



速率状态摩擦定律在地震研究中的若干科学问题

报告人：刘月
地震中长期综合预测研究室

2018-9-26

1. 速率状态摩擦定律简介

2. 建立数值模型

3. 强震轮回和级联破裂

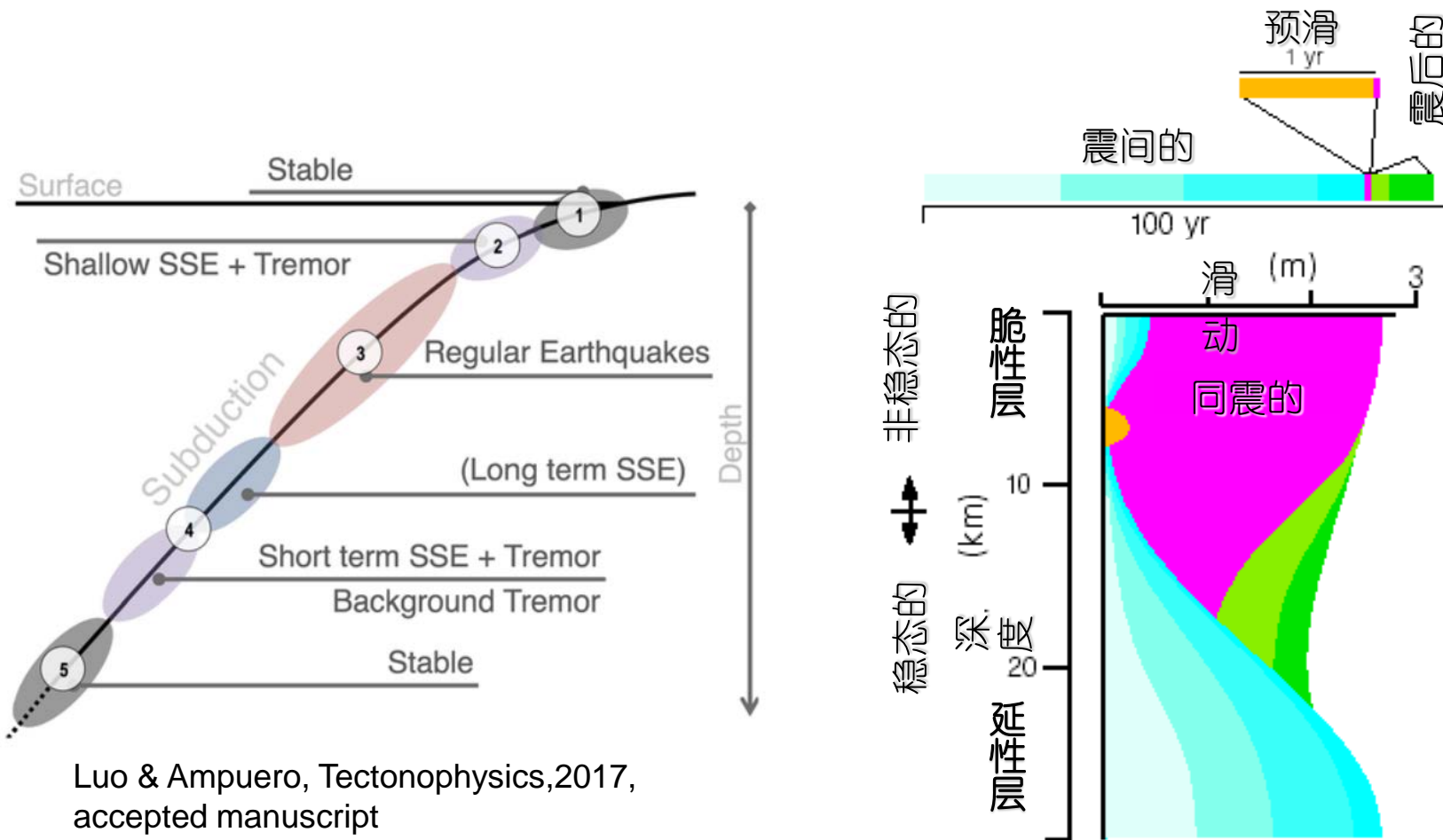
4. 地震目录模拟



断层行为受摩擦性质的影响



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



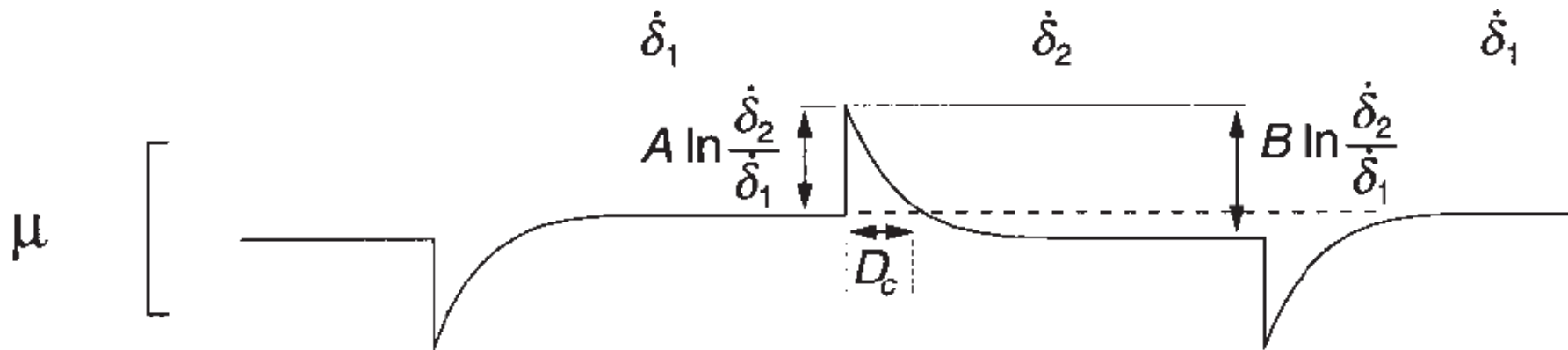
Luo & Ampuero, Tectonophysics, 2017, accepted manuscript

地震、无震滑移、慢地震等受断层摩擦性质非均匀性的影响

速率状态摩擦定律



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



断层系统稳定性依赖于大于0的无量纲参数a和b

$$\tau = \bar{\sigma} \left[f_0 + a \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) + b \ln \left(\frac{V_0 \theta}{d_c} \right) \right]$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V\theta}{d_c} \quad \text{"慢度定律"}$$

$$\tau_{ss} = \bar{\sigma} \left[f_0 + (a - b) \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \right] \quad \text{稳定状态}$$

$$\tau = \tau_0 - \int k(\delta - V_{pl}t) - \frac{\mu}{2c_s} \frac{\partial \delta}{\partial t}$$

