

国家地震科技创新工程之二

解剖地震

(1.0 版)



中国地震局
CHINA EARTHQUAKE ADMINISTRATION

二〇一七年十一月

目 录

概 况	1
一、重点科技问题	4
二、预期目标	4
三、主要任务	6
(一) 典型震例解剖与大震孕育发生机理研究	6
(二) 断层亚失稳观测与前兆机理研究	10
(三) 活动地块边界带成组地震的孕育演化规律研究.....	14
(四) 地震概率预测与人工诱发地震研究	21
(五) 地震大数据建模与超算模拟研究	28
(六) 地震观测新技术与仪器研发	33
四、组织管理模式	44

概 况

地震是地球运动过程中产生的自然现象。在印度板块与欧亚板块碰撞、太平洋板块西向俯冲的共同作用下，中国大陆成为全球板内地震最为活跃的地区。中国也是世界上地震灾害最为严重的国家之一。

大地震样本少、入地观测困难和孕震机理复杂是制约地震预测研究的主要科学瓶颈。对典型震例进行深入解剖是揭示大震孕育发生机理最重要的科学途径。历史上地震科学的进步往往都是通过对大地震的深入解剖所推动的，只有加强对不同类型强震的研究，分析总结其特有规律，才能逐步提高地震预测的科学水平。

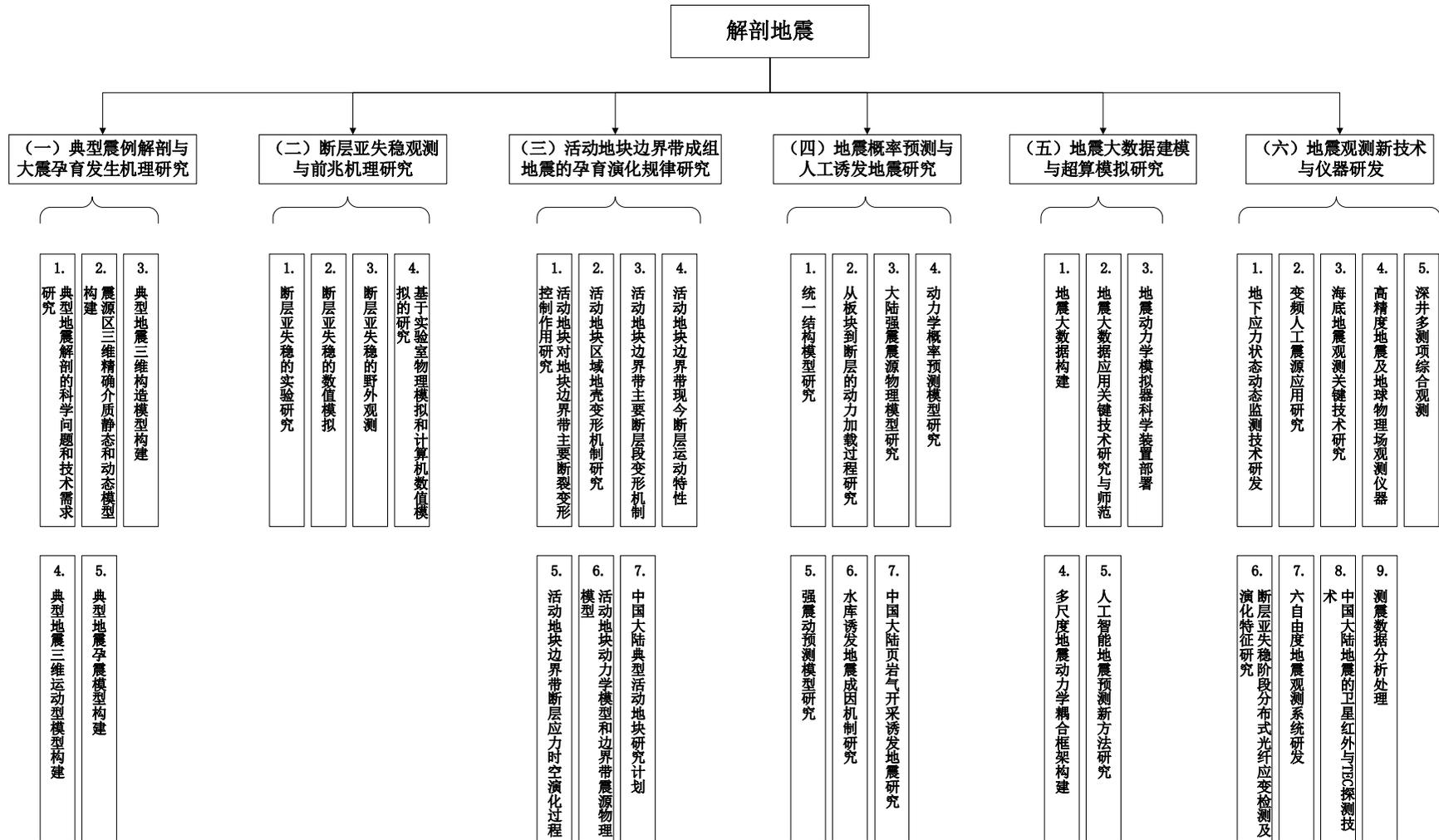
美国从上世纪 60 年代以来，对著名的圣·安德烈斯断层进行了最高密度，手段最丰富的观测和研究，目前正在引领国际地震预报科学研究；日本对阪神大地震、台湾地区对集集大地震等进行了比较深入的解剖研究，这些成果和科学研究思路，对我国的解剖地震研究具有重要的借鉴作用。

目前我国地震监测、探测技术与以往相比有了突破性的进展，时间和空间分辨率得到了大幅度的提高。我国已经开展了一系列大地震综合科学考察，提出并发展了中国大陆地震活动地块理论，开辟了川滇国家地震监测预报实验场，为实施“解剖地震”计划打下了坚实的基础。因此，随着地震预测技术能力的提升和观测资料的丰富，通过深入解剖典型大地震并在此指导下开展实验观测研究，可为大震预测预报取得突破提供重要的科学基础。本计划将深入详细解剖大地

震典型震例，探索断层亚失稳机理、研究活动地块边界带成组地震的孕育演化规律、开展地震概率预测、利用新技术新方法建立强震孕育的数值模型、有目的地针对解剖地震科学研究发展地震监测技术，丰富和发展大陆强震理论，逐步深化对地震孕育发生规律的认识。

针对“解剖地震”计划书的组织编写，牵头单位中国地震局地震预测研究所在中国地震局科学技术司的领导下，向系统内外发函征集“解剖地震”研究计划项目建议，共收到系统外如：中国科学院大学、中国科技大学、北京大学、吉林大学、中国地质大学、南方科技大学、武汉大学、杭州电子科技大学、中国科学院力学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院西北生态研究院、杭州超钜科技有限公司等；共收到系统内如：中国地震局地质所、工力所、地壳所、台网中心、物探中心、应急搜救中心、第一监测中心、第二监测中心、辽宁局、四川局、云南局、新疆局、青海局、宁夏局、甘肃局、陕西局、重庆局、海南局、山东局、广东局、浙江局等 34 家单位共计 80 余项的研究建议。预测所组织专家按照《国家地震科技创新工程》总体框架汇总为 6 项主要任务，含 36 项子任务。在此对提供“解剖地震”研究计划的项目建议单位、相关编写单位和专家表示衷心的感谢。

国家地震科技创新工程之“解剖地震”计划总体框架



一、重点科技问题

典型发震构造模型与地震孕育发生物理过程；断层亚失稳观测与野外识别；活动地块边界带成组地震的孕育演化规律；区域地震概率预测和大数据数值模拟；与地震孕育发生相关的地震观测新技术；标准化、抗干扰、低功耗地震观测仪器设备。

二、预期目标

（一）2020 年目标

完成汶川地震解剖研究，给出孕育发生机理研究结果；开展断层亚失稳室内实验与野外观测比对；初步构建我国大陆活动地块边界带强震发生的动力学模式；建立川滇地震概率预测模型 1.0 版，并给出中长期地震概率预测结果。

（二）2025 年目标

完成选定地震的解剖，开展大震孕育发生机理研究；基于亚失稳阶段演化过程与地震前兆机理，给出识别断层进入亚失稳阶段的判据与方法；给出活动地块边界带成组强震发生的演化规律；构建川滇地区的地震概率预测模型 2.0 版。地震大数据建模和超算模拟研究取得突破，地震观测技术智能化、标准化达到国际水平。

（三）2030 年目标

继续完成大地震深入解剖研究,在此基础上给出不同孕

震构造动力环境的系统认识；基于野外观测亚失稳现象的观测方案，开展观测实验，验证发震断裂进入亚失稳阶段的判据与方法；建立针对活动地块边界带成组强震发生演化规律的数值模型；构建川滇地区的地震概率预测模型 3.0 版；建成地震大数据建模和超算模拟国家重点实验室；地震观测技术智能化、标准化达到国际前沿。

三、主要任务

(一) 典型震例解剖与大震孕育发生机理研究

研究需求和意义：大地震样本少、入地观测困难和孕震机理复杂是制约地震预测的主要科学瓶颈，对典型震例进行深入解剖是揭示大震孕育发生机理最重要的科学途径。目前地震监测、探测技术与以往相比有了突破性的进展，时间和空间分辨率得到了大幅度的提高，为大地震解剖研究奠定了坚实的基础。因此，随着地震预测技术能力的提升和观测资料的丰富，通过深入解剖典型大地震并在此指导下开展实验观测研究，可为大震预测预报取得突破提供重要的科学基础。

