



中国地震科学实验场 工作进展

二〇二〇年八月

目 录

Contents

引 言	1
一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求.....	3
二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距.....	9
三、中国地震科学实验场的发展愿景	17
附录 I 中国地震科学实验场主要科学问题	21
附录 II 中国地震科学实验场科技产品（1.0 版）示范.....	25
附录 III 中国地震科学实验场 2019 年突出科技进展.....	39

引 言

Foreword

2018年5月12日,在汶川地震十周年国际研讨会暨第四届大陆地震国际研讨会开幕式上,王勇国务委员宣读习近平主席致信,并代表中国政府宣布建设中国地震科学实验场(China Seismic Experimental Site, CSES)。2018年11月15日,中国地震局印发《中国地震科学实验场设计方案》,计划在川滇地区建设针对大陆地震科学研究和“从地震破裂过程到工程结构响应全链条科学研究”的地震科学实验场。由系统内外17家单位的19个团队共同编制的《中国地震科学实验场科学设计》于2019年4月17日通过专家论证,5月6日由中国地震局正式印发。

20世纪中叶以来,国际上在地震科学实验场方面开展了持续而曲折的尝试。著名的实验场至少包括前苏联所建的一系列地震预报实验场——加尔姆实验场(1955年起)、勘察加实验场(1961年起)、阿拉木图实验场(1966年起)、北天山实验场(1968年起),以及土耳其地震科学实验场(1979~1991)、美国帕克菲尔德地震预报实验场(1985~1994)、冰岛地震科学实验场(1988~2001),还有约于20世纪60年代末开始的印度柯伊娜水库诱发地震监测预测实验等。目前,被美国南加州地震中心(SCEC)作为天然实验

室 (natural laboratory) 的加州南部, 已成为一个卓有成效的地震科学实验场; 俄罗斯的勘察加地震预报实验场和日本的东海地震预报实验已坚持多年, 仍在继续工作。

我国在地震科学实验场方面的尝试, 至少包括新疆地震实验场 (1971 ~ 1975)、山西地震预报实验场 (1971 ~ 1974)、滇西地震预报实验场 (1980 ~)、京津唐张地震实验场 (1980 ~ 1984)、华北地震实验场 (1982 ~ 1986) 等。2014 ~ 2017 年建设的川滇国家地震监测预报实验场, 为中国地震科学实验场准备了基础。“野外地震科学实验”的概念, 至少可以追溯到 1966 年邢台地震。周恩来总理所倡导的坚持统一指导、组织多个学科、面向地震现场、“抓住地震不放”的战略和开放合作、充分利用各种科技资源和社会力量的政策, 至今对地震科学实验场的组织仍具有高屋建瓴的指导意义。

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

Development Environment and National Needs

(一) 政策环境

地震安全是国家安全的重要组成部分。习近平总书记指出：“要增强忧患意识，防范风险挑战，特别是要提高防大灾、救大险能力，做好抗击发生像唐山大地震、汶川严重地震、九八大洪水那样的重大灾害的准备”。防范化解重大风险，一靠科技、二靠法制、三靠社会。新时代自然灾害防治国家战略的实施，国家应急管理体系和能力的现代化要求，“从注重灾后救助向注重灾前预防转变、从应对单一灾种向综合减灾转变、从减少灾害损失向减轻灾害风险转变”的目标，为地震科技提出全新课题，开辟了地震科技发展的广阔空间。

新时代，创新驱动发展国家战略全面实施，科技资源供给和人才资源供给状况出现历史性变化，“社会主义市场经济条件下关键核心技术攻关新型举国体制”为地震科技发展指明新的方向。把“创新型国家”条件下分布于全国各单位、各行业的科技能力转变成“国家地震科技能力”成为中国地震局科研机构的一项战略性任务。同时，“一带一路”倡议的实施，一方面为地震科技提出保障“一带一路”地震安全的重大需求，另一方面也提供了统筹利用国际资源，

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

发挥“地震科技大国”作用，并向“地震科技强国”努力的历史性机遇。

（二）技术环境

野外实验始终在地震科学中发挥着不可替代的作用。但长期以来，测量精准性的限度和连续、重复测量的困难，一直是地震科学野外实验所面临的严重挑战，结果是地震科学相关的野外“实验”中，“实验”两个字总是摘不掉引号的“帽子”。近年来，这种情况发生了转折性的变化：精准测量开始成为可能、密集观测开始成为可能、连续动态监测开始成为可能、半可控地震过程开始成为可能、在十年尺度上“捕捉”地震并进行“贴近观测”开始成为可能。在新的技术条件下发展“2.0 版地震实验场”成为地震科技发展的重要议程。

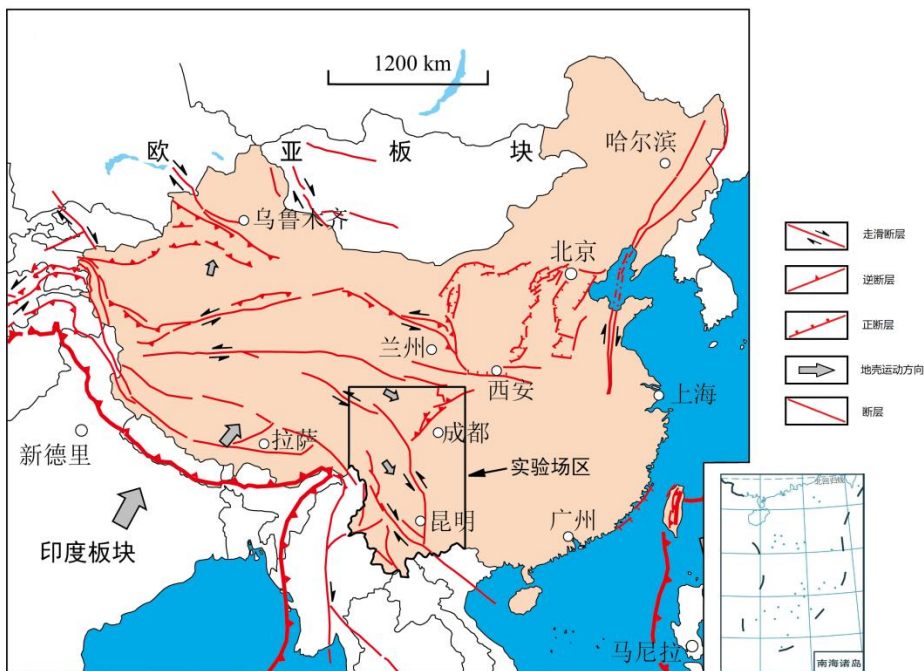
近年来，人工智能技术(AI)、分布式光纤地震观测系统(DAS)、高性能计算(HPC)、地震预警(EEW)等新的技术(系统)逐步进入地震科技并形成新的增长点，使基于野外实验基地的系统试验的重要性日益凸显。而从地震科学实验场的传统源流的角度，中国地震科学实验场同时重视两个方面的建设，一个是面向对地震的系统性科学认识的科学实验场(experimental site)，另一个是面向新技术应用的野外试验场(test site)。

（三）地震环境

川滇地区位于世界“第三极”青藏高原的东缘；邻近“喜马拉雅弧东构造结”；有压缩、剪切、拉张等各类断裂系统；既有板缘地震，也有板内地震。实验场区范围为从川甘交界到云南南部，即 $97.5^{\circ}\sim 105.5^{\circ}\text{E}$ ， $21^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 范围的国境内区域，范围约 78 万平方

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

千米。该地区有龙门山、鲜水河、安宁河、则木河、小江、红河、小金河等重要断裂。在这个地区曾发生过 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震、2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震、2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震等。从 1965 年以来的地震活动的经验看，这里每 10 年约有 14 次 6.0 级以上地震，其中 3 次 7.0 级以上地震；与这些地震的“短兵相接”，为面向减轻地震灾害风险的地震科学实验提供了难得“战机”。相关的研究不仅可以丰富和深化对大陆地震和防震减灾“全链条”科学问题的认识，并以“地震科学野外实验室”形成国际水准的创新平台，而且可以为民生保障、扶贫脱困，特别是川藏/滇藏铁路、重大水利设施、页岩气开采等国家战略工程的地震安全保障提供宝贵的基础科学资料。



实验场位置示意图

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

（四）国家需求

由于地震安全的全局重要性和防震减灾的科技属性,发展地震科技是一个重大国家安全需求。地震科技本身对于国防、外交的重要意义,也使之成为大国竞争的一个“技术制高点”。结合国家发展目标,以地震科学实验场为基础,发展“国家地震研究能力”,不仅将在防灾减灾科技发展方面起到“火车头”的作用,而且在国家创新体系的建设和中也具有重要意义。

面向 2035 年现代化目标和 2050 年现代化强国目标,比照发达国家的经验,考虑中国自身的特色优势,以科技发展为先导,促进全社会的防震减灾理念特别是地震监测预报理念,对标现代化要求,进行根本性、重塑性的改造,是一项重要而紧迫的全局性任务。在地震预测预报方面,如果像长期以来我们所熟悉的那样,长期预报只是为中期预报提供基础,中期预报只是为短临预报提供背景,短临预报只是为震前疏散提供信息,而监测的目的只是为预测预报服务,如果地震实验场的目的仅仅是地震预测方法的检验,那么这样的应对地震灾害的方式不但是落后的,而且实际应用效益的潜力发挥也极为有限。汶川地震科学总结与反思指出,我国防震减灾工作的短板之一,就是对地震预测特别是短临预测倚重过高。从国际经验看,从“预测—响应”模式到“情境—响应”模式的转换,从以“易损性”为重点向以“韧性”为重点的关注点的变化,已成为自然灾害应急管理的重要经验。现代科技条件下,针对不同时空尺度的长期、中期、短期地震预测(国际上一般并不将其全部称为“地震预测”,

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

而是有“地震危险性估计”“与时间相关的地震危险性估计”等多种说法)，以及地震序列、地震次生灾害和衍生灾害的监测预测，尽管仍有相当大的改进空间，都可以为防震减灾提供切实的服务。地震监测、震害防御工作的服务范围则更宽。因此一方面，在继续坚持不懈地支持地震预测预报的基础科学探索的同时，也决不能等到地震预测这一“世界性科学难题”得到完全解决之后再考虑应对地震灾害的问题；另一方面，对于重要的风险源，基于监测预警的应急处置能力的形成，对最大限度减少地震灾害风险，更具实质性的意义。地震监测预报实验场向地震科学实验场的转型势在必行。

一、中国地震科学实验场的发展环境与国家需求

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

Recent Achievements and Gaps

2018~2020年，中国地震科学实验场在1980年以来滇西地震预报实验场、2014~2017年川滇国家地震监测预报实验场工作的基础上，围绕“地震科学野外实验室”的定位和大陆强震、防震减灾“全链条”科学问题两个主要研究方向，以开放合作为重点追求“顺利转型”“良好开局”的短期目标，以机制探索为重点追求“可持续性”的长期目标，借鉴国际先进、结合中国实际，在观测研究、数据产品、开放合作、基础建设等4个方面开展了“打基础、利长远”的工作。

（一）观测与研究

1、完成实验场科学设计。科学设计已于2020年初正式出版；在若干国际会议上进行了介绍，引起正面反响。2019年夏，实验场应邀与阿尔及利亚同行合作开展阿尔及利亚地震科学实验场（ASES）的科学设计，作为实验场科学设计工作思路的检验；2019年底，印度地质学协会会刊（J-GSI）特邀实验场牵头单位中国地震局地震预测研究所撰写社论，介绍中国地震科学实验场。

2、试点合作开展基础研究。2019年，中国地震局地震预测研究所安排基本科研业务费专项，支持12个与系统外、国外单位合

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

作的项目，作为实验场合作项目的试点。2018~2019年，还安排基本科研业务费专项，在实验场实验由中科大团队研发的基于人工智能技术的实时自动地震监测系统。相关工作，既是对2015~2017年川滇国家地震监测预报实验场工作的继承和发展，也作为基本科研业务费专项管理改革的试点。