1. 稳定状态，无震滑移：

$a - b > 0$ ：速率强化（浅层和深部）

2. 粘滑失稳，地震行为或慢滑移事件

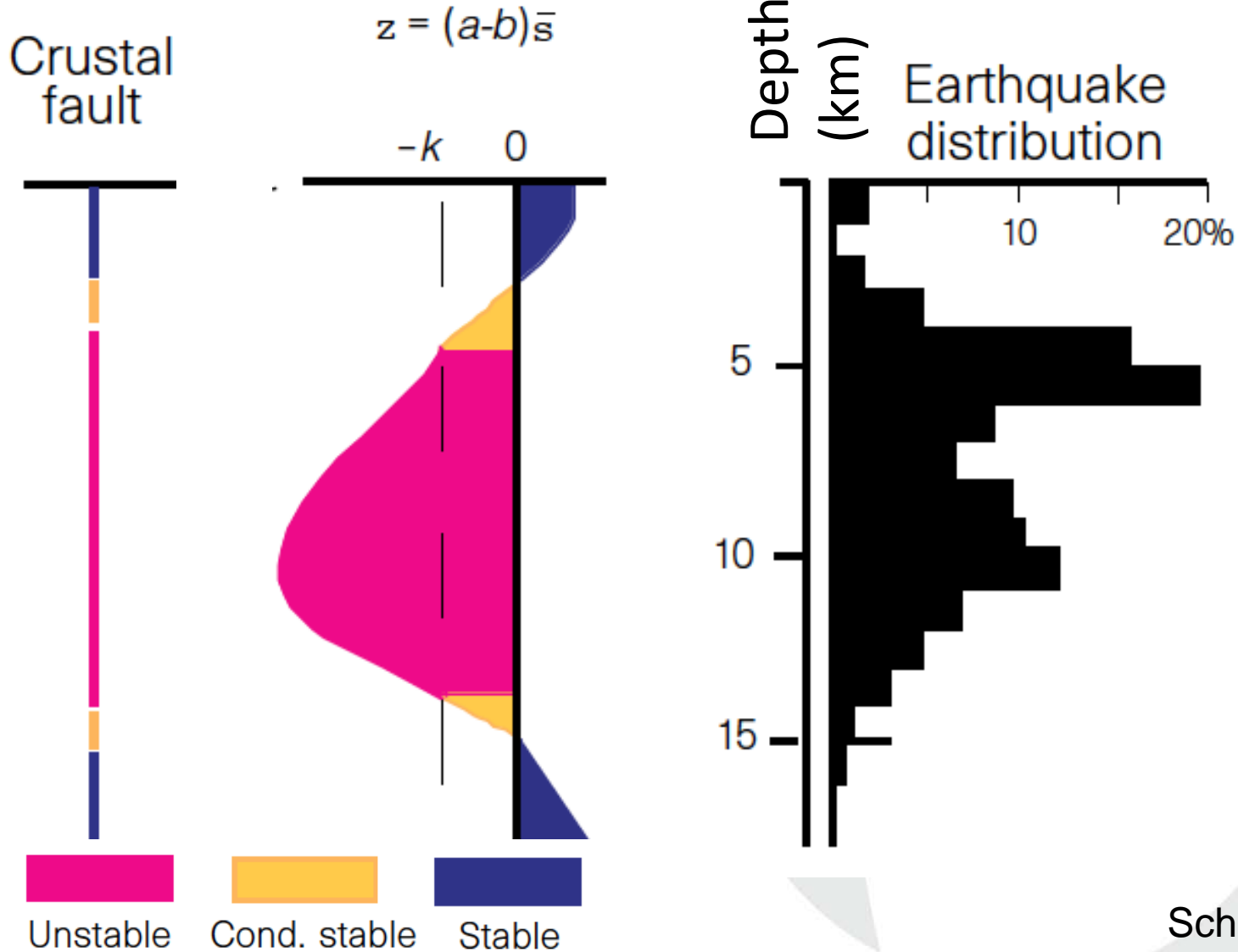
$a - b < 0$ ：速率弱化

3. D_c ：影响断裂能

4. 临界成核尺度： h^*

5. $\bar{\sigma} = \sigma - p$

孕震区 ($a-b < 0$)



