

中国地震科学实验场系列丛书

China Seismic Experimental Site:  
Scientific Challenges

# 中国地震科学实验场 科学设计

中国地震科学实验场科学设计编写组 编著



中国地震科学实验场系列丛书

China Seismic Experimental Site:  
Scientific Challenges

# 中国地震科学实验场 科学设计



策划编辑：张蓓蓓  
责任编辑：张蓓蓓



中国质量出版传媒有限公司



中国标准在线服务网

上架建议：地震科学 / 研究

ISBN 978-7-5066-9466-7



9 787506 694667 >

定价：158.00 元

中国地震科学实验场系列丛书

# 中国地震科学实验场 科学设计

中国地震科学实验场科学设计编写组 编著

中国标准出版社

北京

图书在版编目 ( CIP ) 数据

中国地震科学实验场科学设计 / 中国地震科学实验  
场科学设计编写组编著. —北京: 中国标准出版社,  
2019.12

ISBN 978-7-5066-9466-7

I . ①中… II . ①中… III . ①地震—科学实验—  
场地—设计—中国 IV . ① P315-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2019 ) 第 174884 号  
审图号: GS ( 2019 ) 5578 号

中国标准出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 ( 100029 )

北京市西城区三里河北街 16 号 ( 100045 )

网址: [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室: ( 010 ) 68533533 发行中心: ( 010 ) 51780238

读者服务部: ( 010 ) 68523946

北京博海升彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 11.25 字数 340 千字

2019 年 12 月第一版 2019 年 12 月第一次印刷

\*

定价 158.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: ( 010 ) 68510107

## 编著委员会

主任 张晓东

委员 (按姓氏笔画排序)

马 强 王 华 王 亮 王满达 王曙光 车 时  
田 柳 田勤俭 朱小毅 刘 杰 刘 勉 刘 静  
齐 诚 汤 毅 孙文科 孙 珂 李 丽 李 营  
杨宏峰 杨周胜 杨攀新 吴今生 吴忠良 沈正康  
张 伟 张 怀 张晓东 邵志刚 武艳强 周仕勇  
周伟新 郑 勇 郑国东 孟国杰 赵连锋 赵俊猛  
胡春峰 姚华建 高 原 郭 迅 黄清华 温瑞智  
黎益仕

编辑组 (按姓氏笔画排序)

王 龙 王 辉 太龄雪 华 卫 孙 珂 李 茜  
胡朝忠 崔子健

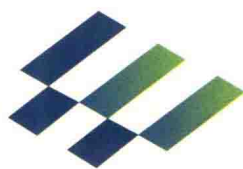
# 目 录

<b>第一部分 总体目标</b>	/1
(一) 建设需求	/1
1. 必要性	/1
2. 紧迫性	/2
(二) 场地选择	/4
(三) 建设特色	/5
<b>第二部分 实验场区基本情况</b>	/6
(一) 区域构造背景	/6
(二) 地质演化历史	/8
(三) 主要地震构造	/10
1. 块体边界断裂	/14
2. 块体内部断裂	/16
(四) 地震活动特征	/17
<b>第三部分 主要科学问题</b>	/22
(一) 前沿科学方向	/22
(二) 近期聚焦的科学问题	/22
(三) 主要技术途径	/23
1. 突出科学观测	/23
2. 重视超算模拟	/25

<b>第四部分 重要研究内容</b>	/26
(一) 透明地壳	/26
1. 地质构造演化模型	/26
2. 地块模型	/29
3. 统一断层模型	/32
4. 统一介质模型	/38
5. 大地测量模型	/46
6. 区域变形模型	/50
7. 断层变形模型	/55
8. 应力模型	/59
(二) 解剖地震	/63
1. 地球介质结构的同震、震后、震前的变化	/63
2. 地下流体在地震孕育过程中的作用	/70
3. 地震断层的多尺度物理与摩擦本构关系	/75
4. 地震破裂模型	/79
5. 人类活动诱发地震问题	/85
6. 作为概率预测输入的统计地震学参数	/90
7. 地震动力学概率预测模型	/94
8. 地震断层破裂过程预测模型	/98
(三) 韧性城乡	/99
1. 强地面运动预测模型	/99
2. 复杂场地地震动作用模型	/103
3. 工程地震破坏	/105
4. 重大工程和生命线工程地震灾害风险	/106
5. 城市地震灾害及工程韧性	/108
(四) 智慧服务	/111
1. 地震数据信息管理服务平台建设	/111
2. 地震信息公共服务平台建设	/115
3. 中国地震科学实验场的宣传教育	/117