3、探索形成可持续的基础研究资源。2019年，中国地震局5个研究所协商设立基本科研业务费专项的实验场联合专项；实验场内容写入2020年国家自然科学基金委员会、中国地震局地震科学联合基金项目指南。虽然不同于SCEC的基础研究投入模式，但在经费数量级上与SCEC大致相当的实验场基础研究可持续投入格局初步形成。

（二）数据与产品

1. 探索数据共享服务。2019年起，实验场试点GNSS数据中心（中国地震局地震预测研究所）、地震学数据中心（中国地震局地球物理研究所）、活断层数据中心（中国地震局地质研究所）、深部探测数据中心（中国地质科学院深部中心），作为实验场“分布式数据中心”的示范。2019年底，完成《中国地震科学实验场数据年报（2019）》。

2. 试点实验场科学产品。2019年底，初步形成了实验场第一代科学产品示范，包括公共模型4个（1.0版速度模型、断层模型、形变模型、流变模型），实验场基础数据集3个（重新定位地震目录、震源机制解目录、“去丛”地震目录），科学预测模型1个（30

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

年尺度强地面运动概率预测模型)。实验场对拟入选的科技产品进行同行评审，用与科技论文相似的形式赋予 DOI 码。

3. 推进成果转化应用。针对地震应急处置，2019 年 6 月 17 日长宁 6.0 级地震发生后，根据与系统外单位的协议和预案，产出实验场为应急管理服务的科技产品；实验场为相关科研机构、高校提供地震数据。针对重要地震的科考，以长宁地震科考为契机，贯彻局领导指示，形成实验场地震科考机制，在实验场区发生有影响的强震后，自动启动地震科学考察。这不仅是实验场地震科考的新模式，也是中国地震局地震科考的新模式。2020 年，实验场继续探索科考轮值机制、虚拟科考机制等，丰富地震科考的内容。2020 年 1 月 19 日新疆伽师 6.4 级地震后，实验场迅即组织了“虚拟科考”，以探索对实验场区外发生的地震进行响应的机制。针对震情跟踪监视，2019 年底，贯彻局领导“边建设、边服务”的指示精神，实验场组织系统内外合作单位和专家，为年度地震趋势会商工作提供科学资料。

(三) 开放与合作

1. 组织开展学术交流。2018~2019 年，组织了地球科学联合学术年会、中国地震学会成立 40 周年学术大会的实验场专题，及中国地震科学实验场学术研讨会等交流活动，组织了北京 2019“一带一路”地震科学实验场国际研讨班等国际交流活动，还于 2018 年 5 月、10 月，2019 年 8 月先后组织了与地震科学实验场相关的小型国际研讨会。

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

2. 促进发挥实验场的创新平台作用。高校、中国科学院专家以实验场为平台，申报国家自然科学基金创新群体项目、国家杰出青年科学基金项目等；中国地震局工程力学研究所以实验场为平台，联合申报国家重点实验室；中国地震局地质研究所以实验场为平台，开展国家重点实验室的工作。在中国地震局与中国地质大学(北京)等单位签订的合作协议中，明确提出共建地震科学实验场的目标。作为促进发挥实验场创新平台作用的措施，2019年底尝试评出了实验场的“年度突出科技进展”12项(其中系统内外单位各占6项)，包括实验场优秀科技产品5项、实验场重要科学问题研究3项、实验场新技术实验2项、实验场顶层设计和科普产品各1项。

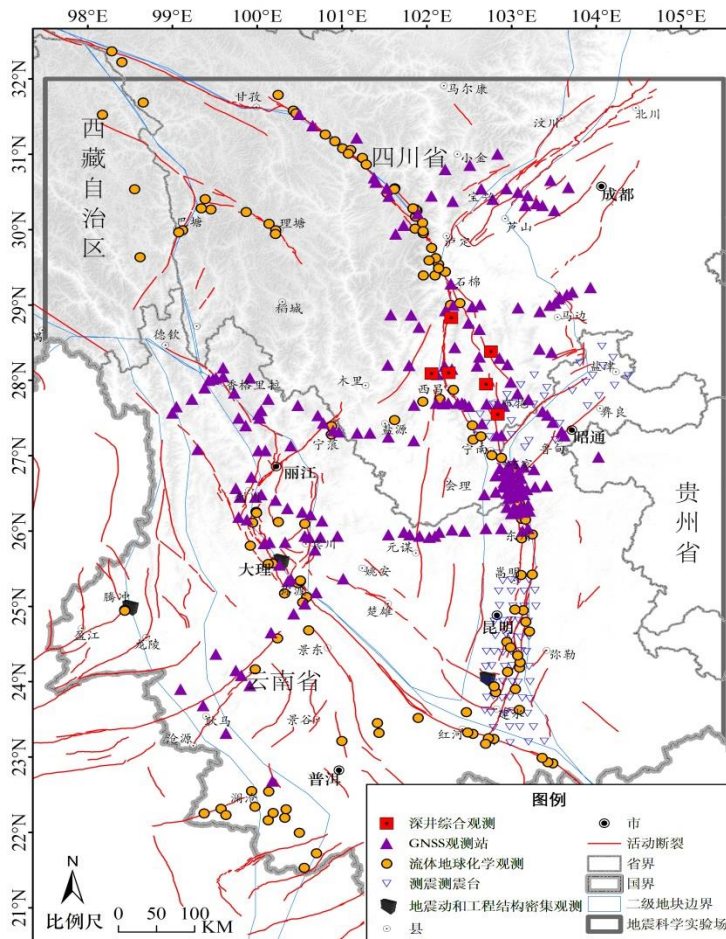
3. 提升与重大计划合作的层次和水平。2018~2019年，与“深地”计划合作，实验场作为北京DEEP 2018国际学术研讨会的协办单位；吸收“深地”计划牵头单位中国地质科学院深部中心作为实验场的分布式数据中心；提出“深地科学在地震科学中的应用”作为实验场的重要研究方向。开展“地震可预测性研究国际合作”(CSEP)项目中国实验区(CSEP-CN)的工作，以实验场为平台成功申报科技部国际科技合作项目；与“APEC地震科学合作(ACES)计划”合作，编辑出版《纯粹和应用地球物理》(PAGEOPH)杂志“大陆地震”专辑，作为“汶川地震十周年国际研讨会暨第四届大陆地震国际研讨会”的成果产出。

(四) 基础建设

1. 开展基础能力建设。落实财政部中国地震科学实验场

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

2019-2021 专项。2019 年，实施项目 6 项（1800 万元），配套修缮购置专项 2 项（1475 万元），建设深井综合观测站 7 个（含 1000 米深钻 1 个）、GNSS 观测站 108 个（观测基础设施 200 个）、地震观测站 90 个、地球化学观测点 132 个（定点观测 2 个）、强震动观测台阵 3 个；获取 LiDAR 观测 225 千米数据、利用 InSAR 数据重建区域 1 万平方千米形变场。在财政部 2019 年度绩效考评中，实验场项目获得“优秀”评价。



实验场 2019 年观测基础设施建设分布示意图

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

2020年,执行财政部实验场项目1338万元、修缮购置项目900万元,按计划实施相关的建设;到2021年,将累计新增深井观测站14个(含1000米深钻2个)、GNSS观测站200个、地球化学观测点138个(定点观测8个)、强震动观测台阵4个, LiDAR观测450千米、InSAR形变场观测7万平方千米,形成无人机LiDAR/SAR观测能力。

2. 试点人才建设。2019年,中国地震局地震预测研究所与南京大学等单位合作,设立了实验场博士后工作站;试行“CSES研究员”机制、试点“工作组”机制,作为柔性人才引进的试点。

3. 推进实验场的“行动者网络”(actors network)建设。创办了实验场网页(中、英文版)、微信公众号;编发《中国地震科学实验场通讯》(不定期,2020年3月前发布10期)、《地震科技前沿快报》(每月一期,2019年共12期)。2020年,计划出版中国地震科学实验场系列丛书(中国标准出版社、地震出版社)、编写《地震科学实验场的理论与实践》英文专著(高等教育出版社和Springer出版公司)。

(五) 差距与挑战

SCEC曾是川滇国家地震监测预报实验场的一个重要的国际参照,也是目前中国地震科学实验场的一个重要的国际参照。SCEC成立于1991年,由美国国家科学基金会(NSF)和美国地质调查局(USGS)联合资助,共经历了五个发展阶段(SCEC-1,1991~2001;SCEC-2,2002~2006;SCEC-3,2007~2011;SCEC-4,2012~

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

2017; SCEC-5, 2017 ~ 2022)。SCEC 强调地震系统科学(earthquake systems science) 的关键问题: 断层(F)、形变(G)、蠕变(R)、应力(S)、热(T)、速度(V), 这也正是中国地震科学实验场所关注的问题。但同时中国地震科学实验场更加强调大陆地震的地域特色和“全链条科学问题”的科技特色。

目前, 中国地震科学实验场的创新体系尚在形成之中, 在科学研究的深度、数据产品的质量、开放合作的广度、基础建设的水平方面, 与国际先进(例如 SCEC) 相比还有较大差距, 粗略的估计目前大致相当于 SCEC 在 20 世纪 90 年代末的水平(或 SCEC-1 的水平); 大陆型地震研究的学术优势和防震减灾“全链条”科技问题研究的地域优势尚未充分发挥, 实验场对自然灾害防治国家战略的直接贡献还十分有限; 实验场还面临着一些特有的体制机制难题, 如数据共享难题、成果转化难题、人才建设难题等。

地震科学是一门观测科学。目前, 比照发达国家例如日本、美国的地震科技, “观测强度”的显著差距主要表现为观测系统的体量差距、观测点密度差距(和由此决定的分辨率的差距)、观测技术现代化水平差距, 及多学科协同攻关程度的差距。这一显著差距使对一些关键性科学问题无法达到“敲死”证据的目标, 并使以成果转化为目的的应用研究缺乏前瞻性。对标 SCEC 的观测工作, 充分利用 SCEC-2 以来新的技术进步和正在进行的从 SCEC-4 到 SCEC-5 转型的启示, 以学习借鉴和重点赶超相结合的战略, 努力建成世界一流的地震科学研究实验基地、吸引国内外科学家参与中国地震科

二、中国地震科学实验场建设以来取得成果与存在差距

技术创新的“大科学”平台、2035年“地震科技强国”目标的标志性工程，是实验场的一项重要任务。

实验场是一个“大科学”性质的系统工程，但目前的组织方式还与这一性质不相适应；参照历史上若干实验场的经验教训，实验场的可持续性问题更是值得认真对待的挑战；实验场科技部署的逐步展开、实施的过程和地震活动、地震灾害之间，存在一个“系统对抗”性质的“博弈”问题，“地震总是走在人的前面”的情况，仍是目前地震科技的一种“常态”，这一挑战需要认真对待、周密谋划。在实验场的规划中，要充分考虑中长期强震重点危险区分布和近期地震形势状况，尽可能降低“东海型”实验（由于1995年阪神地震）、“帕克菲尔德型”实验（由于1989年洛马·普雷塔地震、1992年兰德斯地震，特别是2004年发生于实验场宣布结束之后的帕克菲尔德地震）的负面影响的的风险；同时，要建立实验场区强震科学考察预案，以在一些预期的、或超出预期的重要地震发生后，通过有准备的组织协调，取得应有的科学观测实验结果。

三、中国地震科学实验场的发展愿景

Vision and Strategy

紧密结合《中国地震科学实验场设计方案》所确定的长远发展目标 and 《中国地震科学实验场科学设计》所确定的长期科学目标，聚焦“地震科学野外实验室”的定位和大陆强震、防震减灾“全链条”科学问题两条主线，用五年的时间，初步形成实验场的科技创新体系；力争把实验场建成防震减灾现代化、尤其是地震科技现代化的示范区；形成开放合作的示范、体系建设的示范、成果转化的示范、能力建设的示范。