Scholz, 1998

受温度导致的断层脆塑性转换，孕震区被限定在有限深度范围内

多周期地震过程模拟



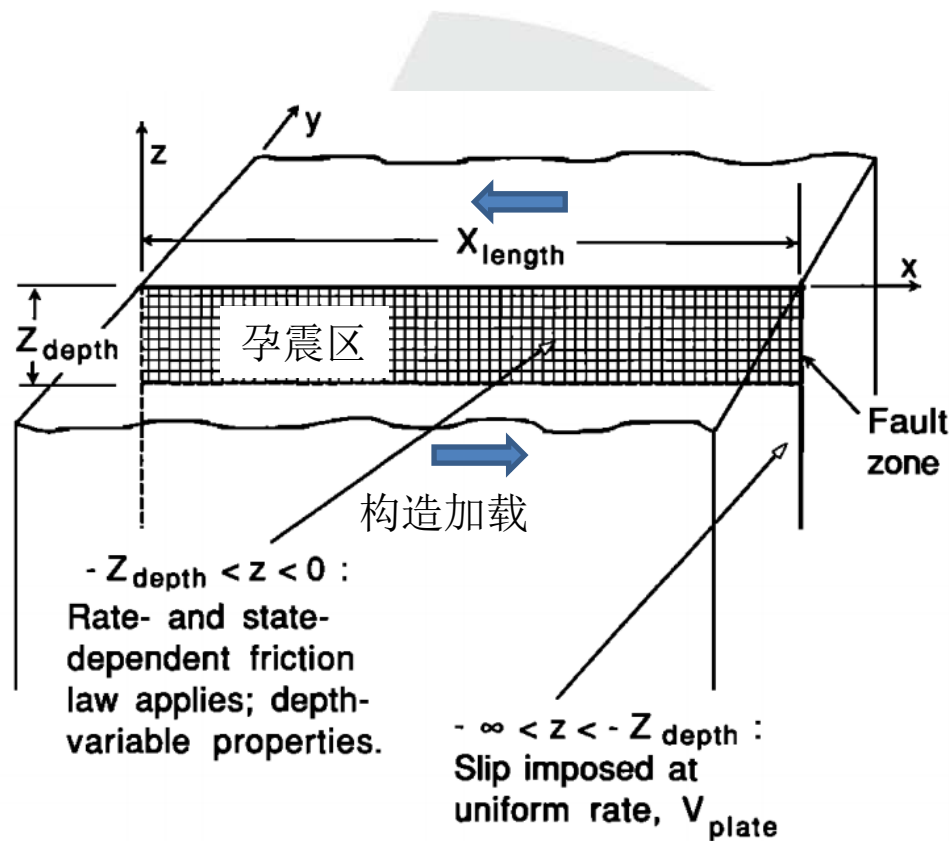
INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

理论基础

- 准动态方程、全动态方程
- 摩擦本构律：速率状态摩擦定律

方法

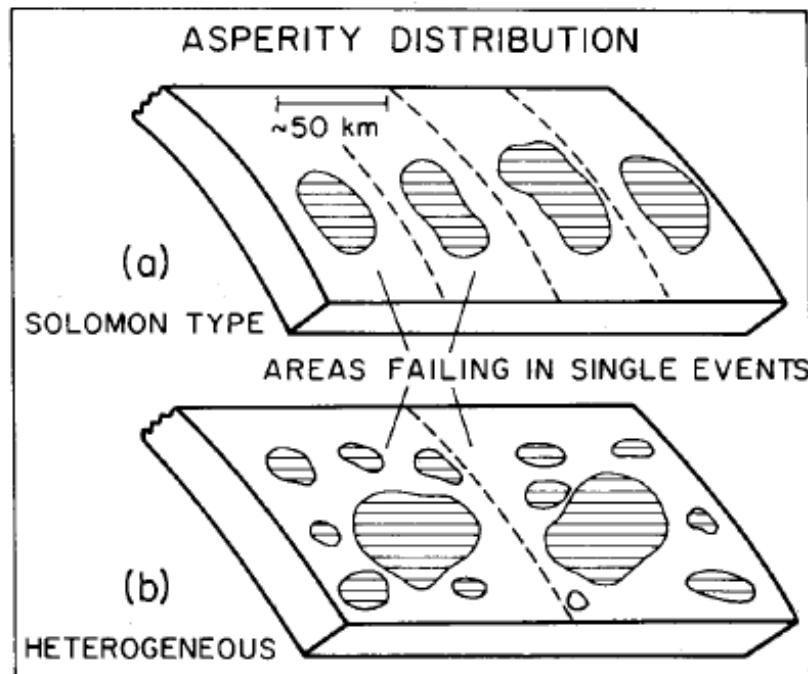
- 边界积分
- 有限差分
- 有限元



Rice, 1993

凹凸体 ($a-b < 0$)

- 地震空区、强震破裂区、小震稀疏段、低b值
- GPS/InSAR闭锁区、强构造变形区的弱变形带、重复地震.....
- 下边界（震中分布的下边界、重复地震的上边界、温度...）



Lay and Kanamori (1980)



