z., Li, Y., et al., 2024. Geochemical Characteristics of Thermal Springs and Insights into the Intersection between the Xiaojiang Fault and the Red River Fault, Southeastern Tibet Plateau. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 25(3): e2023GC011431. doi: 10.1029/2023GC011431

Shao, Z. G., Zhang, G. M., Li, Z. X., et al., 2008. Research on the Process and Tendency of Seismicity along the Active Tectonic Boundaries in Chinese Mainland. *Earthquake*, 28(3): 33-42. (in Chinese with English abstract).

Shao, Z. G., Liu, Q., Pan, Z. Y., et al., 2025. Prediction of Seismic Trends for the Forthcoming One to Three Years and Evaluation of the Urgency of Earthquake Occurrences in Long-Term Seismic Hazard Zones within Chinese Mainland. *Earthquake*, 45(1): 214-260. (in Chinese with English abstract).

Shebalin, P., Keilis-Borok, V., Gabrielov, A., et al., 2006. Short-Term Earthquake Prediction by Reverse Analysis of Lithosphere Dynamics. *Tectonophysics*, 413(1-2): 63-75. doi: 10.1016/j.tecto.2005.10.033

Shebalin, P., Baranov, S., 2017. Long-Delayed Aftershocks in New Zealand and the 2016 M7. 8 Kaikoura Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 174(10): 3751-3764. doi: 10.1007/s00024-017-1608-9

Shen, W. H., Xue, T. F., Zhang, J. F., et al., 2018. 2-D Quasi-Dynamics Numerical Simulation of Earthquake Based on Rate-State Friction Law: Effect of the Variations of Shallow Normal Stress on Fault Evolution. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(8): 3198-3210. (in Chinese with English abstract).

Shen, X. H., Huang, J. P., Lin, J., et al., 2022. Project Plan and Research on Data Analysis and Processing Technology of Geophysical Exploration Satellite and Application Research of Earthquake Prediction. *Progress in Earthquake Sciences*, 52(1): 1-25. (in Chinese with English abstract). doi: 10.19987/j.dzkxjz.2021-103

Shi, D. Y., Liu, Y. W., 2023. A Review on the Role of the Underground Fluid in Earthquake Generation and Precursor Mechanism. *Earthquake Research in China*, 39(3): 453-471. (in Chinese with English abstract).

Shi, T. L., Guo, D. Q., 1995. Preliminary Study of Nonlinear Prediction Method in Seismology. *Advance in Earth Sciences*,

10(3): 273. (in Chinese with English abstract).

Shi, Z., Zhang, H., Wang, G., 2020. Groundwater Trace Elements Change Induced by M5.0 Earthquake in Yunnan. *Journal of Hydrology*, 581: 124424. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124424

Soldati, G., Cannelli, V., Piersanti, A., 2020. Monitoring Soil Radon during the 2016-2017 Central Italy Sequence in Light of Seismicity. *Scientific Reports*, 10(1): 13137. doi: 10.1038/s41598-020-69821-2

Spassiani, I., Falcone, G., Murru, M., et al., 2023. Operational Earthquake Forecasting in Italy: Validation after 10 Yr of Operativity. *Geophysical Journal International*, 234(3): 2501-2518. doi: 10.1093/gji/ggad256

Stacey, F. D., 1964. The Seismomagnetic Effect. *Pure and Applied Geophysics*, 58(1): 5-22. doi: 10.1007/BF00879136

Stevens, V., Avouac, J., 2021. On the Relationship between Strain Rate and Seismicity in the India-Asia Collision Zone: Implications for Probabilistic Seismic Hazard. *Geophysical Journal International*, 226(1): 220-245. doi: 10.1093/gji/ggab098

Stockman, S., Lawson, D. J., Werner, M. J., 2023. Forecasting the 2016-2017 Central Apennines Earthquake Sequence with a Neural Point Process. *Earths Future*, 11(9): e2023EF003777. doi: 10.1029/2023EF003777

Stray, B., Lamb, A., Kaushik, A., et al., 2022. Quantum Sensing for Gravity Cartography. *Nature*, 602(7898): 590-594. doi: 10.1038/s41586-021-04315-3

Sun, W., Okubo, S., 2004. Coseismic Deformations Detectable by Satellite Gravity Missions: A Case Study of Alaska (1964, 2002) and Hokkaido (2003) Earthquakes in the Spectral Domain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4). doi: 10.1029/2003JB002554

Sun, W. K., 2012. Theory of Seismic Dislocation. Science Press, Beijing. (in Chinese).

Sun, X. L., Liu, Y. W., Fu, H., et al., 2020. A Review of Study in the Analysis and Prediction of Seismic Subsurface Fluids during past Ten Years in China. *Journal of Seismological Research*, 43(2): 216-231. (in Chinese with English abstract).

Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H., et al., 2011. Rupture Process of the 2011 Tohoku-Oki Mega-Thrust Earthquake (M9. 0) Inverted from Strong-Motion Data. *Geophysical Research Letters*, 38(7): n/a-n/a. doi: 10.1029/2011GL049136

Takeuchi, A., Nagahama, H., 2001. Voltage Changes Induced by Stick-Slip of Granites. *Geophysical Research Letters*, 28(17): 3365-3368. doi: 10.1029/2001GL012981

Talwani, P., 1979. An Empirical Earthquake Prediction Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 18(4): 288-302. doi: 10.1016/0031-9201(79)90065-7

Tan, D. C., Zhao, J. L., Xi, J. L., et al., 2010. A Study on Feature and Mechanism of the Tidal Geoelectrical Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(3): 544-555. (in Chinese with English abstract).

Tan, D. C., Wang, L. W., Zhao, J. L., et al., 2011. Influence Factors of Harmonic Waves and Directional Waveforms of Tidal Geoelectrical Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(7): 1842-1853. (in Chinese with English abstract).

Tan, D. C., Xi, J. L., Zhang, H., et al., 2013. Hydrogeologic Factors of Geoelectric Field and Diurnal Computation of Preferred Orientation of Crack Water Seepage. *Acta Seismologica Sinica*, 35(1): 36-49. (in Chinese with English abstract).

Tan, D. C., Zhao, J. L., Liu, X. F., et al., 2014. Eatures of Regional Variations of the Spontaneous Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(5): 1588-1598. (in Chinese with English abstract).