国内外研究现状：美国帕克菲尔德实验场，对著名的圣·安德烈斯断层进行了最高密度，手段最丰富的观测，目前正在引领国际地震预报的科学研究。日本对阪神大地震、台湾地区对集集大地震等进行了比较深入的解剖研究，包括：地震震源区精细结构、跨断层深钻探测、深部断层运动、前兆异常与机理等，获得了大量研究成果，这些成果和科学研究思路，对我国的解剖地震研究具有重要的借鉴作用。国内对部分大地震震源区域进行过一定程度探测研究，对 200 多个 5 级以上地震震例进行了总结，尤其是对二十世纪六七十年代发生的九大地震的解剖研究在国内外产生了较大影响。但受限于当时观测的时间、空间分辨率，对特定的构造和震例进行深入研究的程度不够。

研究任务：对海城、唐山、汶川、玉树等典型强震进行详细解剖研究，探索构建不同区域、不同构造类型的孕震模型，深化对地震发生机理的认识；在原有观测资料的基础上，有针对性地获取强震构造区壳幔结构、介质物性、现今地壳运动和构造变形等信息，综合区域变形、断层运动、应力演化与强震孕育发生和后效间的关系，结合岩石物理力学实验结果，构建地震孕震模型，研究地震孕育发生机理，并对观测到的地震前兆给出成因机理解释。

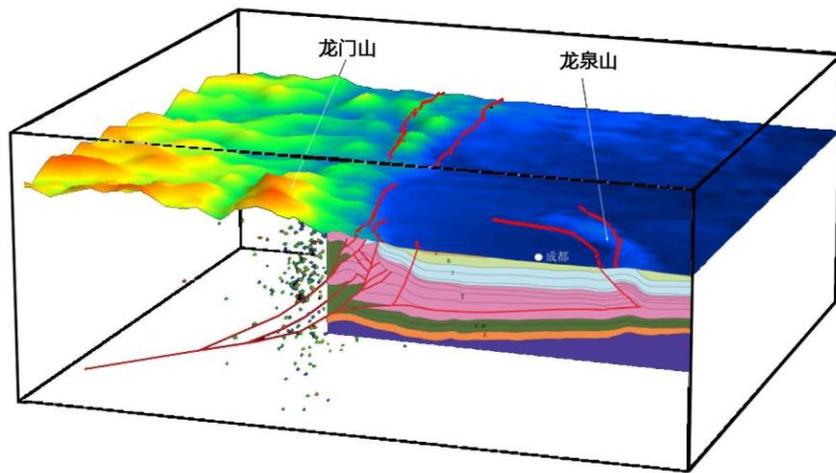


图 1 典型地震震源区地壳和断裂三维结构—以汶川地震为例

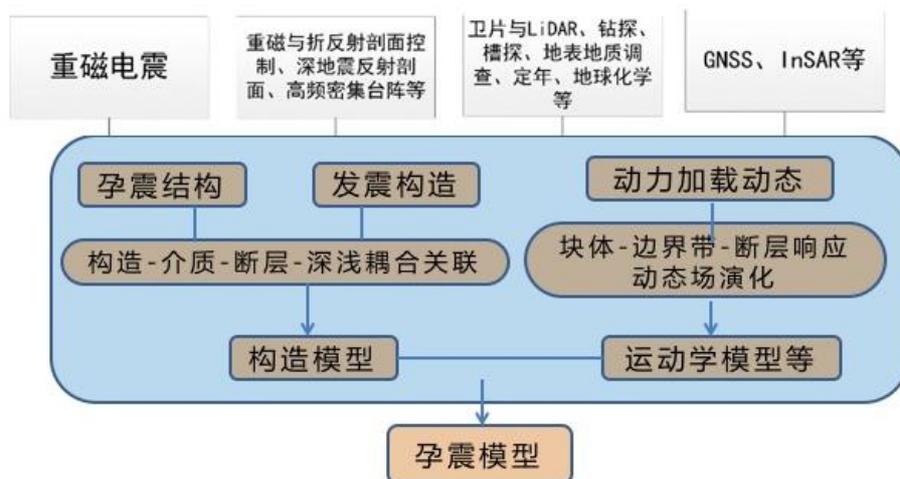


图 2 典型地震解剖科学思路示意图

预期成果：构建断裂带和震源区多尺度高分辨率三维地壳介质速度、密度、电磁等结构；在关键孕震构造，观测空间采样率达到米至百米级别，其它区域达到百米至公里级别，反演分辨率达到公里量级。给出断裂带和震源区地球化学场演化特征，深部物质来源变化趋势和地球深部温压条件改变，建立地球化学前兆成因机理模型。构建区域构造、发震断层、运动学和动力学模型；给出典型异常发生机理解释。

1. 典型地震解剖的科学问题和技术需求研究

对海城、唐山、汶川、玉树等典型强震过程的已有各类观测、考察和研究资料进行系统梳理、研究和问题提炼，提出深入解剖典型地震的科学问题和观测技术需求。针对不同区域、不同构造类型的孕震模型构建提出亟待解决的关键科学问题和观测技术需求；基于对已有和新增观测资料动态变化的研究，提出研究区域介质物性、变形、断层运动、应力状态等随时间演化与地震过程关系的关键科学问题和观测技术需求；给出对不同构造环境下断层活动、地震前兆和活性等资料的系统研究结果。

2. 震源区三维精细介质静态和动态模型构建

按照深入解剖典型地震的科学问题和观测技术需求，在透明地壳观测的基础上，布设高密度流动地震台阵、二维或三维深地震反射和折射、重磁电剖面 and 地球化学观测等，构建静态的孕震区和断层带三维精细介质结构模型。联合地震学和原位应力测量方法，构建区域应力分布结构。

在震源区开展高密度的地球物理、地球化学等连续观测，高密度重磁电剖面多期复测，跨断层深井综合观测等，形成多尺度、多学科的动态监测能力。有效探测和定位蠕滑或颤动等微弱信号，跟踪地震活动性、断层深部滑移、重磁电变化和地球化学场等动态演化特征，给出深部物质和应力的时空迁移图像。结合大震前的异常现象，解剖典型异常的地球物理和地球化学成因机制。

3. 典型地震三维构造模型构建

根据典型地震不同发震构造和沉积环境，通过高分辨率卫星影像解译、野外地质调查、充分利用 LiDAR、无人机航拍、差分 GPS 等手段，获取活动断层的高分辨率 DEM 和地貌数据，对断裂带进行几何和活动性分段。通过大型探槽及组合探槽研究，获取古地震序列及各项参数，厘定断裂的发震能力、复发周期和级联破裂等特征。对覆盖区断裂开展浅层物探和钻孔勘探等，结合区域构造及动力环境分析，震源区三维精细介质模型，构建精细的三维发震构造模型。

4. 典型地震三维运动学模型构建

有针对性地高密度布设 GNSS、InSAR、跨断层形变、定点应力/应变、钻孔形变、重力等连续观测，确保观测数据具有较高的时空分辨率，获取孕震区及发震断层的运动与地壳形变演化特征；开展多源地壳形变观测数据与重力数据融合，结合地震构造、地球物理、地球化学等研究结果，建立高精度的三维地壳运动学模型。通过大量新观测数据的不断

输入，对模型进行检验和逐步优化。

5. 典型地震孕震模型构建

针对典型地震，在“透明地壳”给出的区域孕震背景图像基础上，综合孕震区三维精细介质模型、三维精细构造模型、三维运动学模型、岩石和数值模拟试验给出的本构关系等，研究不同区域不同类型地震的动力学模型，发展中国大陆板内强震孕育、发生、发展的动力学模型，并对板内强震孕震机理和典型异常给出解释。

（二）断层亚失稳观测与前兆机理研究

研究需求和意义：地震伴随断层的快速错动。根据断层整体所处的不同应力阶段，可将其分为弹性变形为主的稳态、伴随局部破裂与应力局部释放的亚稳态、以整体应力准静态和准动态释放为主的亚失稳态和以动态应力释放为主的失稳态（强震发生）四个阶段。亚失稳阶段位于峰值应力和失稳时刻之间，是地震发生前的最后阶段。地震前的变形有一个由慢变快的过程，其中有两个明显的转折点，一个是变形由积累为主转变为释放为主的峰值点，另一个是由准静态向准动态的转折点。峰值后发震断层进入了不可逆变形状态，它的存在是地震可预报性的基本逻辑基石。这是一个震兆最丰富，变化最激烈的阶段，抓住此变形阶段的演化，对于了解地震机理，判断失稳的临近，可以达到事半功倍的效果。

对实验室和野外不同时空尺度、不同结构断层亚失稳阶

段的力学行为开展研究，获取该阶段多物理场时空演化特征，探索识别断层进入亚失稳阶段的判据与方法，为深入研究亚失稳阶段演化过程与发震机理奠定科学基础。

国内外研究现状：断层亚失稳阶段介于断层准静态稳定阶段与动态失稳阶段之间的转换阶段，是开展地震前兆特征与前兆机理研究的关键阶段。构造物理实验表明应力加速释放和断层加速协同化是此阶段的重要特征。有必要在实验室进一步研究影响断层亚失稳过程的各种因素，建立物理和数值模型；同时选择强震活跃地区建立野外实验台网，开展断层亚失稳状态的监测研究；以不同构造部位相互作用及多物理场的演化特征为切入点，完善断层亚失稳理论，为认识地震前兆机理奠定坚实基础。

研究任务：断层亚失稳阶段位于峰值应力和失稳时刻之间，是地震发生前的最后阶段。构造物理实验表明应力加速释放和断层加速协同化是此阶段的重要特征。有必要在实验室进一步研究影响亚失稳态断层演化的各种因素，建立野外实验台网，开展断层亚失稳状态的监测研究。抓住不同构造部位相互作用以及多物理场的演化特征，完善断层亚失稳理论，使之成为认识地震前兆机理的理论基础。相关结果对于了解地震机理，判断失稳的临近十分重要，也可使抽象的理论研究逐步接近实际，更有效地为地震预测服务。

