

“解剖地震”

重要科技问题及研究任务

张晓东
中国地震局地震预测研究所

2018. 11. 21





概况



科技问题



目标任务



与实验场关系



地震预报科学挑战



提出“地震科技创新工程”和四大计划

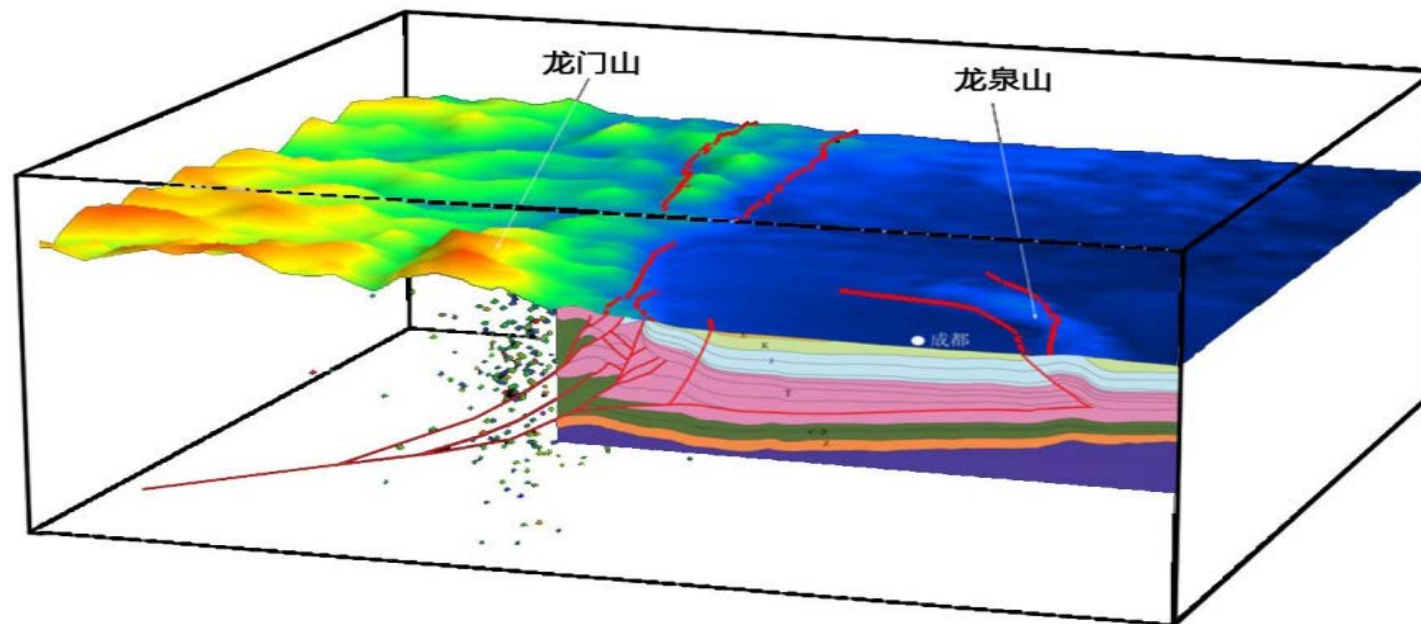


2017年6月7日上午，中国地震局党组书记、局长郑国光在全国地震科技创新大会上作题为《坚持创新发展 广泛凝聚力量 努力开创我国地震科技创新工作新局面》工作报告。



国家地震科技创新工程

-  透明地壳——地下清楚（空间分辨率）
-  解剖地震——地下清楚（时间分辨率）
-  韧性城乡——地上结实
-  智慧服务——公众明白



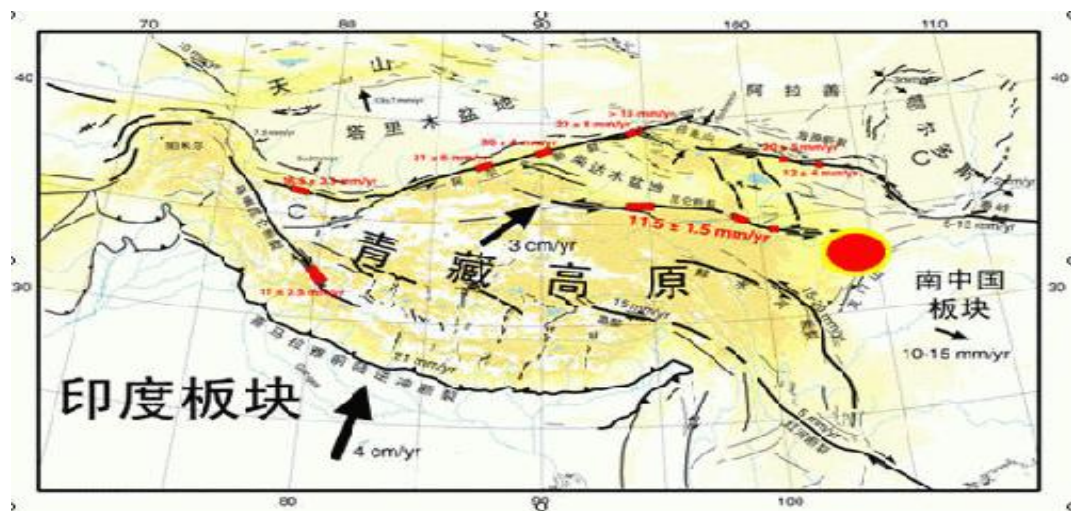
透明地壳-基础

解剖地震-核心

韧性城乡-目标

智慧服务-手段



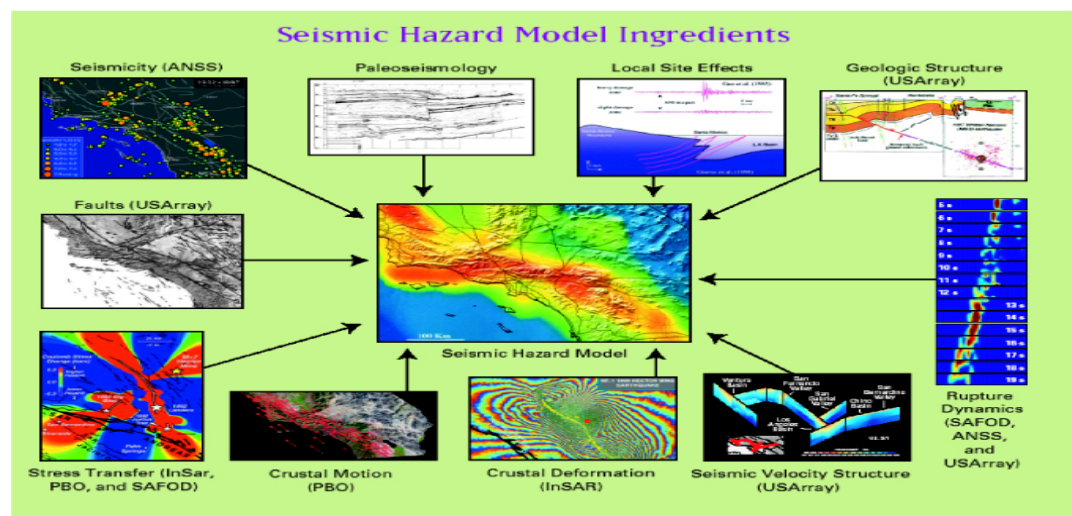


大地震样本少、入地观测困难和孕震机理复杂是制约地震预测的主要科学瓶颈，对典型震例进行深入解剖是揭示大震孕育发生机理最重要的科学途径；

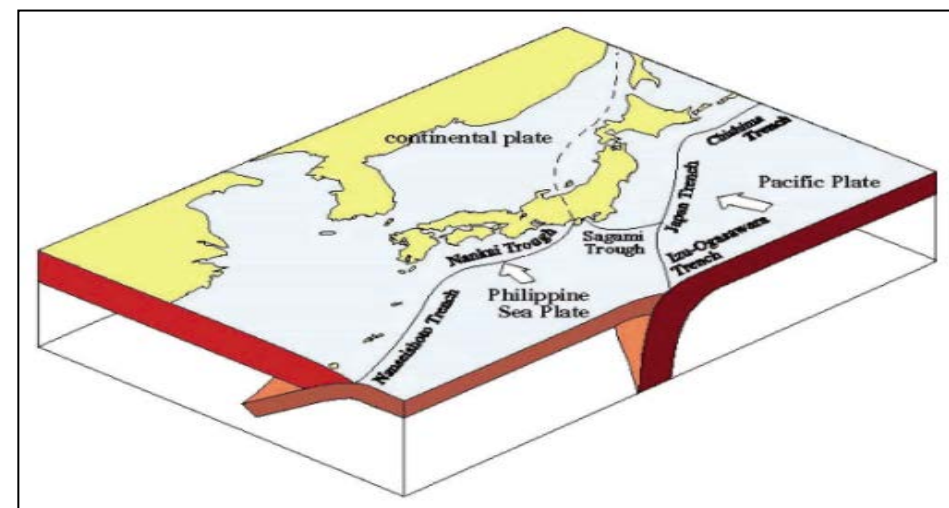
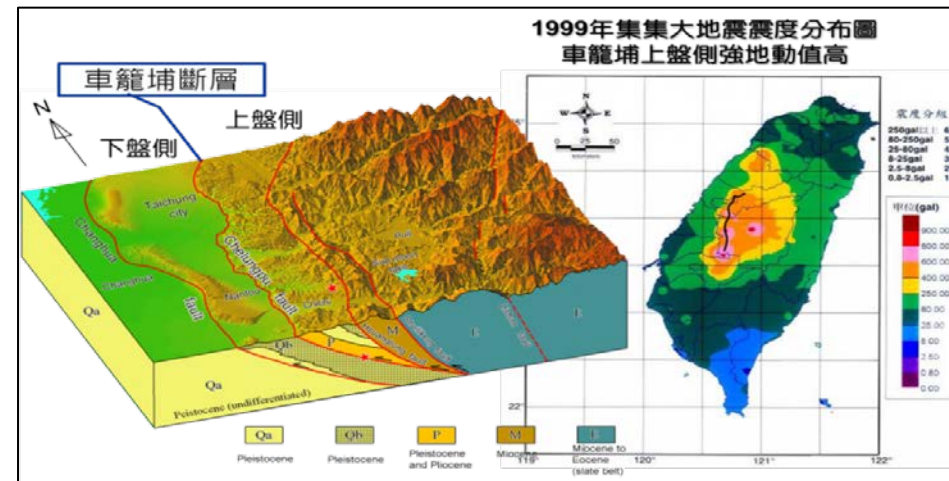
目前地震监测、探测技术时间和空间分辨率大幅度的提高，奠定了坚实的基础；通过深入解剖典型大地震，为大震预测预报取得突破提供重要的科学基础。



美国著名的圣·安德烈斯断层进行了最高密度，手段最丰富的观测；基于地震地质、测震学、大地测量和数值模拟等给出的结果，综合给出地震破裂概率预测结果，被称为强震动力学概率预测模型。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。



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：震源区精细结构、跨断层深钻探测、深部断层运动、异常与机理等，获得大量研究成果，这些成果和研究思路，对解剖地震研究具有重要的借鉴作用。



参加单位：（33个）

1. 中国科学院大学、中国科学与技术大学、中国地质大学（北京）、中国地质大学（武汉）、南方科技大学、武汉大学、吉林大学、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；（12个）
2. 中国地震局地质研究所、中国地震局工程力学研究所、中国地震局地壳应力研究所、中国地震台网中心、中国地震局地球物理勘探中心、中国地震应急搜救中心、中国地震局第一监测中心、中国地震局第二监测中心等；（8个）
3. 辽宁省地震局、四川省地震局、云南省地震局、新疆维吾尔自治区地震局、青海省地震局、宁夏回族自治区地震局、甘肃省地震局、陕西省地震局、重庆市地震局、海南省地震局、山东省地震局、广东省地震局、浙江省地震局等。（13个）





概况



科技问题



目标任务



与实验场关系



地震预报科学挑战



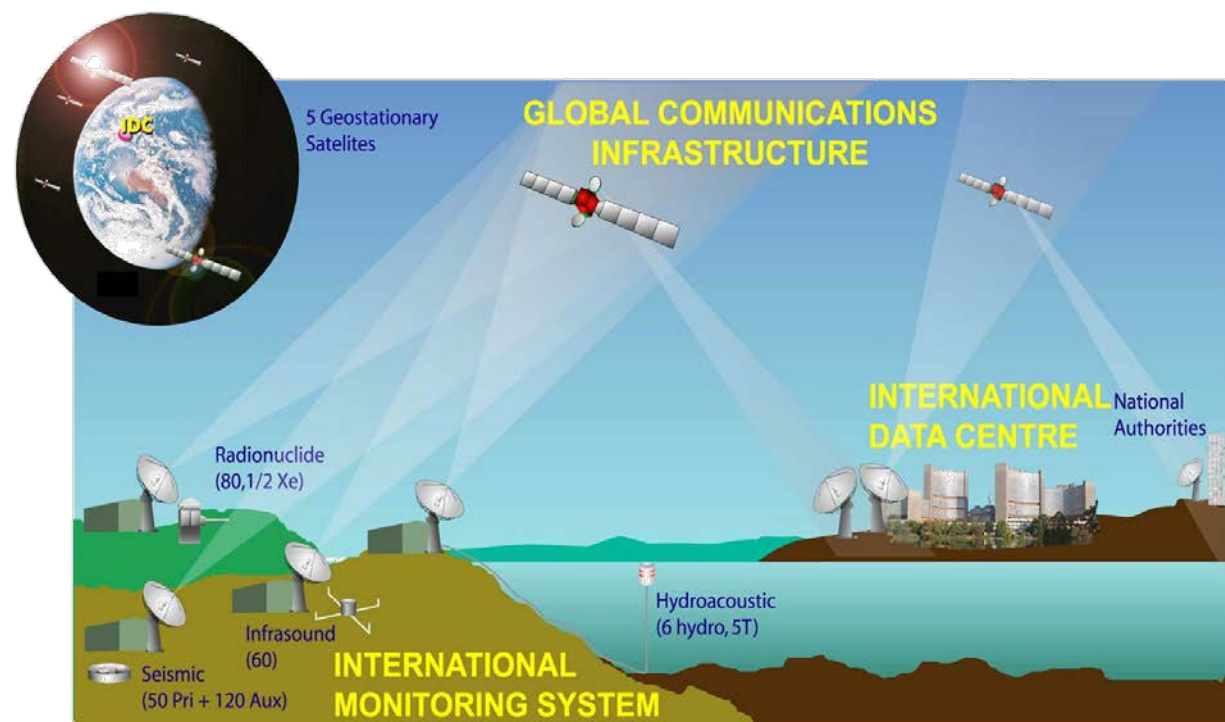
重点科技问题

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。





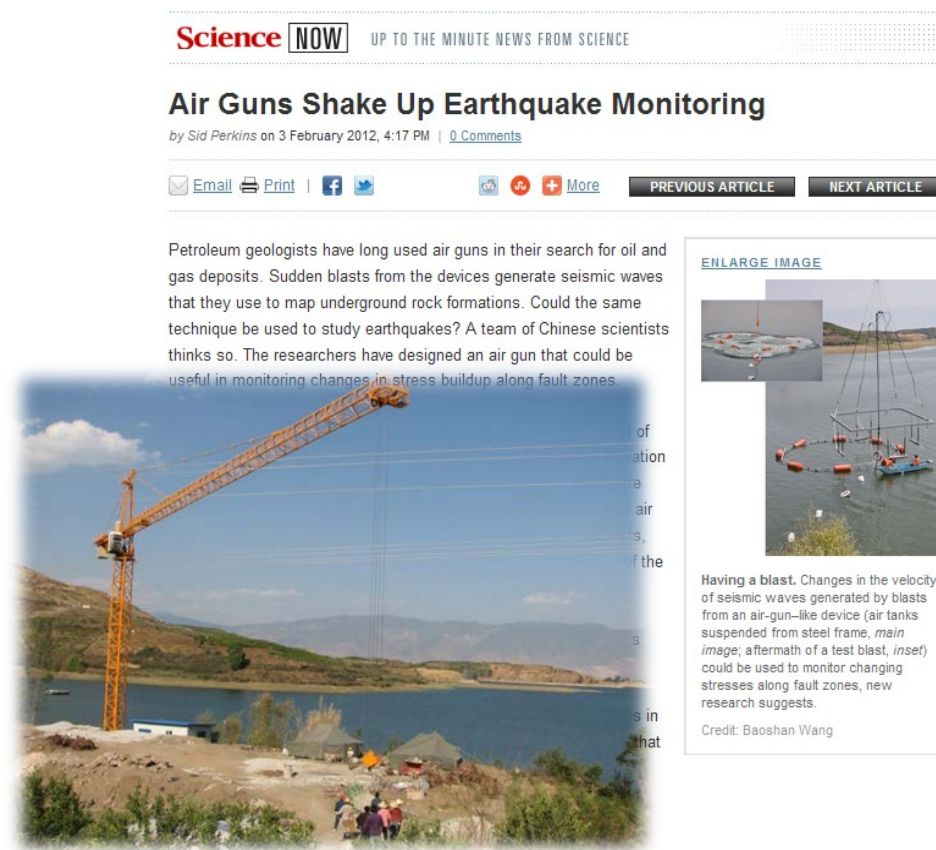
地震科学实验场是一个面向地球深部的“望远镜”，那么我们期待它通过自身的各种性能的实现和提升，更好地看到我们感兴趣的地震现象。



介质和力的作用



- 地球介质结构的变化
- 地球介质结构的同震、震后变化，特别是可能与地震孕育过程有关的震前变化，在实际中是可观测的吗？
- 冰岛地震实验场观测到的由于“大范围膨胀各向异性”（EDA）而导致的S波分裂，在实际中是否是可观测的这样一个重要的科学问题。
- 随着“精准地震学”的发展和主动震源技术的进步，对这一问题开展研究成为可能。



吴忠良PPT

川滇地区的气枪震源实验

科学问题2

- 静态库仑破裂应力变化的实际检测。

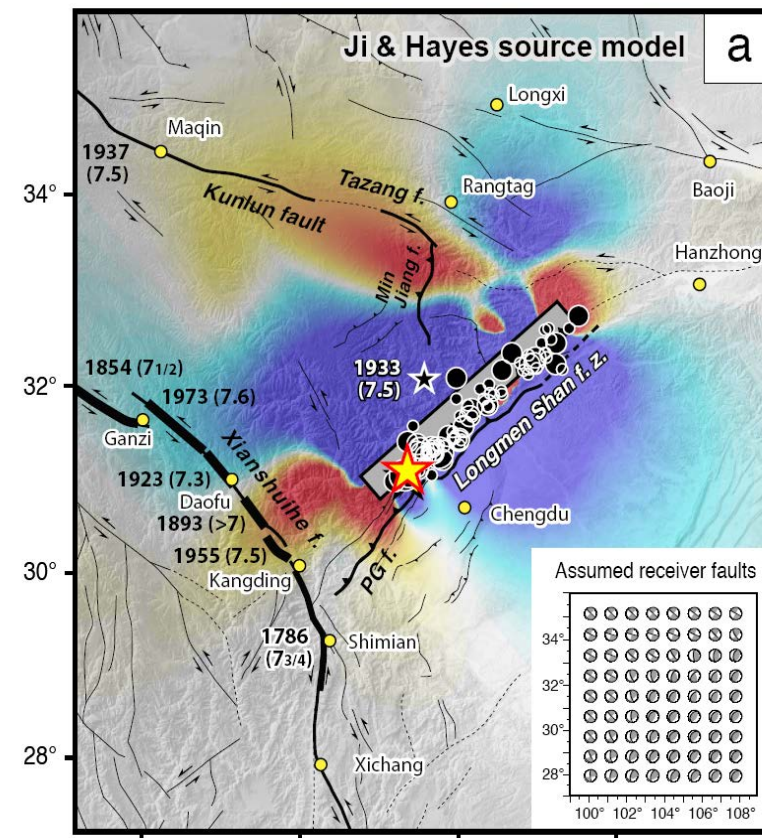
👉 地震引起库仑破裂应力变化，究竟是不是可以直接用观测来验证的物理现象？石耀霖院士提出这个问题，非常重要。

👉 应力测量需要考虑一下这个比较难的问题。

$$n = \frac{r}{\left[\exp\left(\frac{-\Delta\sigma_F}{A_D\sigma}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) + 1}$$