Tan, D. C., Xin, J. C., Wang, J. J., et al., 2019. Application Foundation and Earthquake Case Analysis of the Telluric Field Rock Crack Model. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(2): 558-571. (in Chinese with English abstract).

Tang, H., Sun, W. K., 2020. Progress and Prospect of Deformation Theory in the Viscoelastic Earth. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(1): 11-26. (in Chinese with English abstract).

Tian, J., Zhu, R. J., Ju, Z. H., et al., 2024. Research Progress on Chemical Change of Hot Spring Water in Earthquake Monitoring and Prediction. *Earthquake*, 44(4): 97-115. (in Chinese with English abstract).

Tian, S., Zhang, L., Wang, J. G., et al., 2012. Geoelectric Field Anomaly before Wenchuan and Yushu Earthquake. *Progress in Geophysics*, 27(3): 878-887. (in Chinese with English abstract).

Toutain, J., Baubron, J., 1999. Gas Geochemistry and Seismotectonics: A Review. *Tectonophysics*, 304(1-2): 1-27. doi:

10.1016/S0040-1951(98)00295-9

Uyeda, S., Nagao, T., Orihara, Y., et al., 2000. Geoelectric Potential Changes: Possible Precursors to Earthquakes in Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(9): 4561-4566. doi: 10.1073/pnas.97.9.4561

Uyeda, S., Hayakawa, M., Nagao, T., et al., 2002. Electric and Magnetic Phenomena Observed before the Volcano-Seismic Activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(11): 7352-7355. doi: 10.1073/pnas.072208499

Uyeda, S., Nagao, T., Kamogawa, M., 2009. Short-Term Earthquake Prediction: Current Status of Seismo-Electromagnetics. *Tectonophysics*, 470(3-4): 205-213. doi: 10.1016/j.tecto.2008.07.019

Vallée, M., Ampuero, J. P., Juhel, K., et al., 2017. Observations and Modeling of the Elastogravity Signals Preceding Direct Seismic Waves. *Science*, 358(6367): 1164-1168. doi: 10.1126/science.aao0746

Varotsos, P., Alexopoulos, K., 1984. Physical Properties of the Variations of the Electric Field of the Earth Preceding Earthquakes, I. *Tectonophysics*, 136(3-4): 335-339. doi: 10.1016/0040-1951(84)90059-3

Varotsos, P., Alexopoulos, K., 1987. Physical Properties of the Variations of the Electric Field of the Earth Preceding Earthquakes, I. *Tectonophysics*, 136(3-4): 335-339.

Varotsos, P., Sarlis, N., Skordas, E., et al., 2005. Additional Evidence on Some Relationship between Seismic Electric Signals and Earthquake Source Parameters. *Acta Geophysica Polonica*, 53(3): 293.

Wakita, H., Nakamura, Y., Notsu, K., et al., 1980. Radon Anomaly: A Possible Precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake. *Science*, 207(4433): 882-883. doi: 10.1126/science.207.4433.882

Wallace, L. M., Hreinsdóttir, S., Ellis, S., et al., 2018. Triggered Slow Slip and Afterslip on the Southern Hikurangi Subduction Zone Following the Kaikōura Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 45(10): 4710-4718. doi: 10.1002/2018GL077385

Wang, B., Liu, Y., Sun, X., et al., 2018. Hydrogeological and Geochemical Observations for Earthquake Prediction Research in China: A Brief Overview. *Pure and Applied Geophysics*, 175(7): 2541-2555. doi: 10.1007/s00024-018-1885-y

Wang, G. Z., 1996. Premier Zhou Enlai and China's Guiding Principles for Seismic Work. *Earthquake Research in China*, 12(3): 335-338. (in Chinese with English abstract).

Wang, J., Wang, T. J., Yang, Y. Y., et al., 2018. Monitoring Crustal Media Variation in Wushan Area of Chongqing Municipality by Using Repeated Earthquakes. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 39(6): 16-22. (in Chinese with English abstract).

Wang, J. H., Jiang, H. K., 2022. A Review of the Research Progress of Earthquake Prediction Based on Machine Learning. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 43(S01): 102-104. (in Chinese with English abstract).

Wang, K., Chen, Q.-F., Sun, S., et al., 2006. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3): 757-795. doi: 10.1785/0120050191

Wang, L. W., Zhu, X., Zhu, T., et al., 2011. Multi-Separation Array Geo-Electrical Resistivity Observation System and Its Experimental Observation. *Earthquake*, 31(1): 20-31. (in Chinese with English abstract).

Wang, Q., Guo, Y., Yu, L., et al., 2020. Earthquake Prediction Based on Spatio-Temporal Data Mining: An LSTM Network Approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 8(1): 148-158. doi: 10.1109/TETC.2017.2699169

Wang, Q., Zhang, Y., Zhang, J., et al., 2024. On the Use of VMD-LSTM Neural Network for Approximate Earthquake Prediction. *Natural Hazards*, 120(14): 13351-13367. doi: 10.1007/s11069-024-06724-9

Wang, W. M., Zhao, L. F., Li, J., et al., 2008. Rupture Process of the M8.0 Wenchuan Earthquake of Sichuan, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1403-1410. (in Chinese with English abstract).

Wang, W. M., Tan, D. C., 2020. Correlation Characteristics of the Geoelectric Field with Multi-Azimuth and Multi-Pole Distance for the Same Field. *Acta Seismologica Sinica*, 42(4): 419-434. (in Chinese with English abstract).

Warren-Smith, E., Fry, B., Kaneko, Y., et al., 2018. Foreshocks and Delayed Triggering of the 2016 MW7. 1 Te Araroa Earthquake and Dynamic Reinvigoration of Its Aftershock Sequence by the MW7. 8 Kaikōura Earthquake, New Zealand.

Earth and Planetary Science Letters, 482: 265-276. doi: 10.1016/j.epsl.2017.11.020

Wibberley, C. A., Yielding, G., Di Toro, G., 2008. Recent Advances in the Understanding of Fault Zone Internal Structure: A Review. *Geological Society*, London, Special Publications, 299(1): 5-33. doi: 10.1144/SP299.2

Wood, H. O., Gutenberg, B., 1935. Earthquake Prediction. *Science*, 82(2123): 141-145.

Working Group of M7, 2012. Study on the Mid-to Long-Term Potential of Large Earthquakes on the Chinese Continent. Seismological Press, Beijing, 1-336. (in Chinese with English abstract).