<b>第五部分 实验场基础观测能力建设</b>	/120
(一) 川滇地区观测现状	/120
1. GNSS 观测	/120
2. 区域水准观测	/121
3. 定点形变观测	/121
4. 地震学观测	/125
5. 工程强震动观测	/128
(二) 川滇地区观测设计	/128
1. 设计原则	/128
2. 大地测量观测设计	/130
3. 地震学观测设计	/130
4. 工程强震动观测设计	/131
(三) 基础性观测系统建设	/133
1. 面向系统形成的基地建设	/133
2. 新技术应用实验和技术系统转型实验	/134
<b>第六部分 预期成果与效益</b>	/137
(一) 可检验可对比的统一模型	/137
(二) 强震概率预测模型	/141
(三) 强地面运动预测模型	/141
(四) 新型业务体系示范	/142
(五) 实验场标准体系框架和执行标准清单	/143
<b>缩略词</b> (按英文首字母排序)	/144
<b>附录 1 国家地震科技创新工程</b>	/147
<b>附录 2 中国地震科学实验场设计方案</b>	/161
<b>后记</b>	/170

# 第一部分



## 总体目标

中国地震科学实验场的总体目标是以深化地震孕育发生规律和成灾机理的科学认识、提升地震风险的抗御能力为目的，建设集野外观测、数值模拟、科学验证及科技成果转化应用为一体，具有中国特色、世界一流的地震科学实验场。秉承开放合作，突出机制创新，吸引国内外专家，利用大数据、超算模拟等新技术、新方法，发展地震科学理论与基础模型，产出一批具有国际影响的原创成果，引领地震业务转型升级，提升防震减灾综合能力。

### (一) 建设需求

#### 1. 必要性

地震科学的研究对象是地球和地球上的地震。迄今为止，人类对地震发生的环境、地震的孕育和发生过程，以及地震造成灾害的机理和致灾过程，了解得还很不够，尚不能准确得到“何时、何地、发生多大地震”等问题的答案。由于不能定位地震危险源及确认其孕震阶段，这就造成：一方面，以观测为基础的地震科技无法采取主动手段针对危险源进行震前、震时、震后的全过程观测；另一方面，以学科为组织体系的观测研究工作无法形成聚集效应，这使得人类现有科学技术能力不能在地震科学研究中充分施展。虽然，地震观测台网建设和数据处理技术提升，在一定程度上缓解了地震研究的数据需求，但地震（特别是大地震）的空间稀缺性、时间不确定性以及孕震体的空间尺度，都对地震研究的数据时空分辨率提出高要求，导致在感兴趣区开展实验时遇到观测设施体量不够、科学观测分辨率不够、基础探查现代化程度不够等问题。不仅是地震和地球物理场观测，强震动观测、结构响应等致灾机理研究同样存在观测密度低、与地震观测等其他手段衔接不够等问题。

近年来引领国际地震研究的美国南加州地震中心（SCEC），作为我国地震研究模式学习的对象，致力于地震动力学概率预测，通过概率模型将所有信息集成为对地震事件

具有物理意义和预测能力的综合认识，并对未来地震进行一定程度的预测。SCEC 以美国地质调查局和相关大学为共同研究主体，汇集了南加州地区与地震有关的所有信息，在统一加州地震破裂预测模型中加入断层、应力、应变率、古地震、地表变形、三维密度结构、温度等条件，产出 50 年地震风险分布图、地震破裂预测结果、地震波传播模拟等产品。SCEC 已完成 4 个发展历程：SCEC 1（1991~2001 年），考虑 1992 年 Landers 地震影响的南加州未来地震危险评估；SCEC 2（2002~2007 年），统一的加州地震破裂预测模型 2（UCERF2）报告对未来 30 年的地震风险进行评估；SCEC 3（2007~2012 年），考虑场地效应的南加州地震危险性概率分析；SCEC 4（2012~2017 年），追索强震的级联破裂。目前，SCEC 已进入第 5 个发展历程 SCEC 5（2017~2022 年）。