（一）持续开展观测研究

通过顶层设计、项目试点、研究资源投入保障，推进体系化的实验场基础研究，力争在若干重要科学问题上取得有价值的研究成果，并使实验场逐步形成凝聚人才、凝聚成果、凝聚思想的能力。充分利用近年来在中长期地震预测、密集观测、精密测量、半可控地震过程、近断层采样、中尺度野外实验等方面的新的科技进展，在有可能“抓住”一个或几个强震的地区，针对国家地震科技创新工程中的科学假说和科学问题，开展接近真正意义上的科学实验。

（二）不断完善数据产品

通过数据共享服务、科学产品、支撑引领地震业务的成果转化

三、中国地震科学实验场的发展愿景

应用，逐步打造中国地震科学实验场“品牌”。重点针对数值地震预测模型的建设和改进，建立和完善“实验场综合模型”。探索形成在实验场区开展地震监测仪器检测、地震预测方法检验、震害防御技术应用试点的机制。研究和推出实验场的技术标准。

（三）积极推进开放合作

通过组织学术交流活动、提升与重大科技项目合作的层次和水平，实质性地推动实验场成为国际性地震科技创新平台。办好实验场国际年会，使之成为体现实验场创新平台作用的“品牌”。推进与中国地质大学（北京）等单位共建实验场目标的落实。加强与“地震可预测性研究合作计划”（CSEP）、“亚太经合组织地震科学研究合作计划”（ACES）的合作；争取加入“国际大陆科学钻探计划”（ICDP）、“国际地球科学计划”（IGCP）的合作。

（四）扎实开展基础建设

发挥研究所、省局、中心、防灾学院、深研院、地方地震机构、学会、协会等在建设实验场中的作用。通过基础能力建设、人才建设、实验场“行动者网络”建设，推进形成层次性的、充满活力的、可持续的实验场创新体系。继续试点和不断改进“CSES 研究员”机制，争取设立专项基金（CSEScholarship）；继续试点和不断改进工作组机制，在“十四五”结束时基本定型。结合实验场的国际合作，适时申报国际科技合作示范基地。

（五）凝练和争取实验场重大科技基础设施项目

面向国家发展改革委国家重大科技基础设施项目，积极开展立

三、中国地震科学实验场的发展愿景

项申报,开展科学观测系统建设和服务平台建设。实施和升级实验场建设与运维项目,争取在未来一段时期内成为保证实验场可持续性的一个重要支点。同时,围绕实验场的重要科学问题清单,培育地震科学实验场的“项目生态”,关注国内外可用科技资源的“版图”及其变化,通过规划保证实验场可持续性发展。

(六)明确实验场的中长期发展目标

地震科学实验场工作,贵在坚持。“十四五”规划(2021~2025)期间,实验场要初步完成体系建设,并形成示范。面向2035年“地震科技强国”目标,实验场工作要以“钉钉子”精神和“一张蓝图干到底”的韧性长期坚持、扎实推进。**一要**面向减轻地震灾害风险的实际需求,突出大陆地震和防震减灾“全链条”科学问题,推进断层带结构、断层摩擦、流体作用、低频地震、应力测量、数据同化等基本科学问题的研究,推进数值地震预测路线图、CSEP中国实验区、地震预警系统效能现场测试、地震危险性评估方法(PSHA vs. NDSHA)比较研究等方面的工作。**二要**面向“重塑中国防震减灾业务的技术天际线”,创造条件推进试验“北斗”系统应用、光缆地震监测、主动震源与时变地球物理、旋转地震学、人工智能应用与实时地震学、精准时钟、中微子探测、数字地球、地震深钻、地震控制等新技术的试验与应用。**三要**对实验场区内外的地震形势有清醒的认识和周密的对策,在新的技术条件下做好地震预测和防范化解重大地震灾害风险的现场实验,通过实验场内外的地震的科学考察实现“解剖地震”的目标。**四要**借鉴国际经验,通过地震科学

三、中国地震科学实验场的发展愿景

实验场，将分布于各系统、各地方的科技力量转变成集成性的国家地震科技力量，并努力追求“地震科技国家实验室”的目标。

附录 I

中国地震科学实验场主要科学问题

Scientific Challenges

一、前沿科学方向

中国地震科学实验场前沿科学方向主要有三个方面：

大陆型强震孕育环境：针对印度板块动力边界加载、活动地块运动调整、断层运动状态、构造带变形机制等，开展地质构造演化、活动地块划分、壳幔介质结构、区域变形特征、壳幔介质流变结构、热力学结构、高原隆升作用等研究，系统分析大陆型强震的孕育发生动力学环境，关注时间、空间上不同尺度的地震现象的相互关系与转化。

地震发生过程：针对大陆动力学框架的活动地块、主要断裂带、孕震断层段应力应变分配过程，开展级联破裂、断层运动闭锁程度、断层应力状态、断层摩擦力学性质等震源物理模型研究，科学认知大陆型强震孕育发生的动力学全过程。

致灾机理：选择典型场地和城市，开展场地地震效应、地震地质灾害形成机理、工程结构破坏机理、地震灾害风险监控、地震动预测与灾害情景模拟等研究，为地震灾害风险评估和韧性城乡建设提供技术支撑。

二、近期聚焦的科学问题

中国地震科学实验场近期聚焦的科学问题主要有 18 个：

(1) 如何构建川滇地区统一的大尺度岩石圈结构模型？如何认识强震孕震环境与岩石圈结构的关系？

(2) 地下介质性质变化（如波速、各向异性等）在多大程度上反映了地壳应力状态变化？如何影响地震孕育发生过程？是否可观测？

(3) 川滇地区主要断裂存在断层分段和级联破裂，其主要控制因素是什么？

(4) 如何利用激光雷达扫描技术（LiDAR）、GNSS、超密集台阵等新观测技术构建高分辨率断层精细结构模型？

(5) 如何精准获知川滇地区主要断裂现今运动状态？是否存在断层“蠕滑”行为？

(6) 川滇地区主要活动断裂的晚更新世活动速率、古地震活动历史、最后一次强震的离逝时间是什么？

(7) 缅甸弧俯冲作用如何影响川滇主要断裂应力应变累积过程？如何构建应力应变动态变化数值模型？

(8) 在板块边界带已观测到很多低频地震事件，这种现象在大陆地区是否存在？

(9) 强震前是否存在亚失稳现象？如何在野外观测验证？

(10) 地下应力状态是怎样的？地震引起的库仑破裂应力变化是否能够直接触发地震？能否通过观测验证？

(11) 地震学方法、大地测量方法以及其他方法测量得到的应力、地震应力降等，相互之间是什么关系？

(12) 川滇地区经常观测到地震前有地下流体异常变化，如何认识其内在物理机制？可否进行数值建模？

(13) 现有数值地震预测模型在多大程度上反映了真实情况？关键构成要素有哪些？

(14) 如何基于现有观测数据构建强地面运动情境？怎样在减轻地震灾害风险中发挥作用？

(15) 川滇地区地震造成的农居和城市民居的破坏特征是什么？各种工程抗震措施的效果如何？

(16) 梯级水电站等重要工程设施和生命线工程如何有效防范重大地震及次生灾害风险？

(17) 影响现代城市韧性的主要因素有哪些？如何通过工程措施和非工程措施提高现代城市韧性？

(18) 人类活动对地震活动的影响有哪些？如何安全地开展生产活动而不诱发地震？

附录 II

中国地震科学实验场科技产品（1.0 版）示范

Demonstration of Community Models and Data

一、实验场公共模型

- （一）1.0 版速度模型
- （二）断层模型
- （三）形变模型
- （四）流变模型

二、实验场基础数据集

- （五）重新定位地震目录
- （六）震源机制解目录
- （七）“去丛”地震目录

三、实验场科学预测模型

- （八）30 年尺度强地面运动概率预测模型

一、实验场 1.0 版速度模型

模型¹来自中国科学技术大学姚华建教授团队承担的实验场项目《川滇地区公共速度模型 V1.0 的构建》。

(一) 研究技术路线

1. 提取川滇地区固定和流动台阵的噪声面波频散曲线以及地震面波双台频散曲线, 收集和处理固定和流动台阵的体波走时数据, 以川滇地区三维地壳上地幔顶部横波速度结构模型 SWChinaVs_2018 (经过空间平滑) 为初始反演模型, 并以已经发表的密集台阵接收函数得到的 Moho 界面为约束, 采用课题组研发的体波面波走时联合反演 V_p , V_s 和 V_p/V_s 算法 (Fang et al., 2016; Fang et al., 2019), 反演获得川滇地区地壳上地幔顶部三维公共速度模型 1.0 版本。

2. 以川滇地区地壳上地幔顶部三维速度模型为基础, 基于三维速度模型结构为约束, 采用 H-k 方法获得川滇地区 1000 多个台站下方更可靠的地壳厚度和 V_p/V_s ; 采用基于三维模型走时矫正的 CCP 叠加方法, 进一步获得整个川滇地区 Moho 界面模型 1.0 版本。

(二) 模型成果

通过综合体波走时与噪声面波频散走时联合反演 3-D 地壳 V_p 及 V_s 模型 SWChinaVpVs_2019。模型在深度 40 km 以上的横向分辨率为 50 km, 垂向分辨率优于 10 km; 在深度 40km 以下的横向分辨率 70km, 垂向分辨率 10-15 km。