汶川地震破裂引起的CFS变化
及其与地震发生率之间的关系：
有直接的应力测量作为证据吗？

吴忠良PPT

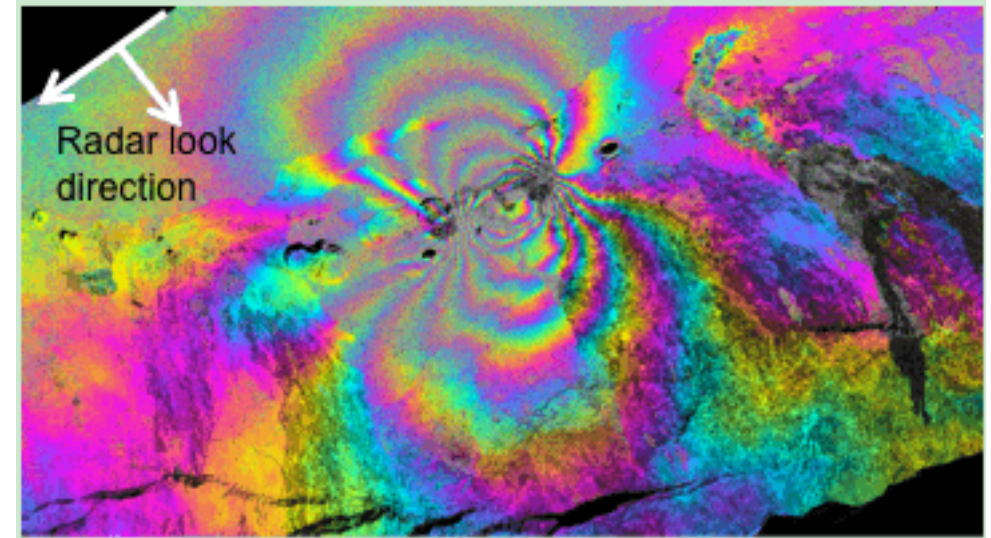


- 断层的闭锁状态。

✎ 川滇地区的断层，其蠕滑状态是怎样的？这是一个重要的问题。

✎ 要确认断层的“闭锁区域”，蠕滑状态的研究是一个必不可少的元素。

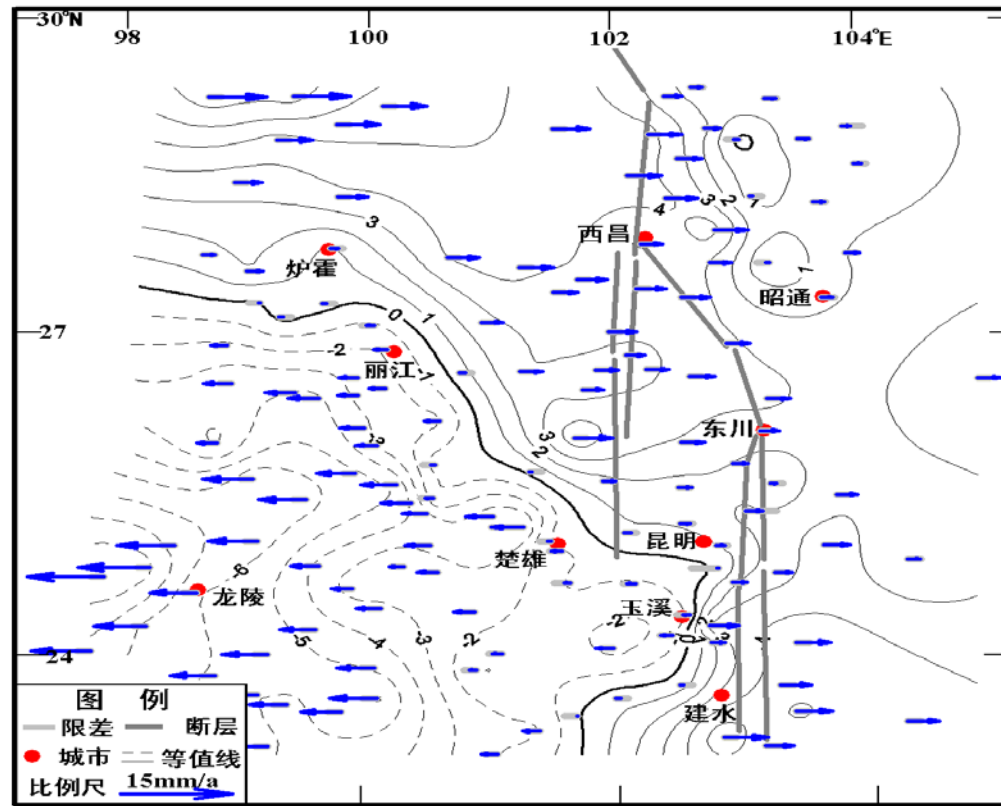
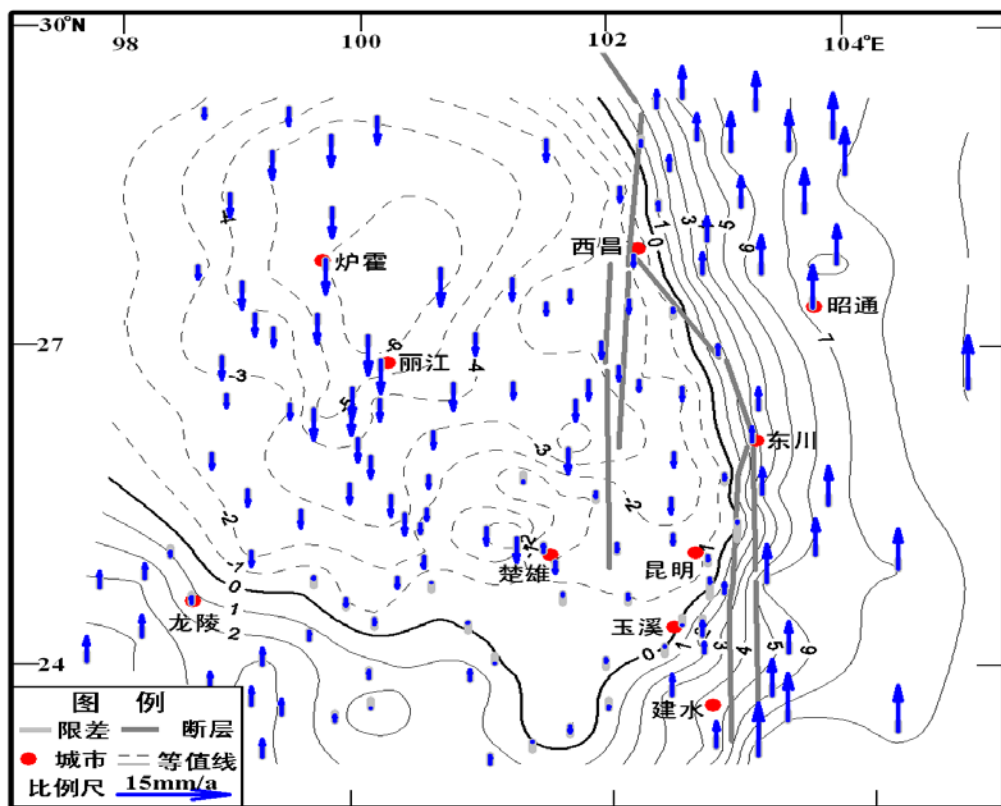
✎ 为了准确获知断层在震后、震时、震前的蠕滑状态，我们需要试一试这个技术的引进和应用。



NASA的UAVSAR

吴忠良PPT

科学问题3



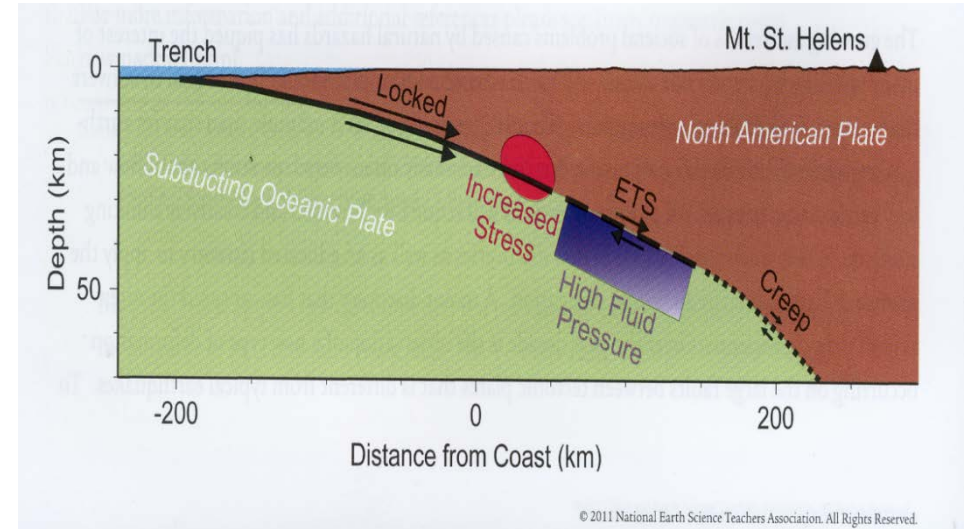
按照断层走向分解后，断层的状态十分清楚
可以判定断层带区域是否有应变积累！



科学问题3

技术上，这个问题的解决需要两个观测条件，一个是密集的（台间距约千米尺度的）宽频带地震观测，另一个是与地震台站共点观测的连续GNSS测量。

我国大陆地区的这个问题的研究，到目前为止并未得到有说服力的结论，主要的原因，就是观测的限制。



介绍ETS的一篇文章

Episodic slow slip and non-volcanic tremor appear to occur in a range of environments and understanding this newly discovered phenomena is helping us decipher the physics of earthquakes. While we are in no position to use ETS to predict earthquakes, such observations give hope to the prospects of using ETS to better understand when and where earthquakes will occur. And considering the sobering history of failed prospects in earthquake prediction (e.g., Hough, 2009), any hope is good news.

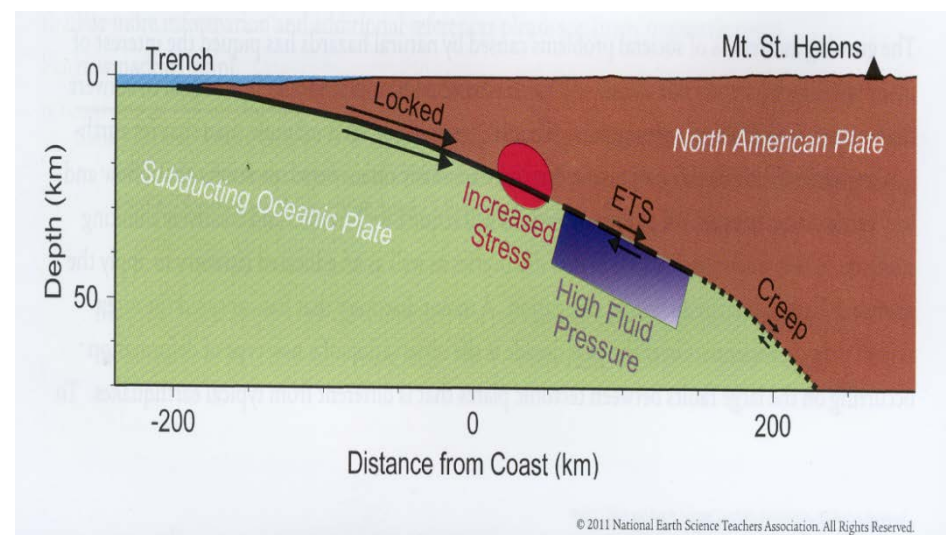
吴忠良PPT



科学问题4

大陆地区的低频地震事件。

- ◎在板块边界带地区开展了很多研究的低频地震事件（非火山颤动事件），在大陆地区是否存在？
- ◎考虑低频地震事件与可见的地震活动之间的关系，这一问题的回答无论是“是”还是“否”，都具有重要的科学意义。



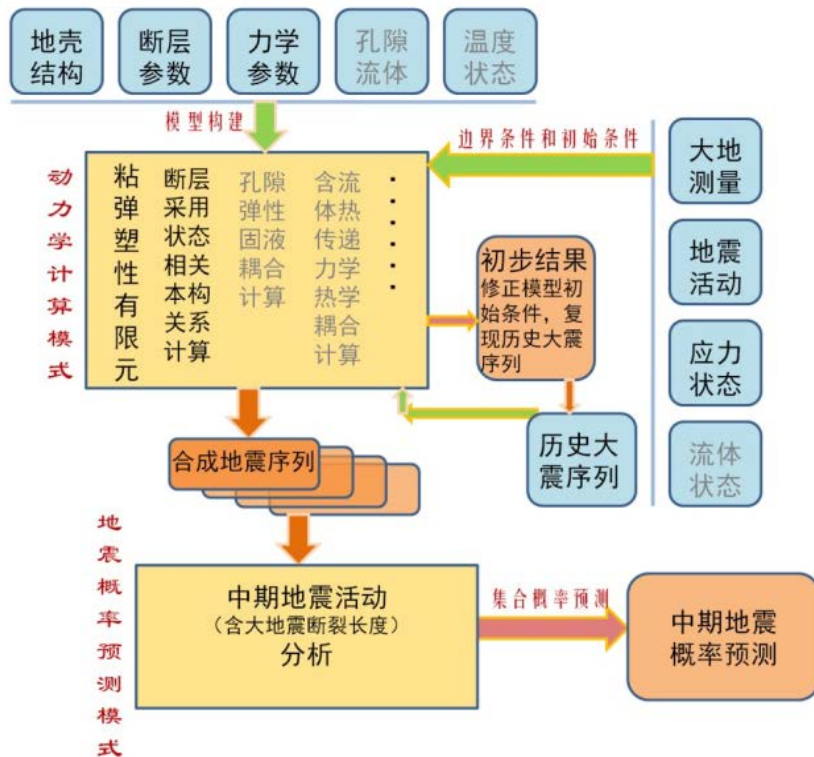
吴忠良PPT



科学问题5

- 数值地震预测的问题。

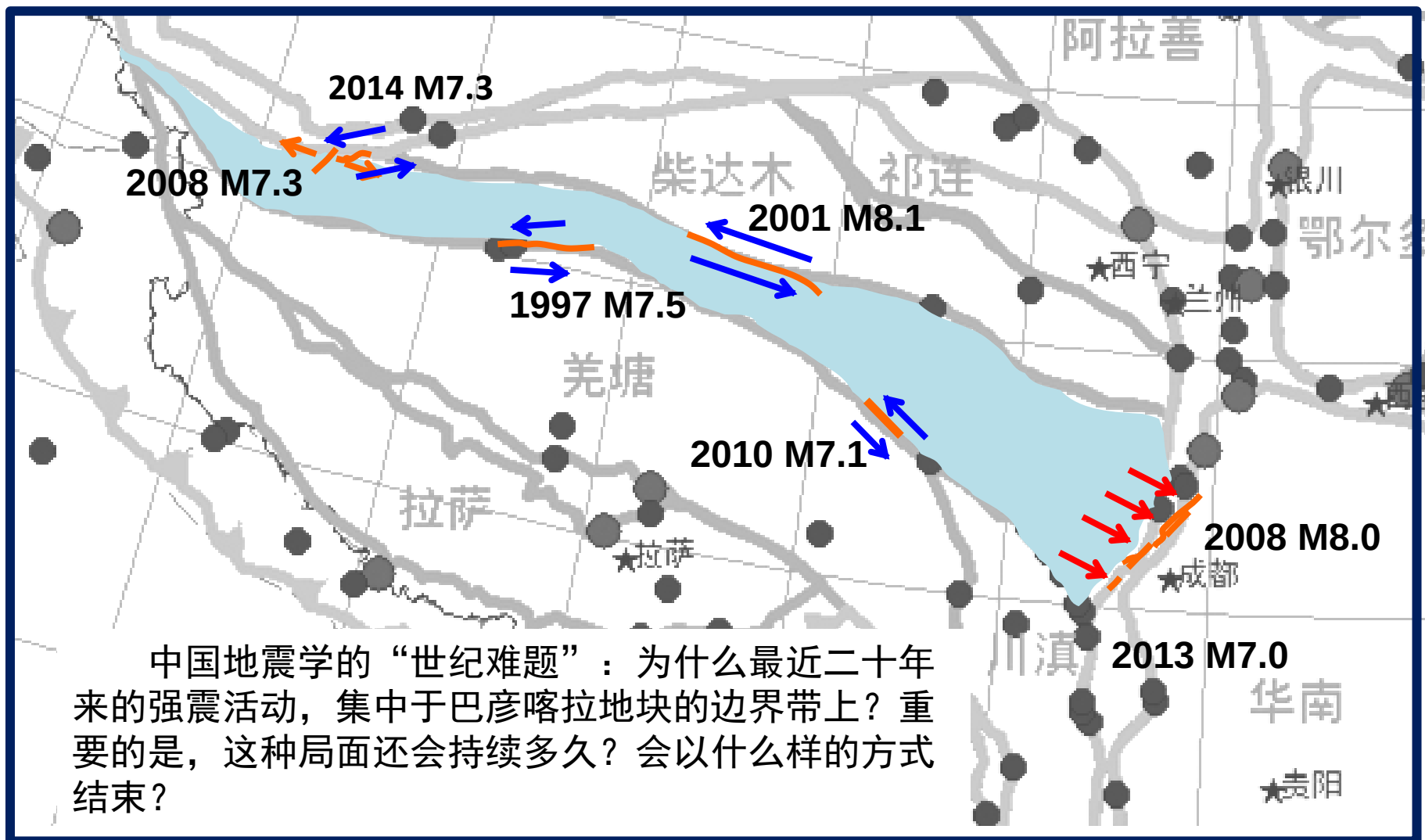
- 数值地震预测是重要的科学目标。应该如何进行，已有很好的路线图设计。
- 目前的中长期地震预测虽已取得非常大的进步，并且已经开始具有为减轻地震灾害风险服务的能力，但本质上还不是物理的。

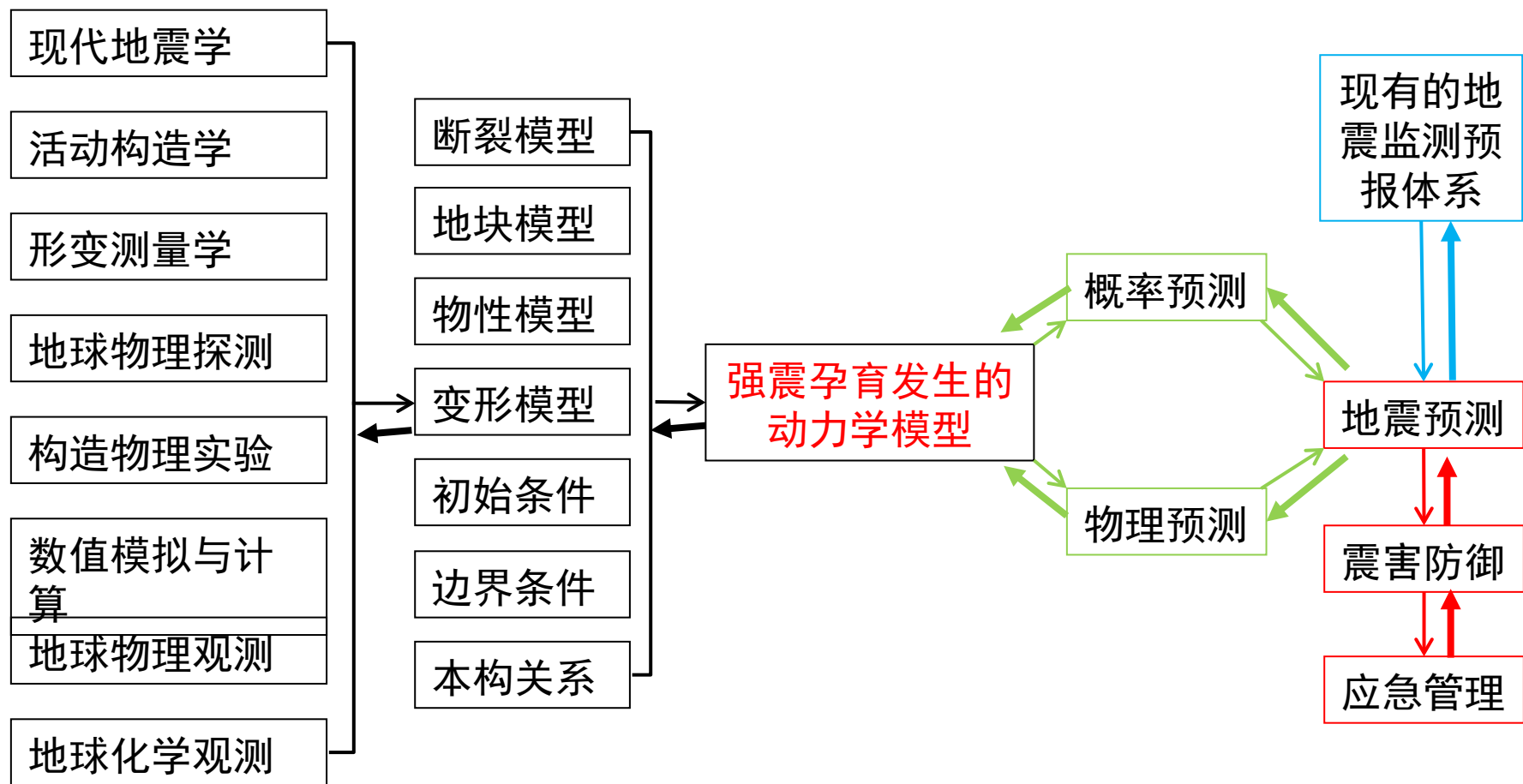


石耀霖院士等关于中期数值地震预测的系统设计



科学问题5





邵志刚PPT





概况



科技问题



目标任务



与实验场关系



地震预报科学挑战



2025年目标

1. 完成选定地震的解剖，开展大震孕育发生机理研究；
2. 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；
3. 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。
4. 大数据建模和超算模拟研究取得突破
5. 地震观测技术智能化、标准化达到国际水平。





主要任务



- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究
- 六．地震观测新技术与仪器研发



创新工程中的研究任务：

- 针对汶川、唐山、海城、玉树等典型强震，基于已有观测资料，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；



创新工程中的研究任务：

- 详细解剖地震孕育发生发展过程，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。
- 为不同构造类型及不同沉积环境下的活动构造提供切实可行的地震预报工作方法和途径。





具体研究内容：

- （一）典型地震解剖的科学问题和技术需求研究
- （二）震源区三维精细介质静态和动态模型构建
- （三）典型地震三维构造模型构建
- （四）典型地震三维运动学模型构建
- （五）典型地震孕震模型构建