断层结构及介质性质

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

断层几何结构

- 不连续阶区
- 断层走向的拐折
- 倾向角度的变化
- 孕震区深度

介质性质差异

- 断层带与非断层介质
- 浅层与深部

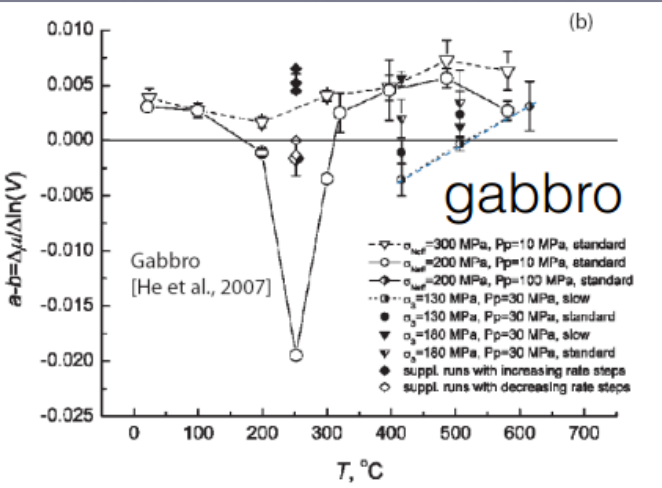
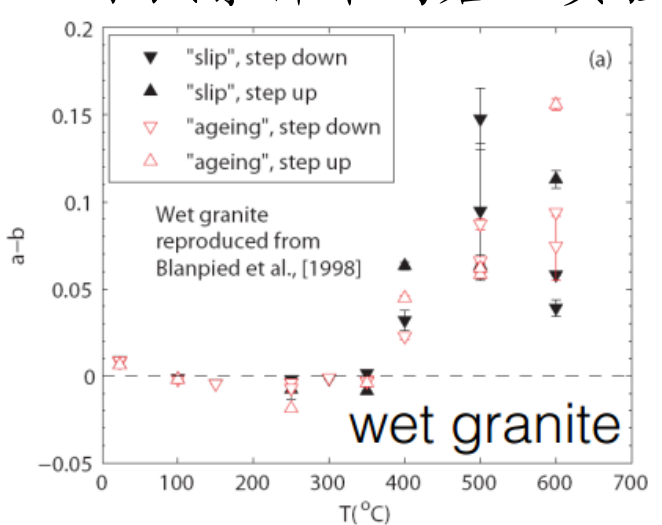
应力状态

- 深部流体作用



室内岩石实验

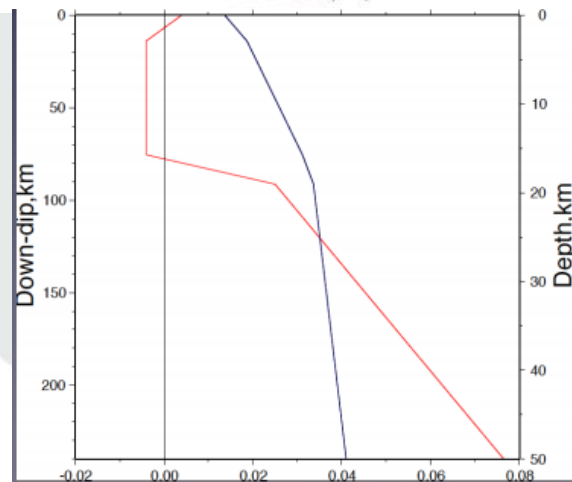
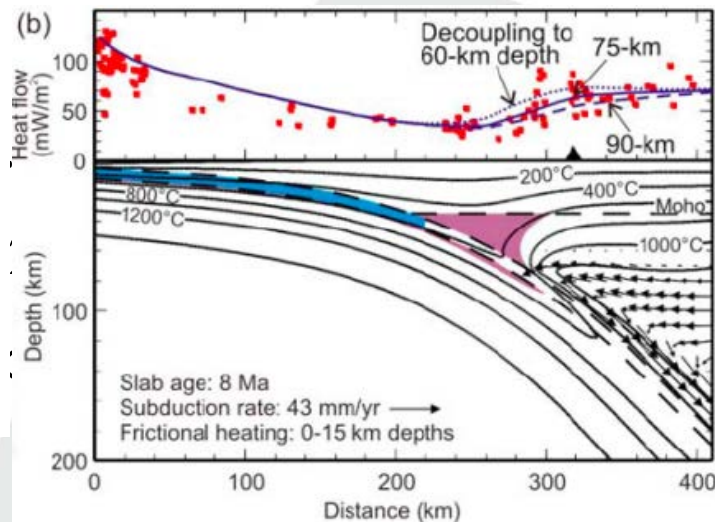
- 水热条件下的岩石实验（钻孔实验），结合地温梯度变化