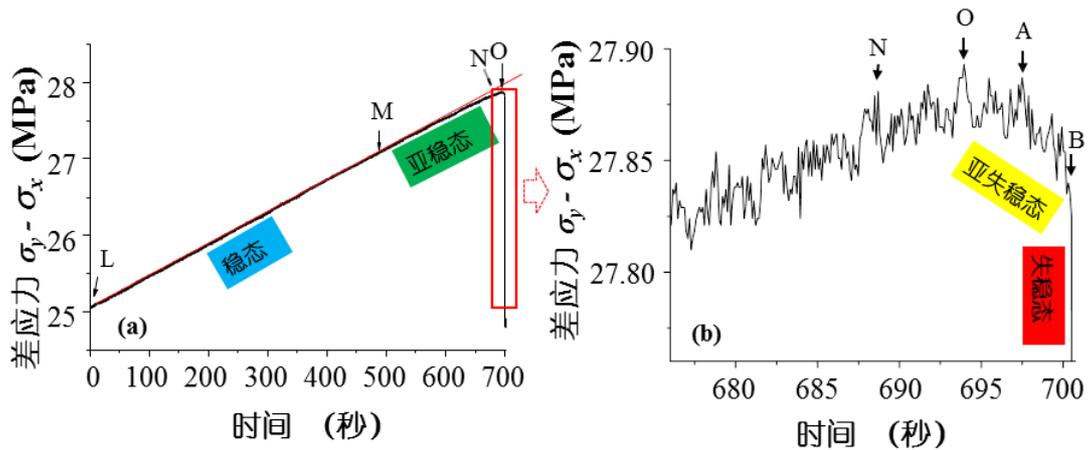


图 3 一次粘滑事件中差应力-时间过程及变形阶段的划分

预期成果：基于构造物理实验获取断层亚失稳阶段多种物理场与微破裂的时空演化特征；断层亚失稳观测方案；进入亚失稳阶段的判据与方法；适合描述断层亚失稳过程的物理模型与数值模型；强震发生的前兆特征及其物理机理；完善的断层亚失稳模型。

1. 断层亚失稳的实验研究

基于构造物理实验，研究不同条件下断层变形破坏进入亚失稳阶段的多物理参数（应力、应变、位移、温度等）变化特征以及与微破裂相关的声发射信号特征，分析研究相关物理量在识别断层亚失稳特征的方法，包括：研究判别断层进入亚失稳阶段的条件；研究断层进入亚失稳阶段的影响因素，如加载条件、构造形式与断层尺度等；研究断层局部预滑区的扩展特征及其对断层亚失稳状态的影响；研究断层亚失稳阶段的微破裂与断层整体失稳之间的关系；研究断层亚失稳阶段瞬态变形场特征及其对失稳过程的影响；研究应变波与断层亚失稳状态的关系；建立适用于描述断层亚失稳状

态的物理模型。

2. 断层亚失稳的数值模拟

结合构造物理实验结果,开展基于速率-状态摩擦本构关系和弹性理论相结合的数值模拟研究,模拟断层几何结构、介质性质、加载速率、环境条件以及流体作用等因素对断层变形过程、特别是亚失稳阶段以及动态破裂过程的可能影响,为分析强震发生与断层闭锁区、成核区的关系以及地震短临前兆的物理机制提供依据。充分考虑实际断层带内部结构的复杂性,结合实验室研究结果,构建断层带三维损伤力学模型,研究断层带上由于岩石破碎和微裂隙产生造成的非弹性变形特征及其对亚失稳和动态破裂过程的影响。基于数值模拟结果,分析不同条件下断层亚失稳阶段的判断标志。

3. 断层亚失稳的野外观测

选择部分地震震例开展回溯性研究,分析地震活动、形变、遥感热红外等观测数据,通过与实验和数值模拟结果的对比,判断震前是否出现亚失稳阶段及其特征表现。同时在川滇地震实验场和西北地区强震活动带选择强震危险性较高的活动断层带,建设实验观测台网,开展不同频带地震观测、断层运动和形变观测、温度观测等,结合区域各种观测资料,分析其现今构造变形模型、动力学背景和现今应力状态,分析其是否处于亚失稳阶段并推断失稳地点,总结亚失稳阶段的演化特征及识别标志。

4. 基于实验室物理模拟和计算机数值模拟的研究

采用构造物理实验和数值模拟两种手段，从区域动力学的角度，研究区域断层几何构建、地壳结构和深部粘弹层对区域应力场和地震活动性的影响和控制。

(三) 活动地块边界带成组地震的孕育演化规律研究

研究需求和意义：中国大陆地区处于欧亚板块、印度板块、太平洋板块相互作用地区，地质构造作用活跃，是全球大陆强震最为活跃地区。在周边板块持续作用下，中国大陆地区形成纵向分层、横向分块的壳幔结构特征，而中国大陆地区强震多发生在块体边界带上的大型断裂带上。中国大陆80%以上的7级以上地震、100%的8级地震均发生在活动地块边界带上。另一方面，中国大陆浅源强震不仅时间上呈现丛集现象，即强震期幕活动特征，而且在空间上也呈现为交替和成组活动现象。例如，1996年11月19日喀喇昆仑7.1级地震以来，中国大陆地区7级以上浅源地震均发生于巴颜喀拉块体边界带上。因此，活动地块边界带成组地震孕育演化规律研究也是中国大陆强震孕育机理研究重要内容。

国内外研究现状：区域强震成组活动机理受到国内外地震学界的广泛关注，当前主要是基于弹簧-滑块或摩擦本构率开展数值模拟，基于数值模拟结果分析强震时空活动特征的机理研究。国内已经建立中国大陆活动地块理论，针对活动地块边界带开展了运动学、动力学方面研究。但针对中国大陆活动地块对强震成组活动控制作用，当前急需开展特定活

动地块边界带的综合研究。

研究任务：开展中国大陆周边板块边界作用方式及其动力影响研究，活动地块边界带变形特征研究，地震危险区壳幔介质变化过程研究，构建我国大陆活动地块边界带强震发生的动力学模式；围绕强震发震构造和块体边界带断裂系统相互作用，认识活动地块运动和变形对强震迁移和触发的控制作用，研究活动地块边界带成组强震发生的机制和演化规律。

预期成果：给出中国大陆典型活动地块边界带主要断裂带重点断层段的断层运动、断层应力等震源物理特征；给出中国大陆典型活动地块边界带的变形特征，活动地块运动和变形对强震迁移和触发的控制作用，构建我国大陆活动地块边界带强震发生的动力学模式；给出中国大陆周边板块边界作用方式及其动力影响结果、地震危险区壳幔介质变化过程、活动地块边界带成组强震发生的机制和演化规律。

1. 活动地块对地块边界带主要断裂变形控制作用研究

中国大陆地块间地质演化历史对现今的壳幔介质和现今地块划分均起到决定作用，依据构造演化历史为细化块体划分提供地质构造依据，并依此分析周边板块边界或地质块体的动力作用和块体内部次级块体间相关关系。开展重力、GPS、测震等基础观测，给出区域壳幔密度、波速、各向异性和电阻率等深浅部结构，分析地质块体的深浅部区域大陆动力学模型，并依据区域大陆动力学模型给出块体边界带对

主要断裂带变形的控制作用。

2. 活动地块区域地壳变形机制研究

针对特定活动地块及其周边区域，综合已有的 GNSS、水准观测与新增 GNSS 观测资料，建立川滇地区统一时空基准下的地壳运动速度场；联合 GNSS 与 InSAR 观测结果，建立研究区的地壳运动速度场。利用数学方法和物理方法实现对测站分布密度高度不均匀观测数据的最佳描述，给出可靠的应变率结果和误差分布。针对特定地质块体的区域变形结果，构建力学模型，通过数值模拟手段，探索识别边界动力加载、岩石圈力学结构差异、地形及重力效应、断层影响等对区域变形分布的具体影响，给出活动地块变形的机理解释。

3. 活动地块边界带主要断层段变形机制

利用活动地块边界带断层活动性、历史强震破裂、古地震、震害和野外调查资料，对研究区断裂进行破裂分段，给出研究区强震时空分布特征，探讨强震成组活动期地震活动特征与地震平静期地震活动特征的差异性。

在高分遥感解译和分析的基础上，沿断裂开展详尽的野外地质地貌调查，基于关键性地层中采集测年样品建立研究区地貌标尺和地层年代序列，研究断裂控制的构造地貌特征，确定断裂地表精细几何展布。综合高分辨率遥感影像、构造变形观测结果、区域地质资料和地质剖面填绘、断层剖面（天然剖面和探槽剖面）的精细研究，结合第四纪年代结

果，获取不同段落断裂滑动速率等晚第四纪活动性参数，重点分析块体边界带主要断裂的断层活动特征和变形机制。根据断裂几何学、运动学和活动特征，开展活动地质块体的整体构造活动特征研究，结合区域构造变形、形变测量和地球物理资料，建立目标地块及其周缘构造带变形模式和区域地震构造模型。

4. 活动地块边界带现今断层运动特征

综合大地测量、测震学、流动地球化学和数值模拟等结果，结合地震地质研究，确定断层的不同孕震阶段、现今运动特征和深部作用。

利用大地测量观测资料获取断层运动模式，给出强震同震、震后断层运动特征、断层震间运动与位移亏损。开展测震学的断层运动模式研究，给出断层面上的凹凸体分布、深部断层运动速率。利用跨断层流动地球化学观测和固定温泉点观测，分析各断层段深浅部孕震环境和孕震阶段。

基于上述研究结果，利用数值模拟分析活动块体作用下块体边界带主要断裂带强震活动时空演化特征，尤其是强震成组活动特征。

5. 活动地块边界带断层应力时空演化过程

基于数值模拟的断层应力研究，具体内容包括：搜集尽量详细地震地质、壳幔介质属性、断层性质、历史地震或古地震同震信息；通过数值模拟给出断层面上库仑应力时空演化结果；结合可靠的历史地震或古地震研究结果给出强震发

震概率；分析强震间相互影响及其触发机制。基于测震学参数的断层应力研究，具体内容包括：基于广义地震目录，针对主要断裂带，计算能反映应力状态的相关测震学参数；基于测震学参数计算结果综合分析断层应力累积水平。