按照系统工程角度看待地球科学和地震研究，借鉴 SCEC 的先进理念，地震系统科学（earthquake systems science, system specific studies, earthquake and fault system dynamics）需要研究的关键问题包括：断层、形变、蠕变、应力、热、速度，研究内容涉及从大尺度到小尺度的“应力转移”、应力加载背景下的断层相互作用、地震滑动过程中断层滑动阻力的变化、断层带和断层系统的结构与演化、瞬态形变的成因和影响、地震强地面运动模拟等，事实上覆盖了从孕震—破裂—地表反应的地震风险研究过程，进一步结合工程结构响应研究，实现了防震减灾科技全过程支撑。这些工作需要通过大量的野外实验进行理论建设和应用创新。

随着观测技术的发展，“中等尺度实验”和“天然实验室”逐渐成为地震科学中的重要概念，地震科学实验所面临的“尺度效应”问题也开始在一定程度上得到解决。对矿山地震、水库地震、页岩气开采注水与地震现象的观测和研究，为认识天然地震的机理提供了有用的参考。因此，建立地震科学实验场，构建地震“野外实验室”，选择在地震多发且具有一定观测和研究基础的地区开展多手段、高密度、高分辨率的综合观测，捕捉地震孕育发生过程信息，验证室内研究提出的地震科学假说，分析我国板块内部大陆型地震特点，建立区域统一科学模型（community model），推进地震动力学预测和数值预测，构建地震预测模型（earthquake forecasts model）对未来地震科技发展十分必要。与此同时，具备良好地震研究条件的地震科学实验场，也是地震预警系统、诱发地震、工程抗震等新业务、新技术经历“实战式”真实地震检验的绝佳场所。

## 2. 紧迫性

中国是一个多地震国家，新时代以人民为中心的现代化建设需要地震研究，通过地震科技减轻地震灾害风险，保护人民生命财产安全，保卫中华民族伟大复兴进程不受重特大地震灾害干扰。习近平总书记在唐山地震 40 周年之际发表的重要讲话中强调，同自

然灾害抗争是人类生存发展的永恒课题。我国作为大陆型地震典型国家，特别需要针对研究较薄弱的板内地震开展研究。地震科技创新工作还不能满足面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求的重大使命要求。因此，建设国家级的地震科学实验场，促进地震科技系统创新，建立对外开放、国际合作的地震科技发展新局面，探索地震科技管理体制机制新模式，实验性地构建区域“从地震破裂过程到工程结构响应”全链条大震巨灾综合防范能力，是贯彻国家科技创新驱动战略和落实“国家地震科技创新工程”的重要举措，意义非凡。

1966年邢台地震以来，经过50多年的积累，我国地震观测全面数字网络化，形变测量全面空间化，已经有条件支持较大规模、较为精细、较为先进、较为开放的地震科学观测实验。地震及地震预测研究等部分关键技术已逐步追上国际先进水平，实现“并跑”，有可能在一定空间范围内，通过可控制、具有可重复性的观测实现地震过程科学观测。利用国家对科技创新的巨大投入，地震行业引进和研发了一批最新的地球科学研究方法。这些“硬实力”构成了中国地震科技在国际上科技竞争的资本。“创新是引领发展的第一动力”。近年来，新的理论、方法和技术涌现，地球和地震科学开始出现快速而带有转折性的进展。对断层性质、地震孕育、地震后效的高分辨率地震观测、形变观测、应力观测、钻孔探测，与对断层带组成和性质的实验研究相结合，成为地震研究中一个生机勃勃的领域。地震波形处理的理论和技术的进步与主动震源技术的进步甚至使一些地震学家提出所谓“高精度地震学”（high-precision seismology）和“时变地球物理”（time-lapse geophysics）的概念。中国地震科学要从“并跑”实现“领跑”，需要在坚持自主创新基础上，通过建设国际化的地震科学实验场，吸引世界智力资源，加快新科技的消化、吸收，孵化原创性重大科技成果，建立中国特色地震科学技术系统，寻觅“弯道超车”发展机会。

