



香港中文大學  
The Chinese University of Hong Kong



# 断裂带的非均匀性与地震破裂过程

杨宏峰

中国地震学会第十八次学术大会

2023.8.7

# 地震预测的现状

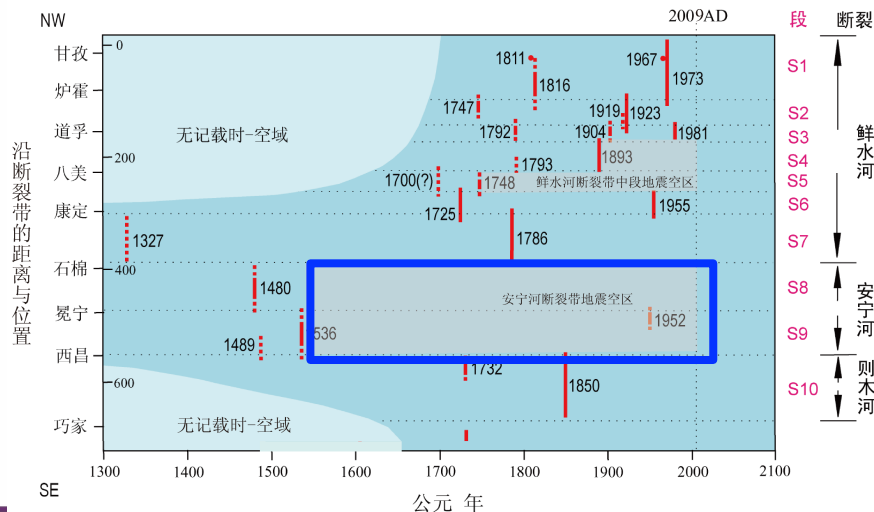
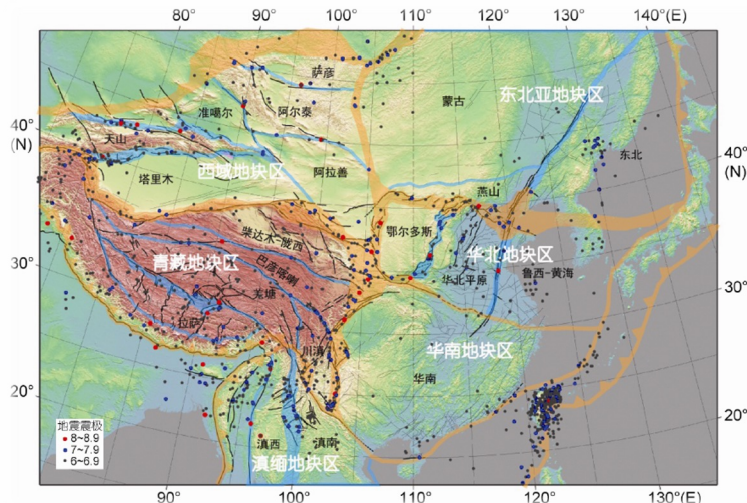


- 目前预测危险区（地点）的多种手段（地震空区、震间闭锁、中小地震稀疏、应力增强…）很成熟，暨哪里会发生（大）地震

当聚焦到某一断裂带时，把“三要素”降维到“两个参数”（震级、时间）。但是预测的难度丝毫不减。

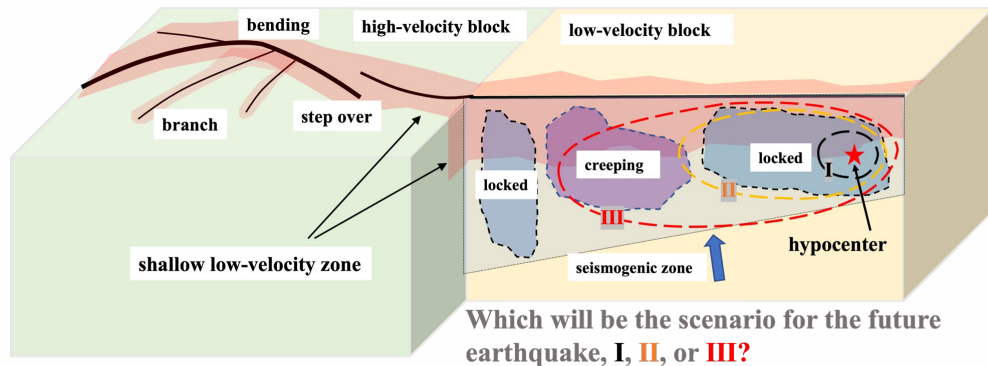
以安宁河断裂带为例：

1. 未来何时会发震？
2. 下次破裂有多远（地震多大）？



# 预测震级十分关键，且是难点

- 当前的难点问题之一：给定某一断裂带，如何判断未来震级、以及破裂过程
- 震级的问题和时间耦合在一起
- 两个核心问题：
  - ❖ 断裂带上积累了多少能量？
  - ❖ 积累的能量会释放多少？取决于哪些因素？

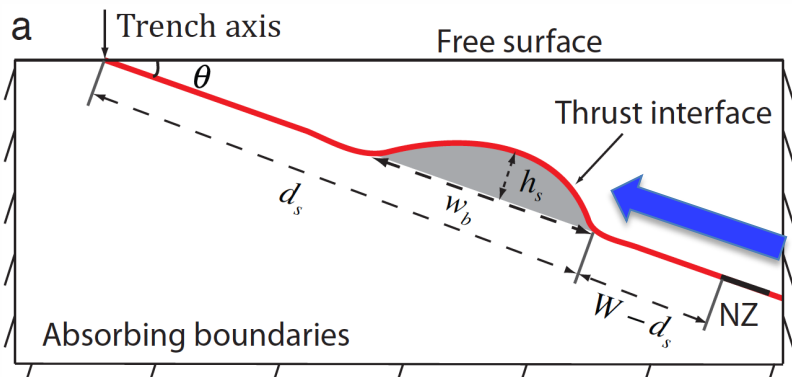


## 断层的非均匀性

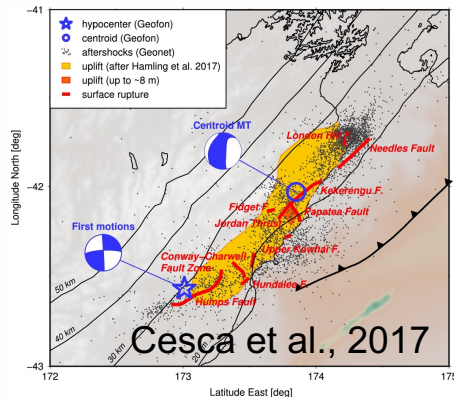
1. 断层几何 \*\*\*
2. 断裂带介质结构 \*\*
3. 断层应力状态及摩擦属性 \*\*\*