Working Group on Twenty-Year Development Design of Earthquake Prediction and Forecasting, 2018. Important Scientific and Technological Challenges Related to Earthquake Prediction and Forecasting. Beijing: Seismological Press. (in Chinese).

Wu, M. Q., Wang, Q., Wang, H. B., 2025. Thermal Structure, Fluid Activity and Earthquake Mechanisms of Oceanic Subduction Zones. *Science China Earth Sciences*, 55(4): 1044-1078. (in Chinese with English abstract).

Wu, Y., Chen, S., 2023. Traffic Resilience Modeling for Post-Earthquake Emergency Medical Response and Planning Considering Disrupted Infrastructure and Dislocated Residents. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 93: 103754. doi: 10.1016/j.ijdrr.2023.103754

Wu, Z. B., Zou, K., Su, J. R., et al., 2024. Crustal Velocity Structure beneath the Eastern Tibetan Plateau Derived from Double-Difference Travel-Time Tomography. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(3): 871-888. (in Chinese with English abstract).

Wu, Z. H., Zhao, G. M., 2013. The Earthquake Prediction Status and Related Problems: A Review. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1493-1512. (in Chinese with English abstract).

Wu, Z. L., Chen, Y. T., 2002. Earthquake Prediction and Statistical Physics. *Physics*, 31(6): 0-0. (in Chinese with English abstract).

Wu, Z. L., Wang, L., Li, L., et al., 2021a. China Seismic Experimental Site (CSES): Earthquake Forecast and System Design. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(6): 679-683. (in Chinese with English abstract).

Wyss, M., 1997. Cannot Earthquakes Be Predicted? *Science*, 278(5337): 487-490.

Xin, J. C., 2020. Analysis of Geoelectric Field Anomalies before the 2017 Jiuzhaigou Earthquake. *Earthquake Research in Shanxi*, (4): 22-25. (in Chinese with English abstract).

Xiong, X., Wu, H., Feng, Y. S., et al., 2023. History, Present Situation and Challenge of Probabilistic Analysis of Seismic Activity. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 43(4): 331-338. (in Chinese with English abstract).

Xu, C. J., Wang, L. Y., 2010. Progress of Joint Inversion of Geodetic and Seismological Data for Seismic Source Rupture Process. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 35(4): 457. (in Chinese with English abstract).

Xu, S. X., Wang, B. Q., Zhang, G. Y., et al., 2011. The Foreshock Sequence of Haicheng Earthquake and Earthquake Swarm the Use of --Foreshock Sequences in Earthquake Prediction. *Acta Seismologica Sinica*, 3(1): 1-10. (in Chinese with English abstract).

Xu, X. W., Wen, X. Z., Ye, J. Q., et al., 2008. The Ms 8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, (03): 597-629. (in Chinese with English abstract).

Xu, X. W., Li, F., Cheng, J., et al., 2023. Advances in Research on Active Faults and Exploration of Relevant Frontier Scientific Problems. *Coal Geology & Exploration*, 51(12). (in Chinese with English abstract).

Yamazaki, Y., 1965. Electrical Conductivity of Strained Rocks, the First Paper, Laboratory Experiments on Sedimentary Rocks. Bull. Earthq. Res. *Inst.*, 43: 783-802.

Yamazaki, Y., 1966. Electrical Conductivity of Strained Rocks, the Second Paper, Further Experiments on Sedimentary Rocks. Bull. Earthq. Res. *Inst.*, 44: 1553-1570.

Yan, H., Dai, W., Liu, H., et al., 2022a. Fusion of Spatially Heterogeneous GNSS and InSAR Deformation Data Using a Multiresolution Segmentation Algorithm and Its Application in the Inversion of Slip Distribution. *Remote Sensing*, 14(14): 3293. doi: 10.3390/rs14143293

Yan, Y., Zhou, X., Liao, L., et al., 2022b. Hydrogeochemical Characteristic of Geothermal Water and Precursory Anomalies

along the Xianshuihe Fault Zone, Southwestern China. *Water*, 14(4): 550. doi: 10.3390/w14040550

Yáñez-Cuadra, V., Moreno, M., Ortega-Culaciati, F., et al., 2023. Mosaicking Andean Morphostructure and Seismic Cycle Crustal Deformation Patterns Using GNSS Velocities and Machine Learning. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1096238. doi: 10.3389/feart.2023.1096238

Yang, J., Ding, R. W., Lin, N. T., et al., 2021. Research Progress of Intelligent Identification of Seismic Faults Based on Deep Learning. *Progressin Geophysics*, 37(1): 298-311. (in Chinese with English abstract).

Yang, L., Sun, S. Z., 2020. Seismic Horizon Tracking Using a Deep Convolutional Neural Network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187: 106709. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106709

Yang, M. Z., Zhang, W. X., Zhao, H. Y., 1986. The Study on the Response Coefficients in the Apparent Resistivity in Horizontal Layered Medium. *Northwestern Seismological Journal*, 8(2): 25-37. (in Chinese with English abstract).

Yang, Q. Y., Zhang, Y., Fu, L. Y., et al., 2020. Coupling Mechanism of Stress Variation and Groundwater (Water Level, Water Temperature, Hydrochemistry, Soil Gas, etc.) and Its Application in Earthquake Precursors Research in Sichuan and Yunnan Regions. *Progress in Geophysics*, 35(6): 2124-2133. (in Chinese with English abstract). doi: 10.6038/pg2020DD0404

Yang, Y., Chen, Q., Xu, Q., et al., 2018. Source Model and Coulomb Stress Change of the 2015 Mw 7.8 Gorkha Earthquake Determined from Improved Inversion of Geodetic Surface Deformation Observations: Y. Yang Et Al. *Journal of Geodesy*, 93(3): 333-351. doi: 10.1007/s00190-018-1164-9

Yao, Q., Wang, H., Liu, J., et al., 2023. A Hybrid Method of Earthquake Forecasting Based on Numerical Simulation and Seismicity Statistics; An Application to China Seismic Experimental Site. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(10): 4162-4175. (in Chinese with English abstract).

Yin, X. F., Li, W. J., Xu, Y. C., et al., 2024. Machine Learning Earthquake Prediction Method Based on Seismic Activity Images and Its Application in North China. *Acta Seismologica Sinica*, 46(2): 257-272. (in Chinese with English abstract).