提炼科学问题与技术需求

针对问题与需求开展观测

三维精细介质模型

介质模型

三维构造模型

断层模型

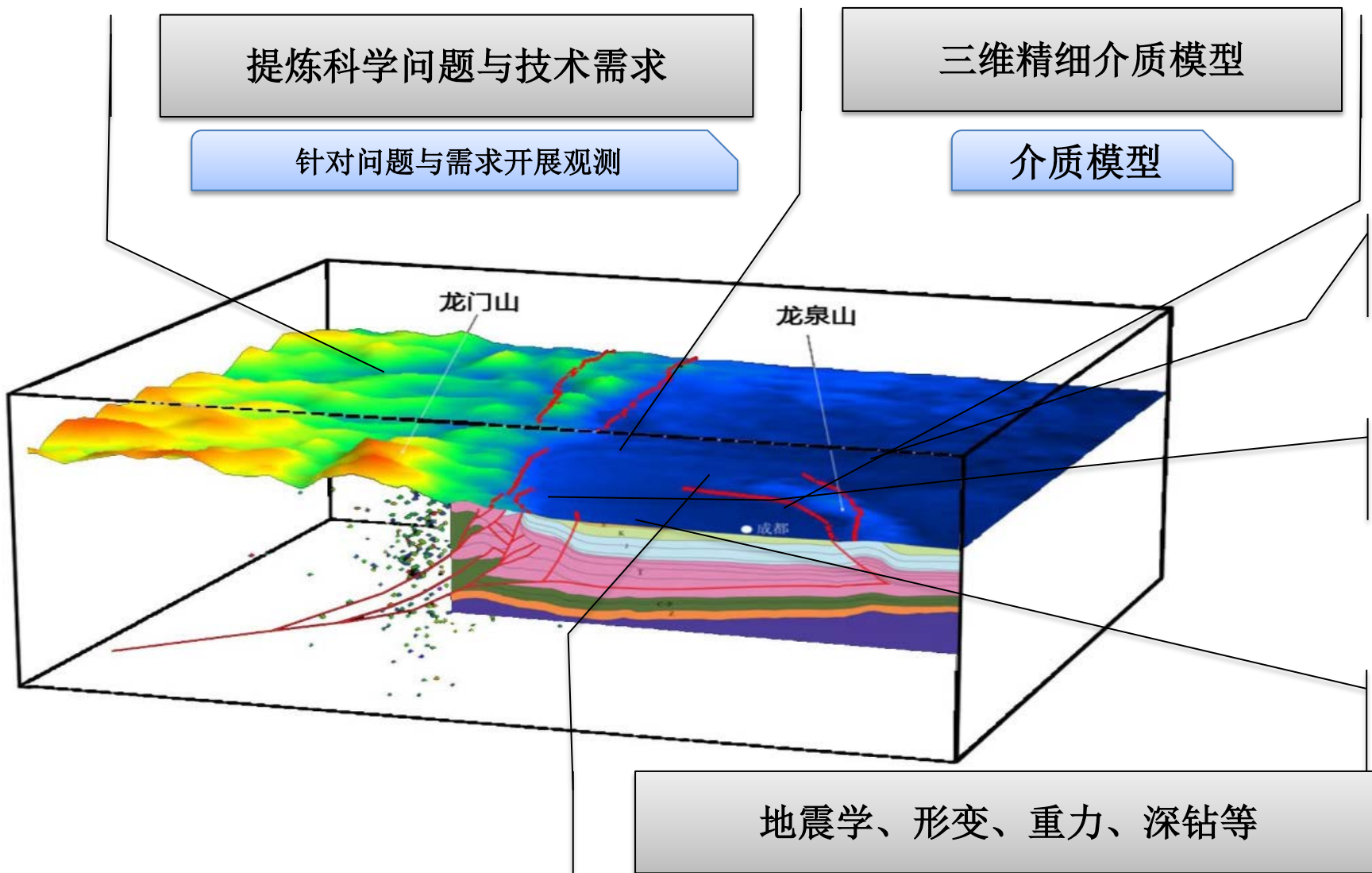
三维运动学模型

运动模型

三维孕震模型

动力学模型

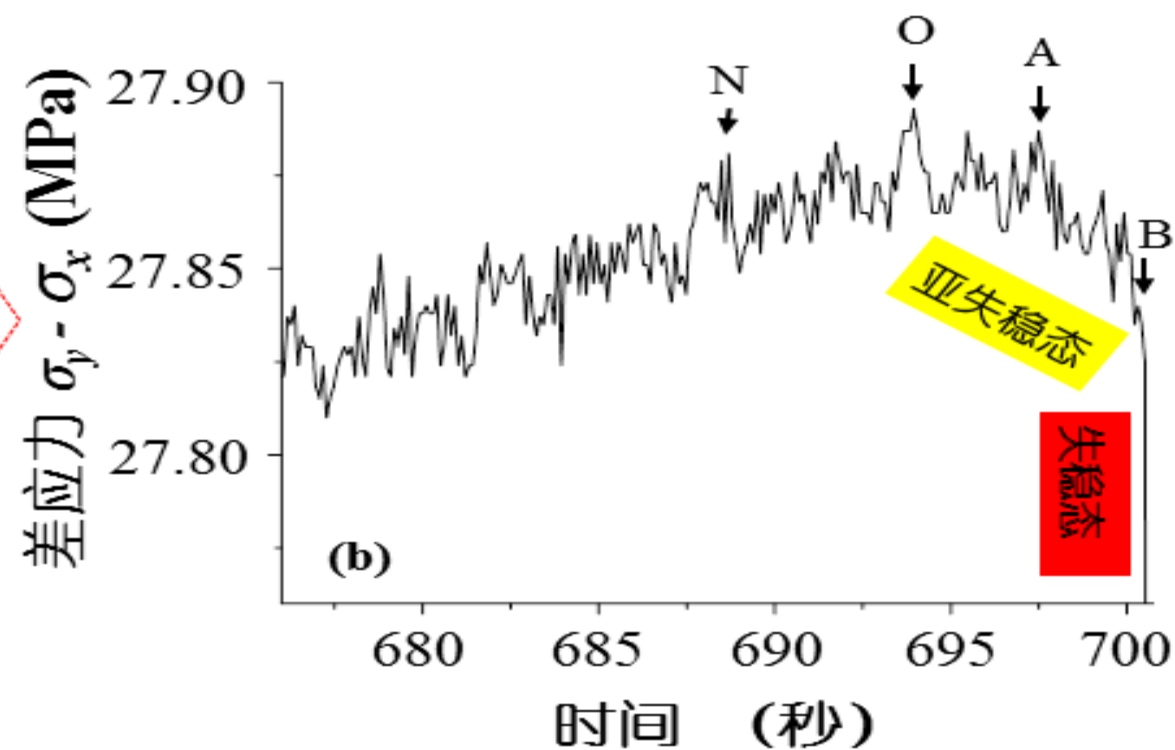
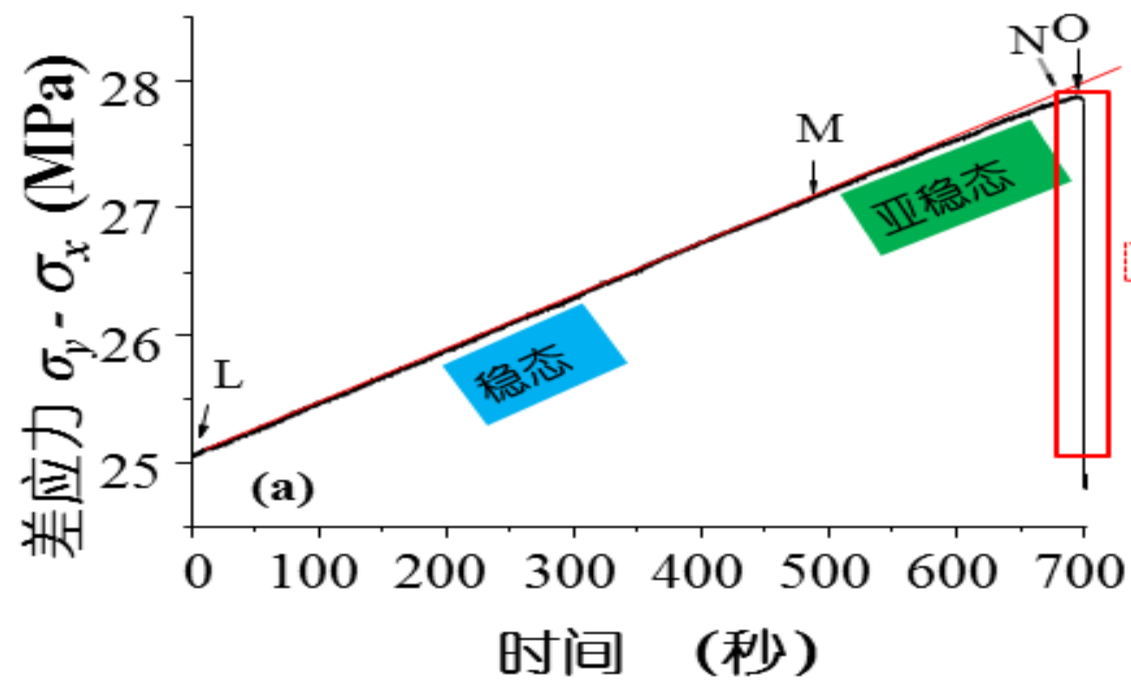
揭示观测现象
和异常机理



主要任务

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
-  二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究
- 六．地震观测新技术与仪器研发





马胜利PPT



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。



主要任务

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
-  三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究
- 六．地震观测新技术与仪器研发



创新工程中的研究任务：

- 开展中国大陆周边板块边界作用方式及其动力影响研究；
- 开展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；

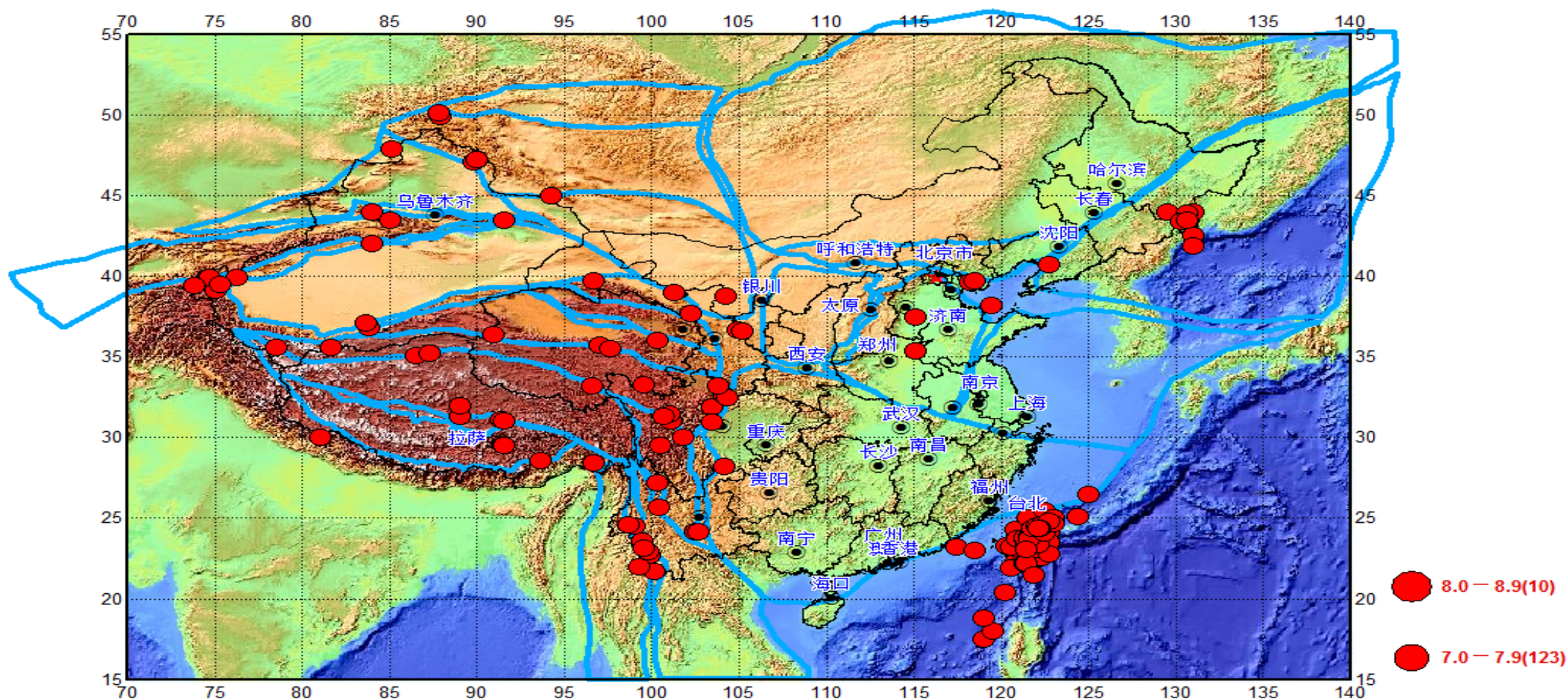


创新工程中的研究任务：

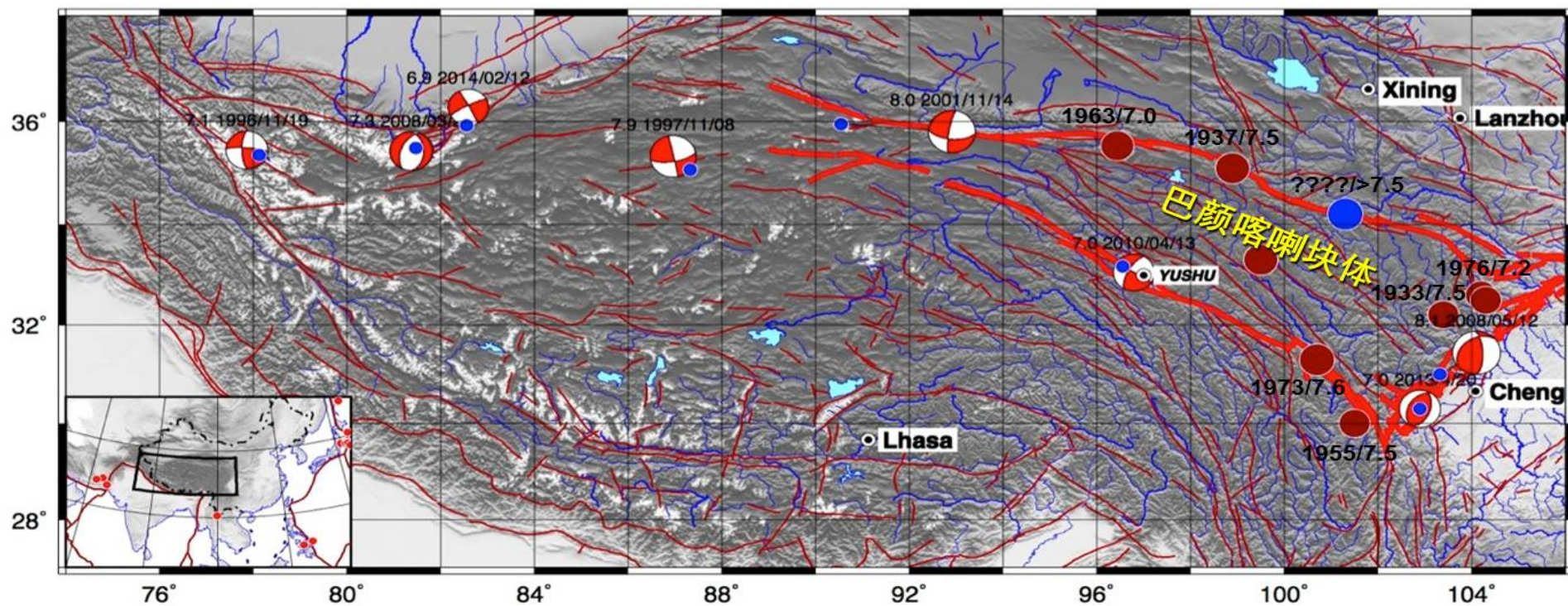
- 围绕强震发震构造和块体边界带断裂系统相互作用，研究活动地块运动和变形对强震迁移和触发的控制作用；
- 研究活动地块边界带成组强震发生的机制和演化规律。