围绕活动地块边界具备强震危险的断层段，即针对长期地震危险区进一步分析区域应力累积水平，开展壳幔介质变化过程研究，分析强震孕育晚期的断层段高应力作用下潜在震源区介质物性时序变化特征。

6. 活动地块动力学模型和边界带震源物理模型

综合活动地块历史构造演化过程、活动地块对地块边界带主要断裂变形控制作用、变形机制、现今运动特征、应力时空演化过程等相关研究结果，构建区域大陆动力学模型和震源物理模型，综合给出块体边界带强震成组活动可能时空演化预测结果。

7. 中国大陆典型活动地块研究计划

分别针对中国大陆典型活动地块边界带开展成组地震的孕育演化规律研究。包括：巴颜喀拉地块边界带、鄂尔多斯地块边界带、川滇菱形块地东边界带、郯庐地震带、青藏高原东北缘、天山地震带等。

自1996年11月19日喀喇昆仑7.1级地震以来，中国大陆地区7级以上浅源地震均发生于巴颜喀拉块体边界带上。重点研究巴颜喀拉活动地块对北边界走滑断裂带（东昆仑断裂带）、东边界逆冲断裂带（龙门山断裂带）、西边界拉张断

裂带上强震活动控制作用，尤其是成组地震孕育演化规律。

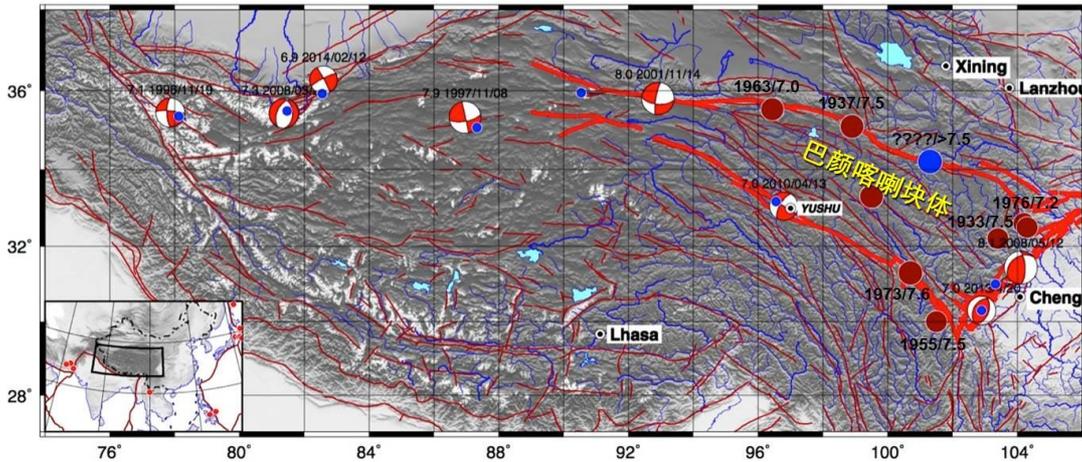


图 4 巴颜喀喇块体边界带大地震发生和迁移

鄂尔多斯周缘是我国的地震多发区域，是中国东部最强烈的地震活动带。自公元 1000 年以来，鄂尔多斯块体周缘的地震活动已经历了 3 个活跃期，每个活跃期均发生过 8 级地震。需重点研究鄂尔多斯活动地块对四个边界断裂带上强震活动控制作用和成组地震孕育演化规律。

川滇菱形块体东边界是我国西部强震频发区域，是中国大陆典型大型走滑断裂带。自公元 1300 年以来，川滇菱形块体东边界的强震活动已经历了多个活跃期，而且多个断层段为强震原地复发。需重点研究川滇菱形块体对东边界强震活动控制作用和成组地震孕育演化规律。

郯庐地震带是我国大陆东部大型断裂带，历史上发生多次强震，包括有记录以来中国大陆东部最大地震 1668 年郯城 8.5 级地震。需重点研究华北活动地块和黄海活动地块对郯庐地震带中段强震活动控制作用和成组地震孕育演化规律。

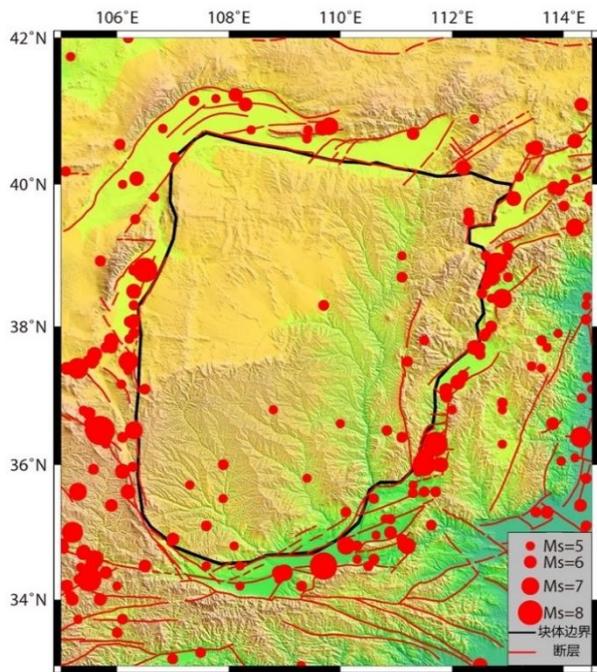


图 5 鄂尔多斯周缘活动构造及强震分布

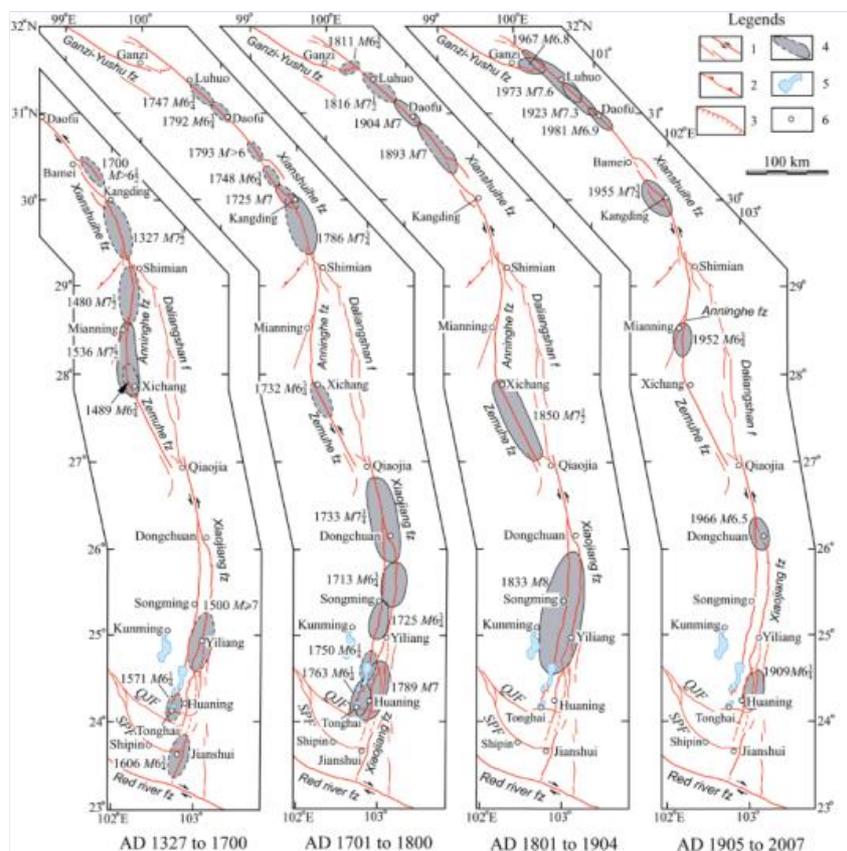


图 6 川滇菱形块体东边界历史强震破裂时空演化图

青藏高原东北缘历史上发生多次强震,包括 1920 年海原 8.5 级地震、1927 年古浪 8.0 级地震等。需重点研究青藏活动地块、西域活动地块和华北活动地块 3 个 I 级块体共同作用下的青藏高原东北缘强震孕育发生的时空演化物理机制。天山地震带是新疆强震活动最为频发地区,1900 年以来已有 3 组 7 级强震成组活动,相关研究表明当前天山地震带存在发生 7 级强震成组活动的可能。需重点研究塔里木活动地块、天山活动地块、准噶尔活动地块对南天山边界带和北天山边界带强震活动控制作用和成组地震孕育演化规律。

(四) 地震概率预测与人工诱发地震研究

研究需求和意义: 地震预测相关研究既具有作为世界科学难题的科学需求,又有作为满足社会发展的社会需求。地震预测不仅只是基于相关现象的统计工作,必须加强综合地震预测的物理基础;现阶段确定性的地震预测结论难以给出,必须加强地震概率预测的综合研究。目前我国地震预测预报中使用的大地测量、地球物理和前兆资料的观测时间跨度为数十年,如何用这些资料判定现今断层活动处于数千年地震周期中的哪个孕震阶段,一直是亟需解决的科学问题。依据地震地质、测震、大地测量和数值模拟等强震过程研究结果,综合强震地点、震级、时间的可能物理预测方法,开展对未来强震预测的综合概率研究,是迈向具有物理基础定量预测的必由之路。

国内外研究现状: 地震概率预测研究前期,国内外主要致力于单项概率预测方法的研究和不同概率结果的综合概

率方法，但当时由于观测资料的限制，方法多为基于地震目录的统计方法，导致综合概率结果的物理基础较差。近年来，美国南加州地震中心基于地震地质、测震学、大地测量和数值模拟等给出的预测结果，综合给出地震破裂概率预测结果，其物理基础明显增强，所以又被称为强震动力学概率预测模型。目前，南加州地震中心推动的“地震破裂预测”是区域动力学概率预测的典范，给出区域概率预测结果，既能获得社会和政府的广泛接受，又很好地体现了现有地震预测科技水平。