# 断层几何

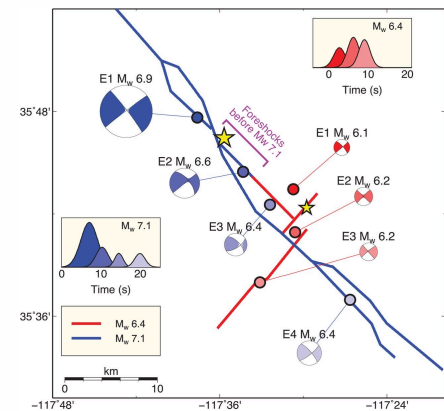
- 断层几何通常被认为利于阻止破裂的传播
- 大量地震的破裂终止处被发现与断层的几何突然变化相关



Yang et al., 2013 GRL



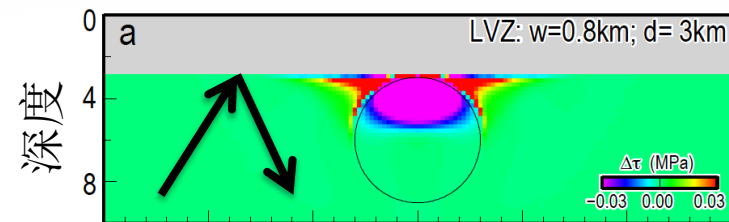
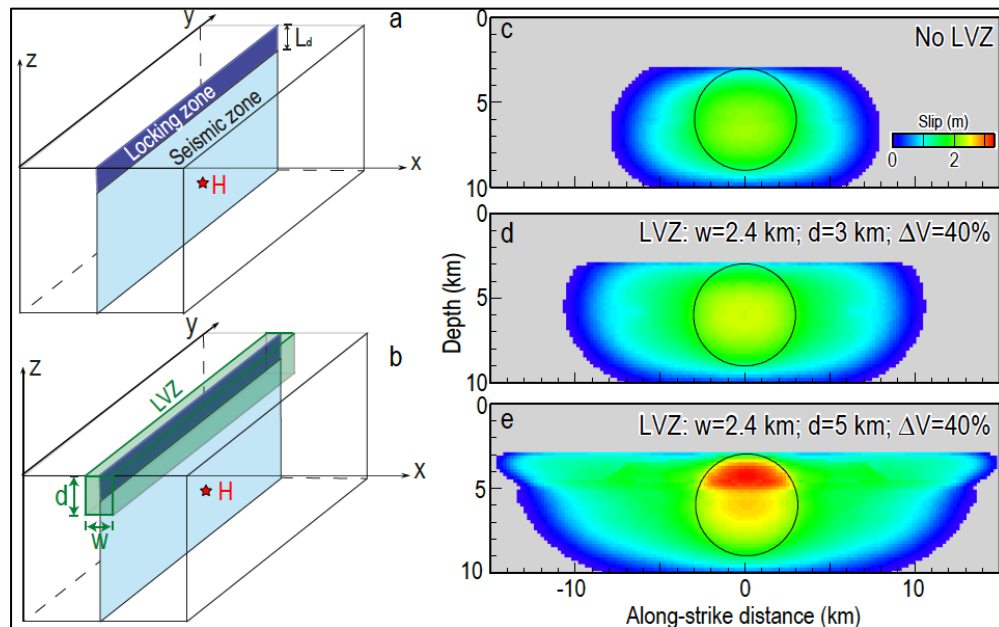
2016 新西兰地震



2019 加州地震

Ross et al., 2019

# 浅部低速带会放大地震震级



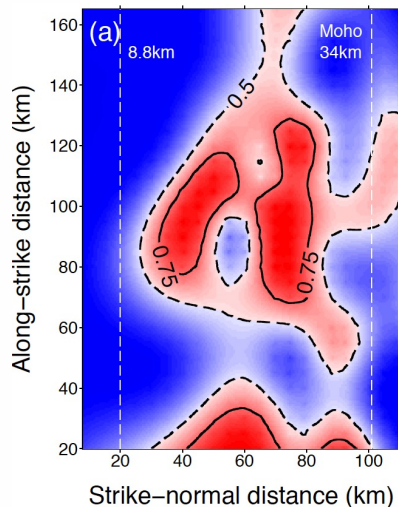
- ❖ 破裂前缘辐射的地震波在低速带底部反射，造成断层面上的应力扰动，影响破裂传播
- ❖ 低速带宽度越大，该效应越明显

让震害“雪上加霜”