中国大陆活动地块与7级以上地震分布（1900年以后）

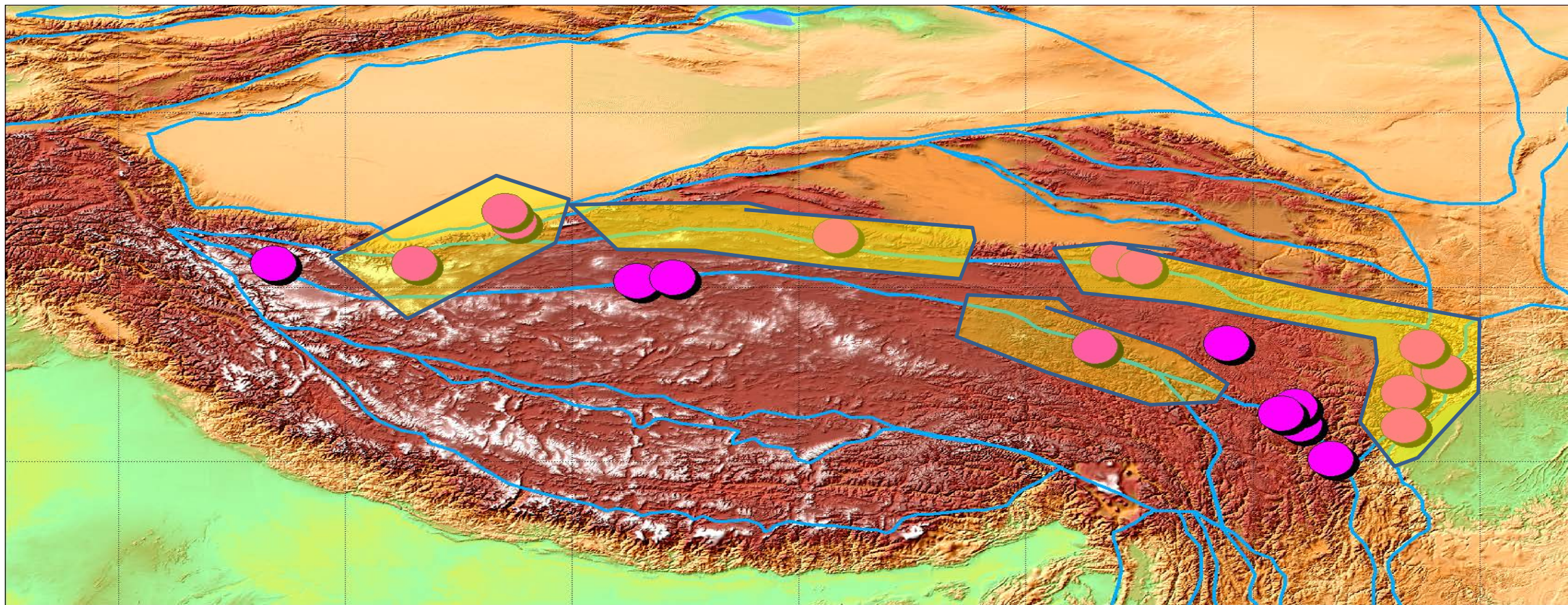


巴颜喀拉块体边界带大地震发生和迁移

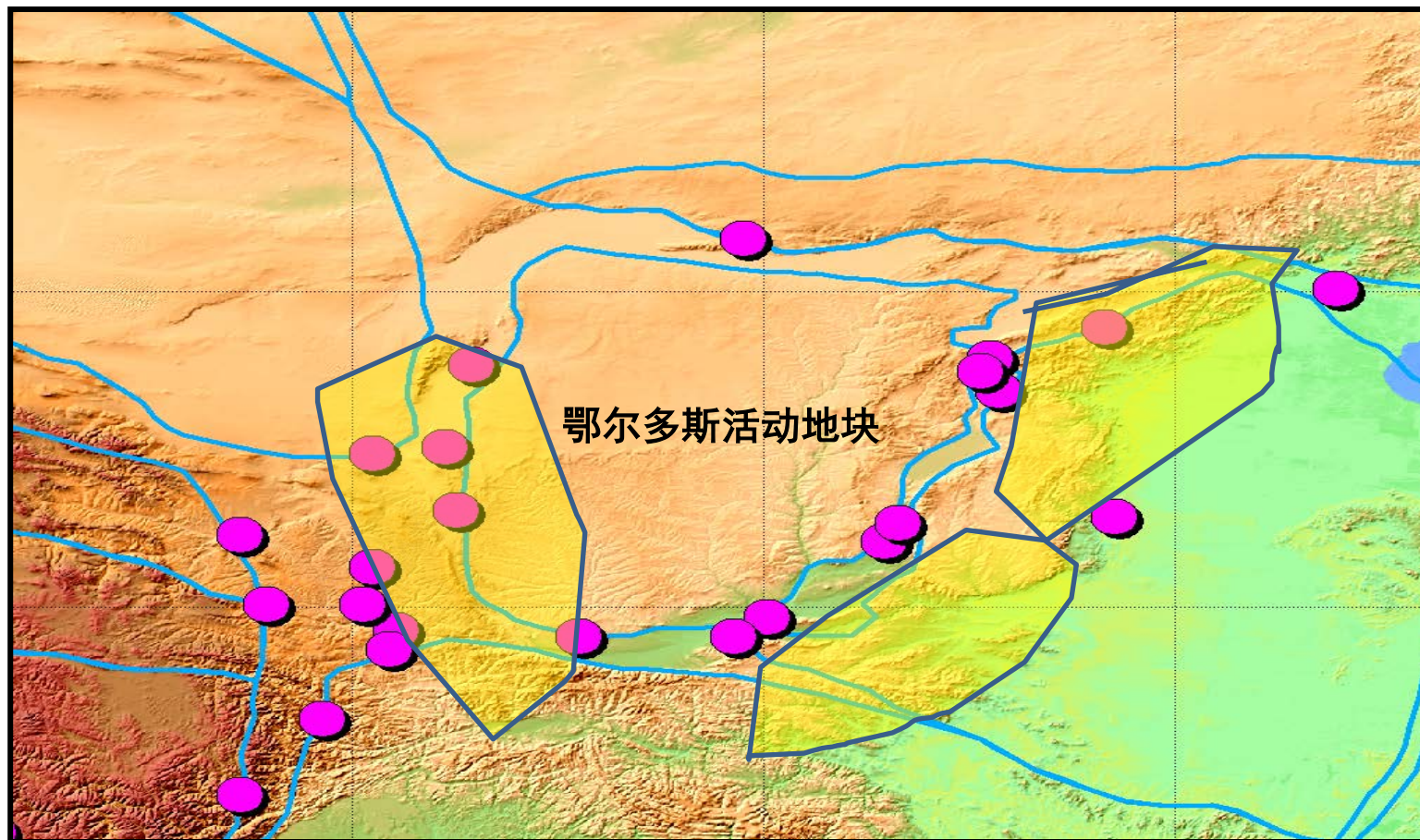


1996年11月19日喀喇昆仑7.1级地震以来，中国大陆地区7级以上浅源地震均发生于巴颜喀拉块体边界带上。

1900年以来巴颜喀拉活动地块7级以上地震分布



工作基础（所长基金重点项目）





地震矩计算结果图

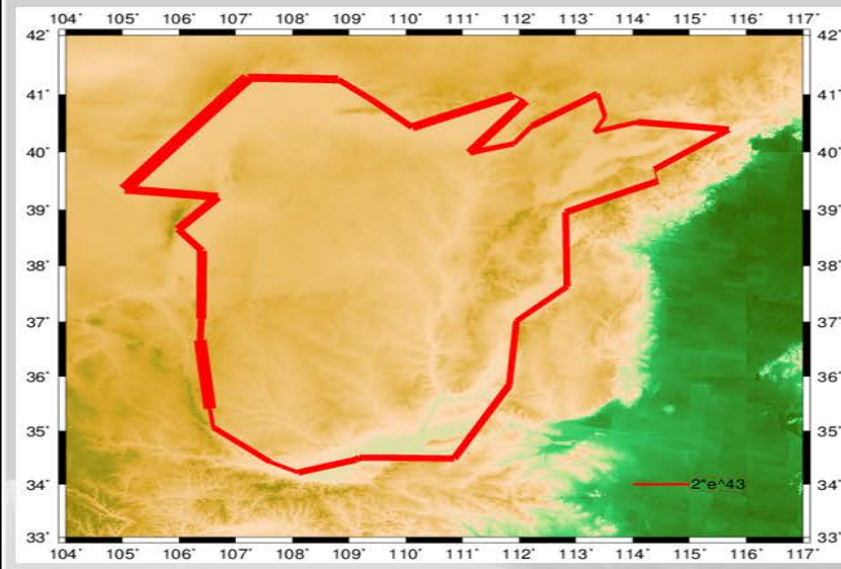


图1：每条断层地震矩积累

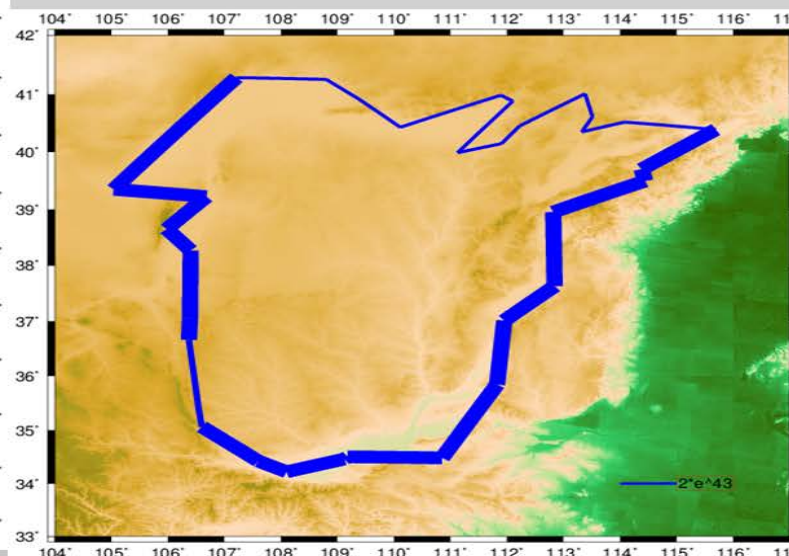


图2：每条断层地震矩释放

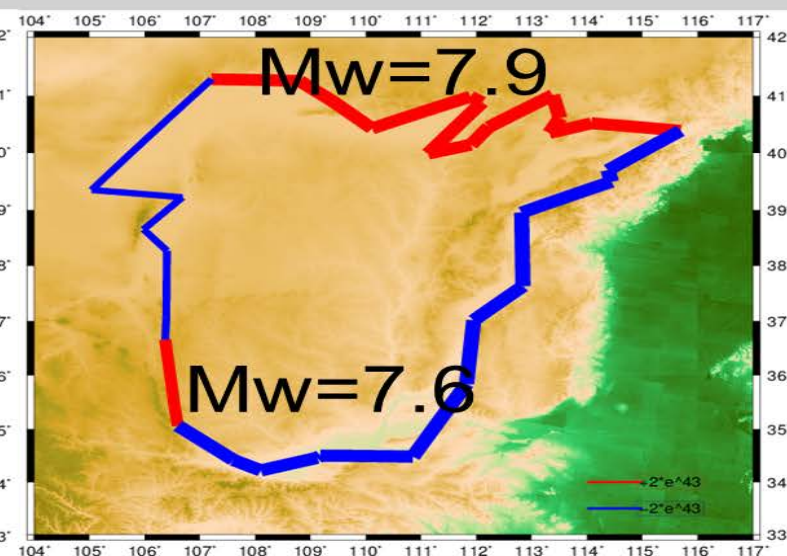


图3：每条断层地震矩亏损

主要任务

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
-  四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究
- 六．地震观测新技术与仪器研发



创新工程中的研究任务：

- 在地球物理、大地测量、地球化学和地质学观测的基础上，依托川滇地震科学试验场，开展活动断层地震复发模式和滑动速率、区域应变速率、地震活动性研究；
- 构建川滇地区地震孕育模型，发展地震概率预测方法；

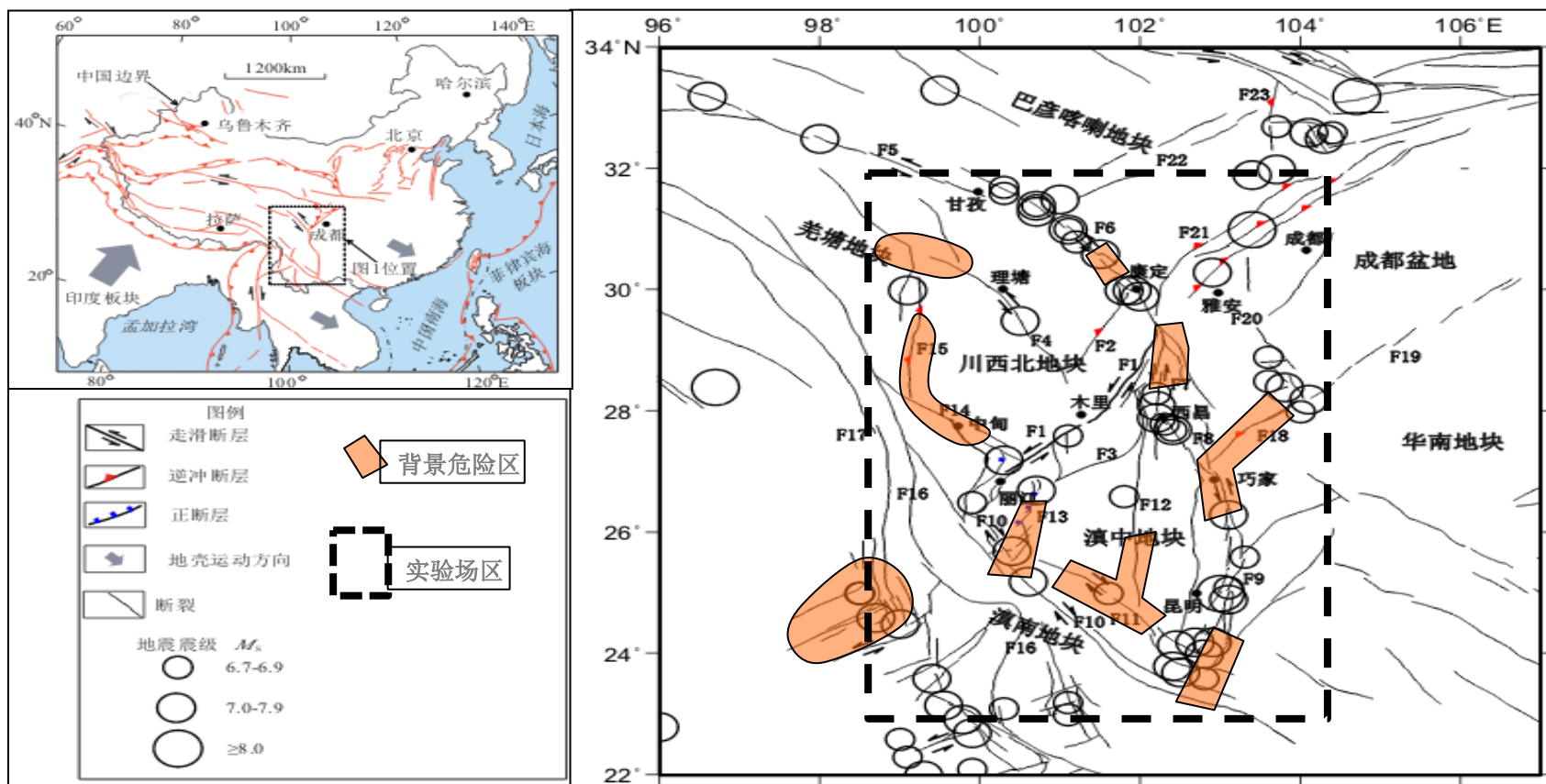


创新工程中的研究任务：

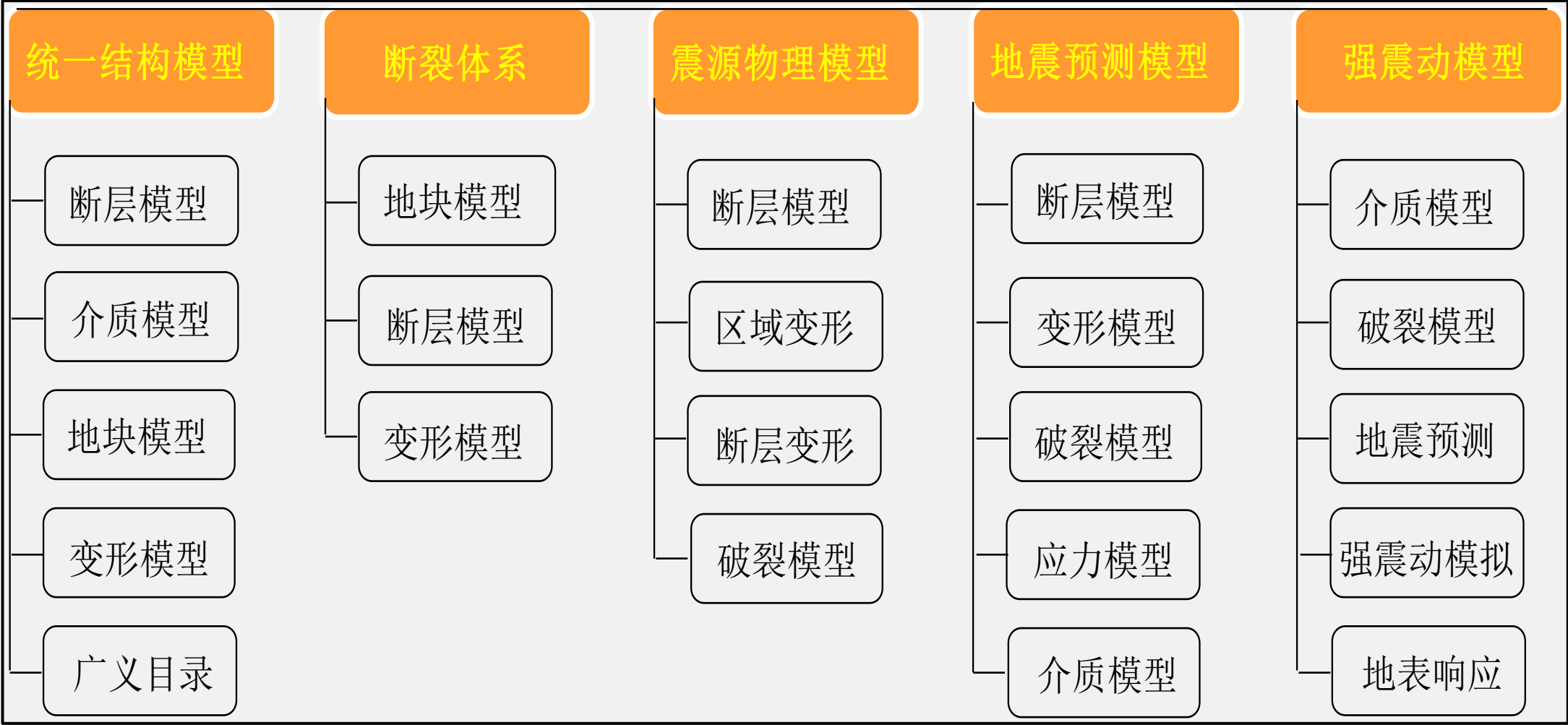
- 结合历史震例，系统搜集、梳理和分析异常信息，揭示异常信息的物理内涵，甄别异常信息与地震发生的内在联系，开展前兆机理研究；
- 发展多时空尺度地震预测新方法、新技术研究；
- 开展人工诱发地震识别方法、活动特征和成因机制研究。



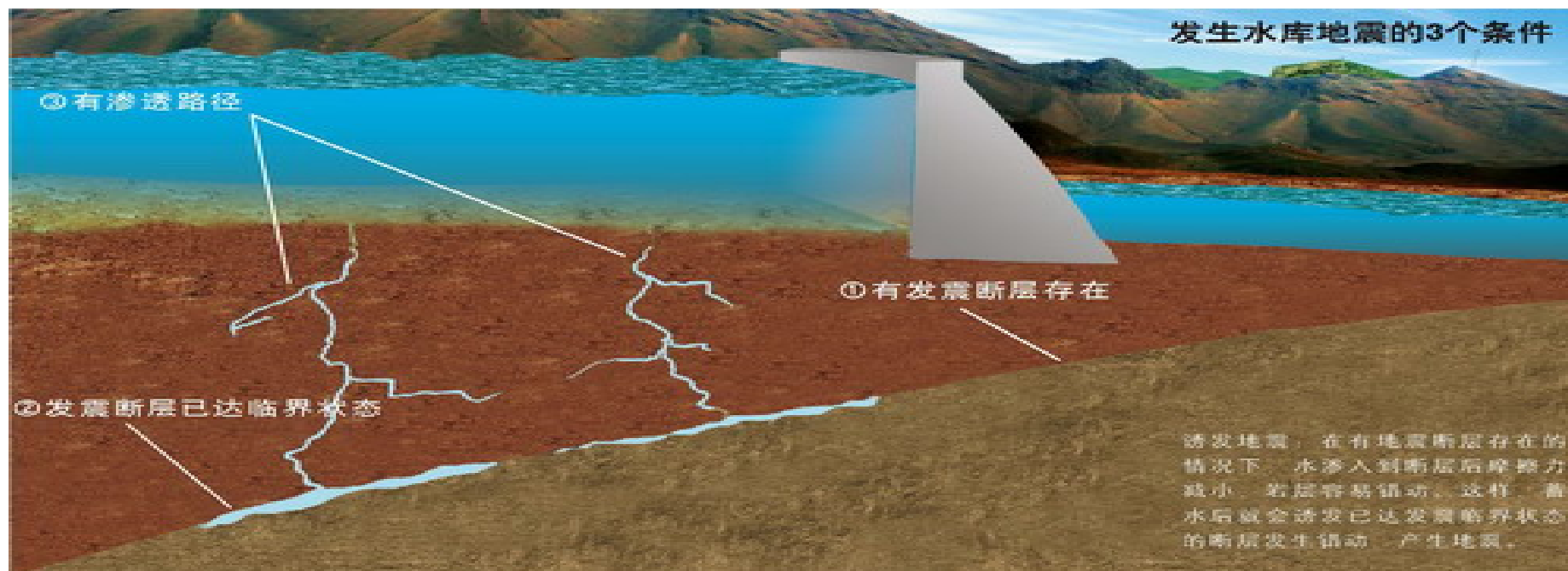
川滇国家地震监测预报实验场区示意图



大陆型强震概率预测模型主要组成框图

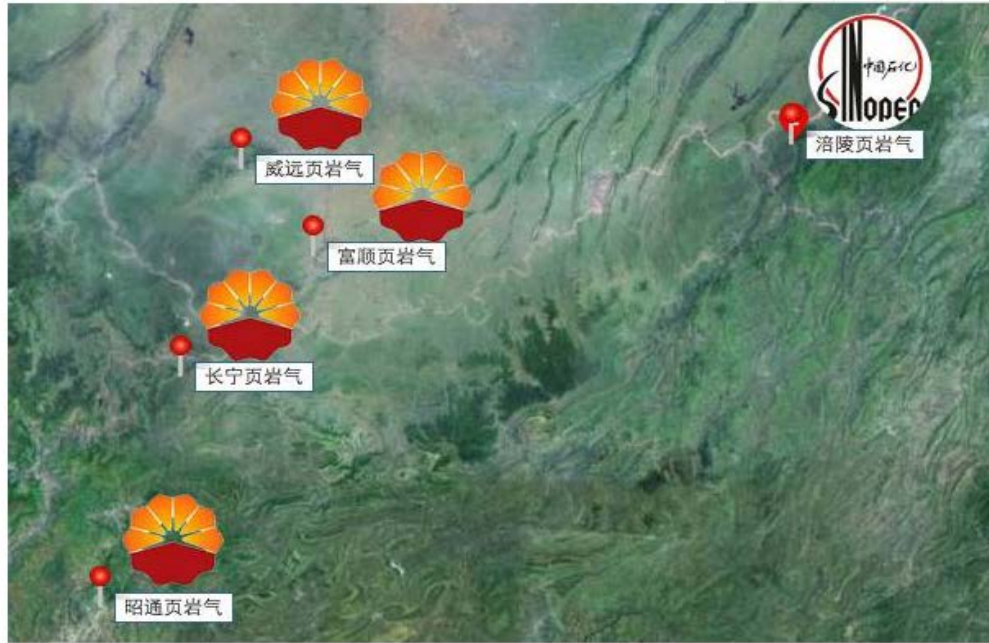


水库地震识别方法、活动特征和成因机制研究



以西部典型梯级高坝水库为目标，研究水库蓄水前后地震活动、震源参数、精细结构、应力应变场等，动态定量计算水库蓄水造成的库区介质和断层应力变化等；研究水库地震活动特征、发生环境和成因机理和危险性分析。

中国大陆页岩气开采诱发地震研究



未来二十年中国是全球第二大页岩气产区。大部分页岩气埋藏较深，存在注水诱发地震风险。以我国页岩气国家级先行开采区为示范区，实施加密观测和井下地震监控。

运用地震学方法和技术，开展微震识别、地震活动时空迁移、震源机制特征等研究。定量计算和分析注水引起的应力变化及其与地震的关系，探讨诱发地震机制、发生条件及预测方法。



主要任务

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
-  五．地震大数据建模与超算模拟研究
- 六．地震观测新技术与仪器研发



创新工程中的研究任务：

- 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技术；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检验；人工智能等地震预测新方法等。



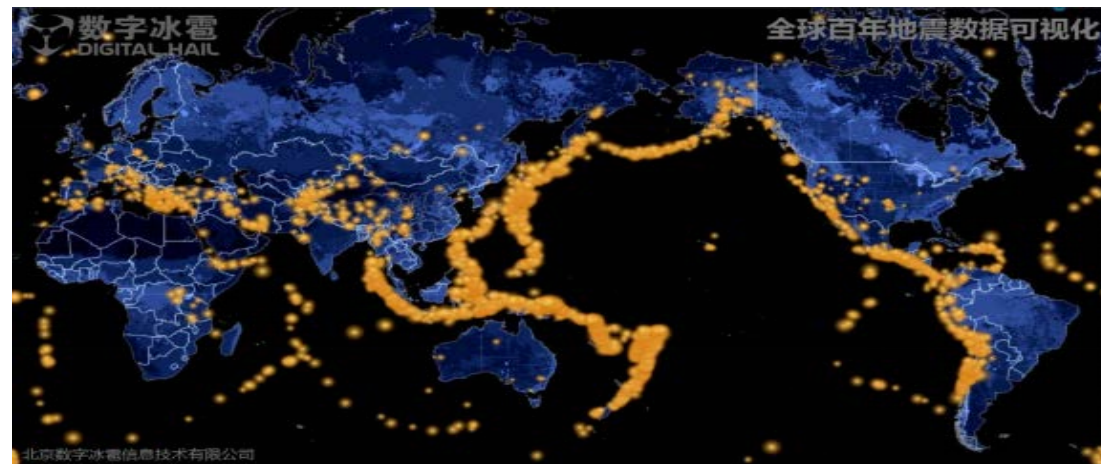
地震大数据建模与超算模拟研究

1. 地震学大数据构建

大数据仓库与云平台建设，核心算法与技术研究，大数据集成标准与备份、共享、安全，大数据可视化与集成分析。

2. 地震学大数据应用关键技术与示范

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可视化建模与实现。大数据产品：深部精细成像、弹性波矢量场层析理论与方法、多源异构地球物理数据联合反演。