以地震科学实验场为平台的地震科技创新，将为国家安全和经济发展带来显著效益。建设现代化的实验平台，将提升地球科学的野外实验能力，潜在地与战略性能源储备、资源勘探、生态环境保护、自然灾害防御，以及保证国家安全和国家权益的工作（例如地下核试验的监测）、外交等紧密地联系在一起。至于与重大工程抗震设计相关的实验能力，更是新时代发展高铁、核电等“大国重器”的必需。经过在实验场检验测试的地震科技产品和新型业务，可有力地提升我国地震科技工程化能力，积极服务“一带一路”倡议及京津冀一体化、雄安新区、长江经济带、粤港澳大湾区等国家战略，为降低国家投资风险提供科技支撑。因此，拥有独立自主的地震科学实验能力、实验装备、实验平台，就像中国需要拥有独立自主的航天科技能力一样，其重要意义是十分明显的，未来

也必将成为国家科技创新的重要驱动力。

## (二) 场地选择

实验场区范围为从川甘交界到云南南部,即  $97.5^{\circ}\text{E}\sim 105.5^{\circ}\text{E}$ 、 $21^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$  范围的国境内区域。该区域位于欧亚板块与印度板块互相碰撞挤压、强烈变形地区,涵盖川滇菱形地块、滇南地块、滇西地块、巴颜喀拉地块东段等,包括龙门山、鲜水河、安宁河、则木河、小江、红河、小金河等重要断裂,是中国大陆与周边板块动力传递的关键部位。实验场区既是研究大陆型强震的理想场所,也是全链条地震灾害风险管理的典型示范区。

川滇地区位于我国大陆强震频度最高的南北地震带中、南段,有记录以来 7 级以上强震频发,其中包括多次 8 级以上地震,地震灾害特别严重;地震中、长期预测研究表明,该地区未来仍可能发生多次强震与大地震,其中的龙门山断裂带南段、川滇菱形块体东边界(鲜水河、安宁河与大凉山、马边-烟峰、莲峰-昭通、小江等断裂带)、川滇菱形块体西边界(金沙江、中甸、红河、楚雄、程海等断裂带)、川滇菱形块体内部(理塘、小金河、元谋等断裂带)和滇西-滇西南地区(腾冲、瑞丽-龙陵、大盈江等断裂带)均存在不同尺度的强震、大地震空区,其中一部分可能是未来潜在强震、大地震发生的危险地段。区内有成都、西昌、攀枝花、昆明、大理、个旧等大、中城市,大、中型水电工程密布,是我国西南人口相对密集、经济较发达的地区。因此,实验场所在地区是对于增强区域防震减灾综合能力建设具有强烈需求的地区。

川滇地区是开展大陆强震孕育机理研究的理想的天然实验场:①区域动力边界作用复杂,在缅甸弧东向俯冲、印度板块藏东构造结北东向楔体挤出和俯冲、青藏高原隆升和南东向挤出等多种现代地质构造活动共同作用下,川滇、巴颜喀拉等活动块体向东-南东方向水平挤出,与相邻块体/地块之间相互作用,且块体内部分块特征同样比较显著;②在周边地质构造动力作用下,川滇地区表现出地壳变形速率高、断层运动剧烈、强震原地复发周期短等区域特征;③川滇地区同时拥有大陆内部典型的剪切构造(例如川滇菱形块体东边界的鲜水河、安宁河、则木河和小江断裂带,川滇菱形块体西边界的红河、中甸等断裂带)、拉张构造(例如川滇菱形地块西边界中段的大理次级地块)、推覆构造(例如川滇菱形地块东边界中段的大凉山次级地块)。

川滇地区已有一定的监测基础和较多的科研产出:有多批次临时或特定周期的流动观测,例如地震科学台站、全球导航卫星系统(GNSS)区域观测、跨断层观测等;

有多学科剖面探测，例如反射折射地震学剖面、大地电磁测深剖面 and 重力剖面等；连续观测有地震学、大地测量、定点前兆等。另一方面，地学界在该地区开展了各类科研项目，是中国大陆地区地学领域研究程度相对较高的地区，积累了较多的科研产出和认识。