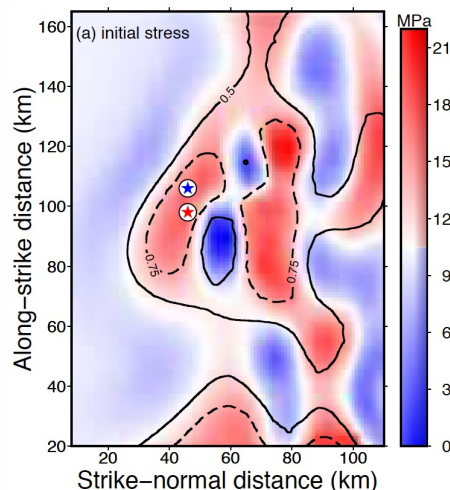
# 断层应力状态与摩擦属性

震间闭锁程度：反应了能量积累的程度，同时也反映了应力积累的非均匀性

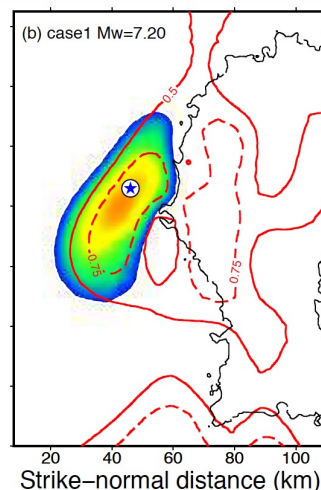
震间闭锁分布



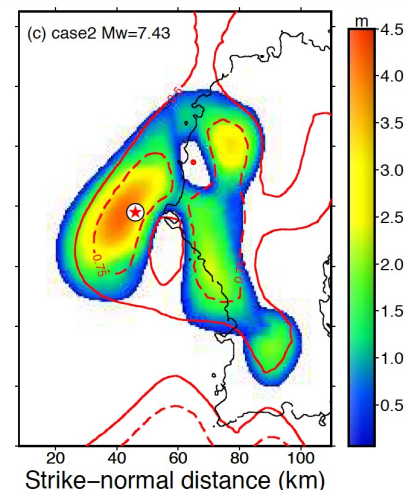
初始应力分布



震中A

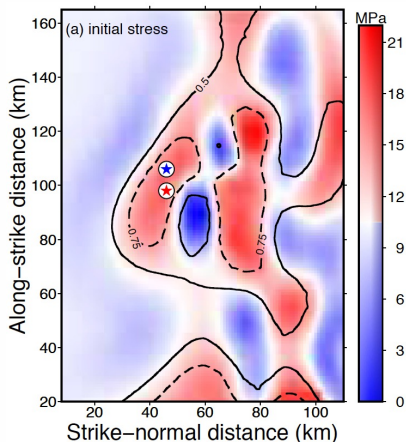


震中B

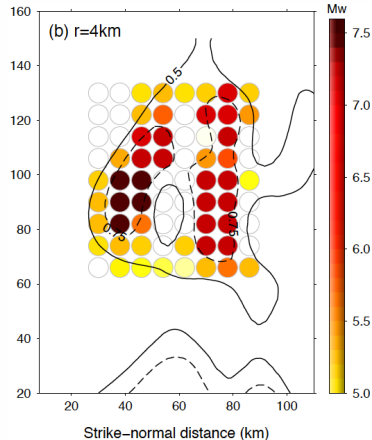


# 震中与震级的“测不准关系”

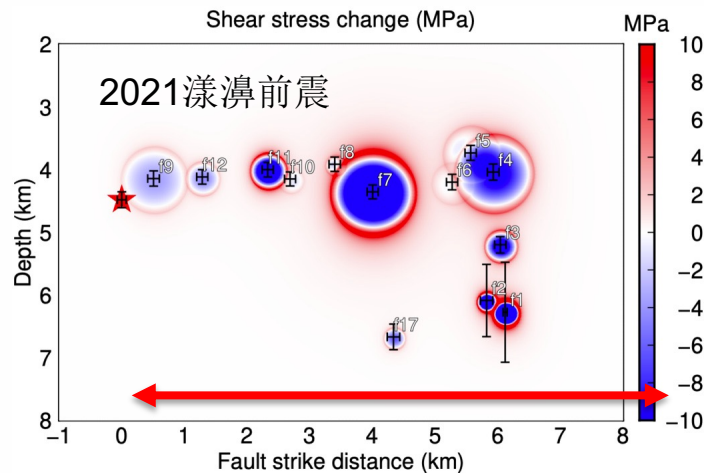
初始应力分布



震中对应的震级



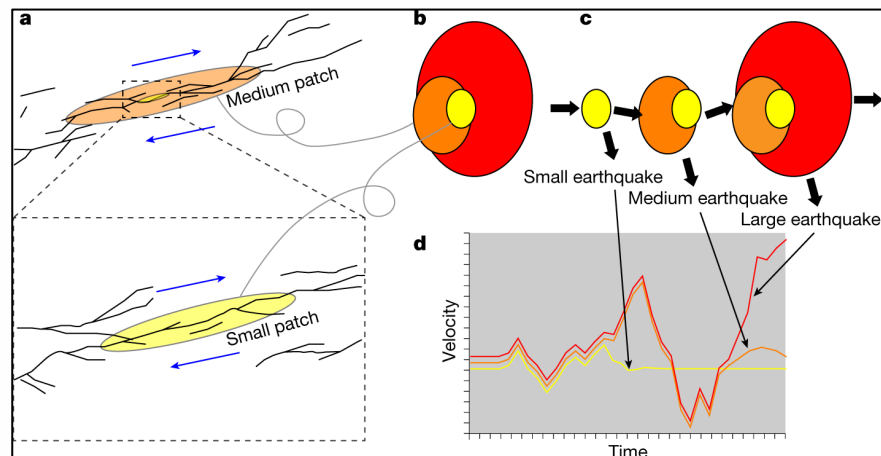
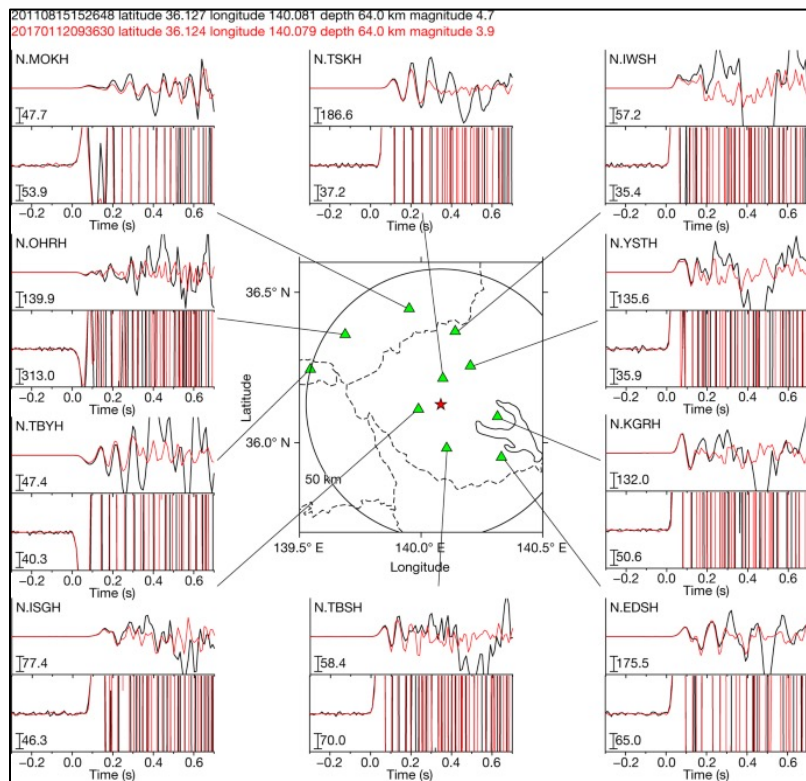
为什么前震没能发展成主震？