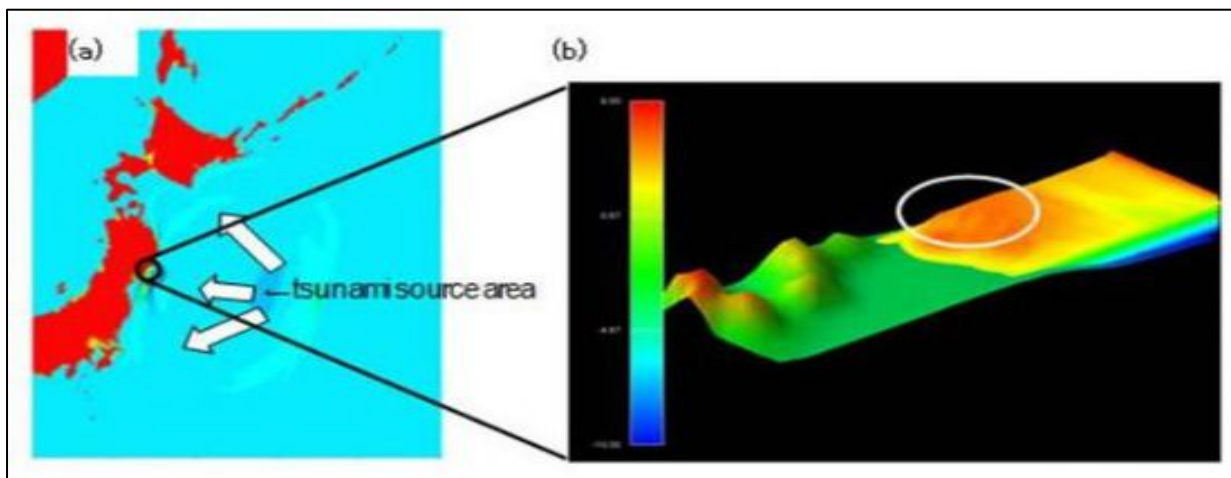


地震大数据建模与超算模拟研究

3. 地震动力学模拟器科学装置部署

部署“固体地球模拟器”建立国际领先的地震动力学数值模拟基础框架。

软件和硬件系统，数据共享系统，可视化与实验分析及决策平台



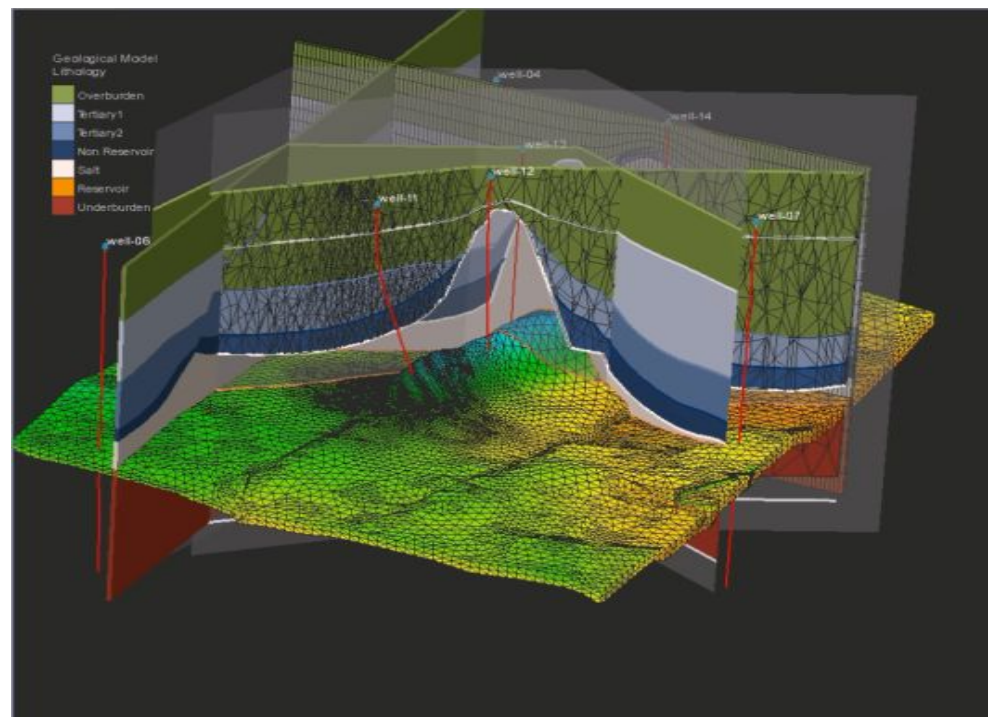
日本富士通公司与Touhoku大学联合开发出了一种3D海啸模拟器，该模拟器通过监测多种自然数据预测海啸，精度极高。2011年首先在Touhoku地区发生的地震是整个日本下半年最严重的自然灾害之一。



地震大数据建模与超算模拟研究

4. 完成多尺度地震动力学耦合框架

完成国际领先的地震动力学多尺度演化过程为核心的地震动力学模拟实验软件系统体系部署，构建系列模拟实验框架体系。



地震大数据建模与超算模拟研究

5、人工智能地震预测新方法研究

基于大数据挖掘和人工智能建模的大数据产品，采用人工智能方法学习处理大量的原始地震观测资料，协同处理、分析解释、获取和发现新知识和新认识，发现和了解新的地震前的异常现象，探索地震预测新方法。



该研究发表在《Geophysical Review Letters》杂志上，确定了一个导致地震的隐藏信号，并用这个“指纹”来训练机器学习算法预测未来的地震。英国剑桥大学和美国波士顿大学的研究人员研究了地震、前兆地震和断层之间的相互作用，希望开发出一种预测地震的方法。



主要任务

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究
-  六．地震观测新技术与仪器研发



创新工程中的研究任务：

- 研制针对地震观测研究的不同观测对象的系列化重力仪和电磁仪；
- 研发地应力综合测量仪器、地埋式土壤化学组分等易于密集布设的测量仪器；
- 研发高温高压环境下地震观测、在线标定等关键技术和观测设备；
- 研发高频GNSS与强震仪集成于一体的新型观测系统和设备。



地震观测新技术与仪器研发

1. 地下应力状态监测技术

研发井下震源装置；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。



2. 变频人工震源应用研究

研发大功率变频人工震源装置，开展变频人工震源应用研究和观测试验。



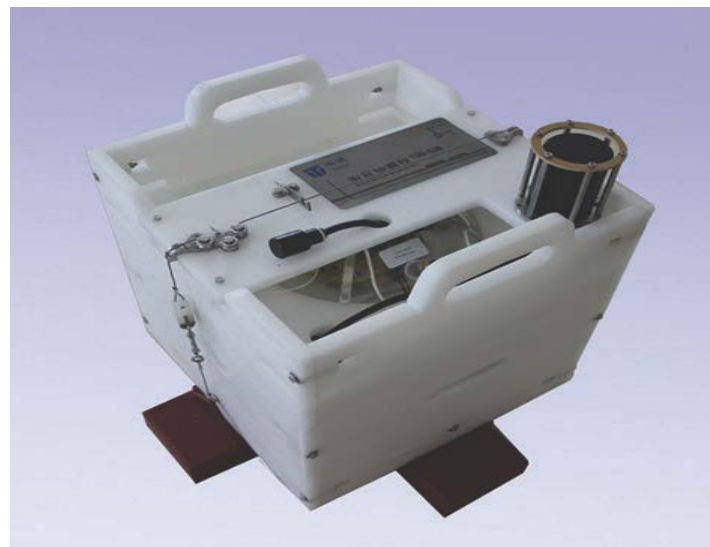
地震观测新技术与仪器研发

3. 海底地震观测关键技术研究

研发海底宽频带地震仪；研发海底地震传感器自检测试技术。研发沉浮式和缆式海底地震、地磁观测技术。

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；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。



地震观测新技术与仪器研发

5. 深井多测项综合观测传感器研发

研发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，解决多种观测仪器的技术集成等技术问题。



地震观测新技术与仪器研发

6. 断层亚失稳阶段光纤应变监测及演化特征研究

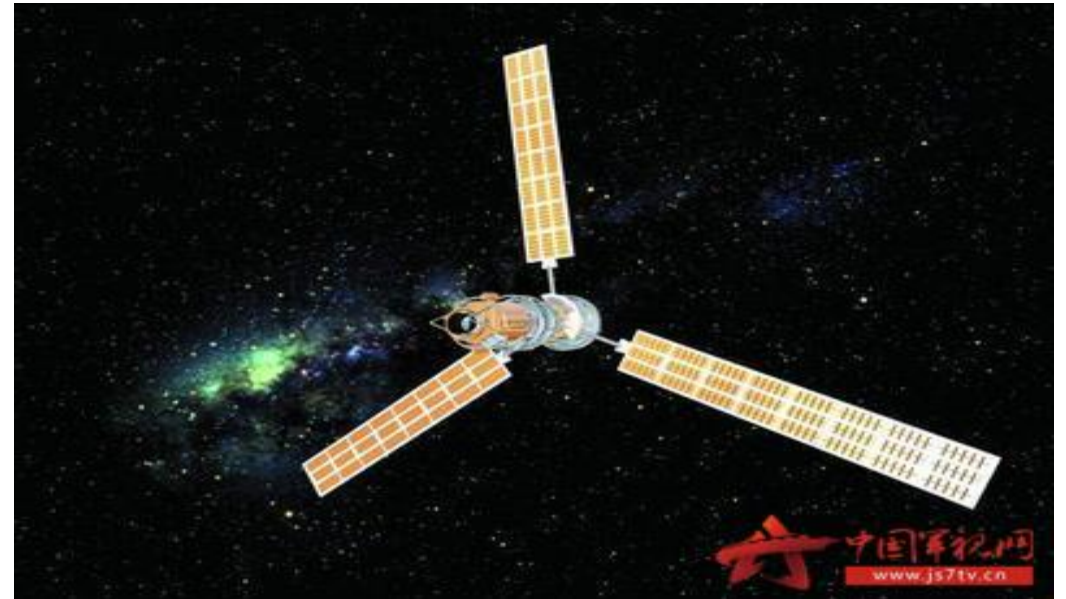
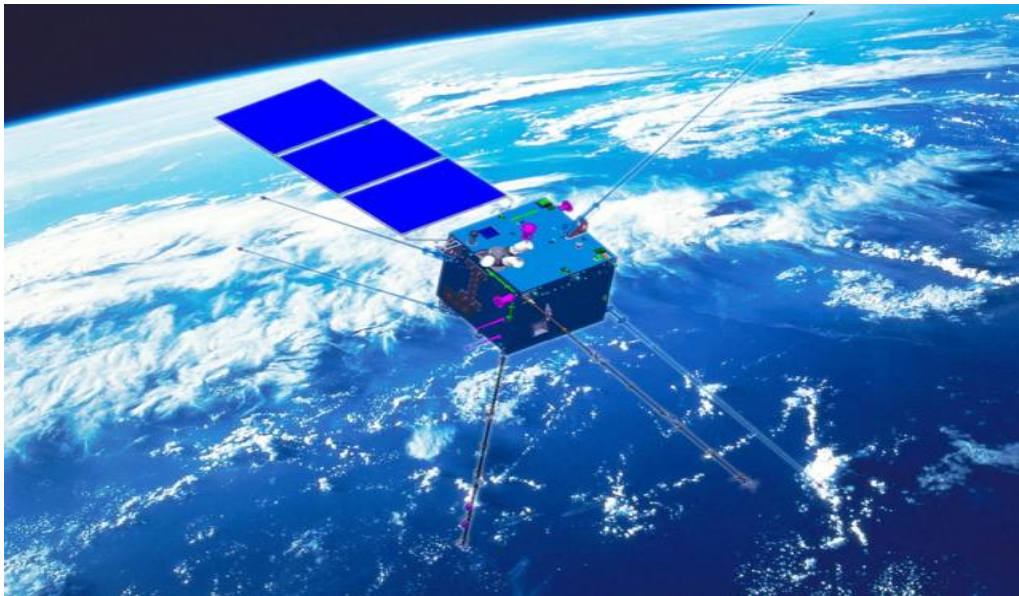
7. 六自由度地震观测系统研发



地震观测新技术与仪器研发

8. 中国大陆地震的卫星红外和TEC探测技术

9. 测震数据分析处理软件



目前主要任务落实情况

- 一．典型震例解剖与大震孕育发生机理研究（深地计划等）
- 二．断层亚失稳观测与前兆机理研究（重点研发、联合基金等）
- 三．大陆活动地块边界带成组强震活动机理研究（重点研发等）
- 四．地震概率预测方法及人工诱发地震研究（重点研发等）
- 五．地震大数据建模与超算模拟研究（重点研发等）
- 六．地震观测新技术与仪器研发（重点研发、联合基金等）





概况



科技问题



目标任务



与实验场关系



地震预报科学挑战



实验场条件——“透明地壳”

实验场目标——“解剖地震”



❁ 精细构造

❁ 介质结构

❁ 应力状态

❁ 时空演化

实验场平台建设?
——基础条件(高时空分辨率)