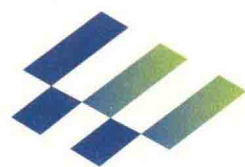
### （三）建设特色

**坚持国际合作。**开门建设实验场、开放运行实验场，面向国际地震科学前沿，瞄准关键科学问题，开展最广泛的国内外合作，发挥国内外专家群体的科学指导作用。提高共建共享水平，重视数据资源和成果资源的共享，注重原创性科技成果的产出，与国际发达国家、“一带一路”沿线国家和地区建立科学实验场合作平台，吸引国内外其他部门和科研机构的积极参与，增强实验场的凝聚力。坚持不求所有、但求所用的人才理念，柔性引进领军人物和拔尖人才，努力把实验场建成新思想的孵化器、新技术的加速器、新成果的助推器。通过开放共享科研仪器、观测设施，将实验场建设成为世界主要地震科学中心和创新高地。

**坚持全链条设计。**紧紧围绕“透明地壳”“解剖地震”“韧性城乡”“智慧服务”四大计划，开展“从地震破裂过程到工程结构响应”全链条风险防范研究、实验和研发，突出我国大陆型地震研究特色，通过实验场进行理论、方法、技术和仪器装备实际验证，强化原创性研究，加强基础和新兴学科建设、学科交叉融合，破解事关国家重大安全战略的重大科学问题，把实验场建成集突破型、引领型、平台型一体化的地震科学研究实验基地，承担国家级地震科技任务。配合自然灾害防治重大工程，逐步摸清川滇地区地震风险底数、致灾机理，构建区域地震科学模型，开展重大地震灾害地震风险防范示范工作，切实提升区域防震减灾科技能力。

**坚持体制机制创新。**将实验场作为地震科技体制机制创新的试验田，统筹整合和充分发挥地震系统内各单位力量、资源和积极性，吸收借鉴国内外各类地震实验场建设经验教训，集中有限资金和优势力量，积累经验后逐步推广。坚持有所为和有所不为，做好顶层设计，突出科学决策，建立全球高端人才的发现和联络机制，加强专家执行团队组建，赋予团队技术路线决策权、经费调剂权和人才队伍组建权，将实验场建设成为地震科技人才培养的基地。强调科学理论与工作实践相融合，实现“无缝衔接”，既从业务实践中凝练科学问题，又将实验场的前沿探索成果及时转化为业务应用。加强宣传和科普，扩大实验场的影响，体现实验场的科学作用和价值。

## 第二部分



# 实验场区基本情况

### (一) 区域构造背景

大约 6000 万 ~5000 万年前印度板块与欧亚板块开始碰撞，导致青藏高原隆升、喜马拉雅山崛起和大量地壳物质向东和南东的侧向逃逸。实验场区受板块边界动力源的持续影响，变形都极其复杂（见图 2.1）。目前对变形的认识主要有两种模式：一种为不连续变形模式，即块体侧向挤出模型，认为构造变形主要集中在少数几条走滑断层上，而围限块体的侧向运移是调节构造变形的机制；另一种为连续变形模式，认为印度板块和亚洲大陆的汇聚所引起的构造变形主要是通过岩石圈整体增厚或下地壳增厚流动，因此高原物质的侧向挤出不是主要的<sup>①-③</sup>。