¹ DOI: 10.12093/02md.02.2019.01.v1

附录 II 中国地震科学实验场科技产品 (1.0 版) 示范

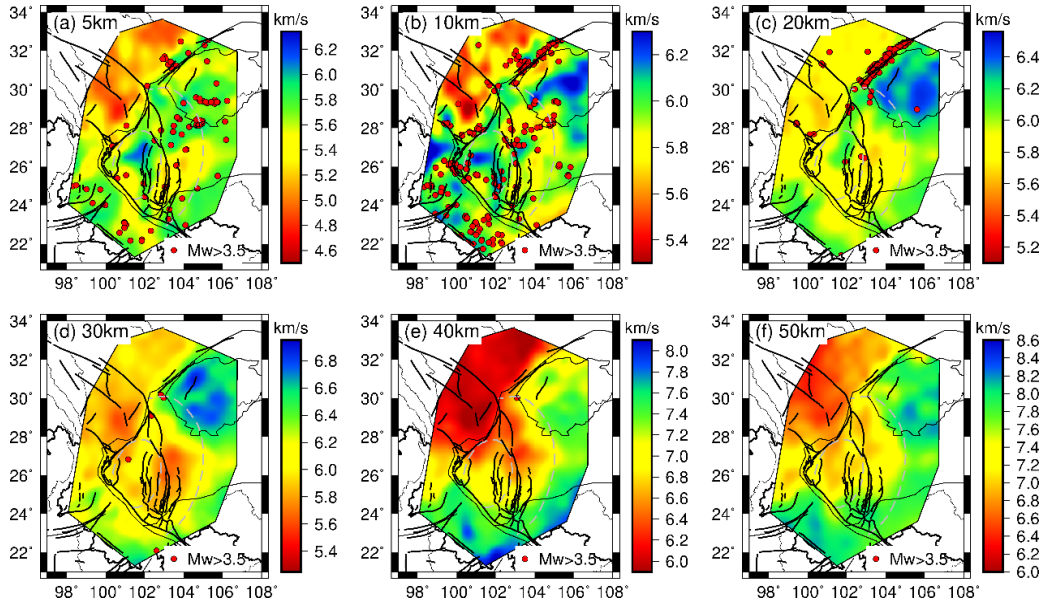


图 1 水平剖面上 (深度 5/10/20/30/40/50 km) 的联合反演 V_p 模型

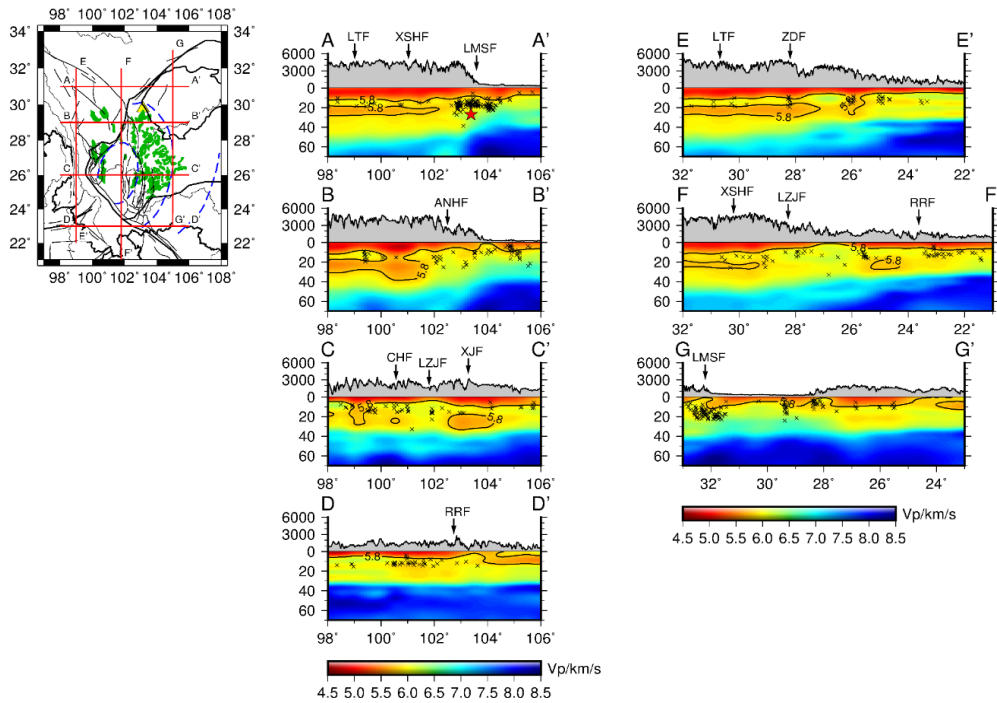


图 2 垂直剖面上 (AA'/BB'/CC'/DD'/EE'/FF'/GG') 的联合反演 V_p 模型

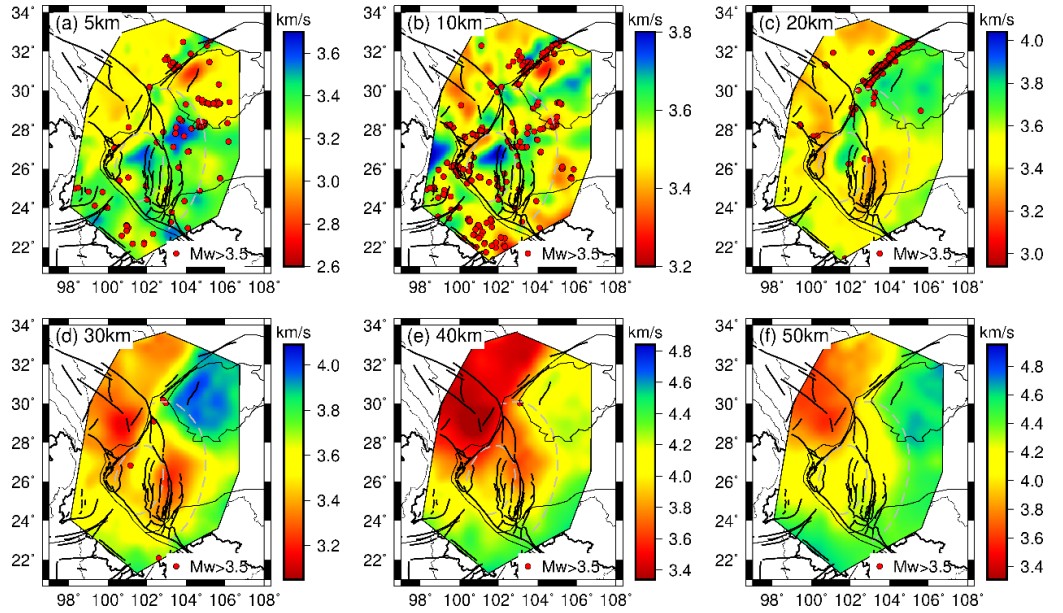


图 3 水平剖面上 (深度 5/10/20/30/40/50 km) 的联合反演 Vs 模型

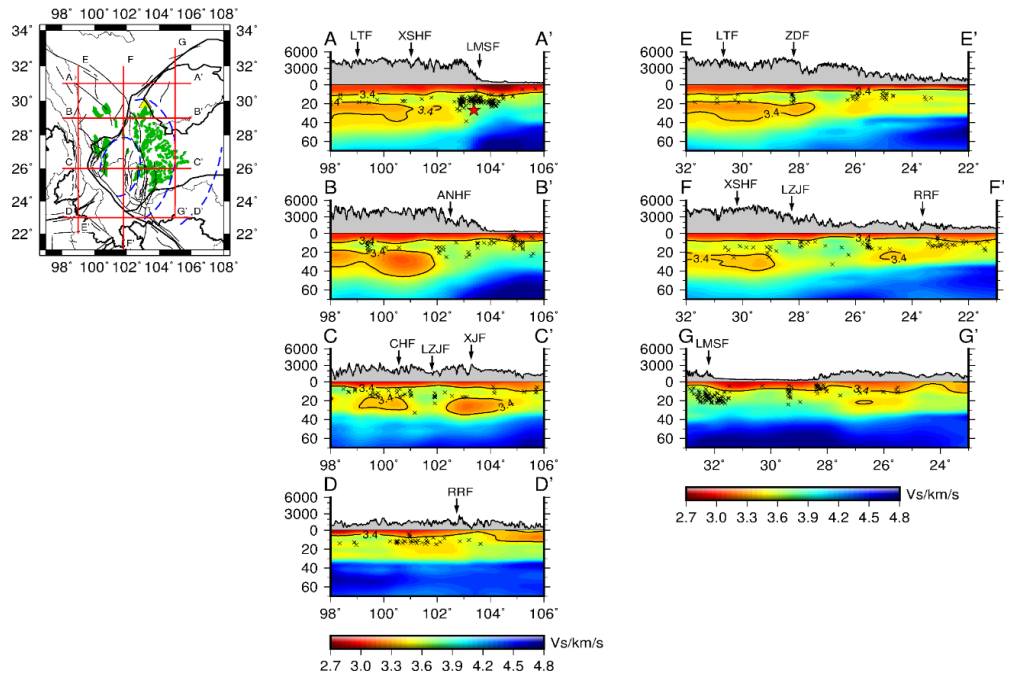


图 4 垂直剖面上 (AA'/BB'/CC'/DD'/EE'/FF'/GG') 的联合反演 Vs 模型

二、实验场断层模型

模型²由来自中国地震局地质研究所鲁人齐研究员、天津大学刘静教授团队承担的实验场项目《统一断层模型数据库》。

（一）研究技术路线

基于 SKUA-GOCAD 三维建模平台，参考复杂构造三维建模方法和流程，进行活动断层的三维建模和验证分析，建立川滇地区三维可视化、主要活动断裂三维模型。关键技术包括：正、逆断层相关褶皱理论；构造剖面平衡恢复与检验；多源数据融合与属性分析；多元约束活动断层三维建模技术。

多元约束活动断层三维建模技术和方法

序号	资料来源	技术特点	研究内容	约束深度
1	浅表活动断层调查	露头、探槽、钻探、年代学等	地表断层分布迹线、断层活动性参数	地表
2	长周期与同震形变观测（GPS、InSAR、水准）	拟合、反演等	块体运动状态、边界条件、模拟活动断层几何学、运动学	浅表
3	区域地质与构造形变（高程、浅层地质构造）	构造定量解析方法（倾角分析、轴面制图）	断层几何学、长周期运动学构造变形量、变形期次等	0-500m
4	震源机制解析	CMT、波形拟合等	发震断层的空间位置、活动断层产状参数、性质	5-20km
5	小震精定位与余震序列	双差定位等	判别发震断层空间展布特征、断层三维几何结构	10-20km
6	人工地震反射剖面（深、浅地震探测）	叠前/叠后、偏移（断层相关褶皱原理）	断层识别分辨率较高；断层几何学、运动学；区分断裂之间的级联、交切的关系	0-60km
7	高密度流动台站观测	噪音成像等	断裂带的大致结构与成像	0-60km
8	地震学台站观测	高精度层析成像	地壳尺度三维速度结构	0-100km+
9	高密度电、磁等物探	联合反演、AMF法	深部构造特征与物性参数	0-100km+

（二）模型成果

综合地表活断层迹线（同震地表破裂）、人工地震剖面、震源机制解、小震重定位、地震波速度、大地电磁测深、数字高程、地

² DOI: 10.12093/04md.02.2019.02.v1

质图、遥感图、钻井/钻孔等数据，搭建了系统的数据库，构建了三维活动断层模型，并在重点断裂上分析三维断层结构之间的相互关系。

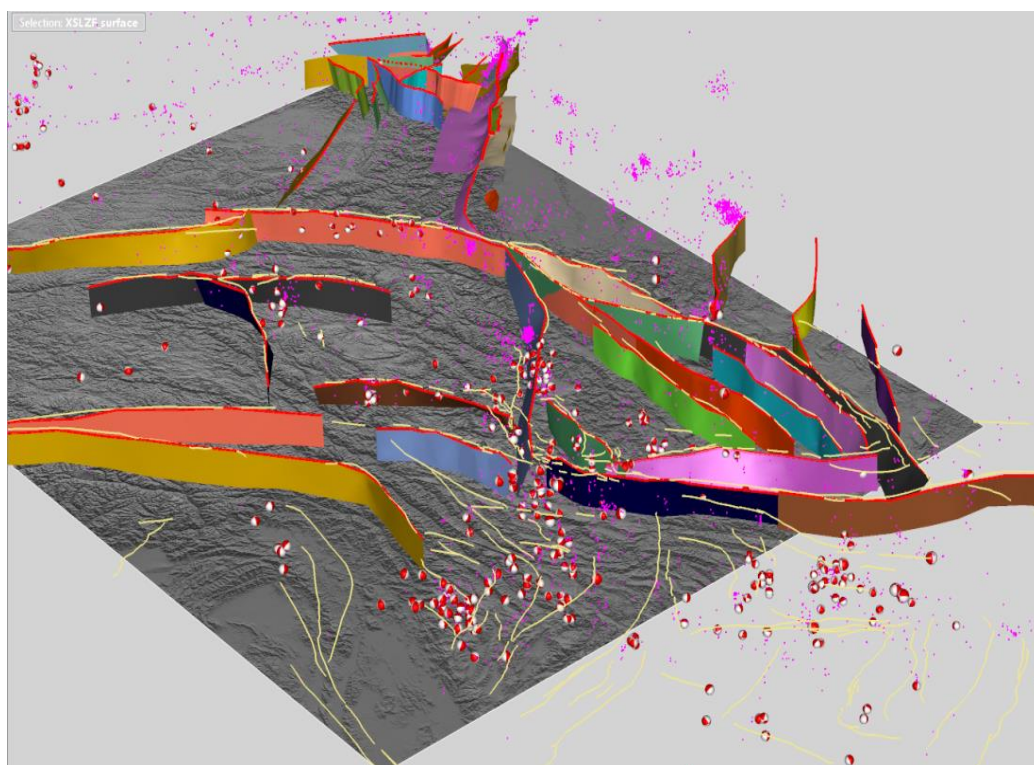


图 5 川滇地区主要活动断裂三维断层模型 V1.1

三、实验场形变模型

模型³由广东工业大学王华教授团队完成。

(一) 研究技术路线

形变模型研制主要包括大地测量数据的收集与处理、GNSS 速度场解算、速度场模型建立、应变率场模型建立、结果验证等过程。模型提供实验场区域高精度大地测量观测速度场，精度达到 1 mm/yr；速度场模型精度达到 1-2 mm/yr；应变率场模型，精度达到 $5 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ 。