Yu, H., Yan, R., Deng, S., et al., 2024. Improved Medium-to-Short-Term Earthquake Predictions in China in 2022. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 15(1): 2350482. doi: 10.1080/19475705.2024.2350482

Yuan, D. B., Zhang, Z. C., Zhang, J., et al., 2020. Application of Optimized Fractional Order EGM (1,1) Model in Deformation Monitoring and Forecasting. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 40(4): 331-334. (in Chinese with English abstract).

Yuan, D. Y., Wang, Y. L., Li, S. W., et al., 2023. Critical Links and Development Trends of Research on Active Tectonics. *Coal Geology & Exploration*, 51(12): 17-28. (in Chinese with English abstract).

Yuce, G., Ugurluoglu, D. Y., Adar, N., et al., 2010. Monitoring of Earthquake Precursors by Multi-Parameter Stations in Eskisehir Region (Turkey). *Applied Geochemistry*, 25(4): 572-579. doi: 10.1016/j.apgeochem.2010.01.013

Yue, M. S., 2005. Strategic Considerations for the Development of Earthquake Prediction Research. *Recent Developments in World Seismobgy*, (5): 7-21. (in Chinese with English abstract).

Zafrir, H., Steinitz, G., Malik, U., et al., 2009. Response of Radon in a Seismic Calibration Explosion, Israel. *Radiation Measurements*, 44(2): 193-198. doi: 10.1016/j.radmeas.2009.01.002

Zechar, J. D., Schorlemmer, D., Liukis, M., et al., 2010. The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability Perspective on Computational Earthquake Science. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 22(12): 1836-1847. doi: 10.1002/cpe.1519

Zeren, Z., Yang, Y., Yan, R., et al., 2025. The Representative Scientific Results of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earthquake Research Advances*, 5(1): 100314. doi: 10.1016/j.eqrea.2024.100314

Zhang, B., Yang, X. H., Lu, Y. Z., 2007. On Seismological Synthesis Forecasting Method Taking Heze Earthquake as a Case. *Earthquake*, 27(4): 27-35. (in Chinese with English abstract).

Zhang, B., Cheng, H. H., Shi, Y. L., 2015. Calculation of the Co-Seismic Effect of Ms8.1 Earthquake, Apirl 25, 2015, Nepal. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(5): 1794-1803. (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. M., Li, L., Li, K. W., et al., 2001. Group Strong Earthquakes and Triggering by Tidal Stress. *Earthquake Research in*

China, 17(2): 110-120. (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. M., 2002. The Main Science Advance of Earthquake Monitoring and Prediction in China. *Earthquake*, 22(1): 2-8. (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. M., Zhang, X. D., Wu, R. H., et al., 2005. Retrospect of Earthquake Forecast and Prospect. *Recent Developments in World Seismology*, (5): 39-53. (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. Q., Zhu, Y. Q., Liang, W. F., et al., 2018. Spatial Patterns of Regional Gravity Changes before the 2008 and 2014 Yutian Ms7. 3 Earthquakes. *Earthquake*, 38(4): 14-21. (in Chinese with English abstract).

Zhang, K. L., Ma, J., Wei, D. P., 2013. Detection of Gravity Anomalies before the 2011 Ms 9.0 Tohoku-Oki Earthquake Using Superconducting Gravimeters. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(7): 2292-2302. (in Chinese with English abstract).

Zhang, M. S., Liu, H. Q., Liang, G. B., et al., 2023. Earthquake Precursors and Short-Impending Prediction of Strong Earthquakes Based on Dynamic Gravity Information. *Northwestern Geology*, 56(3): 1-18. (in Chinese with English abstract).

Zhang, S., Shi, Z., Wang, G., et al., 2020. Groundwater Radon Precursor Anomalies Identification by Decision Tree Method. *Applied Geochemistry*, 121: 104696. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104696

Zhang, T. J., 1981. Experimental Study on the Variations in Apparent Resistivity Associated with the Stress-Strain State of the Rock-Walls in the Underground Mine Tunnels. *China Earthquake Engineering Journal*, 3(1): 1-24. (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. W., Zhang, Y. Q., Huang, Y. P., et al., 2021. Research Progress and Prospect of Seismic Ambient Noise Tomography. *Progress in Geophysics*, 37(1): 125-141. (in Chinese with English abstract).

Zhang, X., Fidani, C., Huang, J., et al., 2013. Burst Increases of Precipitating Electrons Recorded by the DEMETER Satellite before Strong Earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 197-209. doi: 10.5194/nhess-13-197-2013

Zhang, X. D., Fu, Z. X., Zhang, Y. X., et al., 2003. Studies and Experiments on Earthquake Prediction during 1999-2002. *Acta Seismologica Sinica*, 25(5): 479-491. (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. M., Shen, X. H., Zhao, S. F., et al., 2016. The Seismo-Ionospheric Monitoring Technologies and Their Application Research Development. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 356-375. (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. M., Shen, X. H., 2022. The Development in Seismo-Ionospheric Coupling Mechanism. *Progress in Earthquake Sciences*, 52(5): 193-202. (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Feng, W., Xu, L., et al., 2008. Spatio-Temporal Rupture Process of the 2008 Great Wenchuan Earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(2): 145-154. doi: 10.1007/s11430-008-0148-7

Zhang, Y., Bi, J. M., Jiang, Z. S., 2024. Scientific Plans and Concepts of Associated Researches on Earthquake Forecast in Japan for Recent Years. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(2): 135-139. (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z., Cheng, W., Ruan, X., et al., 2009. The Seismicity and Tectonic Stress Field Characteristics of the Longmenshan Fault Zone before the Wenchuan M S8. 0 Earthquake. *Earthquake Science*, 22(2): 119-128. doi: 10.1007/s11589-009-0119-x

Zhang, Z., Wang, Y., 2024. A Global Earthquake Prediction Model Based on Spherical Convolutional LSTM. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-10. doi: 10.1109/tgrs.2024.3380573

Zhang, Z. C., Zhang, W., 2016. Discussion on Scientific and Practical Issues of Earthquake Prediction Feasibility. *Acta Seismologica Sinica*, 38(4): 564-579. (in Chinese with English abstract). doi: 10.11939/jass.2016.04.004

Zhao, G. Z., Chen, X. B., Cai, J. T., 2007. Electromagnetic Observation by Satellite and Earthquake Prediction. *Progress in Geophysics*, 22(3): 667-673. (in Chinese with English abstract).