研究任务：概率预测模型研究任务主要是物理主体模型（大陆型强震孕育发生的动力学模型）和预测主体模型（区域强震动力学概率预测模型）。物理主体模型（Physical Master Model）：大陆型强震孕育发生的动力学模型，描述从动力源到断层震源的加载过程，描述不同类型大陆型强震动力学模型；具体包括中国大陆型强震的两个科学问题，从板块到断层的动力加载过程（由动力源到震源）、大陆型强震震源物理模型（三种大陆型震源）。预测主体模型（Prediction Master Model）：区域强震动力学概率预测模型，主要断裂带强震发震概率及其地表响应。

预期成果：给出川滇菱形块体介质模型、川滇菱形块体东边界主要断裂带大地测量模型、走滑断层运动模型、走滑断层应力模型、地震孕育模型等动力学概率预测模型，分阶段给出现今监测和研究基础上的川滇概率预测模型 1.0、2.0、3.0 版。

1. 统一结构模型研究

统一结构模型是地震科学研究工作的基础，主要包括统一断层模型、统一介质模型、广义地震目录、地块模型和变形模型等基础模型。

断层模型包括断层的类型、分段及长度、活动时代、滑动速率、历史地震及断层在地表以下的空间三维结构等信息，也包括已有资料的可靠性和丰富性评价等。

广义速度模型的区域三维介质物理和几何属性模型，包括速度模型、粘滞模型、密度模型、电阻率模型等，其中速度模型又包括各向同性、各向异性、品质因子等。

研究区域广义地震目录包括震源参数（空间位置、发震时刻、震级、震源机制解等）、动力学过程参数（破裂方向性、同震滑移分布、震前异常、余震分布等）。

在国家重点基础研究发展规划（973）项目“大陆强震机理与预测”给出的块体划分结果基础上，给出研究区更加精细的次级块体划分结果。

区域变形模型应主要包括：区域变形对边界动力加载的响应、区域应变率场可靠结果获取及驱动机制、区域变形与断层变形的关系等。

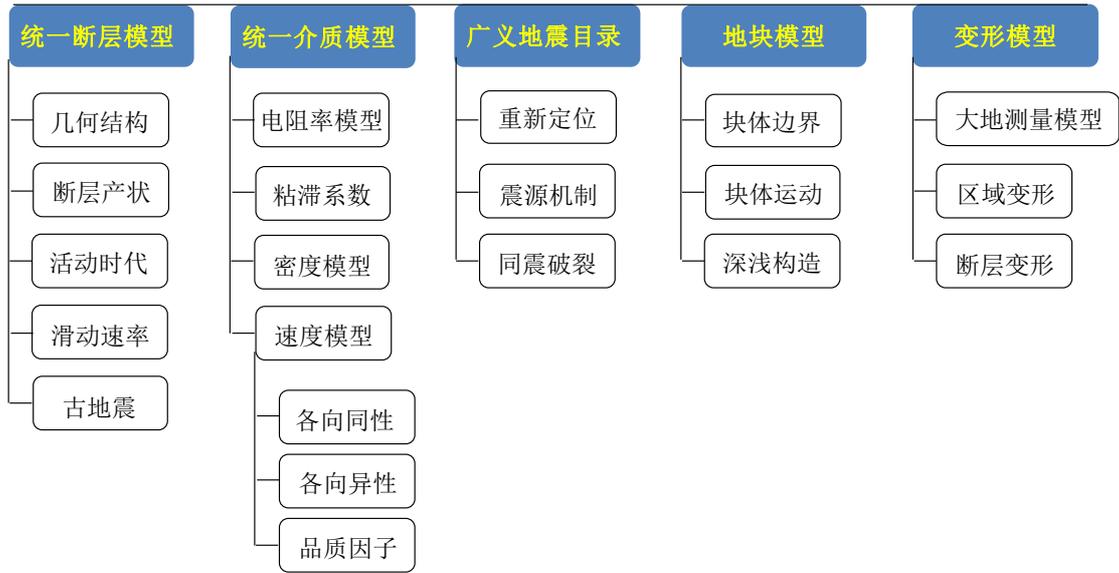


图 7 统一结构模型主要组成框图

2. 从板块到断层的动力加载过程研究

中国大陆地区处于欧亚板块、印度板块、太平洋板块相互作用地区，地质构造作用活跃，是全球大陆强震最为活跃地区之一。在周边板块持续作用下，中国大陆地区形成纵向分层、横向分块的壳幔结构特征，而中国大陆地区强震多发生在块体边界带上的大型断裂带。因此，对中国大陆强震孕育发生这一科学问题来讲，从板块边界加载到具体发震断层面上应力应变累积的动力过程成为非常重要的关键科学问题。

对于川滇菱形块体，重点研究从印度板块动力边界加载、主要地质块体运动调整、实验场区内典型构造带变形机制、实验场区断裂带应力加载等不同角度，系统分析大陆型强震应力应变累积的动力来源及其过程。具体包括：地质构造演化过程与作用、地质构造作用对地块模型的影响、在地质构造和地块共同作用下区域变形特征、具体断层变形中决

定性因素等。涉及到的基础模型包括：地质构造演化模型、地块模型、区域变形模型、断层变形模型。

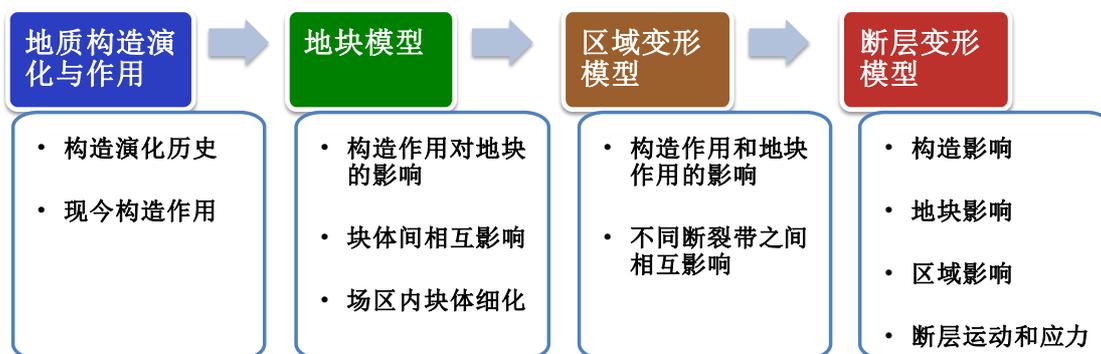


图 8 从板块到断层的动力过程（由动力源到震源）主要组成框图

3. 大陆型强震震源物理模型研究

川滇菱形块体及周缘地区包括三个典型构造区：1) 剪切推覆构造区：川滇交界东部的大凉山次级块体，该块体东西边界为剪切型走滑断裂带，南北边界为典型推覆型逆冲断裂带；2) 拉张构造区：滇西北的大理次级块体，该块体东西边界为张扭型断裂带；3) 复杂剪切构造区：滇南地区为多条近南北向和北西走滑断裂带以锐角交汇的构造区。以上述三个重点构造部位为研究区域，分别研究三种不同类型强震震源物理模型，分析其区域变形对断层加载作用、断层变形特征、强震轮回和破裂过程特征等，研究重点是大陆型强震孕育发生的动力学过程。包括：统一结构模型、断层体系、震源物理模型、地震预测模型、强震动模型。

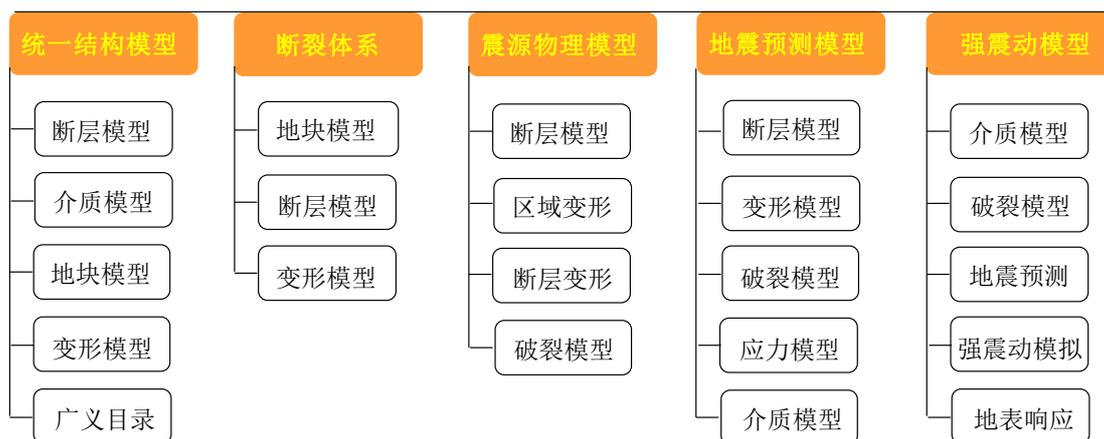


图 9 大陆型强震震源物理模型主要组成框图

4. 动力学概率预测模型研究

基于统一结构模型，以大地测量模型为约束，通过数值模拟和反演等方法分析区域地震活动，探索实验场区内主要断裂带孕震过程中断层运动、断层应力、复发过程等基本特征和物理机制，研究可能的中国大陆强震物理预报方法；基于地震地质研究结果、大地测量观测、强震活动等关于强震物理过程的研究结果，综合相关强震预测结果给出中长期强震综合概率预测模型。