(二) 模型成果

获得中国地震科学实验场 517 个测站的 GNSS 观测速度场；依据上述 GNSS 观测结果，计算得到实验场区域的速度场模型和应变率场模型。

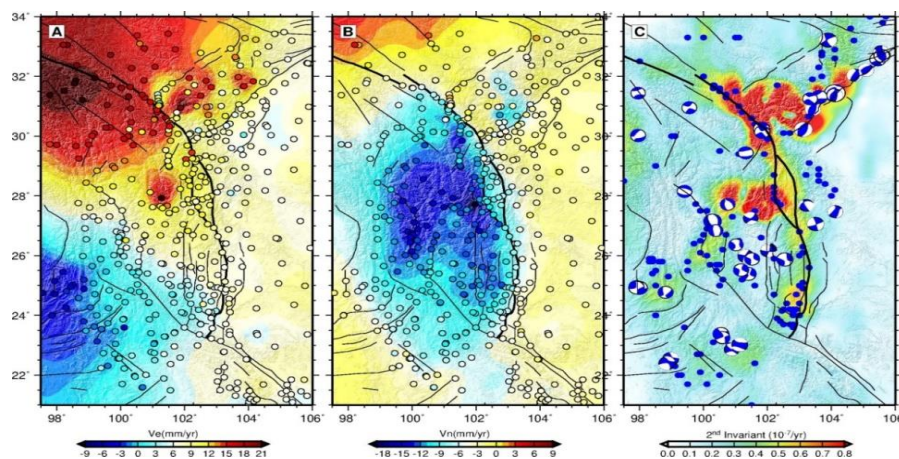


图 6 速度场模型 (蓝点为历史地震)
东向 (A); 北向分量 (B); 应变率张量的第二不变量 (C)

³ DOI: 10.12093/03md.02.2019.04.v1

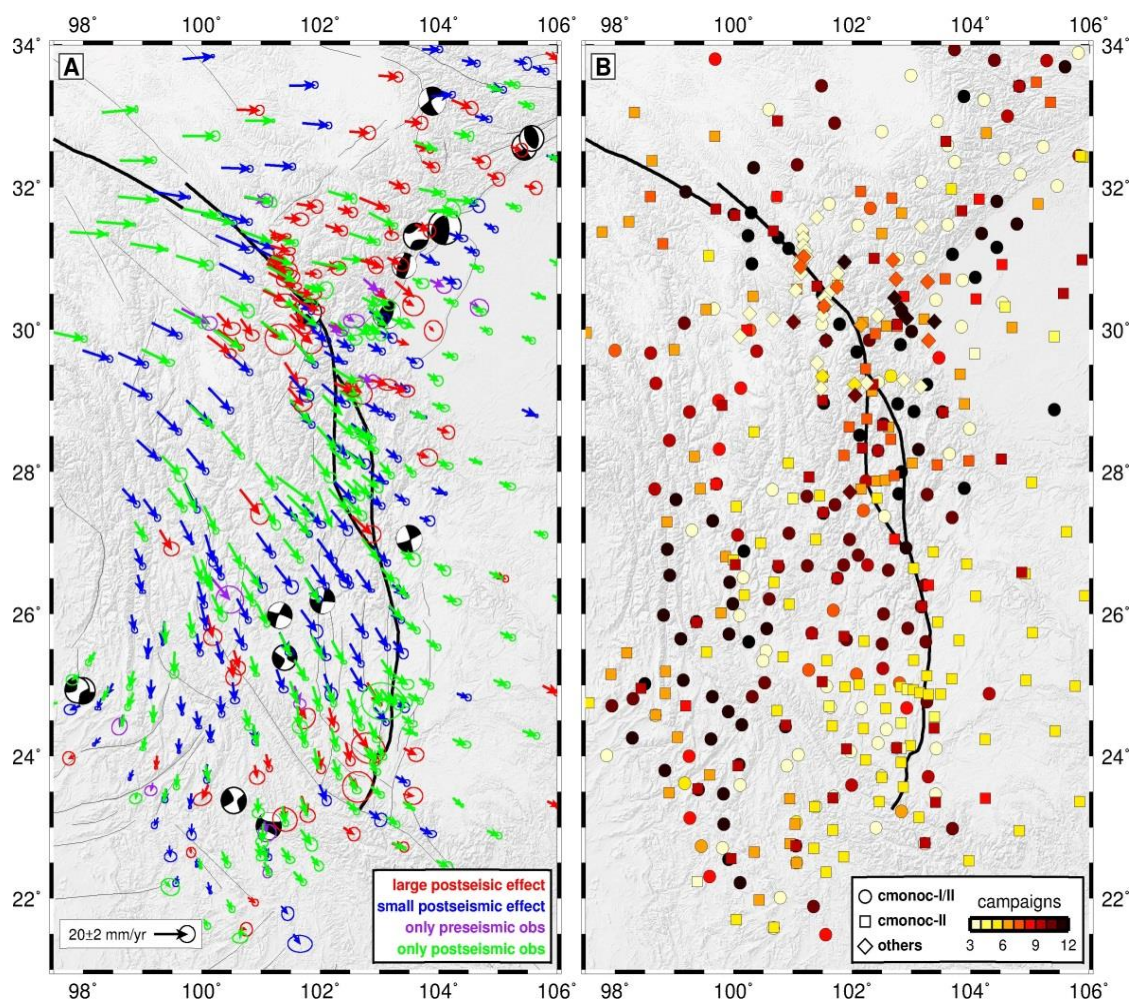


图 7 GNSS 速度场及其受地震影响的程度

(A) 中红色箭头表示震前与震后速度差异较大, 采用震前速度; 蓝色箭头表示震前与震后速度差异较小, 采用所有数据估计的速度; 绿色箭头表示只有震后观测; 紫色箭头表示只有震前观测。(B) 为 GNSS 速度场观测值的期数 (区域站) 或年数 (连续站)。

四、实验场流变模型

模型⁴由中国地震局地震预测研究所邵志刚研究员、第二监测中心徐晶团队完成。

(一) 研究技术路线

采用岩石实验室资料、壳幔温度状态以及震间期 GNSS 观测资料求得的应变速率来估算粘滞结构。利用中国大陆岩石圈温度估计成果和 GNSS 计算的应变速率结果 (石耀霖、曹建玲, 2008), 计算川滇地区地壳和上地幔的等效粘滞系数。

(二) 模型成果

建立实验场地区壳幔粘滞结构模型, 获得了不同深度粘滞系数分布初步结果以及横跨川滇菱形地块东边界带不同位置的粘滞系数剖面结果, 为区域运动学模型和动力学模型的构建提供流变结构的参考。

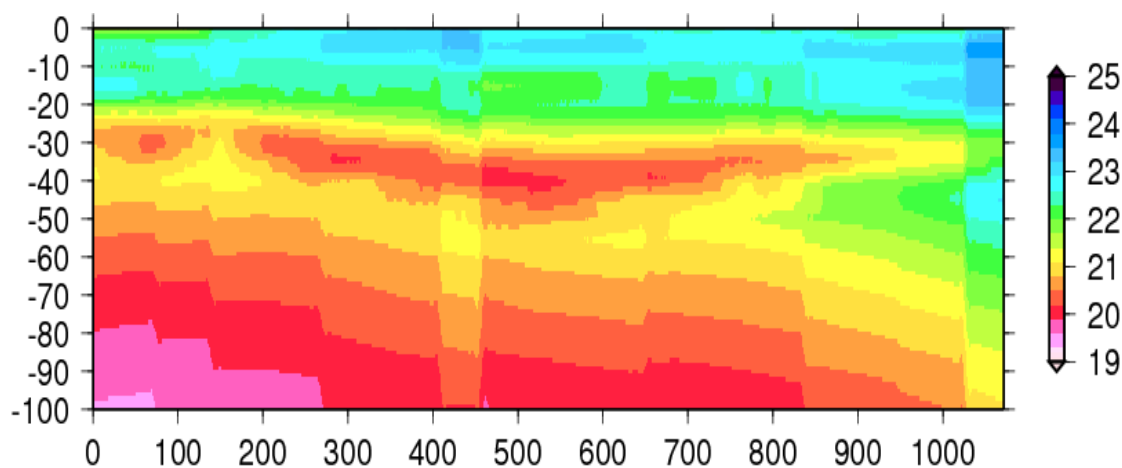


图 8 川滇地区剖面粘滞结构 (E 96.5° ~ 105°; N 24.5° ~ 30.5°)

⁴ DOI:10.12093/04md.02.2019.03.v1

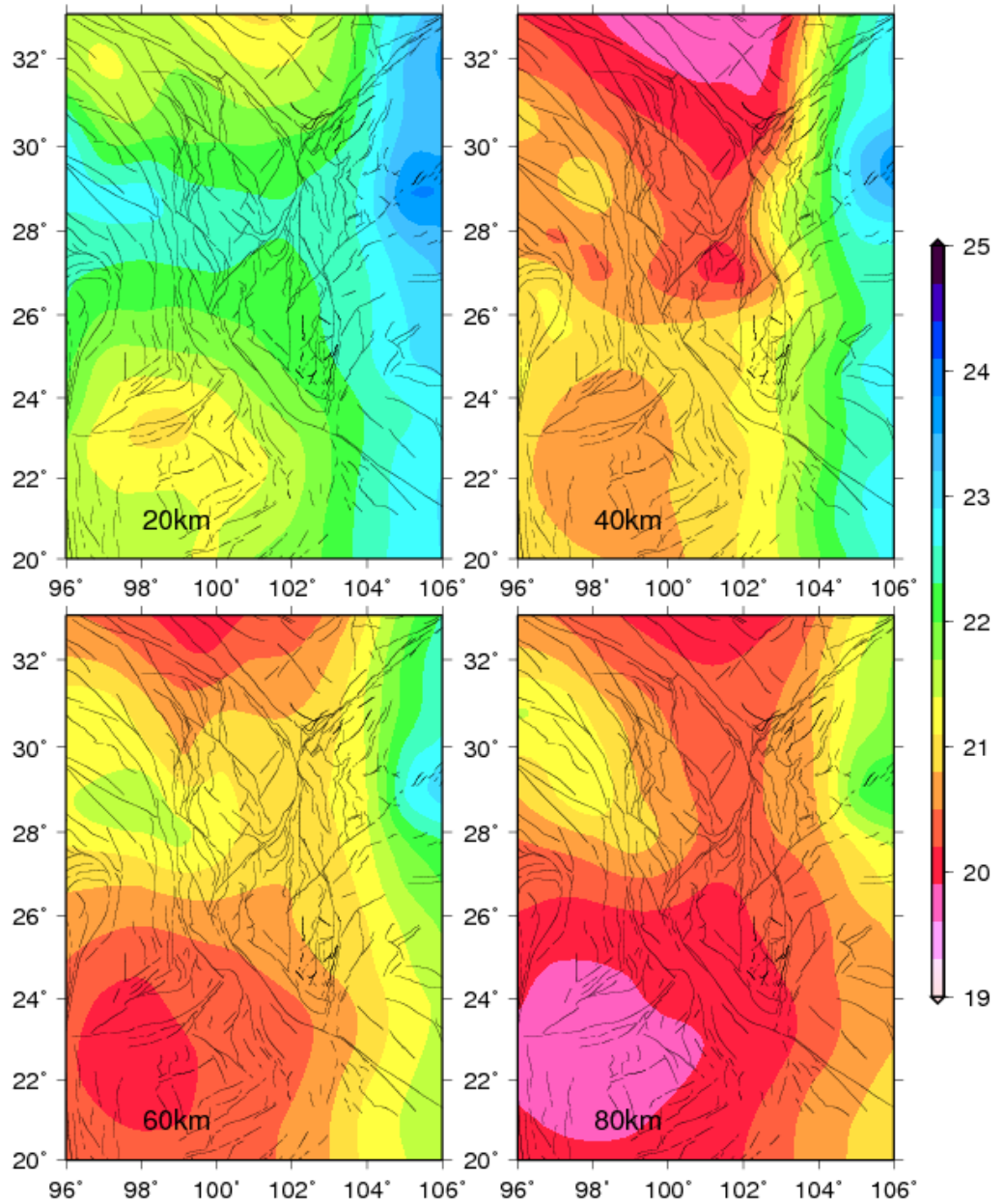


图 9 川滇地区不同深度粘滞系数分布 (20 km, 40 km, 60 km, 80 km)