- 只有某些特定区域能发展成大地震
- 大多数成核位置只能产生中等地震

2021年漾濞前震序列  
2011年日本东北9级地震  
2014年智利北部8.2级地震

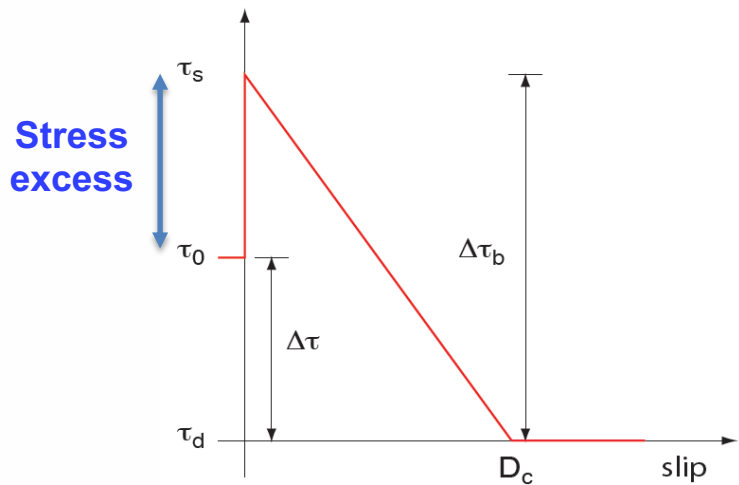
# 观测证据



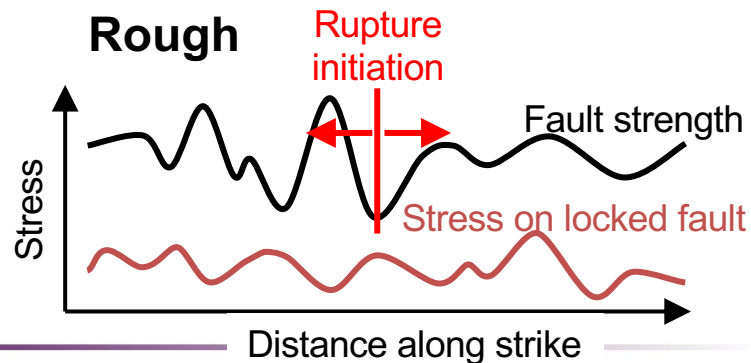
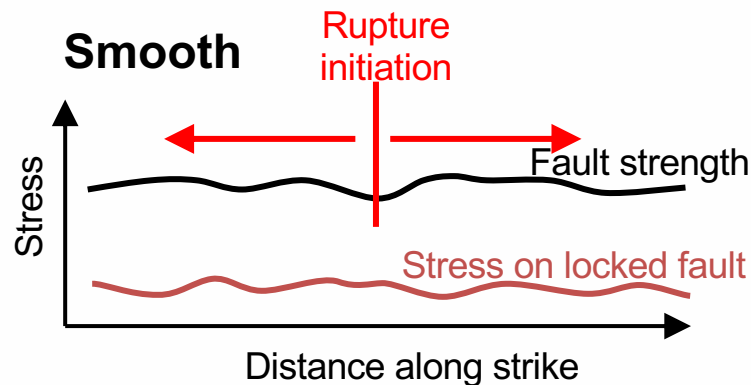
- ❖ 日本东北俯冲带15年的地震目录
- ❖ 不同震级的地震波形相似，说明位置接近
- ❖ 初始波形相同，但是后续发展不同



# 利于大地震的条件



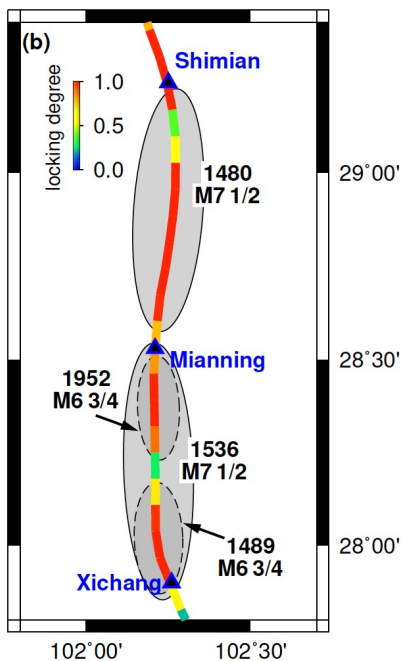
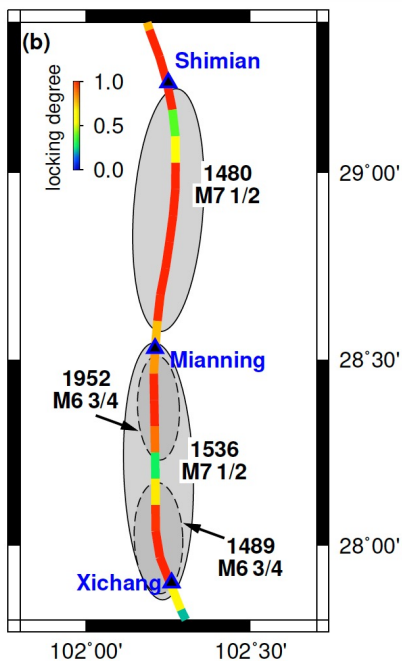
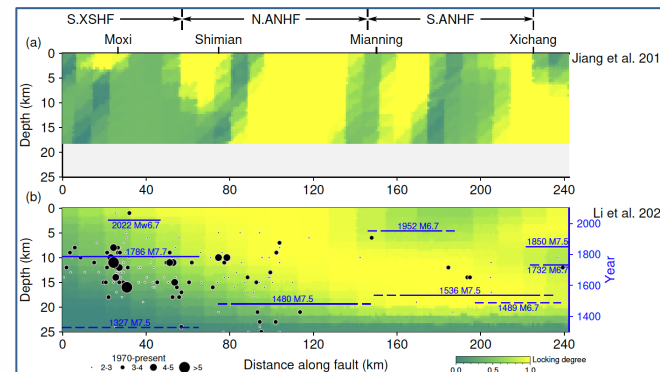
当断层局部应力达到滑动强度时，地震发生。但地震大小（破裂传播的距离），取决于接近于强度的断层尺度大小。  
越“均匀”：地震越大