Zhao, G. Z., Zhang, X. M., Cai, J. T., et al., 2022. A Review of Seismo-Electromagnetic Research in China. *Science China Earth Sciences*, 52(8): 1499-1515. (in Chinese with English abstract).

Zhao, H. Y., Zhang, W. X., Yang, M. Z., 1985. Characteristic Influences of Different Depths in Horizontal Layered Media on Variations of Surface ρS. *Earthquake*, 6: 33-40. (in Chinese with English abstract).

Zhao, H. Y., Qian, J. D., 1987. Inversion and Analysis of Data of Temporal Change in Apparent Resistivity with

Multi-Separations in Pixian Stations, Sichuan Province. *Earthquake Research in China*, 3(Z1): 73-78. (in Chinese with English abstract).

Zhao, J., Liu, J., Ren, J., et al., 2019. Deformation Evolution Characteristics Revealed by GPS and Cross-Fault Leveling Data before the M_S8. 0 Wenchuan Earthquake. *Earthquake Research in China*, 3.

Zhao, W. Z., Ma, Q. Z., Li, W., et al., 2022. Selectivity Phenomenon of Artificial-Source Geoelectric Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(5): 1742-1752. (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Liu, Z., Li, Y., et al., 2021. A Case Study of 10 Years Groundwater Radon Monitoring along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and in Its Adjacent Regions: Implications for Earthquake Surveillance. *Applied Geochemistry*, 131: 105014. doi: 10.1016/j.apgeochem.2021.105014

Zhao, Y. H., Yang, J. Y., Hui, H. J., et al., 2014. Earthquake Prediction Methods I: Review. *Progress in Geophysics*, 29(1): 129-140. (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. H., Xie, Y. Q., Wang, H., et al., 2017b. Earthquake PredictionV: Subsurface Fluid Method. *Progress in Geophysics*, 32(4): 1539-1547. (in Chinese with English abstract). doi: 10.6038/pg20170417

Zhao, Y. H., Xiao, Y. J., Zhang, Q., et al., 2018. Earthquake Prediction VII: Geochemical Method. *Progress in Geophysics*, 33(3): 1022-1028. (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. L., Qian, F. Y., Yang, T. C., et al., 1983. Experiments in Situ of Electrical Resistivity Changes. *Acta Seismologica Sinica*, 5(2): 217-225. (in Chinese with English abstract).

Zheng, Z. B., Zhang, G. M., He, K., et al., 2006. Statistics and Analyses of the Anomalies of Earthquake Cases in China's Mainland. *Earthquake*, 26(2): 29-37. (in Chinese with English abstract).

Zhou, X., Cambiotti, G., Sun, W. K., et al., 2018. Co-Seismic Slip Distribution of the 2011 Tohoku (Mw9.0) Earthquake Inverted from GPS and Space-Borne Gravimetric Data. *Earth and Planetary Physics*, 2(2): 120-138. doi: 10.26464/epp2018013

Zhu, H., Wen, X., 2010. Static Stress Triggering Effects Related with Ms8.0 Wenchuan Earthquake. *Journal of Earth Science*, 21(1): 32-41. doi: 10.1007/s12583-010-0001-8

Zhu, R., Yang, F., Zhou, X., et al., 2024. Anomaly Detection Using Machine Learning in Hydrochemical Data from Hot Springs: Implications for Earthquake Prediction. *Water Resources Research*, 60(6): e2023WR034748. doi: 10.1029/2023WR034748

Zhu, X. L., Xu, K. K., Hou, Z., et al., 2021. GNSS Inversion of Fault Locking and Fault Slip Deficit of the Red River Fault Zone. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 41(3): 296-300. (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. Q., Luo, X. L., Guo, Z. Q., et al., 1991. A Study of Mechanism on Electromagnetic Emission Associated with Rock Fracture. *Chinese Journal of Geophysics*, 34(5): 594-601. (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. Q., Wen, X. Z., Sun, H. P., et al., 2013. Gravity Changes before the Lushan, Sichuan, Ms7.0 Earthquake of 2013. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(6): 1887-1894. (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. Q., Liang, W. F., Zhao, Y. F., et al., 2017. Gravity Changes before the Jiuzhaigou, Sichuan, Ms7. 0 Earthquake of 2017. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(10): 4124-4131. (in Chinese with English abstract).

Zlydenko, O., Elidan, G., Hassidim, A., et al., 2023. A Neural Encoder for Earthquake Rate Forecasting. *Scientific Reports*, 13(1): 12350. doi: 10.1038/s41598-023-38033-9

Zmazek, B., Italiano, F., živčić, M., et al., 2002. Geochemical Monitoring of Thermal Waters in Slovenia: Relationships to Seismic Activity. *Applied Radiation and Isotopes*, 57(6): 919-930. doi: 10.1016/S0969-8043(02)00200-2

Zuo, Z. R., Wu, J. P., Wu, Z. L., 1995. Foreshock Sequence Analysis of the 1975 Haicheng, Liaoning, MS7.3 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 17(4): 493-498. (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安张辉，杜学彬，范莹莹，等，2011. 汶川Ms8.0级大震前天基与陆基电场资料联合应用研究. 地球物理学报，54(11): 2876-2884.

安张辉，杜学彬，范莹莹，等，2020. 2013年芦山Ms7.0地震前地电场变化特征研究. 地震，35(1): 91-99.

车用太，鱼金子，2006. 地震地下流体学. 气象出版社，1-498.