五、实验场重新定位地震目录

数据集⁵由四川省地震局龙锋高级工程师团队完成。

已完成 2009 年 1 月至 2019 年 3 月南北地震带 ML1.5 级以上 127009 条地震的重新定位，其结果已在小震稀疏段判断、闭锁段判定、发震构造分析等方面得以应用。

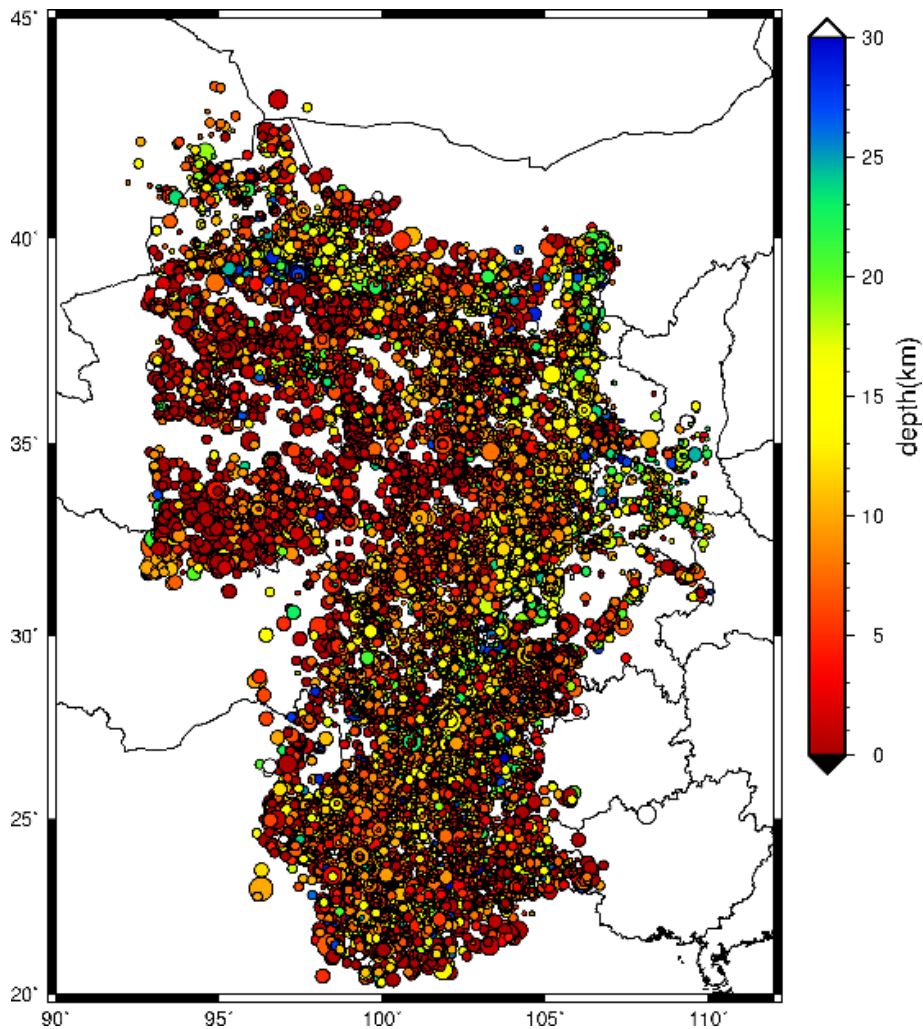


图 10 南北地震带重新定位后的震中分布图

⁵ DOI: 10.12093/01md.02.2019.05.v1

六、实验场震源机制解目录

数据集⁶来自中国地质大学（武汉）郑勇教授团队承担的实验场项目《鲜水河—小江断裂带的闭锁状态研究》。

对实验场区域的 4.0 级以上的地震震源机制解进行研究，给出了研究区域的地震震源性质和深度，以及断层特征，可为建立实验场综合模型的构建提供关键性的支撑。3 个研究组独立开展研究，3 家结果在较大地震（ML>4.5 级）上一致性很好，ML4.0~4.5 级地震总体上比较一致，结果可靠。

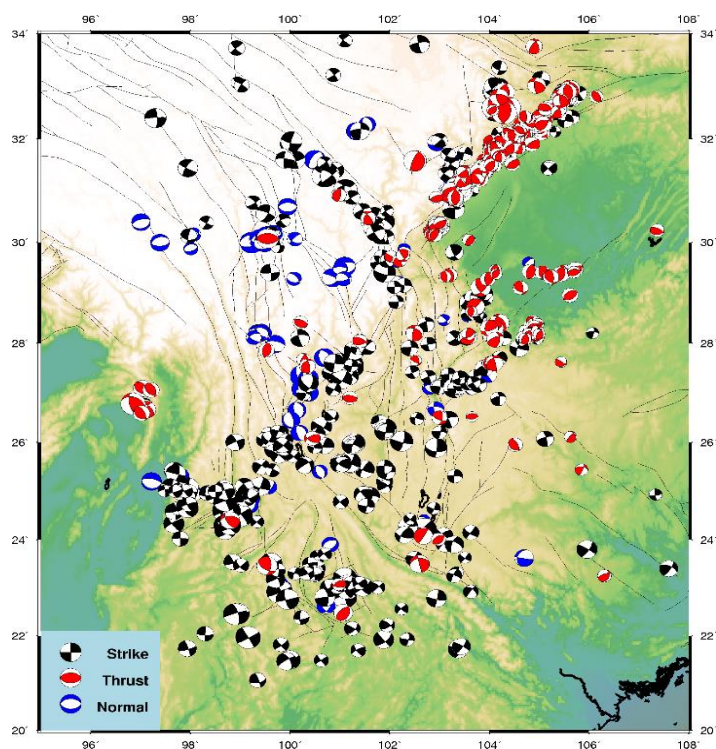


图 11 1970-2017 震源机制解结果
(2009 年以前的结果摘自 Harvard GCMT 结果)

⁶ DOI: 10.12093/01md.02.2019.07.v1

七、实验场“去丛”地震目录

数据集⁷由中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员团队完成。

利用“除丛”（decluster）的统计地震学技术方法，获得地震科学实验场区内的背景地震目录，共享并提供实验场，为区域内开展地震预测建模、地震活动分析和工程地震学研究等使用。

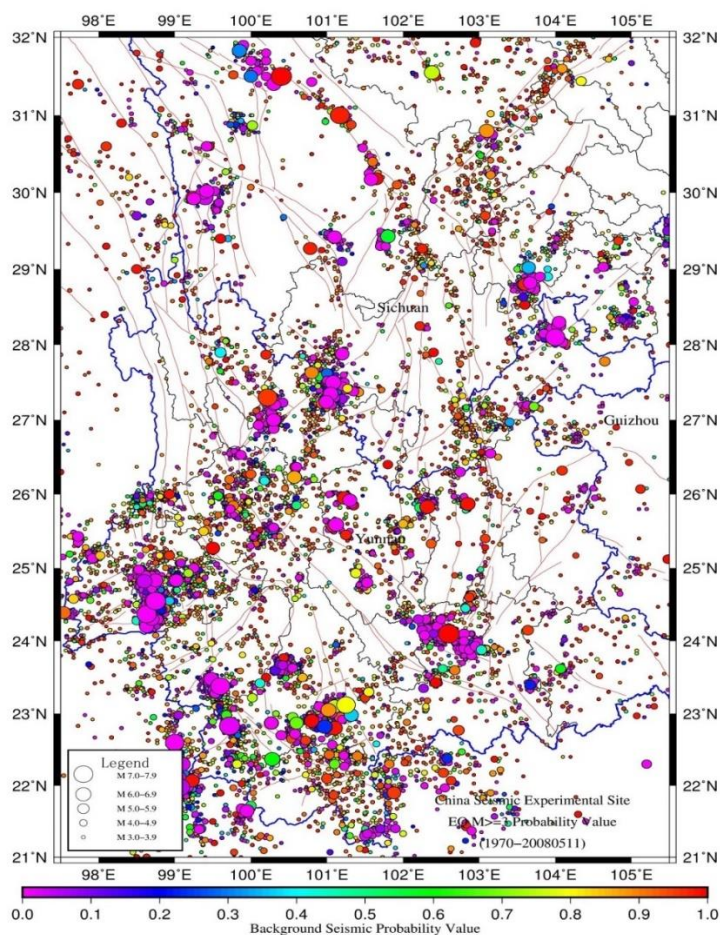


图 11 川滇地区背景地震概率的空间分布
(图中每个地震的颜色背景地震概率的具体数值)

⁷ DOI:10.12093/01md.02.2019.06.v1

八、实验场 30 年尺度强地面运动概率预测模型

数据集⁸来自中国地震局地震预测王芃副研究员承担的实验场项目《实验场综合概率预测模型的初步模型构建》。

获得实验场区 30 年尺度强地面运动概率预测模型。根据模型，未来 30 年鲜水河断裂带、小江断裂带、红河断裂带和小金河断裂带等川滇菱形块体的主要边界带出现峰值地表加速度的概率较高，尤其是块体东部边界的鲜水河断裂带、小江断裂带北段、小江断裂带南段和莲峰—昭通断裂带；相对的，安宁河断裂带、则木河断裂带和小江断裂带中段出现峰值地表加速度的概率较低。

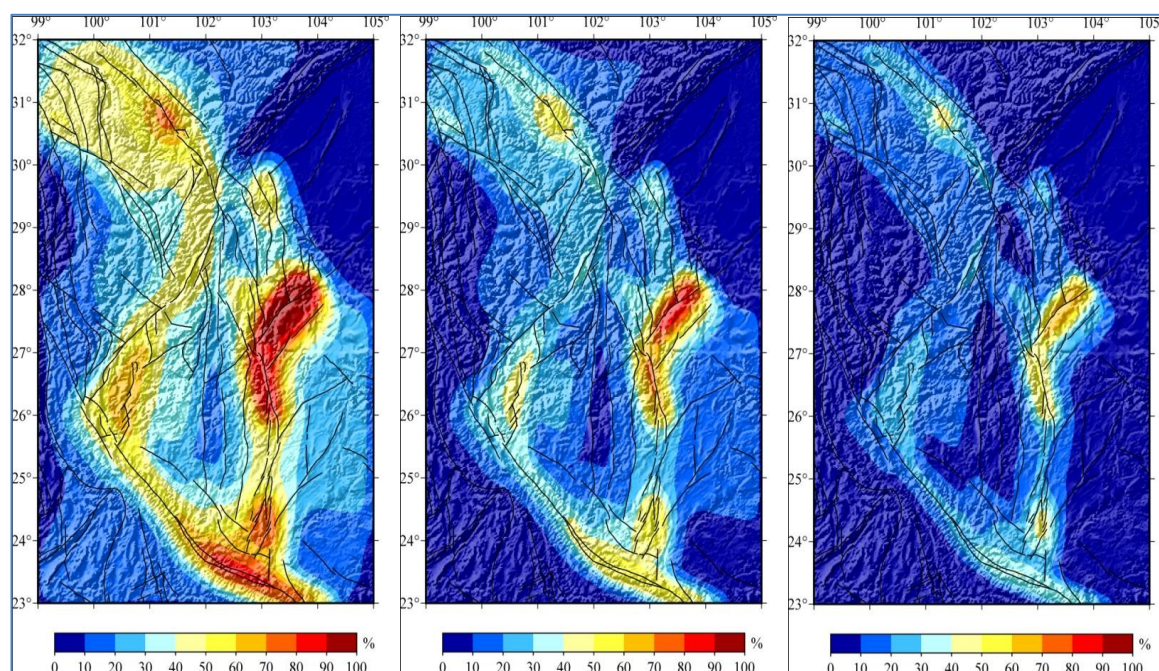


图 13 研究区未来 30 年峰值地表加速度超过不同阈值的概率
(非泊松分布, $\nu=0.8$)