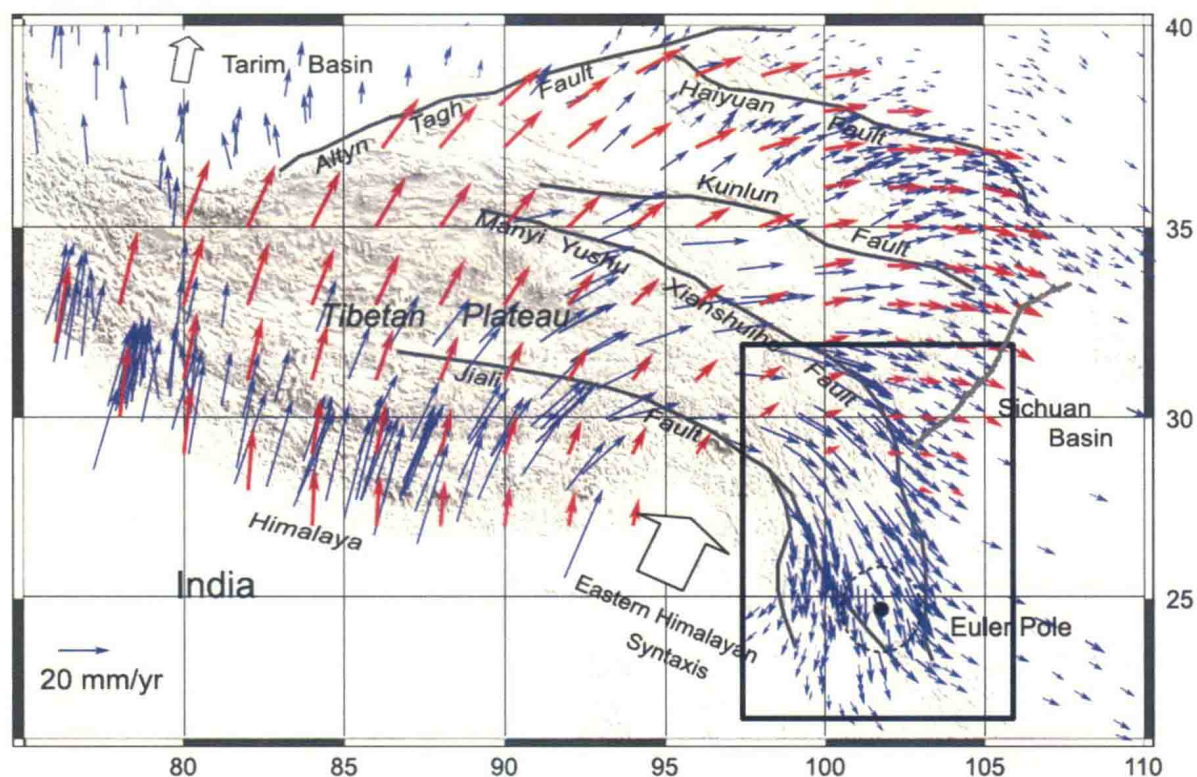
印度 - 欧亚板块碰撞带为典型的陆 - 陆碰撞带，碰撞至今仍在继续。青藏高原东 - 东南缘作为高原与扬子地台之间的过渡带，在两个地质时期经历了强烈的地壳变形和断裂作用。按地震活动区带划分，实验场所在地区属于我国的南北地震带中南段，地震活动频度高，地壳厚度变化十分剧烈，从青藏高原中东部地区的 65 km 下降到云南南部地区的 30 km，这一变化趋势与地形高程呈平稳下降趋势相一致。急需将地球表面的变形场和地幔深处的变形场联系起来，结合地壳和上地幔构造的约束，深入研究地球内部流变特征以及动力学过程，以完善该区域地震发生机理。

实验场区域总体构造动力学环境为：在印度板块持续向东北方向推挤和缅甸板块向东俯冲作用下，羌塘块体和巴颜喀拉块体向东 - 南东方向绕东构造结顺时针旋转，并在东部受扬子板块阻挡作用，使得该区域构造应力场复杂。

GNSS 等大地测量结果表明，川滇地区速度矢量大小和方向均变化较大，显示现今

- 
- ① England P., Houseman G.. Finite strain calculations of continental deformation 2. Comparison with the India-Asia collision zone. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 3664-3676.
  - ② Royden L. H., Burchfiel B. C., King R. W., Wang E., Chen Z. L., Shen F., Liu Y. P. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, 276: 788-790.
  - ③ 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GNSS 速度场. *地学前缘*, 2002, 9: 442-450.

该区域存在较强的相对运动与变形。巴颜喀拉地块东部、川滇地块北部及附近地区以近东西向地壳缩短而南北向地壳伸展变形为主，自西往东运动速度渐减，从南到北南北向速度分量增大，导致川滇地块南部及滇南、滇西地区以近东西向地壳伸展，而南北向以地壳缩短变形为主。青藏高原东缘物质“逃逸”在川滇地区有两个分支，其中一支向南急剧转折至云南，另一支在四川西部向东运动，扬子板块的阻挡导致龙门山断裂带强烈挤压（见图 2.1）<sup>①②</sup>。