车用太，刘成龙，鱼金子，等，2008. 汶川MS8.0地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考. 地震地质，30(4): 828-838.
车用太，鱼金子，刘成龙，2009. 汶川地震的异常及地震预测问题. 防灾科技学院学报，11(1): 1-5.
车用太，鱼金子，2014. 地壳流体对地震活动的影响与控制作用. 国际地震动态，35(8): 1-9.
陈建业，杨晓松，2012. 地震断层的渗透性. 地学前缘，19(4): 30-41.
陈立德，付虹，邬成栋，2008. 强震短临前兆异常共性特征的物理基础. 地震研究，31(2): 99-102.
陈棋福，2005. 海城地震预报过程的回顾及地震预报发展的思考. 国际地震动态(5): 154-155.
陈学忠，吕晓健，王慧敏，2022. 中国大陆地震活跃期和平静期的b值与地震趋势研究. 地震，21(1): 59-62.
陈运泰，顾浩鼎，卢造勋，1980. 1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化. 地震学报(1): 21-31.
陈运泰，2007. 地震预测——进展、困难与前景. 地震地磁观测与研究(2): 1-24.
陈运泰，2009a. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学(D辑: 地球科学)，39(12): 1633-1658.
陈运泰，杨智娴，张勇，等，2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学，43(6): 1064-1072.
丁鉴海，申旭辉，潘威炎，等，2006. 地震电磁前兆研究进展. 电波科学学报，21(5): 791-801.
“地震预测预报二十年发展设计”工作组，2018. 地震预测预报相关的重要科技挑战. 北京: 地震出版社.
杜建国，李营，崔月菊，等，2018. 地震流体地球化学. 地震出版社，1-272.
杜学彬，李宁，叶青，等，2007. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. 地球物理学报，50(6): 1802-1810.
杜学彬，2008. 地震预报中的两类视电阻率变化. 国际地震动态，29(11): 143.
杜学彬，刘君，崔腾发，等，2015. 两次近距离大震前成都台视电阻率重现性、相似性和各向异性变化. 地球物理学报，58(2): 576-588.
段庆宝，杨晓松，陈建业，2015. 地震断层带流体作用的岩石物理和地球化学响应研究综述. 地球物理学进展，30(6): 2448-2462.
范莹莹，杜学彬，谭大成，等，2010. 汶川Ms8.0大震前的电磁现象. 地球物理学报，53(12): 2887-2898.
冯亮亮，邵辉成，2020. 鄂尔多斯周缘地区中强震发生前地震矩加速释放时空特征. 地震地磁观测与研究，41(3): 12-22.
冯锐，庞庆衍，傅征祥，等，1976. 海城地震前后地震波速比的变化. 地球物理学报，19(4): 295-305.
付虹，李永莉，赵小艳，等，2008. 云南M≥5地震震前异常的统计特征. 地震研究，31(4): 335-339.
顾国华，王武星，2020. GPS观测得到的大地震前兆地壳形变震例. 地震科学进展，50(10): 30-39.
顾国华，2023. GNSS测得的大地震前兆水平形变. 中国地震，39(4): 721-731.
顾瑾平，2000. 非线性震级频次关系在时间项短临预测中的应用. 地震，20(z1): 51-57.
顾瑾萍，张晓东，黄辅琼，等，2004. 我国震例前兆异常统计特征和应用研究. 地震，24(2): 59-65.
虢顺民，李志义，程绍平，等，1977. 唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论. 地质科学，12(4): 305-321.
郭自强，周大庄，施行觉，等，1988. 岩石破裂中的电子发射. 地球物理学报，31(5): 566-571.
国家地震局，1982. 一九七六年唐山地震. 地震出版社，1-459.
郝锦绮，刘力强，龙海丽，等，2004. 双轴压力下岩样自电位变化实验的新结果. 地球物理学报，47(3): 475-482.
何康，郑海刚，李军辉，等，2016. 基于震例的地震电磁异常特征研究. 地震，36(4): 144-152.
黄禄渊，张贝，瞿武林，等，2017. 2010智利Maule特大地震的同震效应. 地球物理学报，60(3): 972-984.
黄清华，刘涛，2006. 新岛台地电场的潮汐响应与地震. 地球物理学报，49(6): 1745-1754.
黄清华，林玉峰，2010. 地震电信号选择性数值模拟及可能影响因素. 地球物理学报，53(3): 535-543.
贾科，周仕勇，2022. 断层相互作用与地震触发机制研究回顾与展望. 地球与行星物理论评，54(5): 477-497.
蒋海昆，苗青壮，吴琼，等，2009. 基于震例的前兆统计特征分析. 地震学报，31(3): 245-259.
江在森，杨国华，王敏，等，2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究. 大地测量与地球动力学，26(3): 1-9.
江在森，方颖，武艳强，等，2009. 汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程. 地球物理学报，52(2): 505-518.
江在森，武艳强，邹镇宇，等，2020. GNSS在中国大陆的地震预测应用研究进展与展望. 中国地震，36(4): 693-707.
蒋长胜，吴忠良，2009. 强震前的 “加速矩释放”(AMR) 现象: 对一个有争议的地震前兆的回溯性震例研究. 地球物理学报，52(3): 691-702.