(A) 超过 0.10g; (B) 超过 0.15g; (C) 超过 0.20g

⁸ DOI: 10.12093/02md.02.2019.08.v1

附录 III

中国地震科学实验场 2019 年突出科技进展

Highlights in 2019

一、实验场顶层设计

(一) 实验场科学设计

二、实验场优秀科技产品

(二) 实验场区 1.0 版公共速度模型构建

(三) 实验场区运动学模型与重点构造部位动力学模型

(四) 实验场区公共断层模型

(五) 实验场 3 维密度结构

(六) 基于地球物理剖面的实验场精细地壳结构

三、实验场重要科学问题

(七) 四川长宁窗注水影响和机理研究

(八) 鲜水河—小江断裂带的闭锁状态

(九) 小江断裂带的深部构造活动行为与地震危险性估计

四、实验场新技术实验

(十) AI 技术于地震监测系统的现场实验

(十一) 新型地球化学传感器现场实验

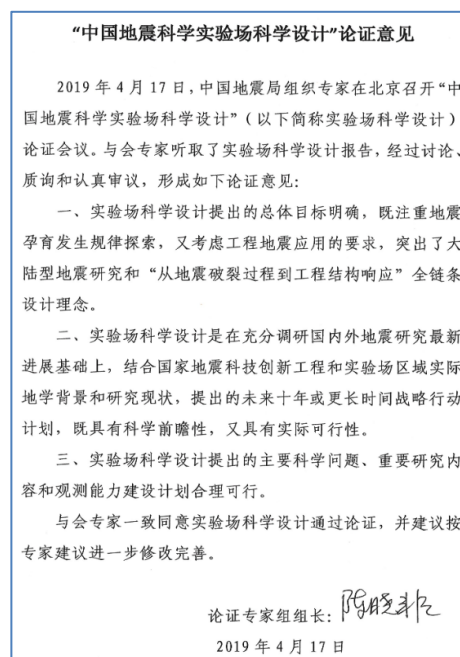
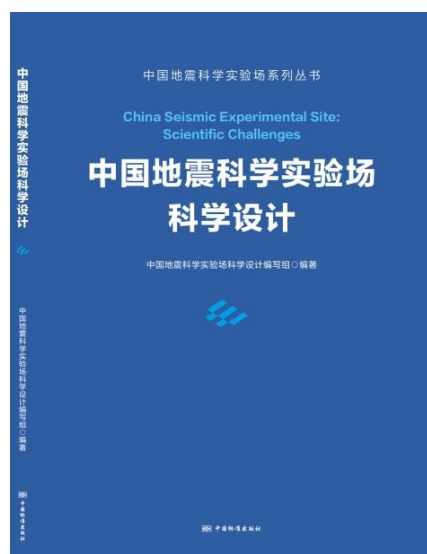
五、实验场科普产品

(十二) 实验场区遥感图像与主要构造视频

一、实验场科学设计

由中国地震科学实验场科学设计编写组完成。

2019 年 4 月，包括 9 位中国科学院院士在内的二十余人专家组参与科学设计的评审工作，一致认为科学设计中总体目标明确、是在调研国内外最新进展基础上提出了未来十年或更长时间战略行动计划，既具有科学前瞻性，又具有实际可行性，一致同意通过论证。同年 5 月 6 日，中国地震局印发科学设计。2019 年 12 月底，科学设计已由中国标准出版社正式出版。



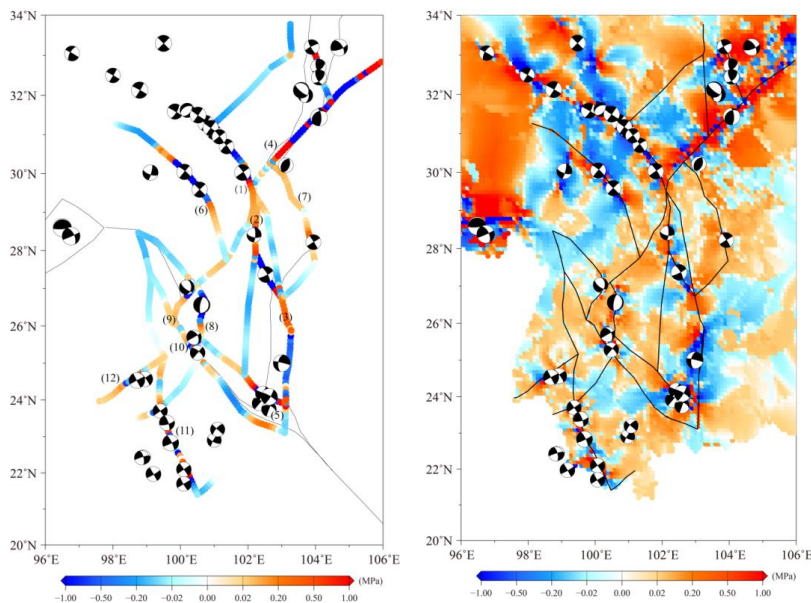
《中国地震科学实验场科学设计》与专家论证意见

二、实验场区 1.0 版公共速度模型构建

由中国科学技术大学姚华建教授团队完成。项目成果提交实验场作为科技产品示范（见附录 I）进行共享。目前，模型数据已实际应用于实验场基于 AI 的地震监测和震源参数自动产出系统研发等工作。

三、实验场区运动学模型与重点构造部位动力学模型

由中国地震局地震预测研究所邵志刚研究员团队与中国地震局地壳应力研究所等单位合作完成。发展了中长期强震危险区的发震紧迫程度分析方法。获取了川滇地区主要断层上强震引起的库仑应力变化，分析了库仑应力增加显著和库仑应力增加比较显著的区段。相关成果已在强震长期危险区确定和紧迫程度判定工作中得到应用。



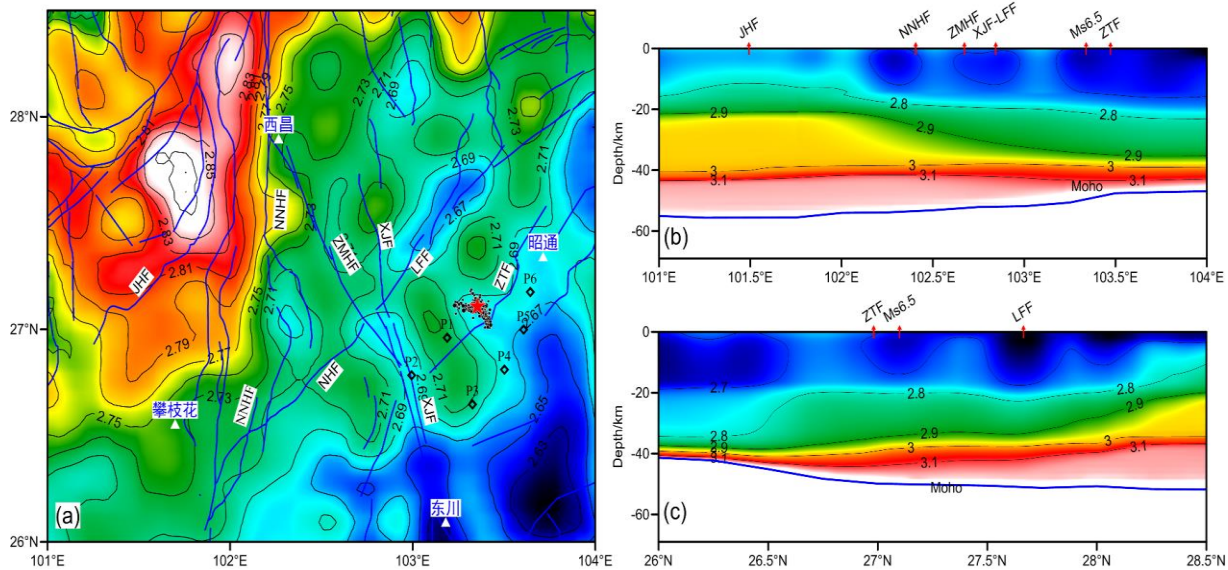
实验场区运动学模型与重点构造部位动力学模型

四、实验场区公共断层模型

由中国地震局地质研究所鲁人齐研究员、天津大学刘静教授团队完成。项目成果提交实验场作为科技产品示范（见附录 I）进行共享。

五、实验场 3 维密度结构

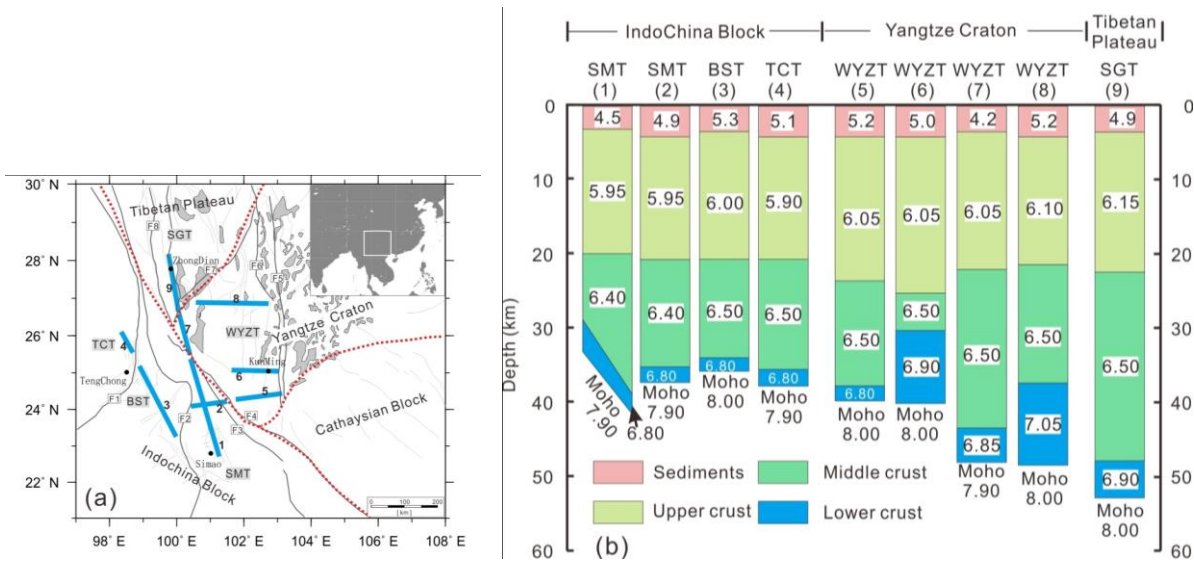
由中国地震局地球物理研究所陈石研究员团队完成。发展了三维密度结构模型构建方法。通过测试，方法上保证了研究成果的高水平。实际应用中，在鲁甸地震中发现震中位置的布格重力异常场存在一个北西向的梯度带，说明在震中两侧地壳物性结构有一定差异，并基于三维反演结果解释了 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震孕震区结构特征。