注：蓝色箭头为 GNSS 速度场，红色箭头为青藏高原欧拉极拟合速度场。

图 2.1 实验场区空间范围（粗黑框）及活动断裂分布图

大地电磁测深剖面探测结果显示，测深剖面与主要断裂交汇部位呈现高导特征，其埋深为 20 km~40 km。此外，多条大地电磁长剖面获得了青藏高原东南部的深部电性结构，发现青藏高原的物质挤出主要集中在两个“通道”上，即班公湖-怒江缝合带西侧和鲜水河-小江断裂带西侧，从青藏高原延伸 800 km 进入中国南部，这一高导特征为下地壳流模型提供了观测证据<sup>③</sup>。也有研究认为，青藏高原东南缘并不存在大规模的下地壳流。而最

- ① Shen Z. K., Lu J., Wang M., Burgmann R.. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, B11409, doi: 10.1029/2004JB003421.
- ② Gan W., Zhang P. Z., Shen Z.K., Niu Z. J.. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GNSS measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, B08416, doi: 10.1029/2005JB004120.
- ③ Bai D. H., Unsworth M. J., Meju M. A., Ma X. B., Teng J. W., Kong X. R., Sun Y., Sun J., Wang L. F., Jiang C. S., Zhao C. P., Xiao P. F., Liu M.. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 2010, doi: 10.1038/NGE0830.

近的地震学成像研究又支持存在这两条中下地壳物质流的通道，其中小江断裂带内的壳内低速异常向南穿过红河断裂带，一直延伸到越南北部，主要分布在奠边府断裂带的西侧。

实验场所在区域涉及羌塘、巴颜喀拉、扬子和滇缅地块，区内断裂纵横交错，既有大型块体边界断裂，块体内部也有活动断裂发育，块体活动及构造变形复杂，已有研究资料证明地表的大型走滑断裂系和深部的地壳运动控制了该区域地壳的旋转运动特征，在整体的顺时针旋转作用下，地壳被多条断裂切割成多个次级块体。因此，场区内主要断裂多为左旋走滑兼挤压运动，少数断裂为右旋走滑性质<sup>①</sup>，共同调节主要块体和次级块体的不同运动和旋转量。

## （二）地质演化历史

实验场地区处于印度板块和扬子板块汇聚带上，由两大板块分裂出的一些较小的地块和微陆块拼贴而成，在全球构造格局中具有板块边缘的构造特征。实验场所在的川滇地区发育有三条缝合带，自西向东时代逐渐变老，依次为雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带和西金乌兰-金沙江缝合带；而西部的三江褶皱系为特提斯-喜马拉雅构造域向南东的延伸部分，即喜马拉雅-缅甸弧形的东端。按大地构造单元划分，其包括松潘-甘孜褶皱带、义敦岛弧-花岗岩带、华南板块西南部和三江褶皱带。其中，松潘-甘孜褶皱带、义敦岛弧位于楚雄盆地以北。松潘-甘孜盆地为三叠复理石沉积，并发育强烈褶皱。义敦岛弧呈弧形向南延伸，覆盖在华南板块型古生代地层之上，受到三叠纪和早侏罗世火成岩的强烈褶皱和侵入作用，发育复杂的构造变形，古近纪和新近纪地层与下伏的三叠纪及较老的地层不整合接触。

该地区晚古生代以来经历了陆内裂解、洋盆扩张、俯冲、古特提斯洋闭合、弧-陆碰撞、斜向汇聚-挤压，于晚三叠纪中期碰撞造山结束。晚三叠纪-早侏罗纪新特提斯洋打开，晚白垩纪-古近纪中特提斯洋闭合，6000万~5000万年前新特提斯洋开始闭合，从冈瓦纳大陆裂解出来的拼贴块体相继与欧亚大陆发生碰撞。新生代经历了印度-欧亚板块碰撞抬升、陆内挤压变形及区域大断裂挤压-走滑运动转换等复杂的构造演化史。

构造古地磁学的研究结果显示：自印度-欧亚板块碰撞以来，掸泰地块相对于欧亚大陆发生了 $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 顺时针旋转，局部地区旋转量甚至高达 $135^{\circ}$ ；印支地块相对于欧亚大陆发生了 $30^{\circ}$ 顺时针旋转。该区自西向东高黎贡山、崇山及红河哀牢山分布三条线性展布的韧性剪切带，晚始新世至中新世存在同期活动性，是对印度-欧亚板块碰撞印度

<sup>①</sup> 张培震, 朱守彪, 张竹琪, 王庆良. 汶川地震的发震构造与破裂机理地震地质. 地震地质, 2012, 34: 566-575.