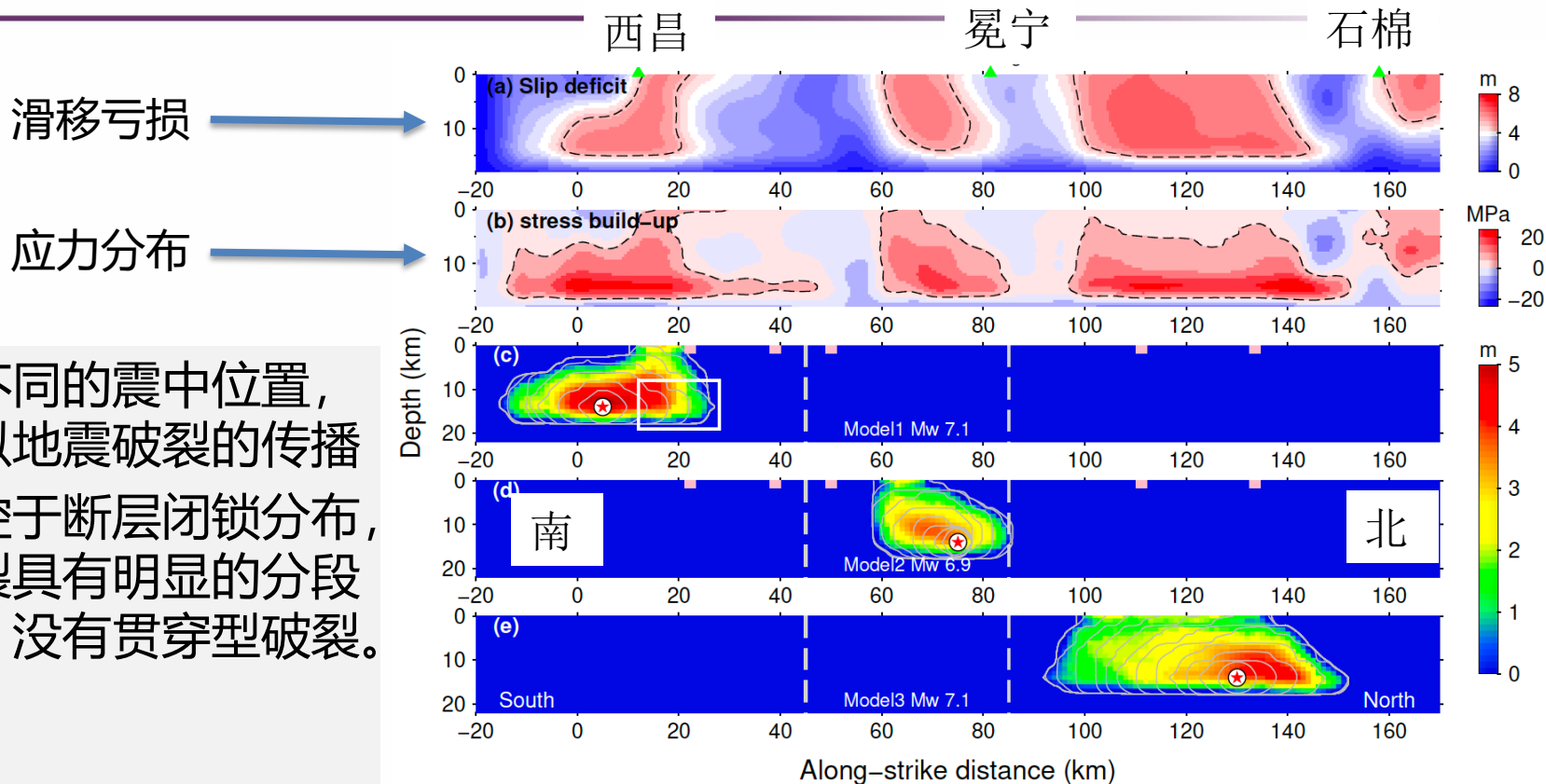
# 安宁河断裂带

安宁河谷人口密集: 150万  
小地震稀疏  
震间闭锁区明显

鲜水河 安宁河 安宁河  
南段 北段 南段

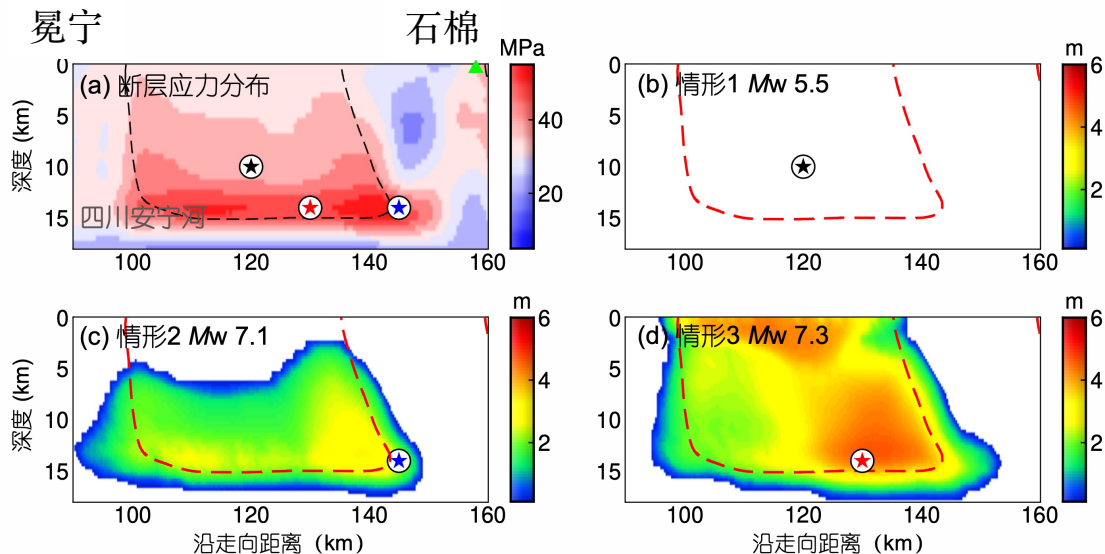


# 破裂具有明显分段性



1. 在不同的震中位置，模拟地震破裂的传播
2. 受控于断层闭锁分布，破裂具有明显的分段性。没有贯穿型破裂。

# 震中位置影响滑移分布和地表破裂



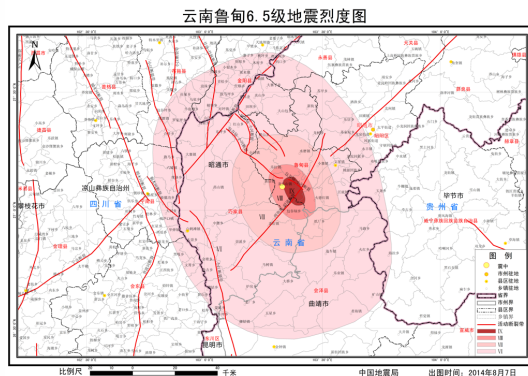
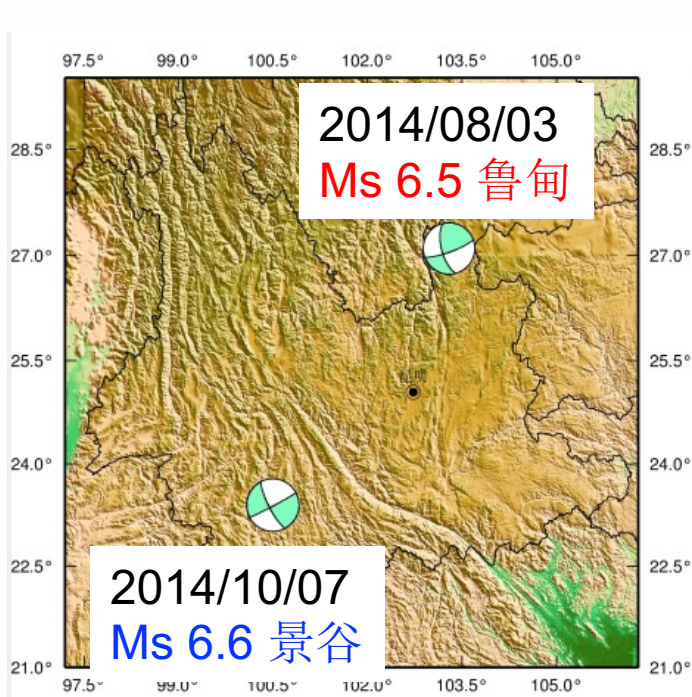
三个震中位置

- (1) 5.5级
- (b) 7.1级，无地表破裂