解滔，卢军，2020. 含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化. 地球物理学报，63(4): 1675-1694.
金安忠，1981a. 地电阻率正常变化的初步研究. 地球物理学报，24(1): 92-106.
金安忠，1981b. 地电阻率正常变化与电剖面的关系. 地震学报，3(4): 421-428.
李营，陈志，胡乐，等，2022. 流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用. 科学通报，67(13): 1404-1420.
李营，方震，张晨蕾，等，2023. 地震流体地球化学短临预测研究进展与展望. 地震地质，45(3): 593-621.
李永莉，毛慧玲，付虹，2007. 2007年宁洱6.4级地震前地震学异常的动态演化. 地震研究，30(4): 318-323.
刘春国，晏锐，樊春燕，等，2022. 我国地震地下流体监测现状分析及展望. 地震研究，45(2): 161-172 doi: 10.20015/j.cnki.issn1000-0666.2022.0032
刘欢，赵润卓，董浩斌，2023. 基于高阶磁异常导数与高阶统计量的地震短临预测方法. 地球科学，49(8): 2952-2960.
刘雷，李玉江，季灵运，2024. 构造转换区强震间相互作用机制的数值模拟研究：以2008—2020年4次Ms>6.0于田地震为例. 地球物理学报，67(1).
刘丽芳，苏有锦，秦嘉政，等，2007. 2007年宁洱6.4级地震序列及中短期地震学异常演化特征研究. 地震研究，30(4): 324-330.
刘喜亮，高雅婧，2023. 数值地震预测研究方向展望. 地震地磁观测与研究，44(S1): 149-150.
刘耀炜，陈华静，车用太，2006. 我国地震地下流体观测研究40年发展与展望. 国际地震动态，7(3): 12.
M7专项工作组，2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究. 北京：地震出版社，1-336.
马钦忠，方国庆，李伟，等，2013. 芦山Ms 7.0地震前的电磁异常信号. 地震学报，35(5): 717-730.
马钦忠，李伟，张继红，等，2014. 与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究. 地球物理学报，57(2): 518-530.
马钦忠，钱家栋，李伟，等，2016. 源自多个大电流源的华东地区地电场空间变化特征. 地球物理学报，59(7): 2598-2614.
梅世蓉，梁北援，1989. 唐山地震孕震过程的数值模拟. 中国地震，5(3): 9-17.
梅世蓉，冯德益，张国民，等，1993. 中国地震预报概论. 北京：地震出版社.
孟宪森，2023. 地震预测工作的几个问题讨论. 地震地磁观测与研究，44(增刊1): S1.078. doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2023
缪淼，朱守彪，2012. 地下流体对地震孕育发生过程的影响研究综述. 地球物理学进展，27(3): 950-959.
裴玮来，周仕勇，庄建仓，等，2021. 统计地震学在地震危险性概率预测方法研究中的应用与讨论. 中国科学: 地球科学，51(12): 2035-2047.
祁贵仲，1978. “膨胀”磁效应. 地球物理学报，21(1): 18-33.
钱复业，赵玉林，于谋明，等，1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学(B辑化学生物学农学医学地学)，3.
钱复业，赵玉林，2005. 地电场短临预报方法研究. 地震，25(2): 33-40.
钱家栋，赵和云，张文孝，1986. 水平层状介质视电阻率的高精度计算公式及其误差分析. 西北地震学报，8(2): 10-19.
钱家栋，赵和云，1988. 地电阻率的数值模拟和多极距观测系统. 地震学报，10(1): 77-89.
钱家栋，1993. 与大震孕育过程有关的地电阻率变化研究. 中国地震，9(4): 341-350.
钱家栋，虞雪君，曹爱民，等，2013. 水平层状介质视波速比响应特性的数值模拟. 地震，33(1): 1-11.
钱书清，郝锦绮，周建国，等，2003. 岩石受压破裂的ULF和LF电磁前兆信号. 中国地震，19(2): 109-116.
瞿武林，张贝，黄禄渊，等，2017. 2004年Mw9.3苏门答腊地震产生的库仑应力. 中国科学院大学学报，1(34).
邵志刚，张国民，李志雄，等，2008. 中国大陆活动地块边界带地震活动过程及其趋势研究. 地震，28(3): 33-42.
邵志刚，刘琦，潘正洋，等，2025. 中国陆区未来1-3年地震趋势与长期危险区发震紧迫程度预测研究. 地震，45(1): 214-260.
申文豪，薛腾飞，张景发，等，2018. 基于速率-状态摩擦定律的地震二维准动力学数值模拟：浅层正应力变化对断层演化的影响. 地球物理学报，61(8): 3198-3210.
申旭辉，黄建平，林剑，等，2022. 地球物理探测卫星数据分析处理技术与地震预测应用研究项目及研究进展. 地震科学进展，52(1): 1-25 doi: 10.19987/j.dzkxjz.2021-103
施得旸，刘耀炜，2023. 地下流体在地震孕育中的主要作用与流体前兆形成机制研究进展. 中国地震，39(3): 453-471.
石特临，郭大庆，1995. 地震学中非线性预测方法的初步研究. 地球科学进展，10(3): 273.
孙文科，2012. 地震位错理论. 北京：科学出版社.

孙小龙，刘耀炜，付虹，等，2020. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾. 地震研究，43(2): 216-231.
谭大诚，赵家骝，席继楼，等，2010. 潮汐地电场特征及机理研究. 地球物理学报，53(3): 544-555.
谭大诚，王兰炜，赵家骝，等，2011. 潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素. 地球物理学报，54(7): 1842-1853.
谭大诚，席继楼，张慧，等，2013. 地电场水文地质因素及裂隙水 主体渗流方向逐日计算. 地震学报，35(1): 36-49.
谭大诚，赵家骝，刘小凤，等，2014. 自然电场的区域性变化特征. 地球物理学报，57(5): 1588-1598.
谭大诚，辛建村，王建军，等，2019. 大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析. 地球物理学报，62(2): 558-571.
唐河，孙文科，2020. 黏弹地球地震变形理论研究进展和展望. 地球与行星物理论评，52(1): 11-26.
天娇，朱瑞杰，琚长辉，等，2024. 温泉水化学变化在地震监测预测中的研究进展. 地震，44(4): 97-115.
王国治，1996. 周恩来总理与我国的地震工作方针. 中国地震，12(3): 335-338.
汪建，王同军，杨亚运，等，2018. 利用重复地震观测重庆巫山地区地壳介质变化. 地震地磁观测与研究，39(6): 16-22.
王锦红，蒋海昆，2022. 基于机器学习的地震预测研究进展综述. 地震地磁观测与研究，43(S01): 102-104.
王兰炜，朱旭，朱涛，等，2011. 地电阻率多极距观测系统及试验研究. 地震，31(1): 20-31.
王卫民，赵连锋，李娟，等，2008. 四川汶川8.0级地震震源过程. 地球物理学报，51(5): 1403-1410.
王玮铭，谭大诚，2020. 同场地多方位多极距地电场相关特性. 地震学报，42(4): 419-434.
武梅千，王勤，王海波，2025. 大洋俯冲带的热结构、流体活动与地震机制. 中国科学: 地球科学，55(4): 1044-1078.
武振波，邹昆，苏金蓉，等，2024. 利用双差走时成像研究青藏高原东缘地壳速度结构. 地球物理学报，67(3): 871-888.
吴中海，赵根模，2013. 地震预报现状及相关问题综述. 地质通报，32(10): 1493-1512.
吴忠良，陈运泰，2002. 地震预测与统计物理. 物理，31(6): 0-0.
吴忠良，王龙，李丽，等，2021. 中国地震科学实验场: 地震预测与系统设计. 地球与行星物理论评，52(6): 679-683.
熊熊，吴杭，冯雅杉，等，2023. 地震活动性概率分析研究的历史，现状与挑战. 大地测量与地球动力学，43(4): 331-338.
许才军，王乐洋，2010. 大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程研究进展. 武汉大学学报(信息科学版)，35(4): 457.
许绍燮，王碧泉，章光月，等，2011. 海城地震前震系列与震群--兼论前震系列在地震预报中的一种功能. 地震学报，3(1): 1-10.
徐锡伟，闻学泽，叶建青，等，2008. 汶川MS8.0地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质(03): 597-629.
徐锡伟，李峰，程佳，等，2023. 活动断层研究进展及其科学前沿问题讨论. 煤田地质与勘探，51(12).
杨晶，丁仁伟，林年添，等，2021. 基于深度学习的地震断层智能识别研究进展. 地球物理学进展，37(1): 298-311.
杨明芝，张文孝，赵和云，1986. 关于层状介质视电阻率响应系数的研究. 西北地震学报，8(2): 25-37.
杨秋野，张艳，符力耘，等，2020. 应力变化与流体(水位、水温、水化学、土壤气等)变化的耦合机理及其在川滇地区地震前兆研究中的应用. 地球物理学进展，35(6): 2124-2133.
姚琪，王辉，刘杰，等，2023. 基于数值模拟和地震活动性统计的混合地震预测：在中国地震科学实验场的应用. 地球物理学报，66(10): 4162-4175.
尹晓菲，李文军，许英才，等，2024. 基于地震活动图像的机器学习地震预测方法及其在华北地区的应用. 地震学报，46(2): 257-272.
袁道阳，王有林，李树武，等，2023. 活动构造研究的关键环节与发展趋势. 煤田地质与勘探，51(12): 17-28.
袁德宝，张振超，张军，等，2020. 最优化分数阶算子EGM (1，1) 模型在变形监测预报中的应用. 大地测量与地球动力学，40(4): 331-334.
岳明生，2005. 地震预测研究发展战略几点思考. 国际地震动态(5): 7-21.
张贝，程惠红，石耀霖，2015. 2015年4月25日尼泊尔Ms8.1大地震的同震效应. 地球物理学报，58(5): 1794-1803.
张彬，杨选辉，陆远忠，2007. 以菏泽地震为例探讨地震学综合预测方法. 地震，27(4): 27-35.
张国民，李丽，黎凯武，等，2001. 强震成组活动与潮汐力调制触发. 中国地震，17(2): 110-120.
张国民，2002. 我国地震监测预报研究的主要科学进展. 地震，22(1): 2-8.
张国民，张晓东，吴荣辉，等，2005. 地震预报回顾与展望. 国际地震动态(5): 39-53.
张国庆，祝意青，梁伟锋，等，2018. 2008年和2014年两次于田Ms7.3地震前区域重力变化特征. 地震，38(4): 14-21.