板块北向运动的响应性调整。其中，哀牢山－红河断裂带作为走滑逃逸模式早期挤出的东边界而成为研究焦点，但目前关于该断裂的性质、走滑时间和方式仍存在很大争议。中新世以来，随着印度板块持续地向欧亚大陆楔性挤压，川滇地块相对相邻块体加速南向运移，从而导致了鲜水河－小江断裂系的发育以及红河断裂系走滑性质的转变。

新生代以来的构造运动对先前的构造变形具有一定的继承性，也是该地区成为构造运动最为活跃的地区的原因之一。该区域构造活动还受深部热作用较大的影响<sup>①</sup>，伴随强烈的岩浆活动，形成了大型的斑岩矿床。作为印度和欧亚板块的侧向碰撞部位，川滇地区卷入了区域收缩变形、地壳增厚和侧向滑移。青藏高原东南缘出露一系列中、新生代红层，并直接覆盖于古生代地层之上。受新生代构造活动影响，这些红层在掸泰和川滇地块内被挤压成一系列北西－北北西向的褶皱和逆冲断层。新生代盆地碳酸盐岩古土壤结核的稳定氧同位素研究揭露，川西藏东在该时期整体隆升接近现今的高度，即高原东南缘和南缘是高原最先形成的部分，其中东南缘在沿红河断裂和实皆断裂挤出过程中，在1500万~2000万年前之间该区域变形发生较大转变，由于太平洋海槽快速迁移的停滞，青藏高原块体挤出速度减缓，导致高原面的快速隆升，并导致藏东区域地壳增厚，使得该地区的构造变形更为复杂（见图2.2）。

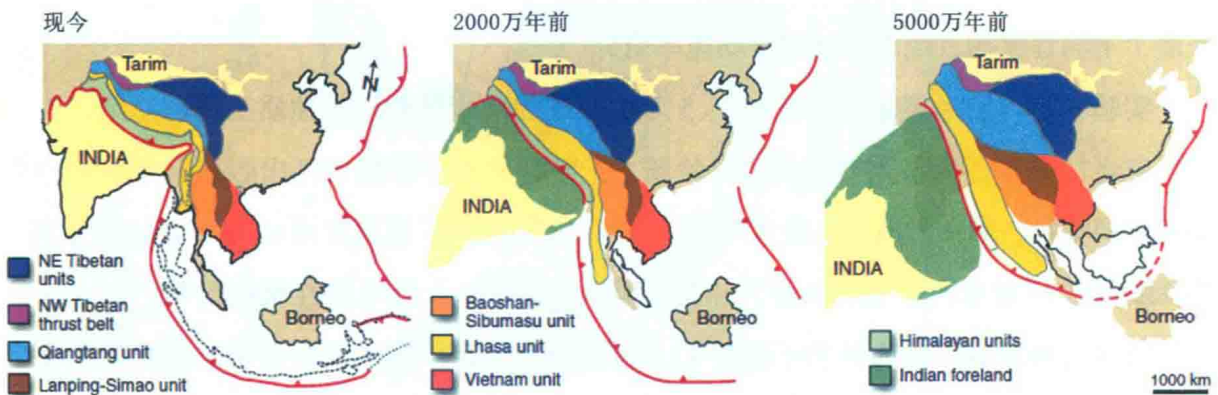


图 2.2 实验场及周边地区构造演化图<sup>②</sup>

新构造分区单元为断层所围限的次级块体构成，主要包括川滇菱形、掸泰、滇南、川西等活动地块。其中川滇菱形块体是实验场的主体和中心部分，位于扬子板块的西南，被北西－南北向的鲜水河－小江断裂与扬子板块主体隔开，其西南以哀牢山－红河断裂带为边界，其周边和内部断裂地震活动最强。掸泰块体位于场区西南，可进一步划分为保山地体和兰坪－思茅地体。

① Hou Z., Zhou Y., Wang R., Zheng Y., et al. Recycling of metal-fertilized lower continental crust: Origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges. *Geology*, 2017, 45: 563-566

② Leigh H. Royden, et al.. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, 321: 1054.