❖ 震源结构

❖ 深部动力学环境

❖ 孕震和发生模型

❖ 揭示孕震与发震过程

❖ 解释观测异常

解剖地震解剖什么？
实验场目标



实验场是落实“四大计划”的理想场所，
实验场既要体现严谨的科学性，又要体现具体的实践性，以科学性指导具体的实践，但必须警惕演变成为震情跟踪工作，冲淡科学性。





目前地震监测、探测技术的时间和空间分辨率大幅度的提高。通过正在建立密集观测的科学实验场，深入解剖典型地震，将为大震预测预报取得突破提供重要的科学基础。





概况



科技问题



目标任务



与实验场关系



地震预报科学挑战



- ❁ 地球不可入性
- ❁ 大地震样本少
- ❁ 孕育过程复杂



一、地球不可入性

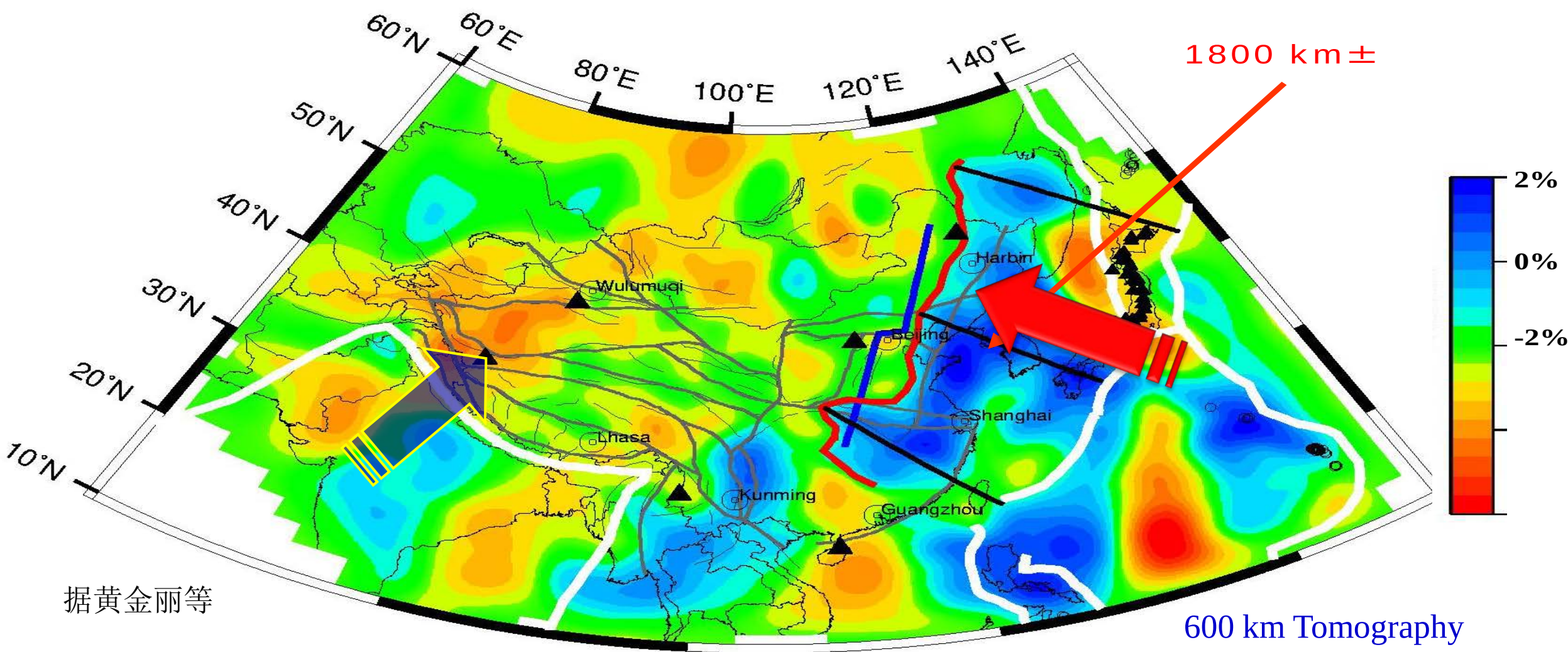
上天不易、入地更难

间接观测

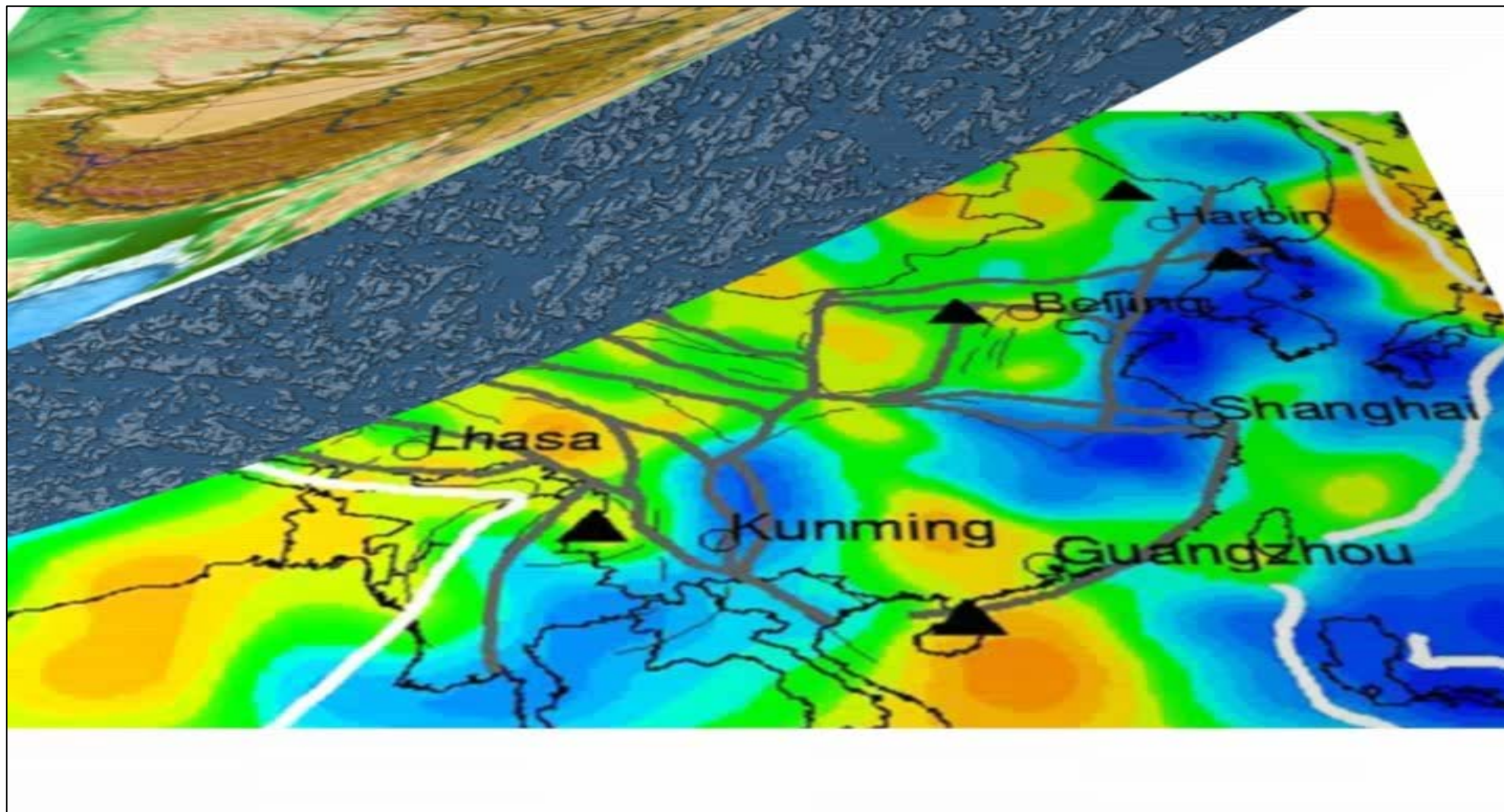
- ◎ 地球物理场三维成像
- ◎ 深钻



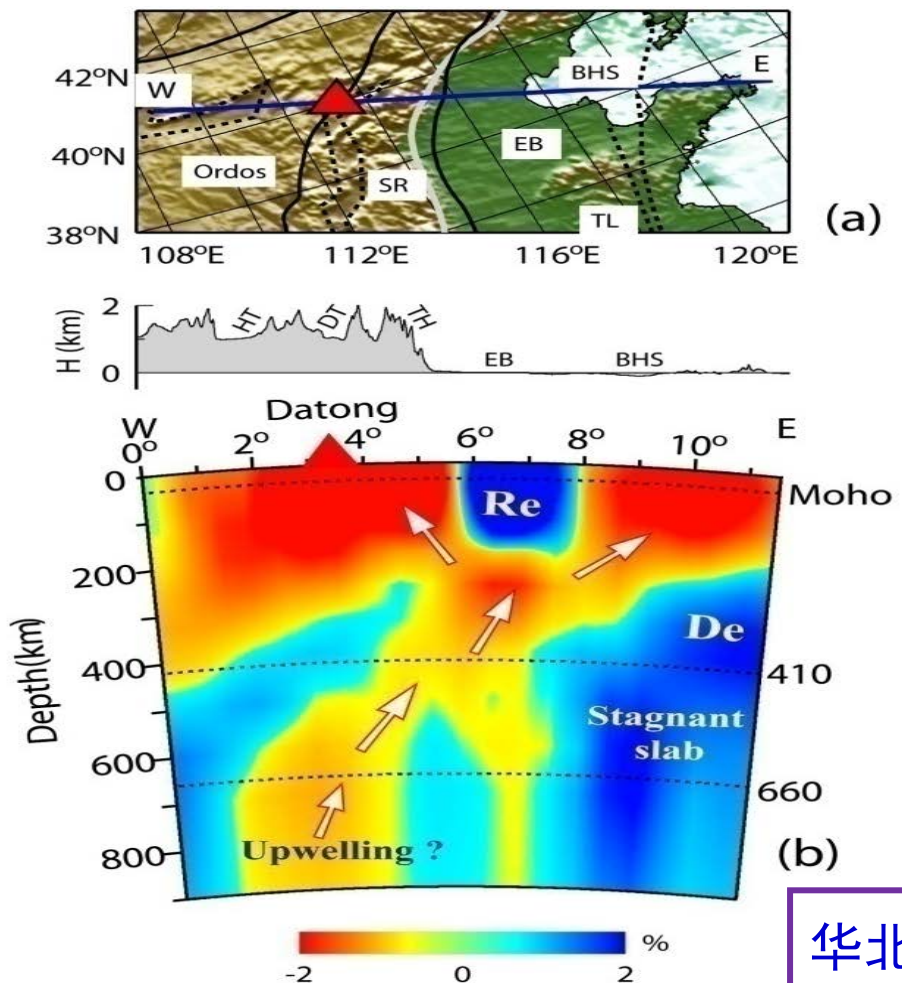
◎ 地球物理场三维成像



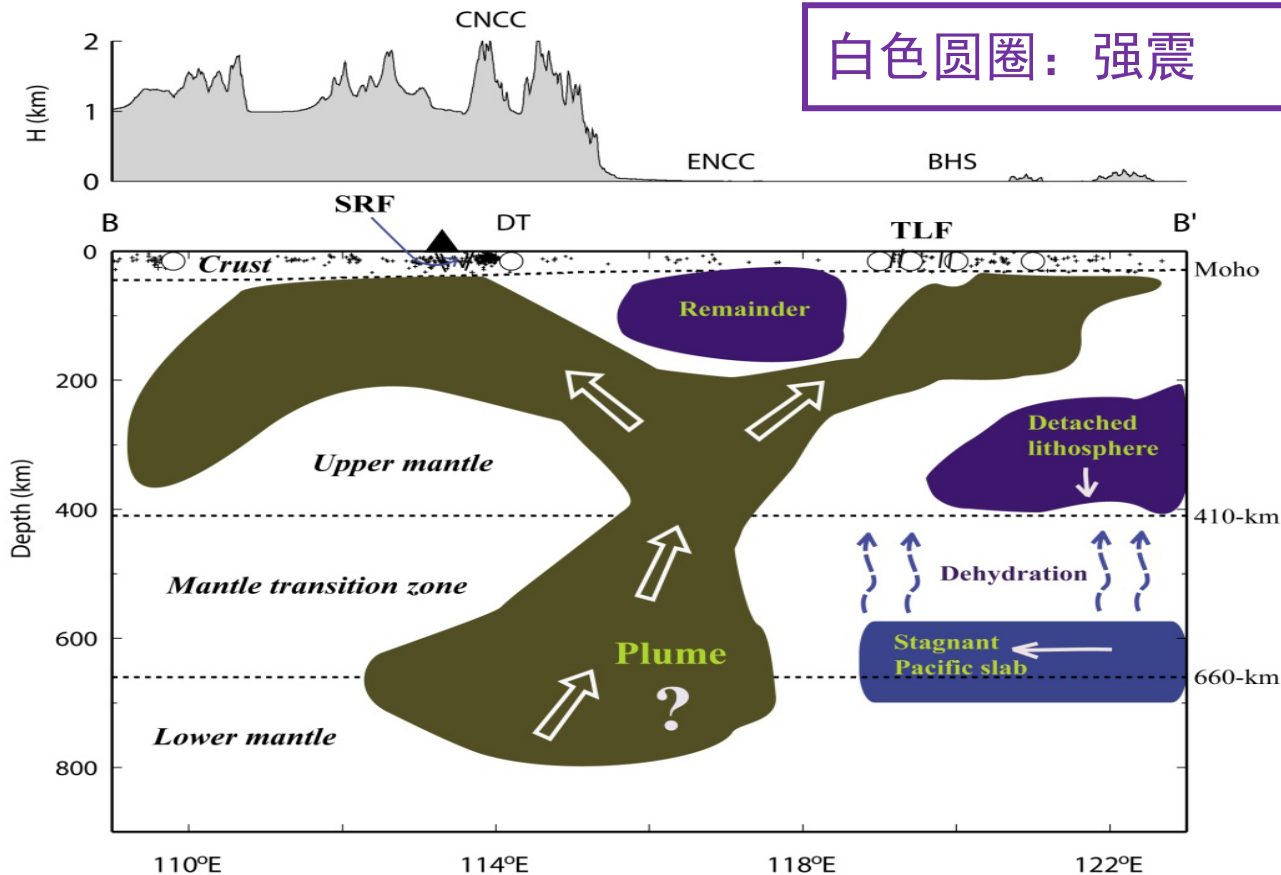
◎ 地球物理场三维成像



华北地区上地幔成像结果



Lei, 2012, JGR



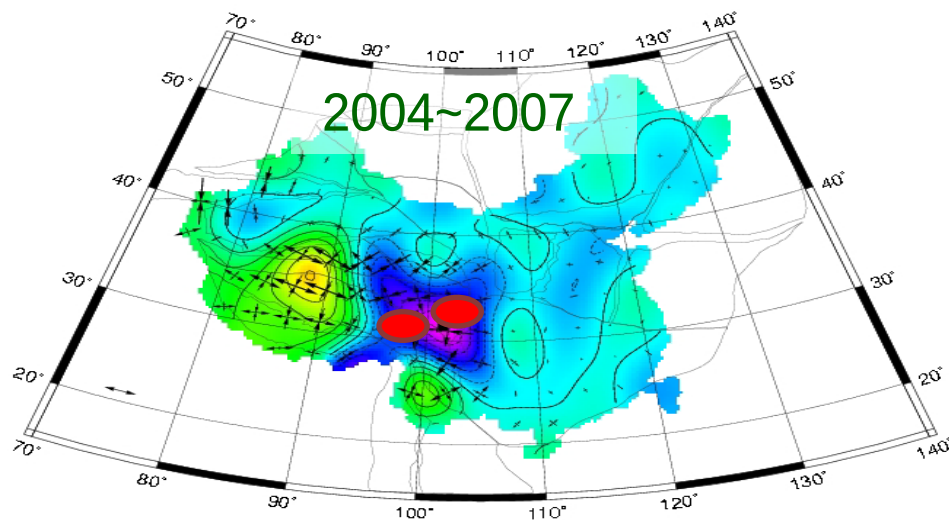
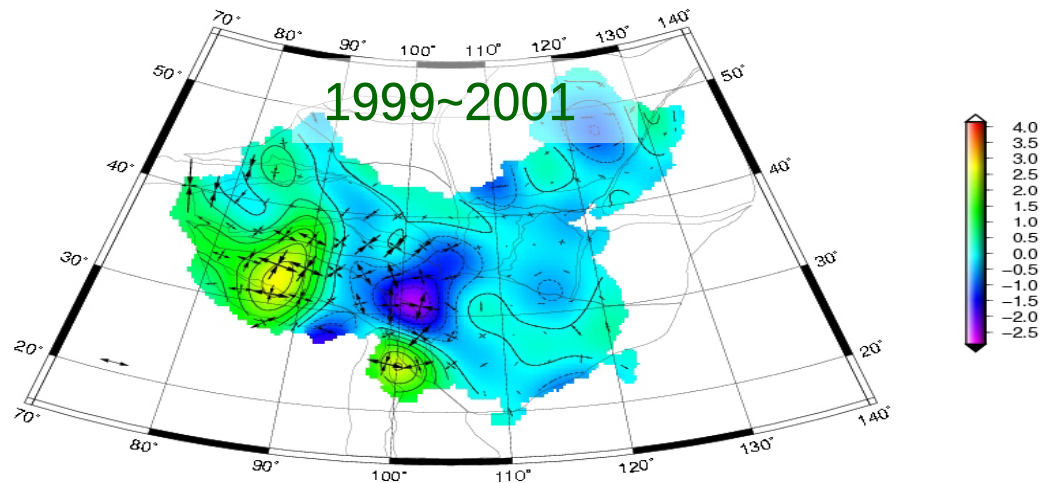
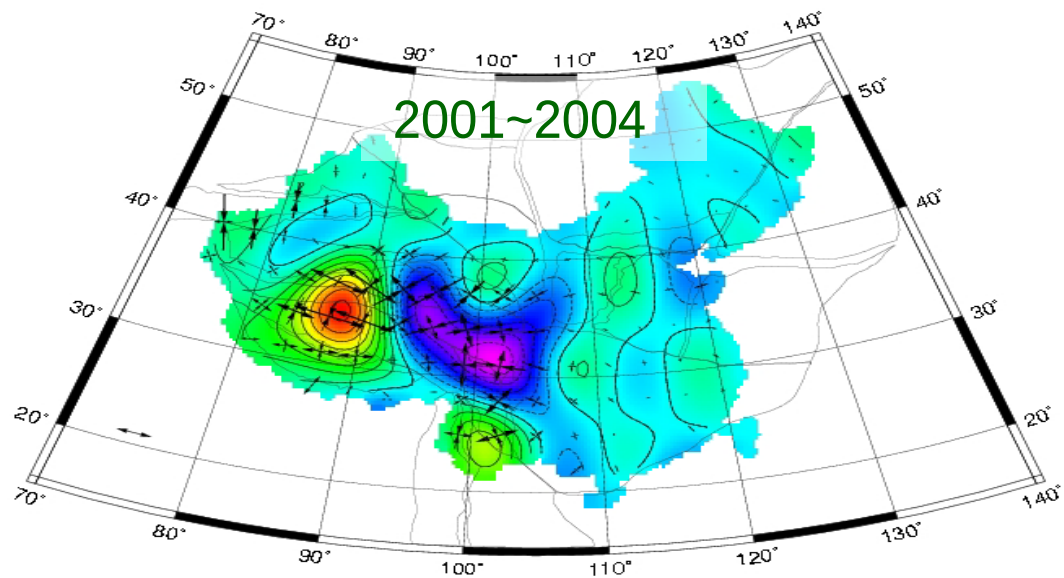
白色圆圈：强震

华北地区地幔深处存在“Y”字形低波速异常，暗示出该区强震的发生可能与太平洋板块深俯冲形成的地幔热物质上涌等动力过程有关



中国大陆水平应变场 东西向应变分量

据江再森等



二、大地震样本少

8级地震平均10年1次

长期观测

- ◎ 大地震系统科考
- ◎ 古地震和历史地震研究
- ◎ 岩石实验



◎ 大地震系统科考

- 昆仑山8.1级地震
- 汶川8.0级地震
- 唐山、海源、察隅、古浪、富蕴等



◎ 古地震和历史地震研究

- 汶川地震区域古地震
- 青海喇家遗址古地震
- 郯庐带北段古地震
- 岐山历史大地震



三.孕育过程复杂

  基础理论探索



◎ 基础理论探索

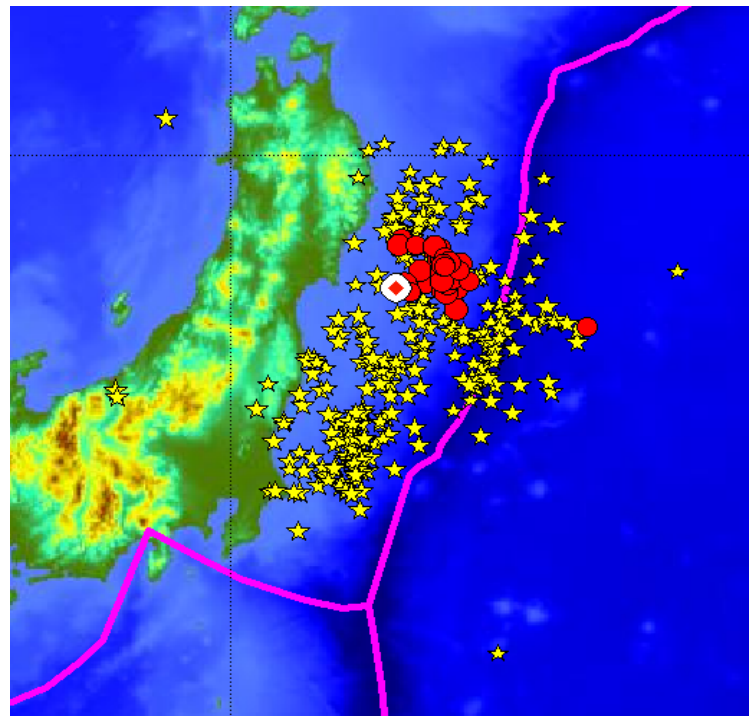
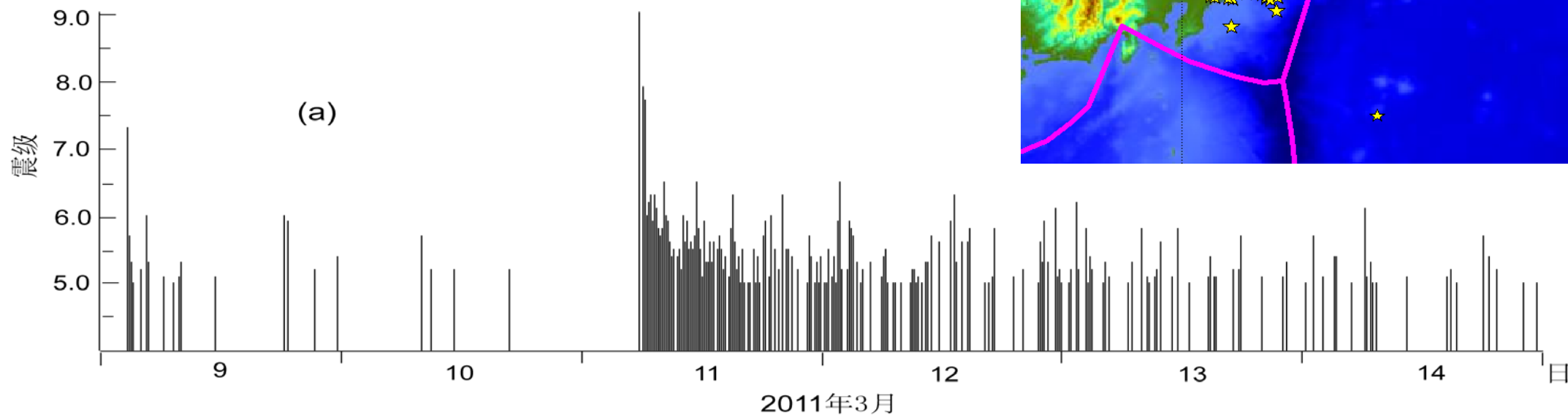


- 1. 国际破裂成核理论
- 2. 震源区闭锁理论
- 3. 我国活动地块理论



1.国际破裂成核理论

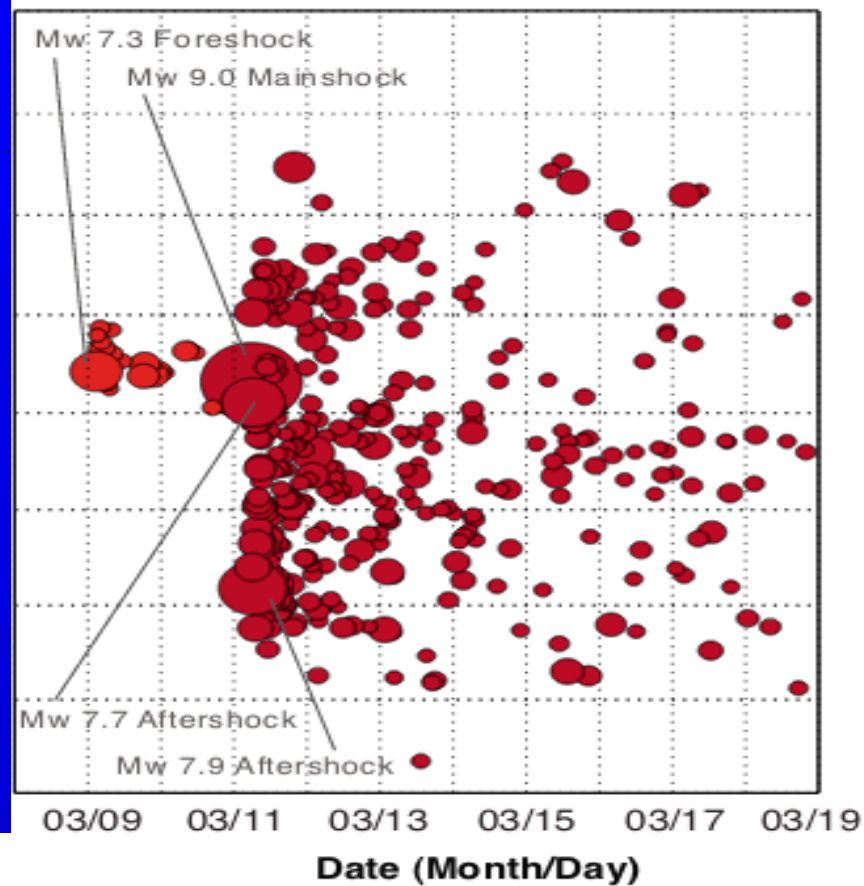
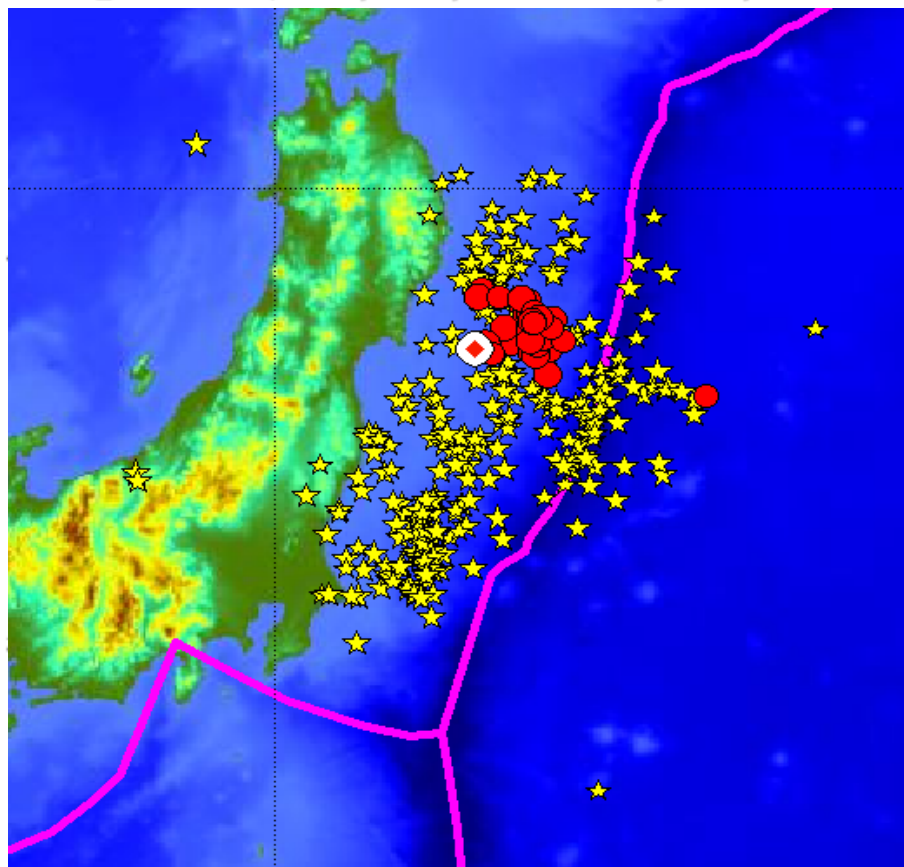
日本2011.03.11 M_w 9.0地震