实验场 3 维密度结构

六、基于地球物理剖面的实验场精细地壳结构

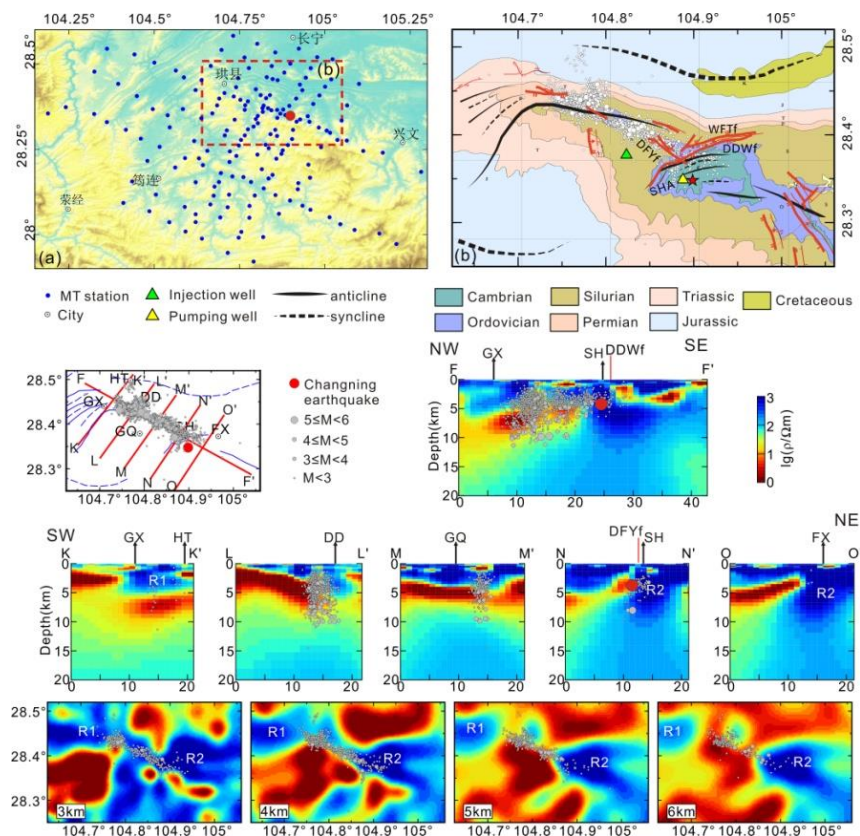
由中国地震局地球物理勘探中心王夫运研究员团队完成。对自上世纪 80 年代以来，在地震科学实验场范围内完成的 21 条、约 9800km 长的深地震测深剖面，利用走时正演和波形拟合的方法，重新进行资料处理，获得了实验场三维地壳 P 波分层结构、结晶基底和莫霍界面模型。基于岩石高温高压试验解释了主要构造块体的岩性。地壳 P 波速度分层结构模型可作为地震科学实验场的基础模型。



基于地球物理剖面的实验场精细地壳结构

七、四川长宁窗注水影响和机理研究

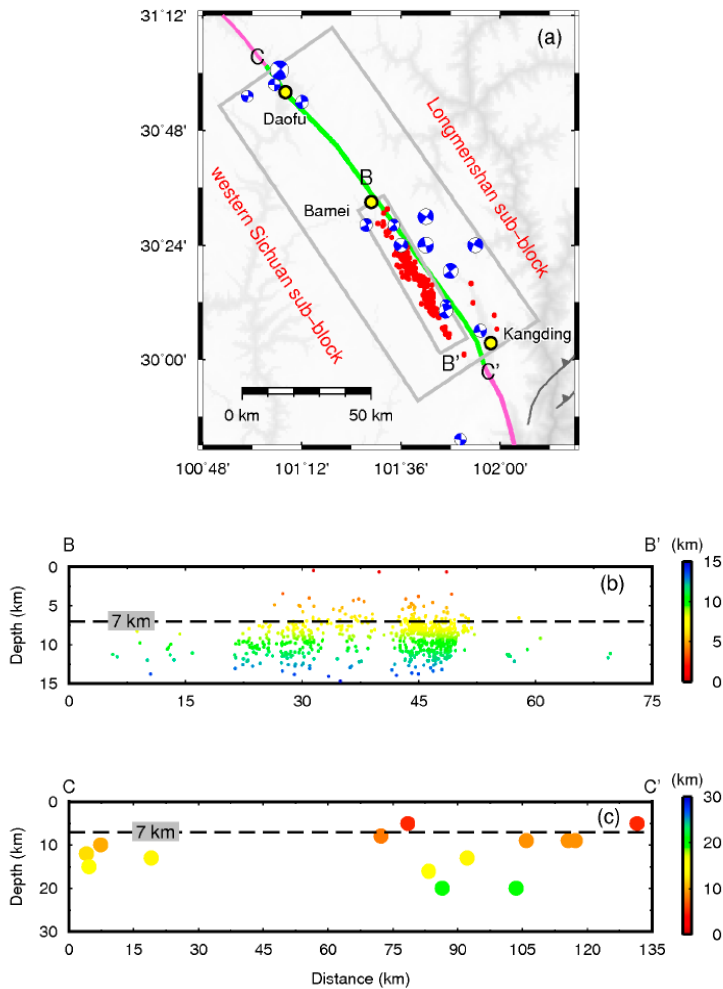
由中国地震台网中心孟令媛研究员团队、中国地震局地质研究所詹艳研究员团队、四川省地震局等单位共同完成完成。长宁地震前，架设 21 套流动台，使长宁地区地震目录完整性震级可达到 1.0-1.2，宜宾地区已经成为四川地震监测能力最高的地区。大地电磁测深工作在长宁震区实现了国内首次同一地震前、后深部电性结构对比观测研究。上述工作深入探讨了长宁地震窗及附近区域地震活动受工业注水的影响，并尝试解释了研究区域内地震活动的发震机理。



四川长宁窗注水影响和机理研究

八、鲜水河—小江断裂带的闭锁状态

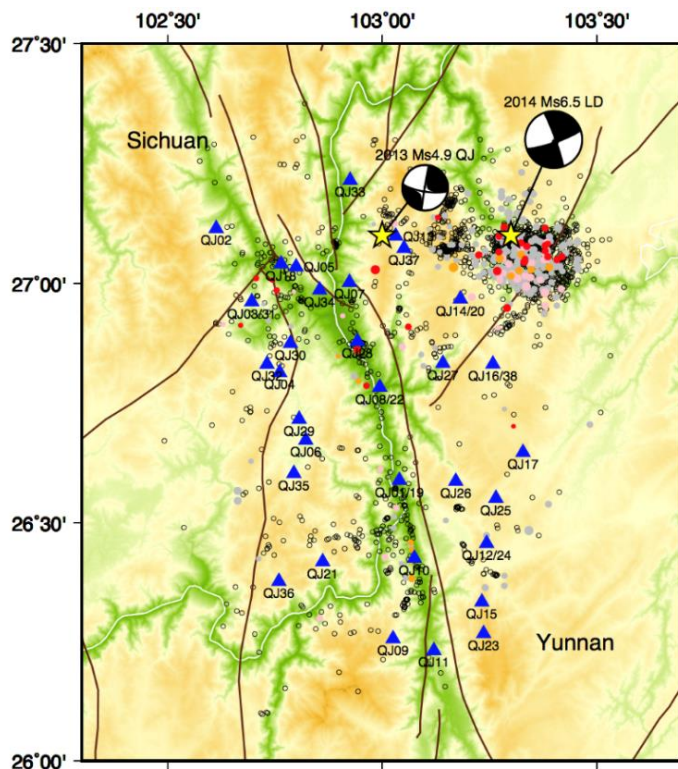
由中国地质大学（武汉）郑勇团队完成。获得了实验场地区安宁河的闭锁深度为 3 km 左右，闭锁深度以下滑移速度为 8.9 ± 0.9 mm/yr。该结果更新了以往的认识，精确确定了鲜水河—小江断裂带中小地震的精确位置及发震构造，获得了鲜水河—小江断裂带上主要构造区域的闭锁状态。



鲜水河—小江断裂带的闭锁状态

九、小江断裂带的深部构造活动行为与地震危险性估计

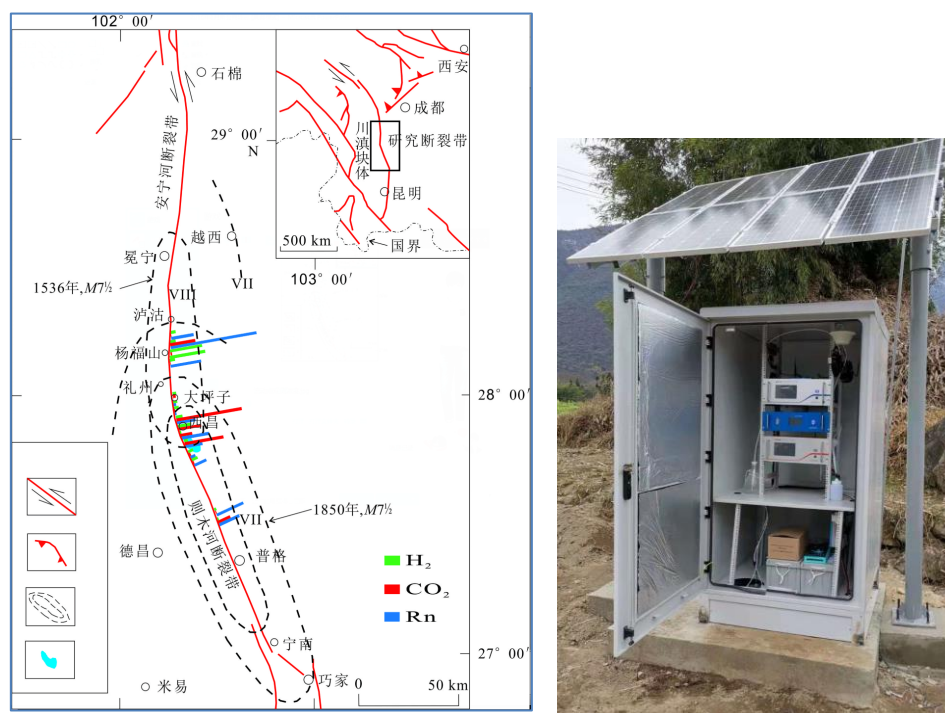
由北京大学周仕勇教授团队完成。针对密集地震台阵海量数据的分析处理问题,开发基于震相拾取与震相关联的地震事件自动检测算法 PAD、基于人工智能的地震事件自动检测与地震震相到时自动读取的软件系统;提出了可以自动检测远震动态触发信号的算法并开发了相关软件,获得了小江断裂带远震触发的动态应力阈值;开展了模板地震识别、断裂带高精度的速度结构成像,分辨出了断裂带内的高、低速分区等。



检测出小江台阵记录的远震动态触发小震分布图
红色、橙色、粉色及灰色实心圆分别代表 A、B、C 及 D 型地震触发的小震
黑色的空心圆圈代表选择的模板地震

十一、新型地球化学传感器现场实验

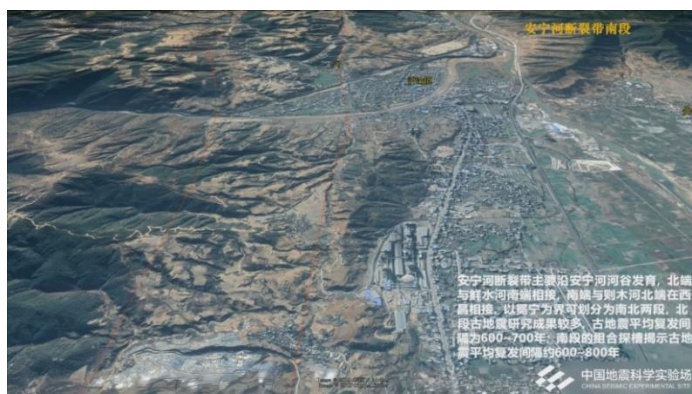
由中国地震局地壳应力研究所刘耀炜研究员团队、四川省地震局陈学芬高级工程师团队和中国地震局地震预测研究所李营研究员团队共同研究。开展不同构造环境条件观测站建设，断层气氢 75 套，溶解气氢 7 套，通过试点，高精度氢、氡新型传感器在实验场通过实验观测已达到列装水平。



新型地球化学传感器现场实验及观测设施

十二、实验场区遥感图像与主要构造视频

由地震预测研究所实验场管理部王龙等完成。根据长期研究的成果，以视频方式，表现了模拟航拍的实验场区遥感图像与主要构造。视频在中国地震科学实验场新闻发布会上展示，受到媒体的欢迎。



实验场区遥感图像与主要构造视频在实验场新闻发布会现场播放