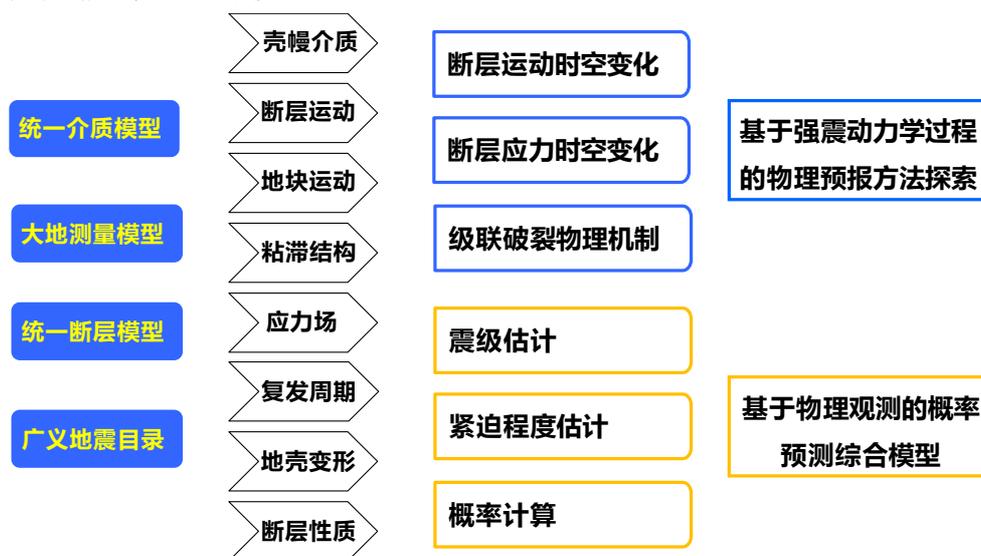


图 10 动力学概率预测模型框架图

5. 强地面运动预测模型研究

强地面运动预测以统一结构模型（包括断层模型和粘弹性结构模型）为基础，通过岩石圈变形模拟得到地震破裂动力学触发条件，或地震破裂概率预测得到的触发概率，进而结合断层破裂的动力学过程模拟或断层破裂的运动学或动力学过程，利用高性能计算平台进行地震波在复杂介质中的传播过程计算，产出地表地震动时程图和峰值分布图，服务于工程抗震设计、地震灾害预测、断层破裂模型验证等。

6. 水库诱发地震成因机制研究

以西部典型梯级高坝水库（如金沙江下游乌东德-白鹤滩库区等）为目标，开展地震加密观测，运用前沿的地震学方法和技术，精细研究水库蓄水前及蓄水后各阶段的地震活动性、震源参数、精细介质结构、应力场及它们的时空变化过程和特征等，跟踪分析它们与蓄水过程的相关性；动态定量计算水库蓄水造成的库区介质和断层的应力变化等；综合分析水库地震的活动特征、成因机理和预测方法。

7. 中国大陆页岩气开采诱发地震研究

未来二十年中国将成为仅次于北美的全球第二大页岩气产区。我国的大部分页岩气资源埋藏较深（1500 到 4500 米不等），大量注水压入地下深处，存在较大的潜在注水诱发地震风险。计划跟随全国页岩气开采进程，在全国几大主要开采区开展加密观测和调研（如新疆、四川盆地等），全

面收集深部废水注射数据和开采区微震数据；以我国页岩气国家级先行开采区（昭通勘探开发区、富顺-永川勘探开发区）为重点研究示范区，实施加密观测和井下地震监控。运用前沿的地震学方法和技术，开展微震识别、地震活动时空迁移、震源机制、地震活动统计特征等研究，定量计算和分析注水引起开采区的应力变化及其与地震的关系，探讨诱发地震发生机制、发生条件及预测方法。

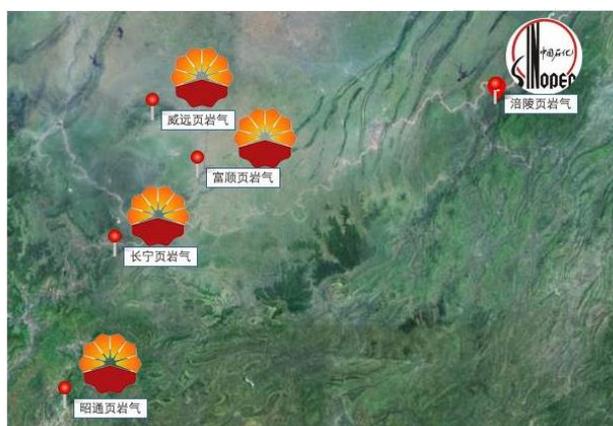


图 11 中国大陆页岩气开发分布（来自：国家能源局《2017 年能源工作指导意见》）

（五）地震大数据建模与超算模拟研究

研究需求和意义：随着人类对地球深部探测、地震观测记录及分析数据等能力的巨大提升，对地球科学的深刻认识已经逐步进入到全球系统多圈层耦合动力学的时代。科学高效管理地震大数据，建立地震大数据模型，从中提取新认识、新模型等，不仅可以为提升全国地震监测水平服务、合理制定防灾减灾规划提供科学依据，提升地质灾害监测预警能力，还可以促进深地科学研究成果的进步。地震大数据建模与超算模拟研究旨在充分挖掘地震大数据，综合地球物理、

大地测量、地球化学和地质学观测资料，开展数据同化、提取与地震孕育发生物理过程相关的关键参数，构建基于大数据的地震发生物理过程及其数学表达，研发基于超算技术的地震数值预测相关计算方法和软件库，开展地震数值模拟实验与检验，探索人工智能等地震预测新方法。

国内外研究现状：高性能超大规模数值模拟与仿真已经成为科学研究的第三种方法。计算地球科学是应用集数学、物理、化学和计算方法为一体的计算科学解决地学问题而形成的一门新兴学科，具有明显的多学科交叉基本特征。地震动力学数值模拟技术是当代地震学研究的核心内容之一。

大数据时代正引发地震数值预测领域研究理念的革命性变革。传统地震学研究中，对数据深度利用最为充分的是以物理模型为基础的数值模拟技术。数值模拟在过去几十年里对地震学及其相关地球科学的发展起到了至关重要的作用。对模型不确定性的约束需要大数据成果的约束来完善数值地震预测的物理建模和计算模拟结果的校核，并逐步进行模型的甄别和更新。目前，与其他学科基于分布式数据密集型计算相比，真正意义上基于大规模数据集的大数据地震超算模拟研究在国内外均处于理论与技术概念研究阶段。现有的地震建模与数值模拟研究还缺乏对已有的大量地质和地球物理学观测数据的融合。因此，开展地震大数据建模与超算模拟，将会带来现代地震科学研究与管理的一场深刻革命。

研究任务：综合地球物理、大地测量、地球化学和地质学等观测资料，开展数据同化、提取与地震孕育发生物理过

程相关的关键参数，构建基于大数据的地震发生物理过程及其数学表达，研发基于超算技术的相关计算方法和软件库，开展地震数值模拟实验与检验，探索人工智能等地震预测新方法。

预期成果：综合地球物理、大地测量、地球化学和地质学观测资料的数据同化方法；与地震孕育发生物理过程相关的关键参数；基于大数据的地震发生物理过程及其数学表达；基于超算技术的相关计算方法和软件库；地震数值模拟实验与效能检验；人工智能等地震预测新方法。

1. 地震大数据构建

集成地震学及相关领域的重大科技项目的探测、观测、研究成果数据大数据管理，主要研究成果的云共享服务以及基于大数据的关键性技术研究，大数据的虚拟现实化展示与交互分析。内容包括：基于地震学大数据典型特征的新一代分布式大数据仓库与云平台（硬件平台）建设；开发地震学大数据专用的多级云存储、云管理、云通信、云安全和共享等核心算法和技术研究；基于地震学大数据集成标准制定，基于云平台的大数据管理与备份，大数据分级共享与数据安全；TB量级高性能大数据可视化与集成分析等。

2. 地震大数据应用关键技术与示范

针对不同类型的地震学大数据，探索关键技术与算法研究，包括对地震学大数据的数据挖掘技术、机器学习技术、人工智能发现创新和大数据可视化领域的建模与实现等，改

变以往单纯由观测到简单假说的研究模式。通过地震学大数据模型，自动提取新知识、新认识、新模型、新假说等，形成以大数据分析结果形成科学分析初步假说情形下的研究思路创新。推动地震动力学研究由假说驱动到大数据驱动的转变。

开展以大数据为核心的前沿交叉学科与典型学科应用示范研究，并形成大数据产品，包括：深部地震学精细成像；弹性波矢量波场层析理论与方法；多源异构地球物理大数据的联合反演等。在地震学大数据机器学习、人工智能化建模（AI modeling）等关键性基础研究领域的关键算法和成果国际领先。

3. 地震动力学模拟器科学装置部署

部署“固体地球模拟器”，充分利用地震学探测重大科技项目数据成果和模型，建立国际领先的地震动力学数值模拟基础架构。地震动力学数值模拟科学装置运行速度等主要技术指标国际领先。集成国际领先的高性能可视化环境和基于大数据挖掘和人工智能建模的大数据产品，建成后的地震动力学数值实验平台要支持科学建模、数值建模与研究者互动操作，协同处理、分析解释、获取和发现深地领域的新知识和新认识、甄别已有模型和理论，完善、发展和创新新的深地动力学演化理论和模型。

“地震动力学模拟器”科学装置包括：大规模地震动力学模拟器硬件环境和软件系统；基于数值模拟结果的大数

据科学数据管理与共享系统；综合可视化与实验分析和决策平台体系三个主要部分。

4. 多尺度地震动力学耦合框架构建

完成国际领先的以地震动力学多尺度演化过程为核心的地震动力学数值模拟实验软件体系部署。立足于多尺度超大规模高性能数值计算手段，构建综合地震学大数据管理与分析、云计算时代特征的地震动力学数值模拟实验框架体系，完备典型地震和地震带的孕育环境和发震过程多物理场多尺度耦合动力框架体系，形成完整的认知地震动力学科学规律的认知体系，主要研究内容包括：利用深部探测数据、地震学反演数据、透明地壳等大数据，通过高分辨率数据恢复，建立中国大陆地壳与发震构造的数值网格化；集中攻关多尺度超级耦合、超大规模线性系统并行求解、超高分辨率并行可视化等国际前沿技术；地震动力学多尺度耦合作用超大规模数值模式。开展包括孕震过程、地下流体、气体运移与地震孕育环境相应，发震机理与发震过程耦合模式，区域地震波强地面运动过程与灾害预警评估，震后相应、大震的近场和远场触发机理与环境等的数值研究。