- (c) 7.3级，有地表破裂，浅部滑移~3米  
(与安宁河古地震记录接近，2.7米)

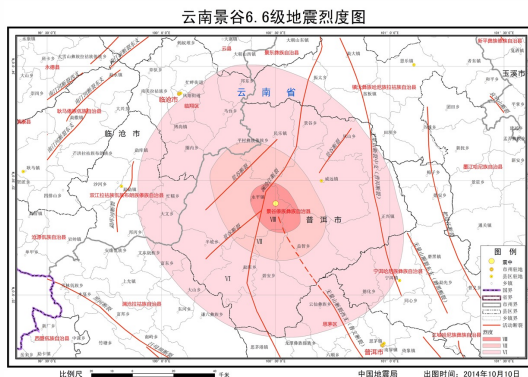
对于安宁河断裂带，在利用震间闭锁约束的非均匀初始应力分布下，动力学模拟结果显示，**尽管初始条件相同，不同震中位置导致不同的震级，也导致不同的近地表滑移分布**

滑移亏损 ≠ 未来滑动  
震中与震级/滑移的  
“测不准关系”

# 地表破裂与烈度及震害



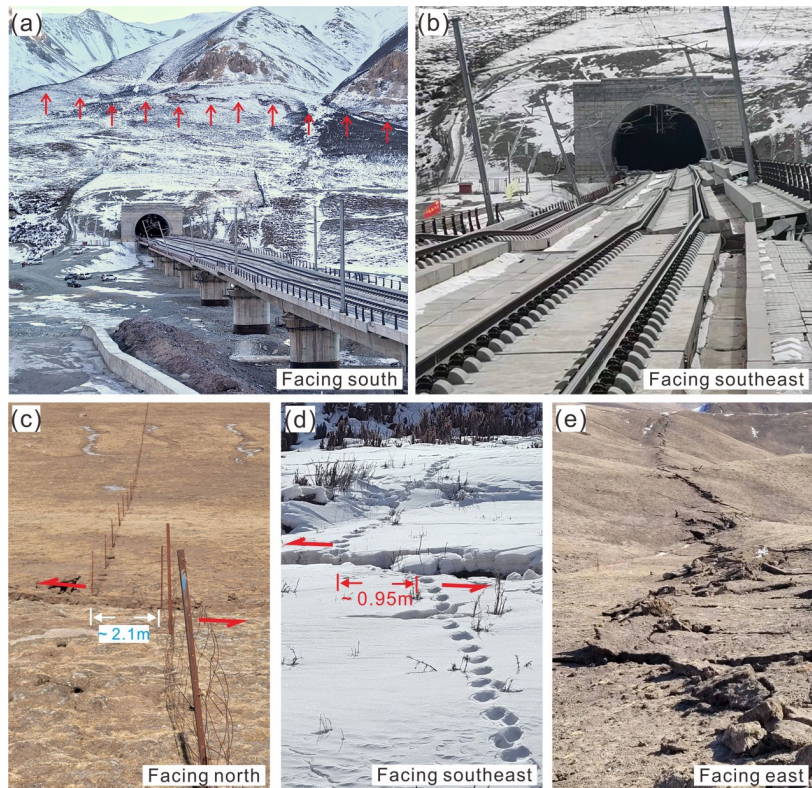
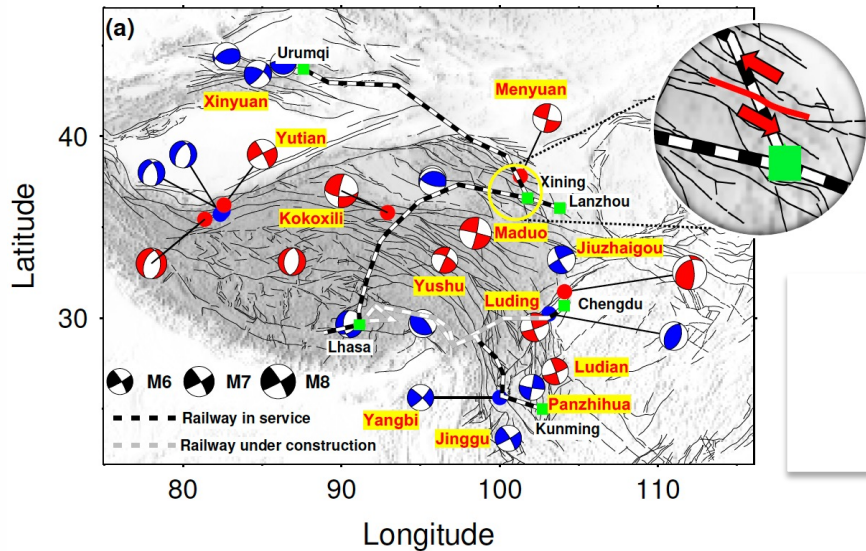
- ❖ 破裂到地表
- ❖ 烈度极值: 9
- ❖ 死亡617人
- ❖ 失踪112人
- ❖ 受伤3143人
- ❖ 经济损失198亿