Tohoku, Japan Earthquake: Aftershock (and Foreshock)
Sequence, 03/08/11 - 03/16/11

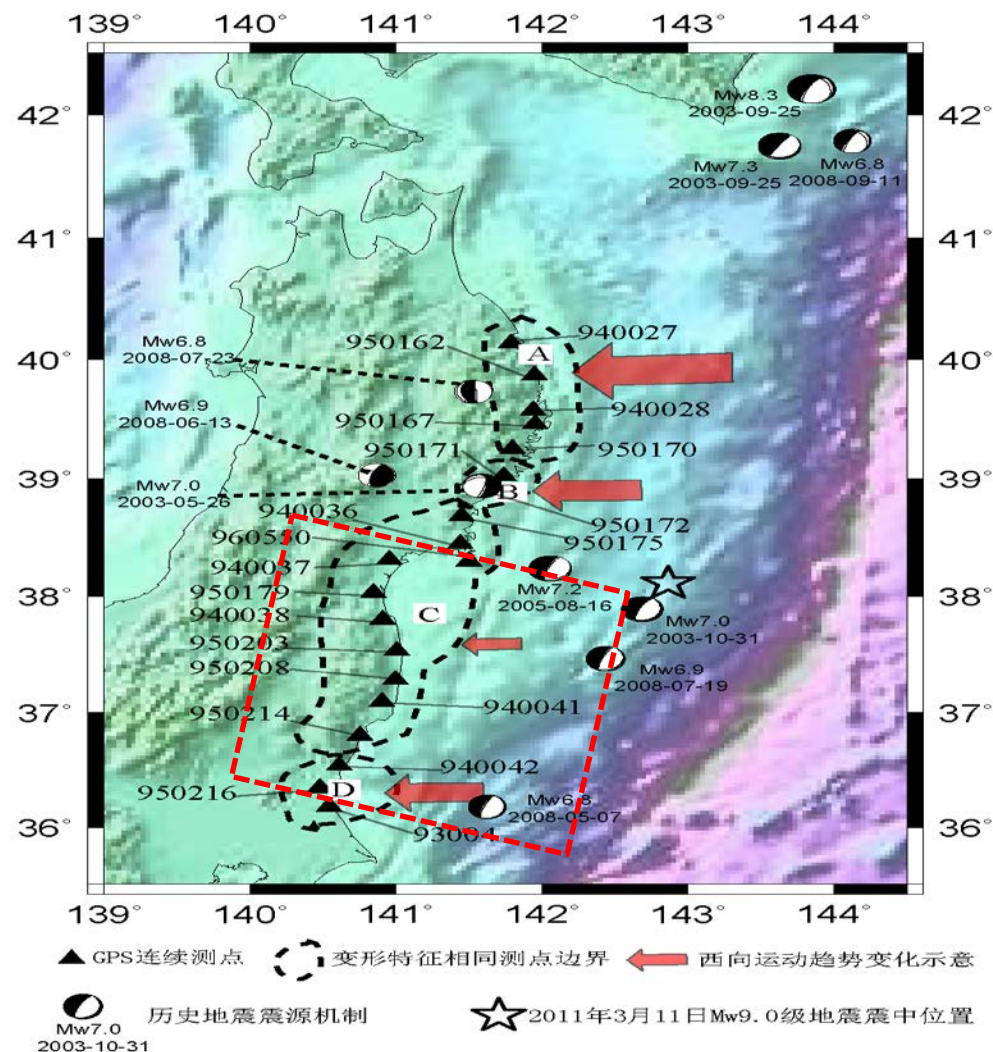


日本2011.03.11 M_w 9.0地震

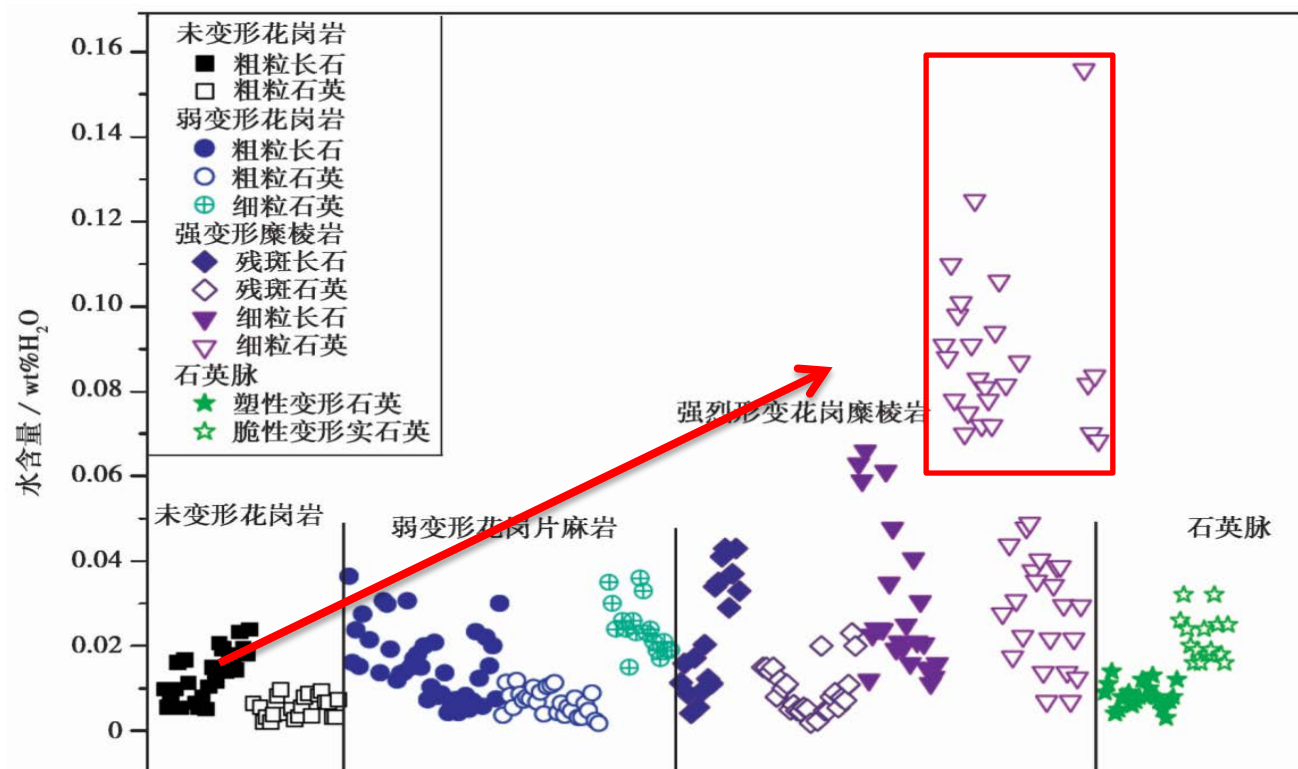


2011年3月11日 东日本9.0级大地震

震源区域地震前GPS观测显示运动量比周围区域明显减小



断层脆-塑性转化带应力状态与流体分布

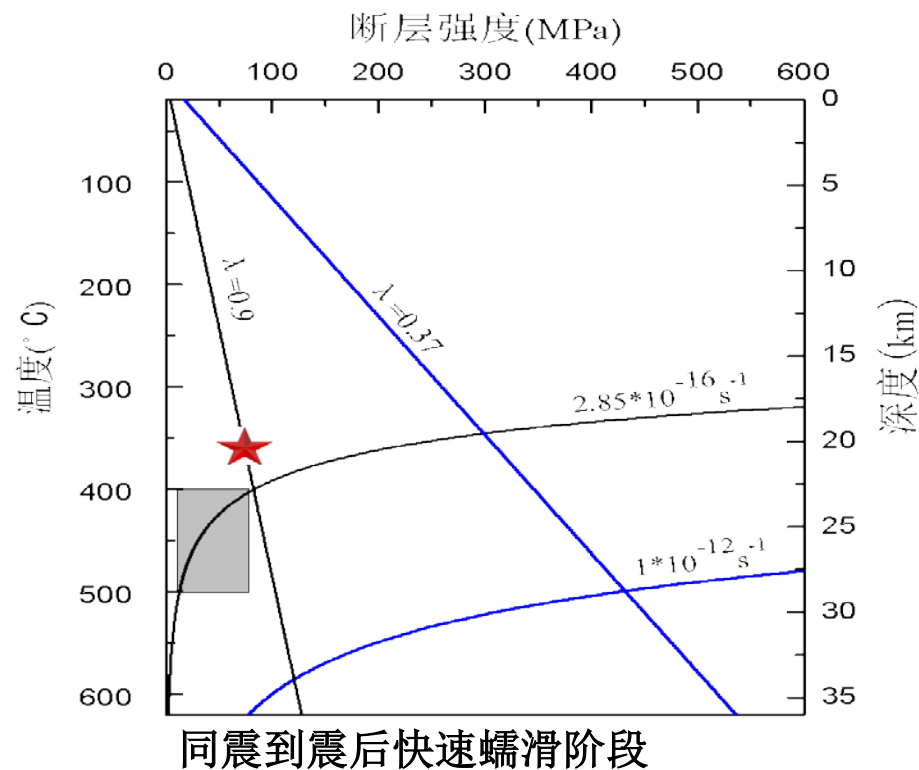
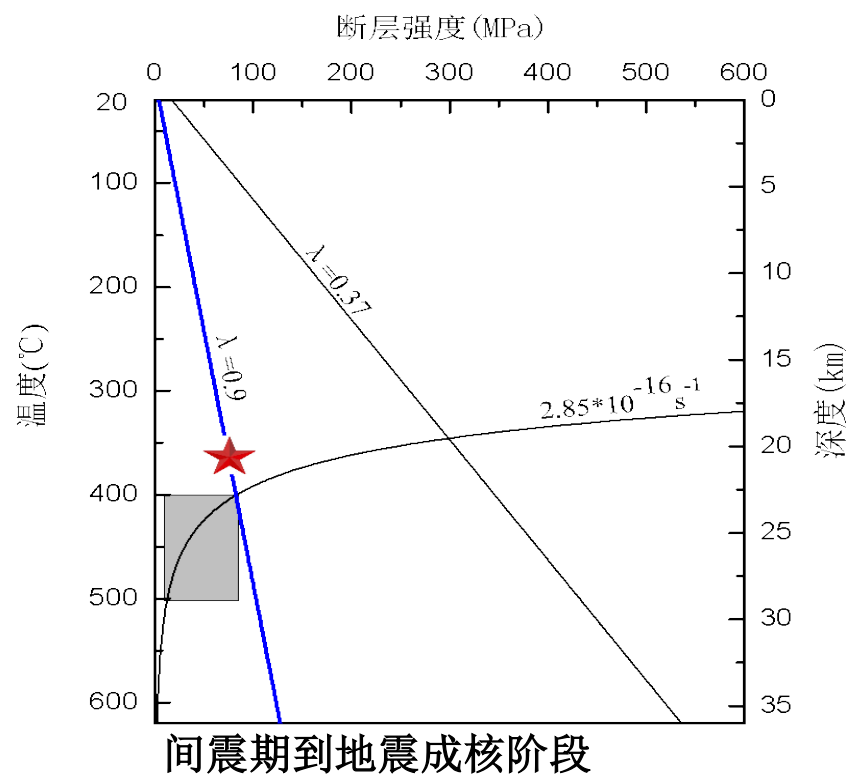