张克亮，马瑾，魏东平，2013. 超导重力仪检测2011年日本东北Mw9.0级地震前的重力扰动信号. 地球物理学报，56(7): 2292-2302.
张茂省，刘华强，梁国冰，等，2023. 基于动态重力信息的地震前兆与强震短临预报. 西北地质，56(3): 1-18.
张文文，张永谦，黄跃鹏，等，2021. 地震背景噪声成像技术研究进展与展望. 地球物理学进展，37(1): 125-141.
张晓东，傅征祥，张永仙，等，2003. 1999-2002年地震预报研究进展. 地震学报，25(5): 479-491.
张学民，申旭辉，赵庶凡，等，2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展. 地震学报，38(3): 356-375.
张学民，申旭辉，2022. 地震—电离层圈层耦合机理研究进展及问题思考. 地震科学进展，52(5): 193-202.
张琰，毕金孟，蒋长胜，2024. 日本近年来关于地震预测研究的科学计划和科学理念. 地震科学进展，54(2): 135-139.
张肇诚，张炜，2016. 地震预报可行性的科学与实践问题讨论. 地震学报，38(4): 564-579 doi: 10.11939/jass.2016.04.004
赵国泽，陈小斌，蔡军涛，2007. 电磁卫星和地震预测. 地球物理学进展，22(3): 667-673.
赵国泽，张学民，蔡军涛，等，2022. 中国地震电磁研究现状和发展趋势. 中国科学: 地球科学，52(8): 1499-1515.
赵和云，张文孝，杨明芝，1985. 水平层状介质中不同深度对地表ρs变化的响应特性. 地震，6: 33-40.
赵和云，钱家栋，1987. 郫县台多极距观测资料的反演和分析. 中国地震，3(Z1): 73-78.
赵文舟，马钦忠，李伟，等，2022. 人工源地电场“选择性”现象研究. 地球物理学报，65(5): 1742-1752.
赵永红，杨家英，惠红军，等，2014. 地震预测方法I: 综述. 地球物理学进展，29(1): 129-140.
赵永红，谢雨晴，王航，等，2017. 地震预测方法V: 地下流体方法. 地球物理学进展，32(4): 1539-1547.
赵永红，肖彦君，张琼，等，2018. 地震预测方法VII: 水文地球化学方法. 地球物理学进展，33(3): 1022-1028.
赵玉林，钱复业，杨体成，等，1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报，5(2): 217-225.
郑兆苾，张国民，何康，等，2006. 中国大陆地震震例异常统计与分析. 地震，26(2): 29-37.
中国地震局地震预测研究所，2020. “八五”至“十三五”以来地震监测预报规划回顾[R/OL]. 北京: 中国地震局地震预测研究所，2020. https://www.ief.ac.cn/upload/a5fffe35-d881-45ac-98db-0dae5c0b3593/4.5-2%E2%80%9C%E5%85%AB%E4%BA%94%E2%80%9D%E8%87%B3%E2%80%9C%E5%8D%81%E4%B8%89%E4%BA%94%E2%80%9D%E4%BB%A5%E6%9D%A5%E5%9C%B0%E9%9C%87%E7%9B%91%E6%B5%8B%E9%A2%84%E6%8A%A5%E8%A7%84%E5%88%92%E5%9B%9E%E9%A1%BE.pdf.
中国地震局科学技术委员会办公室，2002. 当前地震预报面临的主要科学问题、解决的科学思路、技术途径及建议. 国际地震动态(8): 2-6.
朱绪林，徐克科，侯争，等，2021. 红河断裂带闭锁程度与滑动亏损分布的GNSS反演. 大地测量与地球动力学，41(3): 296-300.
祝意青，闻学泽，孙和平，等，2013. 2013年四川芦山Ms7.0地震前的重力变化. 地球物理学报，56(6): 1887-1894.
祝意青，梁伟锋，赵云峰，等，2017. 2017年四川九寨沟Ms7.0地震前区域重力场变化. 地球物理学报，60(10): 4124-4131.
朱元清，罗祥麟，郭自强，等，1991. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究. 地球物理学报，34(5): 594-601.
左兆荣，吴建平，巫志玲，1995. 1975年辽宁海城MS7.3地震的前震序列分析. 地震学报，17(4): 493-498.