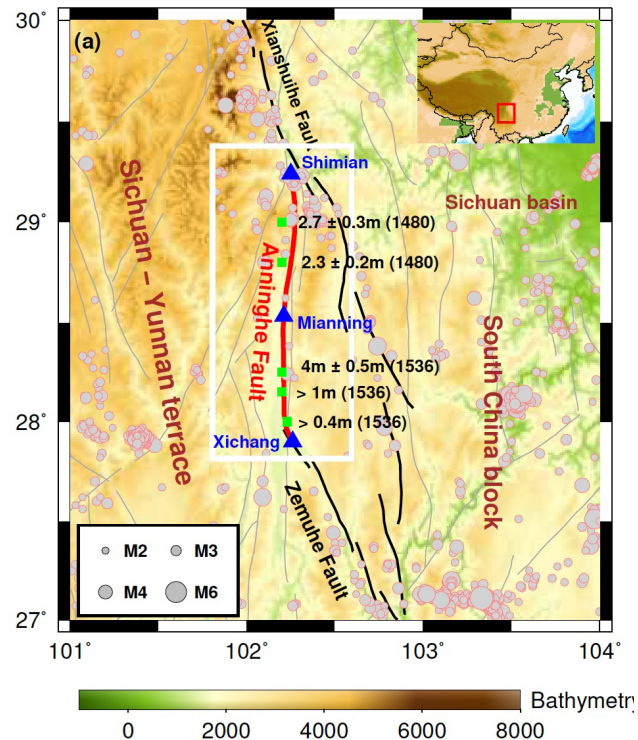
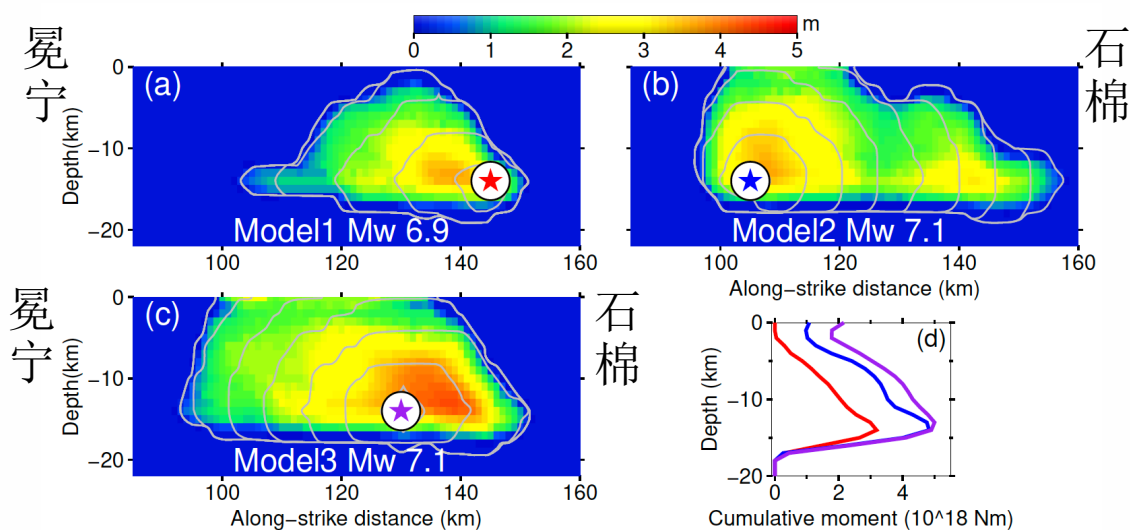
- ❖ 破裂未到地表
- ❖ 烈度极值: 8
- ❖ 死亡1人
- ❖ 受伤324人
- ❖ 经济损失17亿