从地震孕育、发生过程、震后调整三个时段物理过程特征入手，理论、实验、数值模拟和野外观测大数据分析结合，综合研究地震孕育发生物理过程及其数学表达即基本方程。

结合岩石圈结构、状态（力学状态、热状态、流体状态）和包括岩体力学性质、热学性质、渗透率、断层本构关系等

在内的温度压力相关的岩石非线性物性的实验室测量和野外探测获取超算技术方法研究。

对地应力、地形变、地震活动性基本物理量的观测方法技术、台站布设、可靠观测、数据处理分析；探讨电磁声光物理前兆和地下水前兆与地震孕育和发生过程的关系。

通过与气象数值预测的综合对比研究，研究不同时段地震数值预测的主要任务，明确主要目标，并提出相应的战略部署方案。

5、人工智能地震预测新方法研究

基于海量多源地震观测资料，采用人工智能方法学习处理大量的原始资料，包括地震学、地壳形变、地球电磁、地球化学、天文环境等；利用数据挖掘、机器学习和人工智能等技术分析来自地壳活动信号并研究其模式，获取和发现新的地震前的异常现象，并研究异常特征与地震发生的关系；通过进一步的新数据学习，更新自己的结果以反映新信息，在此基础上探索人工智能地震预测新方法。

（六）地震观测新技术与仪器研发

研究需求和意义：我国地震观测在地震活动、地球物理场观测、深部构造探测、地震前兆异常的观测与识别等方面取得了很大进展，但在有关地震孕育过程的地下介质物性参数动态监测方面，仍然面临很大困难，难以获得重点监视区内有关应力积累过程及发震断层应力状态演化的可靠信息，需要进一步开展地震观测新技术的研究与应用。在地震观测

仪器与装备方面，目前地震观测台网中装备的观测设备有测震、地壳形变、电磁和地下流体四大学科的 150 余个型号，总体来看，测震设备相对成熟，而地壳形变、电磁和地下流体观测设备发展水平参差不齐。地震观测设备的研发、生产与列装工作是业务链的关键环节，不仅需要围绕新的需求开展新仪器技术研发，还要持续改进和研制那些制约我国地震观测系统技术水平、与国际先进水平相比差距明显的观测仪器，特别是地球物理场观测所需的高精度重力仪、磁力仪等高端观测仪器，这类观测仪器目前主要依赖进口。开展高端地球物理场观测仪器的研发与应用研究，是提高地球物理场及其动态变化的观测能力，获取高质量观测资料的必然途径。

井下地震观测不仅能够避开地表各种干扰源，提高观测数据质量，所获得的观测数据对于反演地下应力应变场及介质参数也具有重要意义，开展井下地震观测技术研发与应用，是深入地下的重要手段。近年来，空间对地观测、微机械 MEMS 技术、光纤传感技术、人工智能技术等发展迅速，在地震观测领域跟踪新技术、研发和应用新技术，是逐步提高地震观测网络技术水平和观测效能的重要工作。

国内外研究现状：在地层应力应变观测方面，美国板块边界观测(PBO)使用了大量钻孔应变仪，我国也建设了 40 余个分量钻孔应变观测站，由于多种漂移因素的存在，尚不能可靠地用于区域应力场的动态监测。介质波速测量是一种有潜力的间接应力测量方法，其测量介质的物性参数不受钻孔

的影响。日本、美国在实验观测中发现了令人信服的地震波速对潮汐应力变化做出规律响应的证据。基于地表主动震源的地下波速动态监测实验研究也在进行中，我国已经开展了大容量气枪、精密可控震源的技术研发与观测实验，目前在地下波速动态监测方面尚未取得突破性进展。

在高端地球物理观测仪器方面，重力仪、地磁仪仍然依赖于国外产品，如 FG-5 绝对重力仪、CG-5 相对重力仪、超导重力仪、量子干涉磁力仪、Overhauser 磁力仪等，成为我国地球物理场观测水平提高的技术瓶颈。我国正在进行高精度绝对重力仪、高精度磁力仪等方面的技术研发，但在适合固定台站连续观测方面，尚缺少高精度、低漂移型重力仪，以及高精度矢量磁力仪。

钻孔观测能够最大限度避免地表干扰因素的影响。国内外已经开展了井下多测项的地震观测，如测震、应变、重力、倾斜、温度等，已研发了多种适合井下观测的仪器设备，但在多测项综合观测方面以及深井适应性方面尚与应用需求之间存在较大的差距。如东海 5000m 深井、汶川地震后的深钻科学项目，至今都没有理想的仪器安装到井下深部开展观测。与地表观测相比，在基岩深部开展地球物理观测更能够反应深部的情况。

在测震领域，区域台网测震仪器的观测动态范围仍然不够大，对于震中距在 100km~1000km 范围内的大震及特大地震，宽频带微震仪器限幅，而强震加速度记录的长周期信噪比偏低；在台网数据处理方面，智能化、自动化程度低，大

震余震震群仍然依靠人工进行处理，工作量大，难以胜任；人工智能在地震观测数据处理方面的应用仍处于空白状态。基于光纤陀螺仪技术的地震波旋转分量观测仪器已经出现，有望进一步提升测震观测与数据应用技术水平；在海洋地震观测方面，国外已经建成了多个基于宽频带实时地震网用于地震深部动力学研究及海啸预警，我国在这方面仍处于空白状态。

研究任务：通过开展基于井间波速测量原理为核心的井下多参数观测装置观测仪器研发，并开展观测相应的观测试验，实现地下介质物性参数的动态监测，服务于重点监视区地震孕育过程的监测。通过开展基于变频技术的人工震源观测试验，结合气枪震源观测试验数据，发展基于地表人工震源的地壳深部物性参数动态变化的观测技术及数据处理技术，为主动震源观测系统的常态化运行打下基础。

开展高端地球物理场观测仪器研发，实现高性能的、适合于固定站点连续观测的重力仪、地磁仪和倾斜仪，为提高固定台站观测系统技术水平打下基础。开展基于光纤传感技术的新型地震观测仪器，实现深井地震观测的光纤化、综合化，提高深井观测仪器的耐高温高压能力；实现基于光纤陀螺仪的地震波旋转分量观测。

开展空间对地观测，应用卫星红外和 TEC 探测技术，研究中国大陆红外和 TEC 异常信息与大地震发生的关系。

预期成果：通过地震观测新技术研发与应用研究，实现井下多测项复合观测仪器，大大提高井下观测技术水平，实

现井间波速测量和钻孔应变综合观测，将明显提高我们对地壳深部构造应力场动态变化的监测能力，为地震预测研究提供进一步的支撑；开展海洋地震观测技术研发，使我国地震观测从大陆延伸到海域，提升海域地震的监测能力，更好支撑地球深部动力学研究及海啸预警；通过高端地球物理观测技术与仪器研发，提高重力观测、倾斜观测和地磁观测仪器技术水平，提高固定台站地球物理场观测能力；在测震仪器方面，实现六分量地震波观测，支撑基于平动分量和转动分量观测数据联合应用反演技术研究，提升区域台网及科学流动台阵地下介质结构探测水平；通过新技术的研发试验，进一步提高光纤传感技术在地震观测领域的实用化水平。

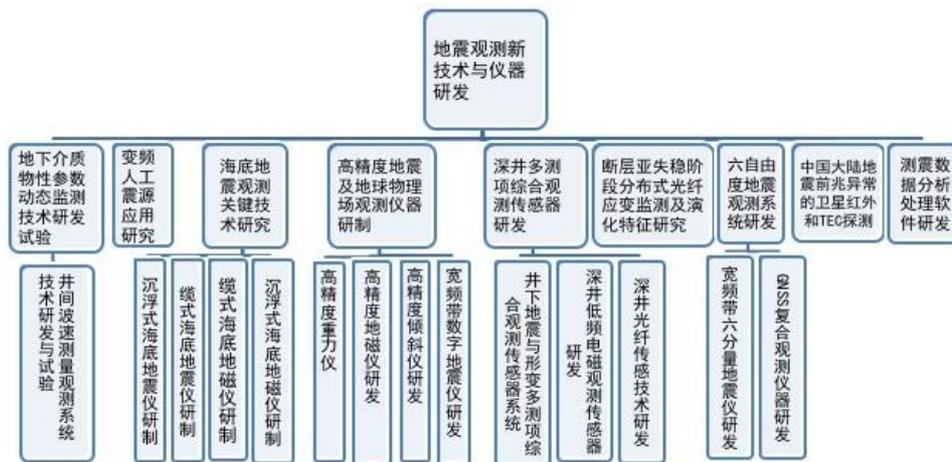


图 12 地震观测新技术与仪器研发体系

1. 地下应力状态动态监测技术研发

研发井下震源装置，能够激发出时间重复性高的震源信号；研发钻孔综合观测仪器，集成钻孔应变、宽频带地震仪、高分辨地温传感器。综合应用井间波速测量、钻孔应变监测等多手段观测技术，开展井下观测试验，通过对比分析断层

两侧波速与穿过断层的波速差异，分析穿过断层震源信号的衰减特性，分析穿过断层震源信号的 S 波分裂现象等，实现断层及两侧的介质波速动态变化的连续监测，为进一步开展野外断层亚失稳状态监测研究打下基础。通过观测实验，对试验区域的地震大形势跟踪提供观测证据。