据马胜利ppt

剪切带内矿物的水含量与变形程度正相关，断层内部比断层周围岩石含有更多的水，并且是高温高压下具有极强活性的气体水。



龙门山断层脆-塑性转化带流变结构



地震成核部位具有低强度（高孔隙压力造成）、速度弱化的特征，断层带高压流体的存

据马胜利ppt

在可能对地震成核起着重要作用。 *Han et al., J Asian Earth Sci., 2016*



◎ 基础理论探索

➤ 1. 国际破裂成核理论



➤ 2. 震源区闭锁理论

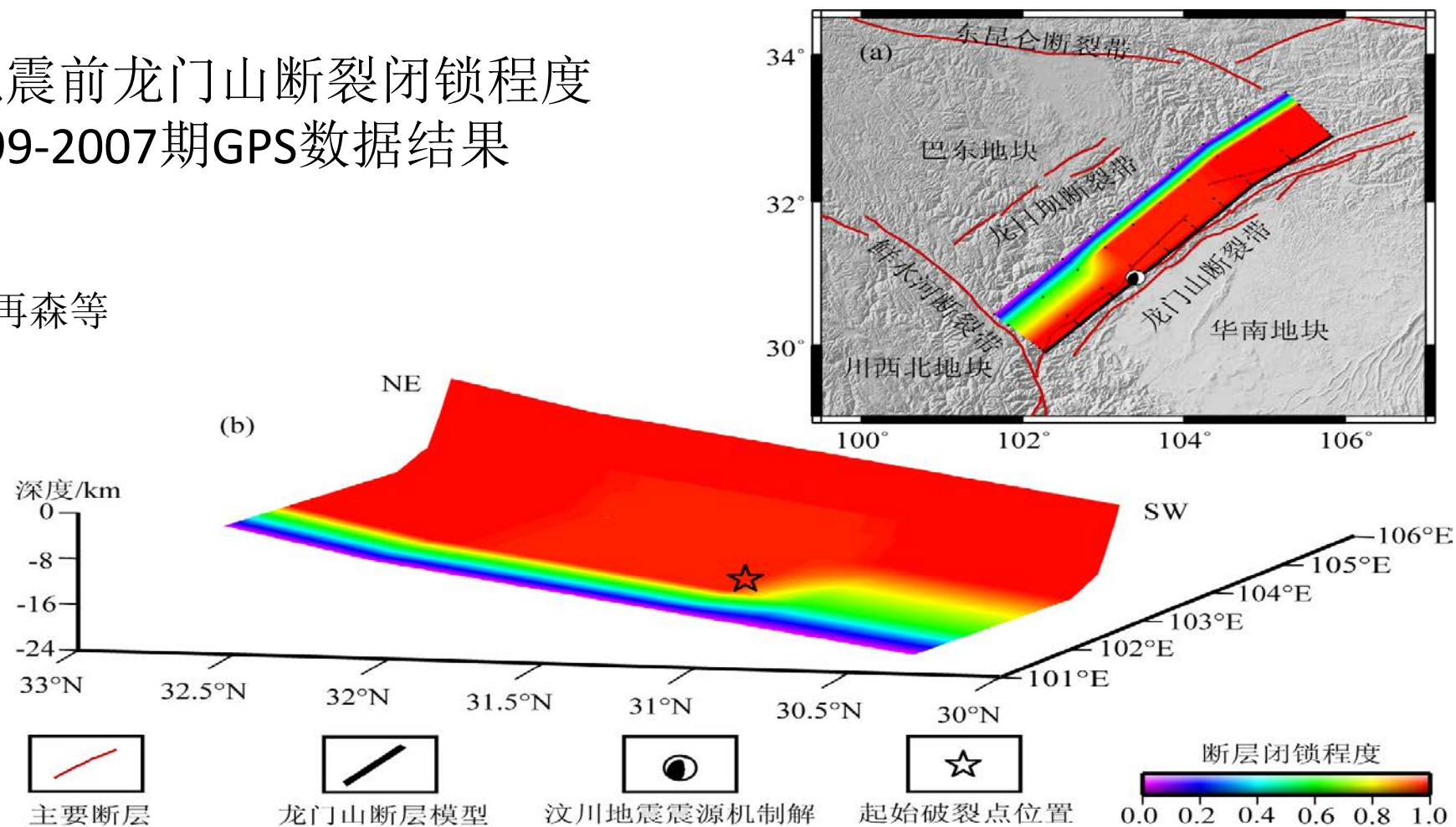
➤ 3. 我国活动地块理论



震源区闭锁理论

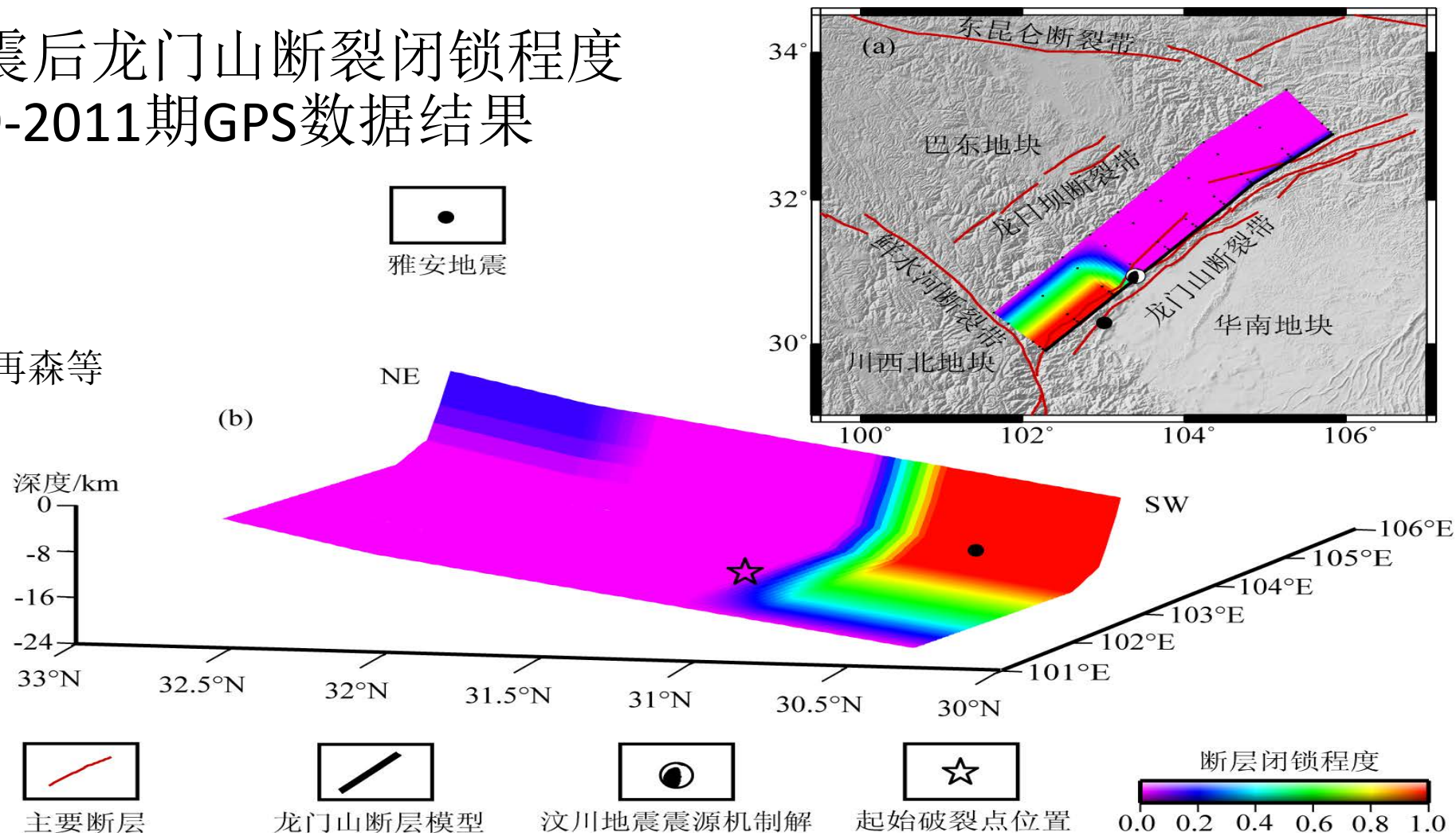
汶川地震前龙门山断裂闭锁程度 1999-2007期GPS数据结果

据赵静、江再森等



汶川地震后龙门山断裂闭锁程度 2009-2011期GPS数据结果

据赵静、江再森等



汶川地震反思——初步认识

巨大地震孕育

大尺度——边界条件

长时间

平稳、均匀——加载方式

巨大地震发生地方一般地震活动水平较低



◎ 基础理论探索

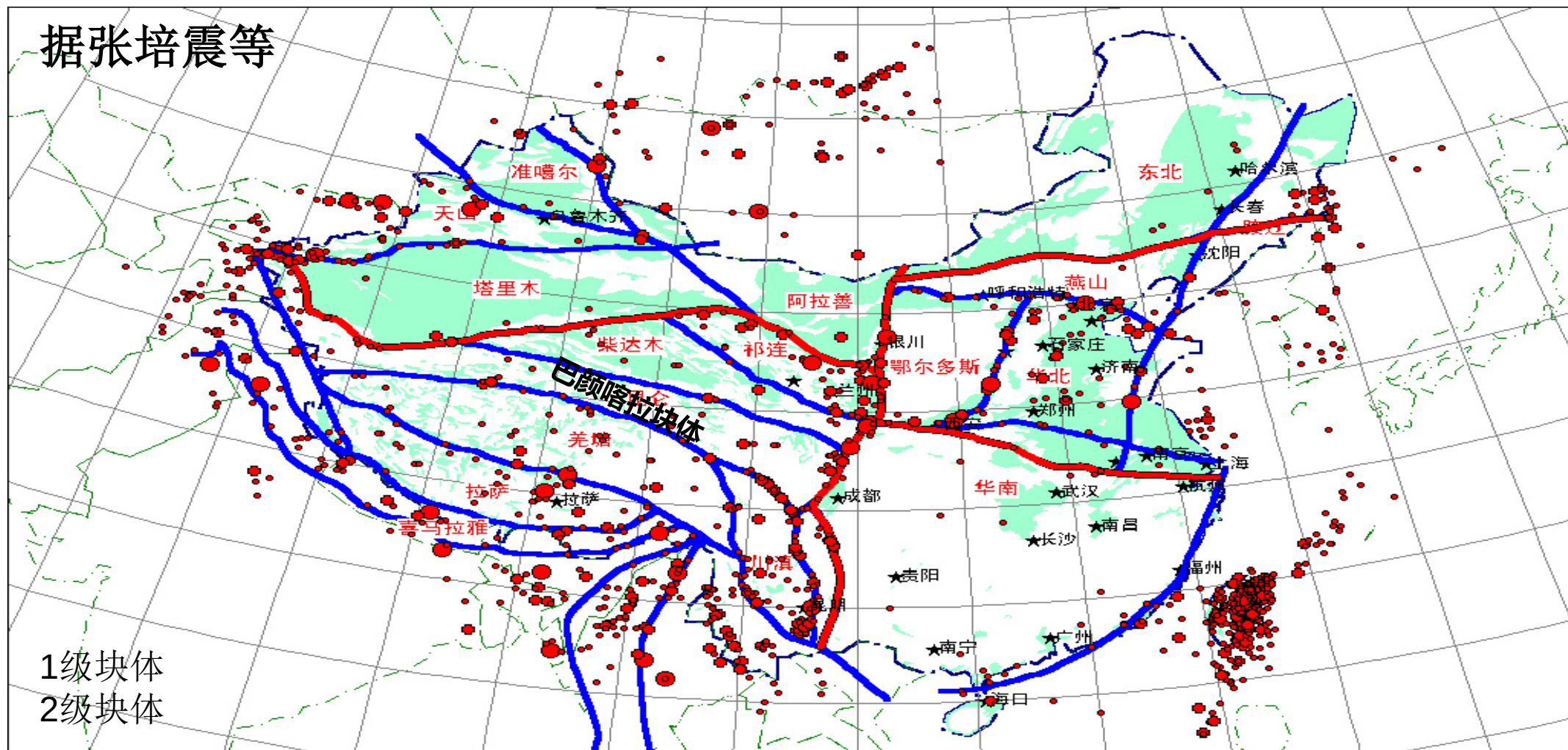
➤ 1. 国际破裂成核理论

➤ 2. 震源区闭锁理论

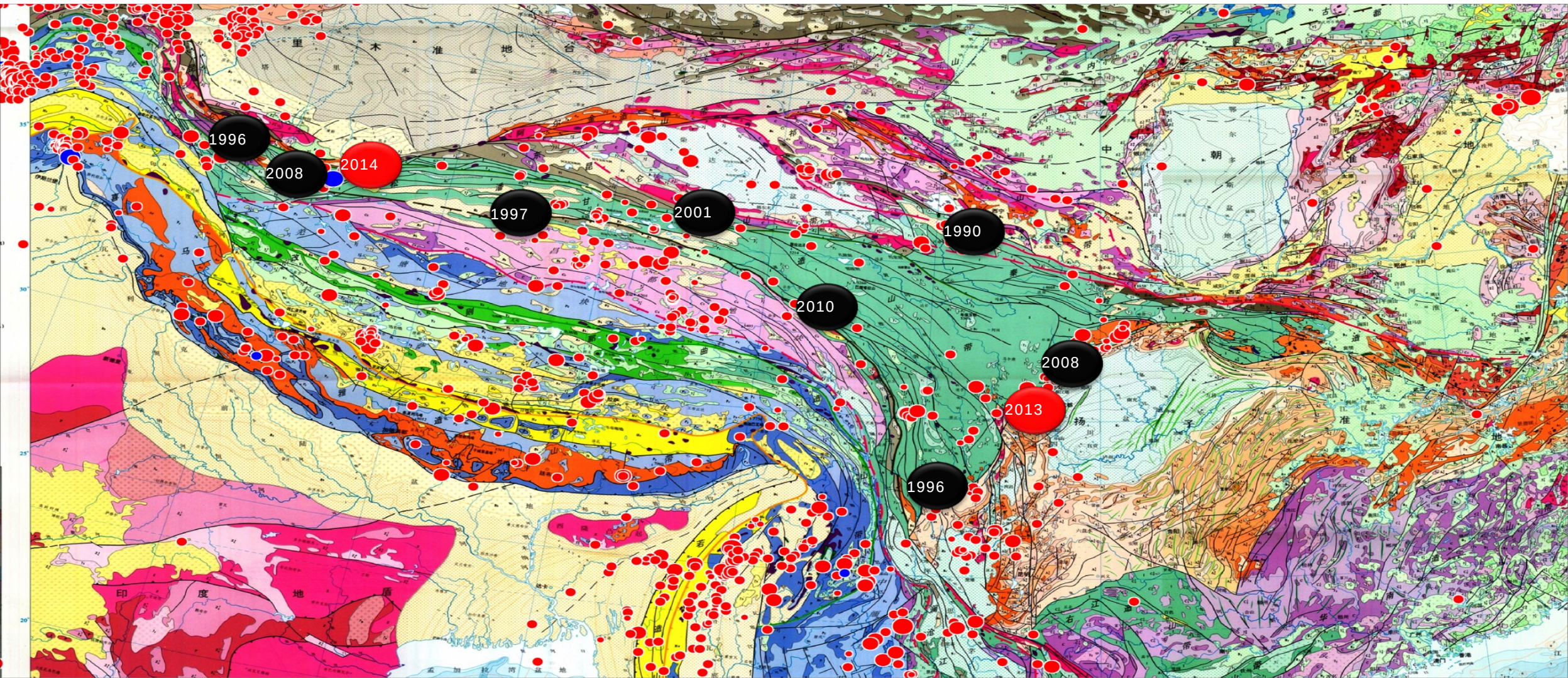
 ➤ 3. 我国活动地块理论



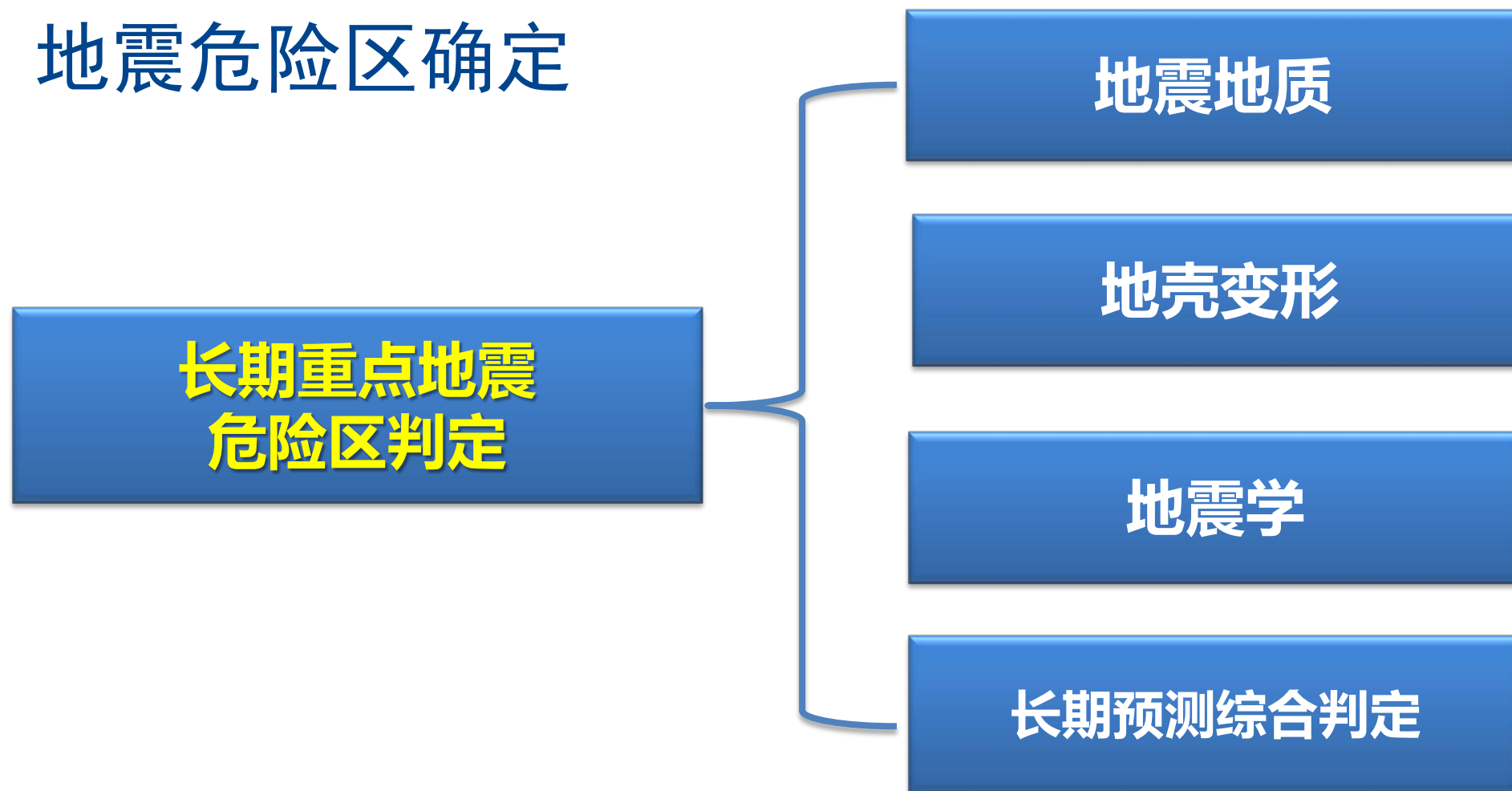
据张培震等



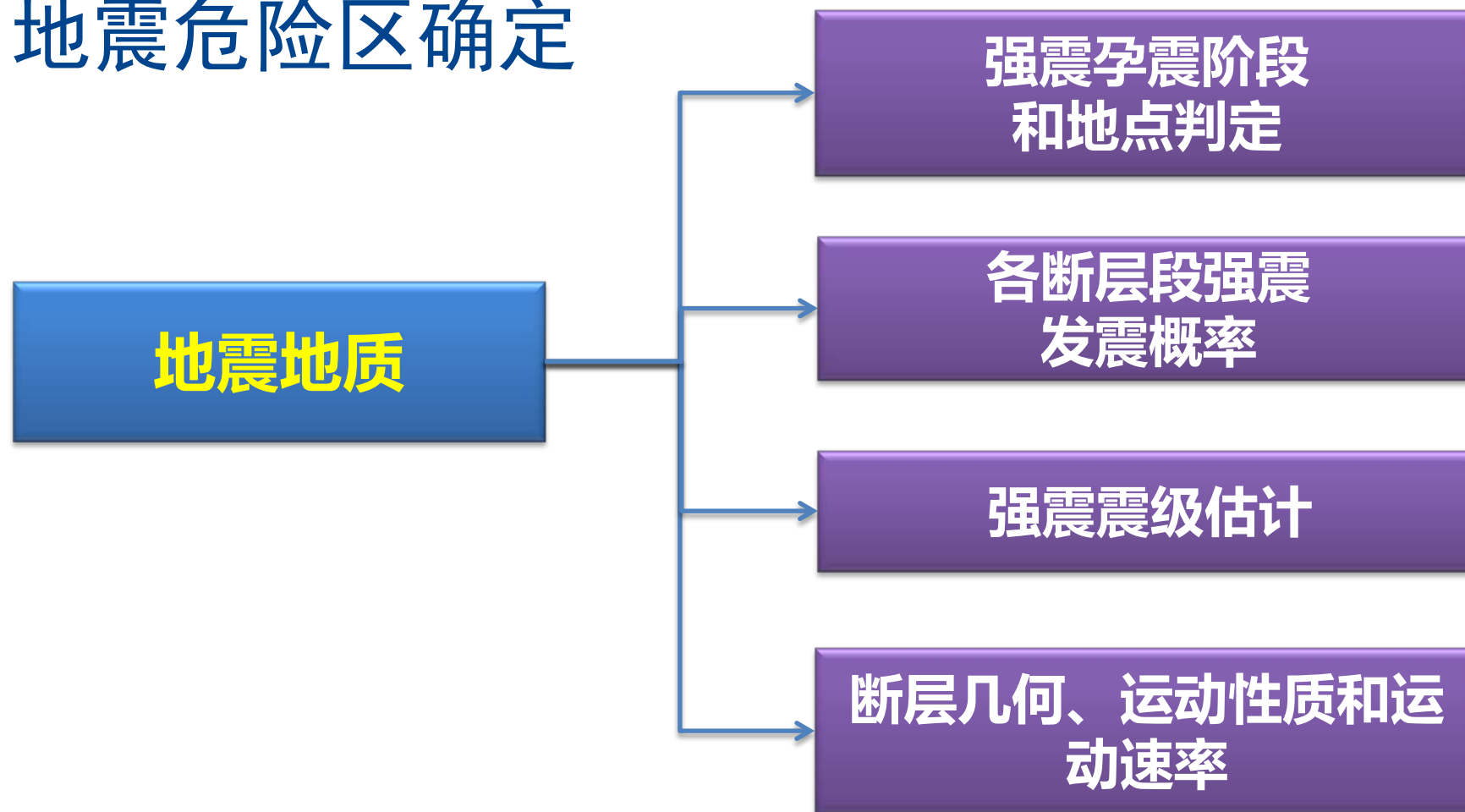
高孟潭：松潘甘孜块体地震 成组活动仍在继续



地震危险区确定



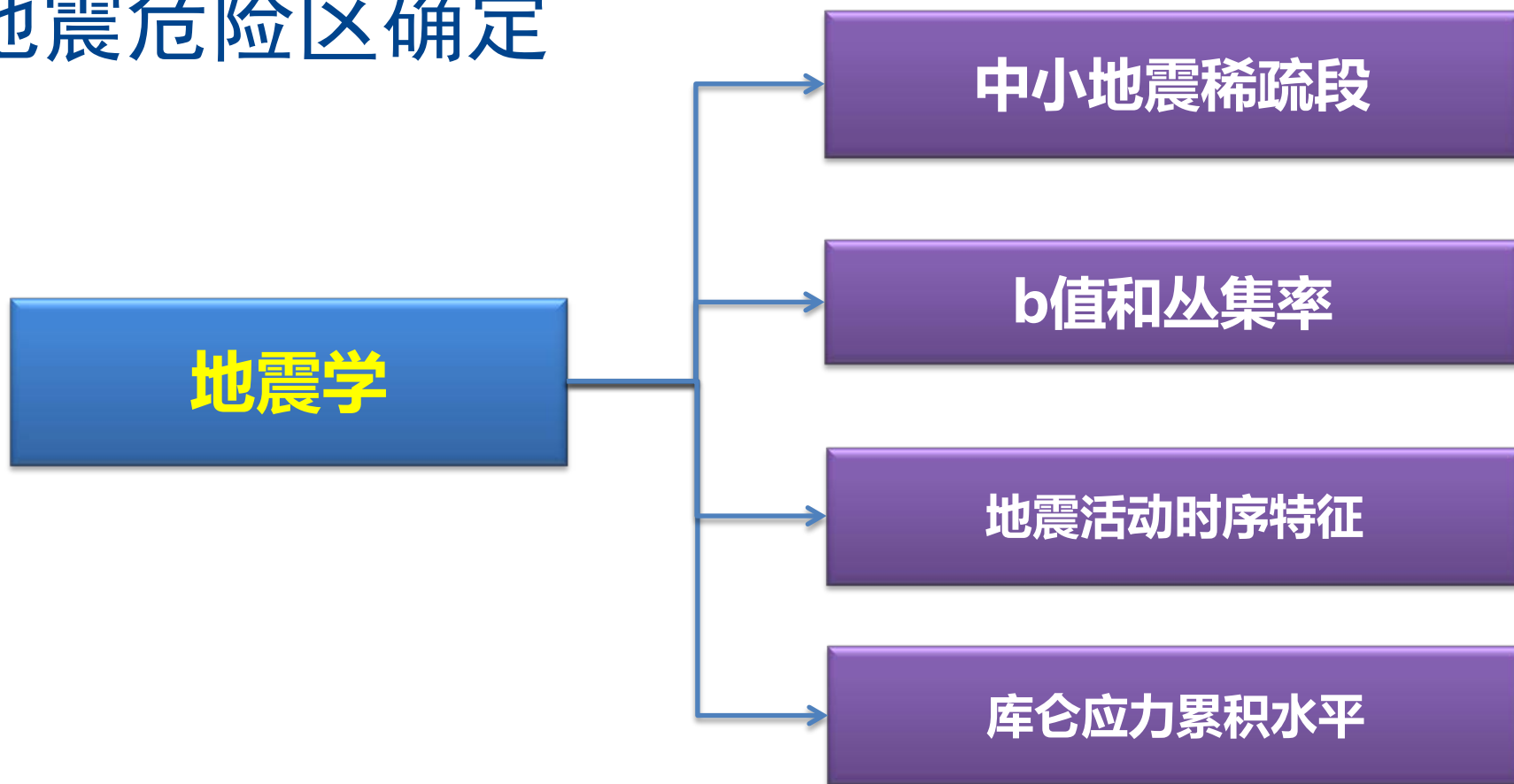
地震危险区确定



地震危险区确定



地震危险区确定



地震危险区确定

区域强震趋势分析

全球和大陆相关构造区强震趋势及其对中国大陆的影响

周边板块边界动力调整或显著地震事件影响

中国大陆及其内部主要构造区强震趋势分析



长期重点危险区发震紧迫程度判定

断层运动状态判定及动态跟踪

观测现象定性分析

断层闭锁特征识别

断层运动状态综合研判

断层应力状态判定及动态跟踪

断层库仑应力分析

震源机制一致性分析

b值空间扫描及动态变化

断层应力状态综合研判

震源异常信息判定与动态跟踪

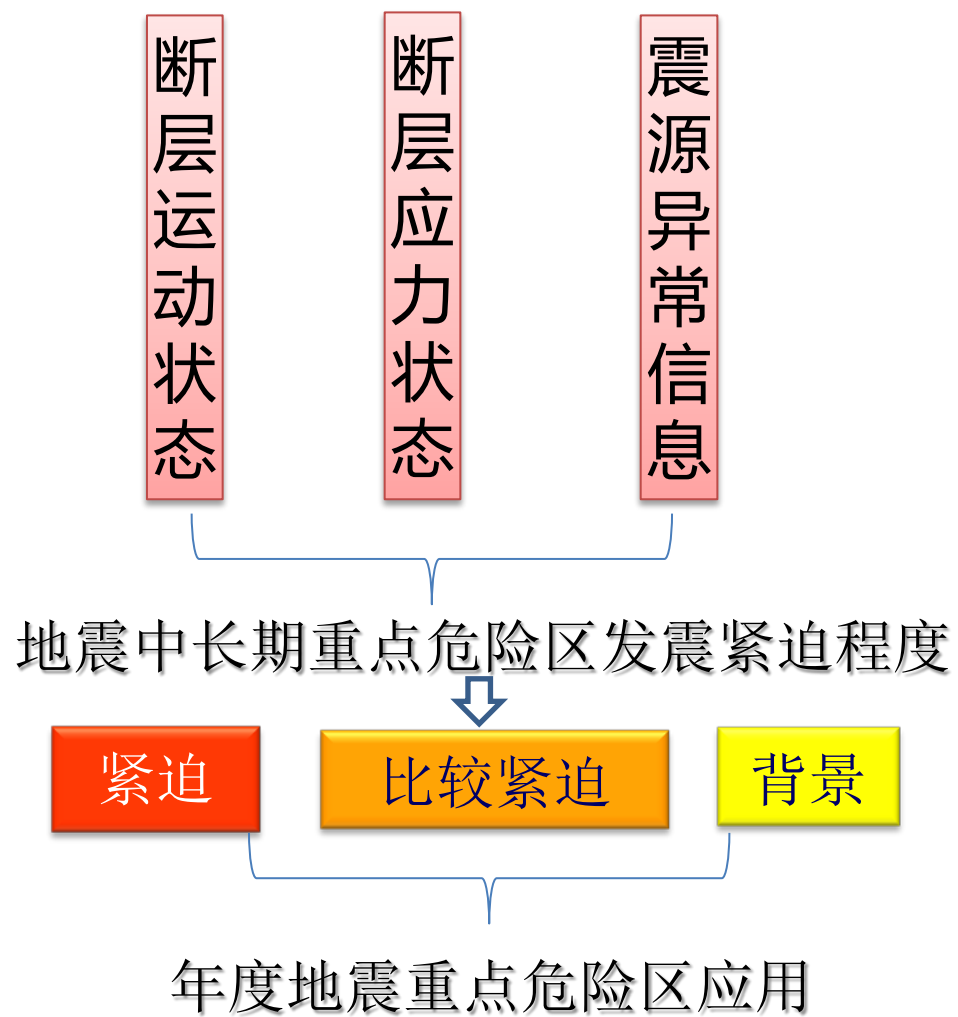
地震空区、条带分析

地球物理场分析

定点前兆观测资料分析

震源异常信息综合研判





目前，我们对地震预报的科学问题有了更加深刻的认识，观测技术和计算技术的发展为推进科学问题的研究提供了非常好条件。地震科学，尤其是地震预报科学将有实质性或突破性的进展。



谢谢大家！



2018年11月21日