# 地表破裂致灾严重

## 2022年门源6.9级地震 兰新铁路严重受损



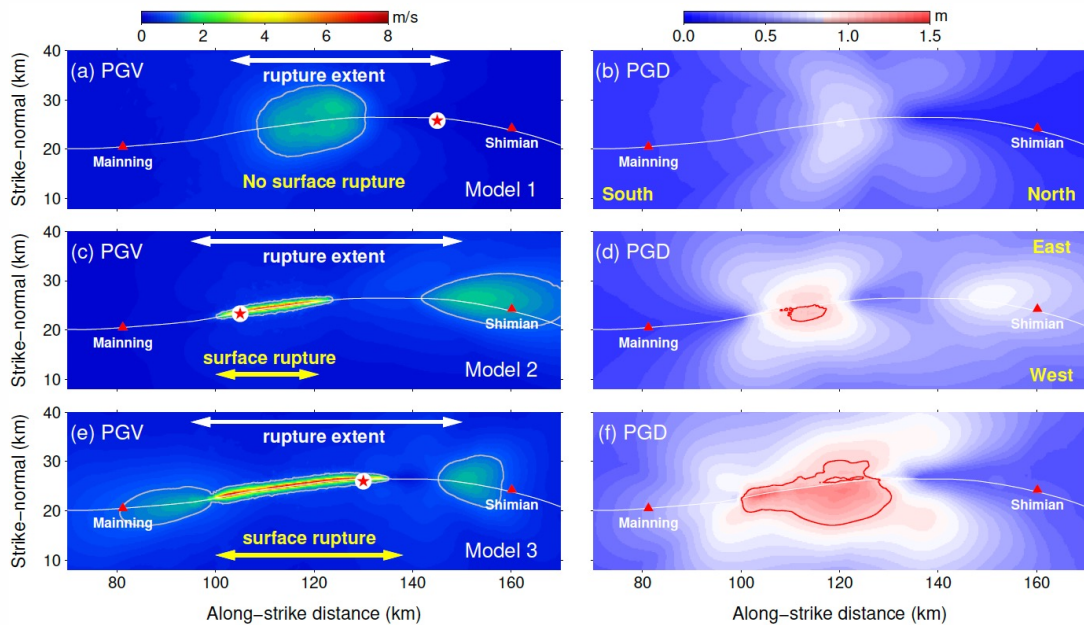
# 考虑“测不准关系”的灾害评估



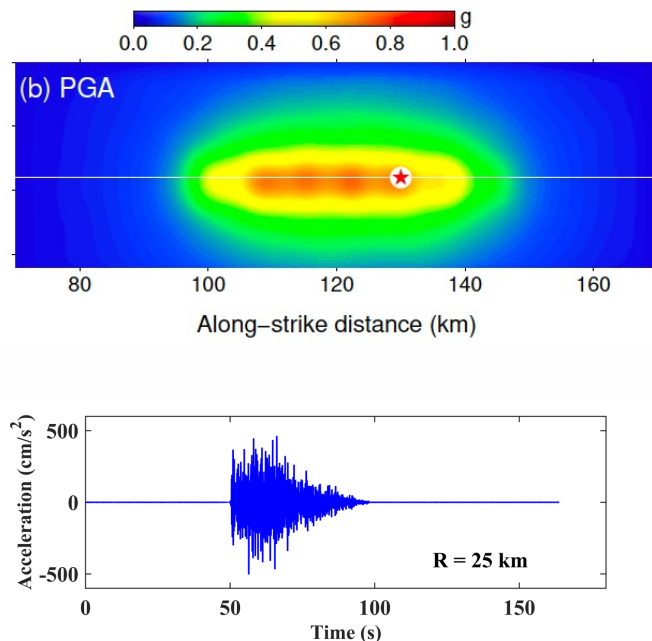
对于安宁河断裂带，在利用震间闭锁约束的非均匀初始应力分布下，动力学模拟结果显示，**尽管初始条件相同，不同震中位置导致不同的震级，也导致不同的近地表滑移分布**

# 峰值加速度与峰值位移

Dynamic rupture simulations,  $< 1$  Hz



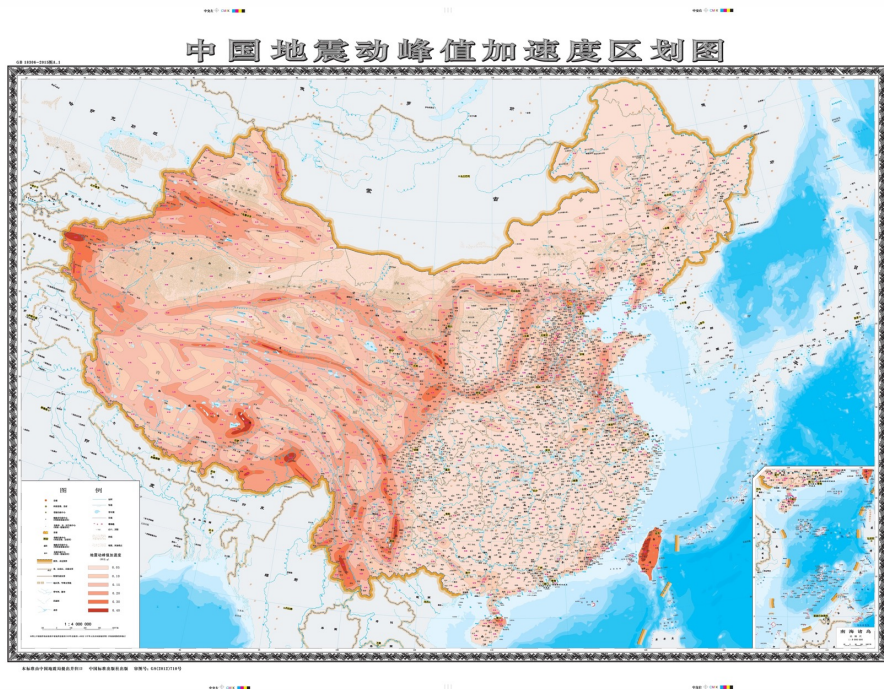
Stochastic modeling  
PGA,  $< 20$  Hz





# 基于地震物理的灾害区划

全国尺度



地区尺度

应变积累 / 震间闭锁



动态破裂模拟



地震强震动预测



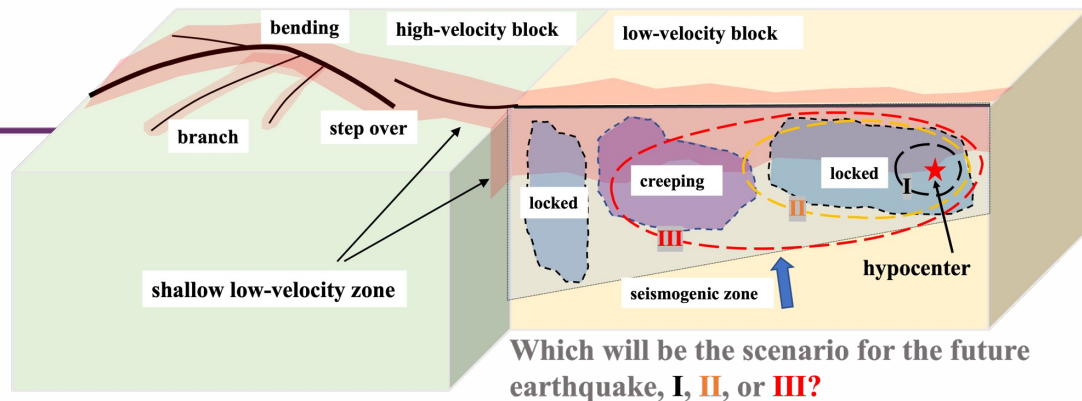
当地人口/建筑



预测灾害及伤亡

# 结论

发震断层具有不同尺度的非均匀性



- 地震震级大小与地表破裂，取决于破裂起始位置，呈现出“震中-震级的测不准关系”。
- 这种“测不准关系”由断层的非均匀性导致，可以解释前震现象，也给精准预测震级带来了挑战
- 结合应变积累、破裂动力学模拟，可以圈定未来大地震的可能成核位置
- 长期可靠的地震目录也可用于分析未来大地震的可能成核位置
- 区域尺度可以开展基于地震物理的灾害评估手段