2. 变频人工震源应用研究

研发大功率变频人工震源装置，建设变频人工震源实验发射站，实现多种变频信号固定偏振模式的变频震源信号发射，开展变频人工震源应用技术研究和基于变频人工震源的观测试验，通过使用中心频率与震源信号相同变化规律的窄带数字滤波器，从接收信号中分离震相信号，形成有效的多种震相信息的提取技术，形成基于速度结构成像、介质 Q 值成像等方法的地下介质变化的监测技术。

3. 海底地震观测关键技术研究

针对沉浮式海底地震观测和基于海缆的海底地震观测应用需求，研发适用于海底地震观测的宽频带地震仪核心技术，包括宽频带反馈地震计、数据采集与控制系统，以及海底地震仪安装或投放所需的有关传感器姿态测量与调整、地理方位角测量与方位校正等系统解决方案，研发海底地震仪地震观测传感器的自检测试技术，形成可海试的海底地震仪测试样机，开展海试实验。研发适用于沉浮式和缆式海底地震观测的核心技术，形成小型化、宽频带、具有自检、自主姿态测量和方位角测量及校正功能的数字化海底地震仪核

心技术，实现宽频带海底地震仪，并进行海试实验予以技术验证。研发适用于沉浮式和缆式海底地磁观测仪器，并进行海试实验予以技术验证。

4. 高精度地震及地球物理场观测仪器研发

研发新一代低漂移型金属弹簧重力仪，进一步提高高稳定性金属弹簧制造技术，完善弹簧参数检测技术；研发高精度恒温系统，减小系统的温度漂移；研发高精度的位移测量系统或力平衡反馈测量系统。研发石英弹簧重力仪：研发石英弹簧重力仪悬挂系统、高灵敏度位移传感测量系统和力平衡反馈系统；研发小型化高精度恒温系统，减小系统的温度漂移；研发高精度的位移测量系统或力平衡反馈测量系统。

研发基于石英丝悬挂技术的高稳定性、高灵敏度倾斜仪，通过引入力平衡反馈技术，提高倾斜仪的观测精度和动态范围等核心指标，并实现其在线自检测试，保障其运行中传递函数的准确可靠。开展测试技术研究，形成定量检测倾斜仪核心技术指标的实验室方法和野外对比观测试验评价方法，对倾斜仪的测量范围、传递函数、噪声及漂移技术参数进行检测和评价。

研发基于 Overhauser 或者基于 CPT 技术的高精度地磁总强度连续测量仪和地磁偏角倾角自动绝对测量仪，提高测量速率和分辨力，服务于固定台站连续观测。

研制大动态模拟数字转换技术，通过将其内置到地震计中并进行参数优化，实现数字量输出的大动态宽频带地震仪样

机，其动态范围比现有宽频带地震计匹配 24 位数据采集器的系统动态范围提高 20dB，限幅电平提高到 100mm/s。大动态数字地震仪将高质量地记录距离特大地震发震断层 100km 以外的地震波，一定程度上解决现有宽频带地震仪大震限幅的问题。

5. 深井多测项综合观测传感器研发

研发一种适用于井下观测的，集井下地震与井下形变观测两种类型传感器为一体的多测项综合观测传感器系统，集成宽频带地震仪、钻孔分量应变仪，以及井下倾斜仪、高分辨地温等测量仪器，解决多种观测仪器的技术集成、井下综合数据采集与控制、安装工艺等技术问题，形成实用化的样机。开展观测试验，利用惯性传感器和应变传感器两种不同类型传感器的观测资料，研究长周期地震波的波场与应变观测之间的关系，从而为研究钻孔周围介质物性，以及应变观测至钻孔“远场”应变的计算建立检验的技术途径。

研制深井电磁观测传感器，研发井下断层及岩石应力集中区域的电磁传感探头及天线系统，以记录岩石应力作用、微裂隙和裂隙，以及岩石破裂过程前后产生的、并在全空间传播的微弱、宽频带电磁信号，实现三维宽频带、全空间探测和高采样率数据采集和分析处理系统，对地下岩石应用作用产生的电磁辐射信号进行探测与研究。

开展深井光纤传感技术研发。针对高精度地震、强震、形变、倾斜、温度、地磁的探测需求，开展光纤光栅地震仪、

光纤激光强震仪、光纤光栅伸缩仪、光纤光栅倾斜仪、光纤光栅温度传感器、光纤磁场传感器的探头设计、封装与标定测试技术研究；开展多参量同步综合观测的高精度光纤信号解调设备研究，包括高精度光纤多参量信号解调光路设计以及高信噪比解调算法研究。针对深井高温高压环境下的地震观测，研发适应高温、高压工作环境的传感元件封装技术、传感器整体结构设计技术，实现高温高压环境井下光纤光栅综合观测仪器。

6. 断层亚失稳阶段分布式光纤应变监测及演化特征研究

研究提高分布式光纤应变监测空间分辨率的关键信号处理技术。空间分辨率是最重要的光纤应变监测性能指标，研究缩短小入射脉冲光的脉冲宽度，提高空间分辨率的技术。完善断裂带光纤应变温度补偿方法，开展多光谱应变温度联合数据解析方法研究，弥补目前同轴光纤温度补偿方法的不足。开展断层裂破碎带光纤定向植入、钻孔和光纤的耦合、耦合剂筛选方法研究，实现光纤与地层应变同步响应。建立断层亚失稳状态应变分布式光纤监测示范野外观测台网，开展断层应变分布式光纤监测的定向钻孔、光纤植入耦合工艺设计和现场施工，完成现场监测指标的标定。开展断层亚失稳应变分布式光纤野外连续观测比对。基于断层空间多尺度深部应变动态数据，研究断层不同构造部位应变相互作用机制以及演化特征，揭示断层亚失稳状态应变演化规

律。

7. 六自由度地震观测系统研发

以获取地震波的平动分量和转动分量为目标，开展六自由度地震观测技术研究。研制基于惯性摆原理的高灵敏度宽频带六分量地震仪，测量平动分量的速度和转动分量的角速度，观测频带 0.0083Hz~40Hz。设计高精度光纤旋转地震仪，配合传统甚宽频带地震仪，实现六分量观测。研制集成 GNSS 接收机、加速度计、陀螺仪三种传感器的复合观测仪器，开展加速度计和陀螺仪组成惯性测量单元以增强 GNSS 高动态跟踪环路的研究，建立深组合跟踪环路误差模型，设计深组合跟踪环路设计方法，实现并优化深组合跟踪环路设计，应用于形变及大震同震响应观测。

8. 中国大陆地震的卫星红外和 TEC 探测技术

选取中国大陆及周边地区典型强震震例，开展不同方法的短期异常变化特征研究。通过对重点监测区域不同算法和参数的适用性分析确定效果较好的异常提取方法，并进一步建立稳定高效、适应性强的震前异常信息提取模型和综合判定指标。将遴选的多种异常提取模型联合应用于多种卫星数据（MODIS 红外亮温、地表温度、水汽等产品，AMSR-2 被动微波数据、Himawari-8 静止卫星 AHI 红外数据和 GNSS TEC 数据等），探索多方法、多参数在时空尺度上的耦合关系，发挥各自的长处，实现优势互补。

基于不同波段、时空分辨率、物理量的多源数据对重点

监测区域（如川滇地区、青藏高原）进行综合观测，在监测实践中积累异常提取结果的统计数据。通过对比热异常对地震的响应形式，即有异常-有地震（正确）；有异常-无地震（虚报）；无异常-有地震（漏报）进行算法有效性的比较与总结。

9. 测震数据分析处理软件

随着测震观测台站数量的增加，以及大量用于地震预警和烈度速报强震动观测台站等建设和即将投入应用，地震事件的自动识别与处理技术、震源参数自动计算技术越来越迫切，将大大提高我们对地震事件的响应速度和研究深度，服务于大震应急响应和震情趋势研究与判定。基于密集布设的观测台站、区域台网三维速度结构研究成果，结合人工智能计算技术，发展近场地震波数据处理技术，实现地震事件的自动处理功能，以及震相识别与地震编目的自动化。研发基于高性能并行计算技术的微小地震自动识别软件以及连续波形自动分析处理软件并予以持续改进。

四、组织管理模式

“解剖地震”计划研究在中国地震局统一领导下，由中国地震局地震预测研究所牵头组织，地震系统内外多家科研院所、高校、中心、省局和企业等联合参与。本计划下设领导小组、专家委员会、协调组和项目管理办公室，负责计划的顶层设计，广泛动员社会力量，开展协同攻关，发挥导向作用，为国家地震科技创新工程的顺利实施打下坚实的基础。

领导小组负责落实中国地震局关于国家地震科技创新工程实施工作的统筹、协调、决策和部署，围绕本计划确定的目标和任务认真谋划工作格局，保障计划的任务实施条件，审定计划实施中的重大事项，解决计划实施中的重大问题。

专家委员会负责指导本计划实施的科技创新任务，指导编制实施计划，对计划实施的重大科技和经费问题进行咨询和审议。

协调组主要负责计划的组织协调，完善管理方式，加强政策协调，发挥好计划的协调单位作用。围绕本计划的实施，协调创新团队建设和人才队伍建设，促进科研资源的有效配置。负责联合各大部委、国内外高校和科研院所，获得智力支持，为计划的顺利实施提供人才保障。同政府、高校、企业、以及其他科研院所的科学技术管理部门、资助机构和学术组织建立联系并开展交流合作。配合支持国家地震科技创新工程的其他计划。

项目管理办公室以 S²I³ (Systematic 系统的, Strategic 战略的; Interactive 交互的, Inclusive 包容的, Innovative 创新的) 模式, 围绕计划开展立项与实施。落实中央财政科研项目资金管理相关政策措施。完成本计划相关的年度地震科技创新和进展成果汇集工作; 参考发达国家同期地震科技进展, 分析、对比、展示本计划的关键性指标, 提交阶段性成果进展报告。围绕本计划产出, 面向公众服务推出可直观展示的科普产品, 推动科技成果示范及应用转化工作。