岩石实验
+
地温梯度变化

||

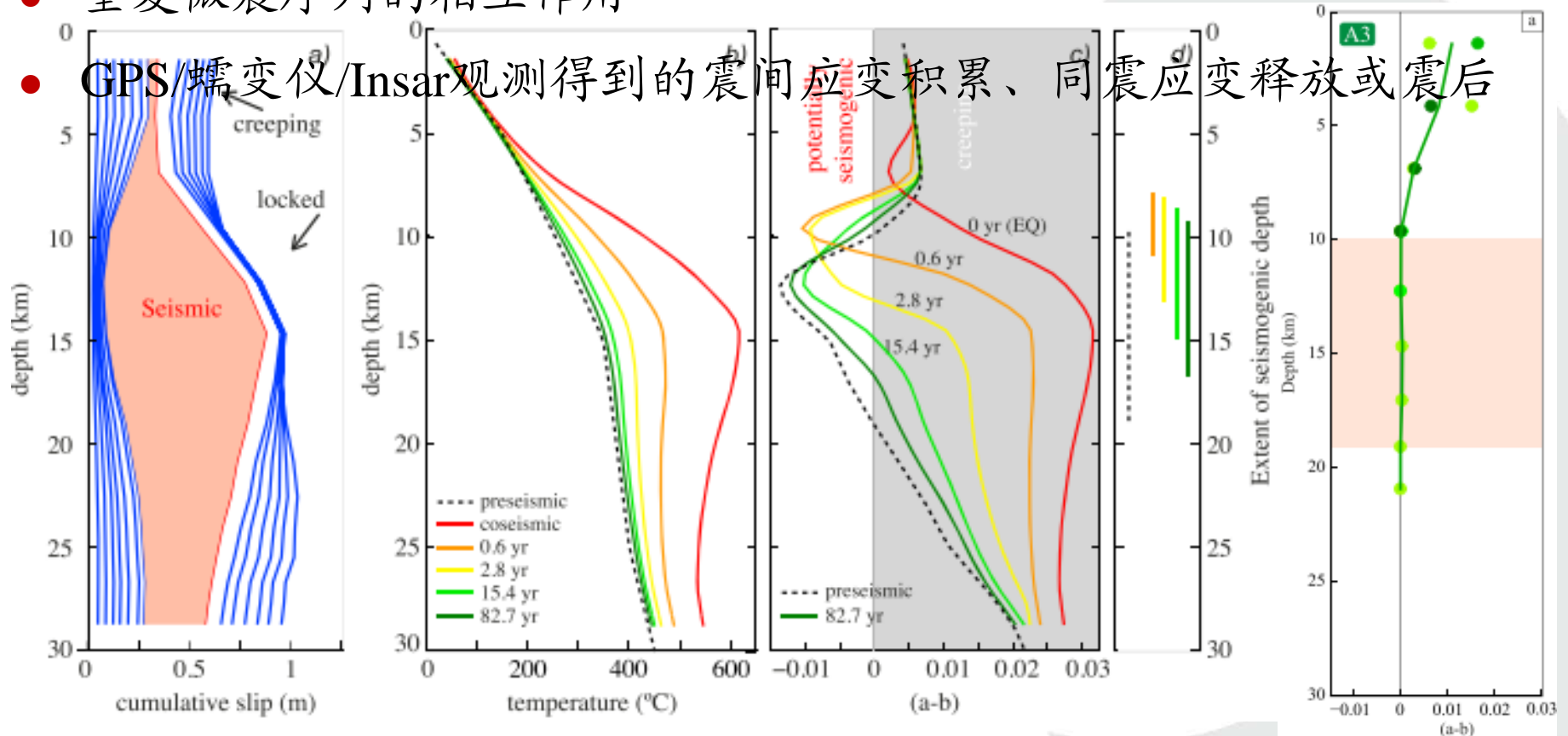
断层摩擦参数



摩擦参数

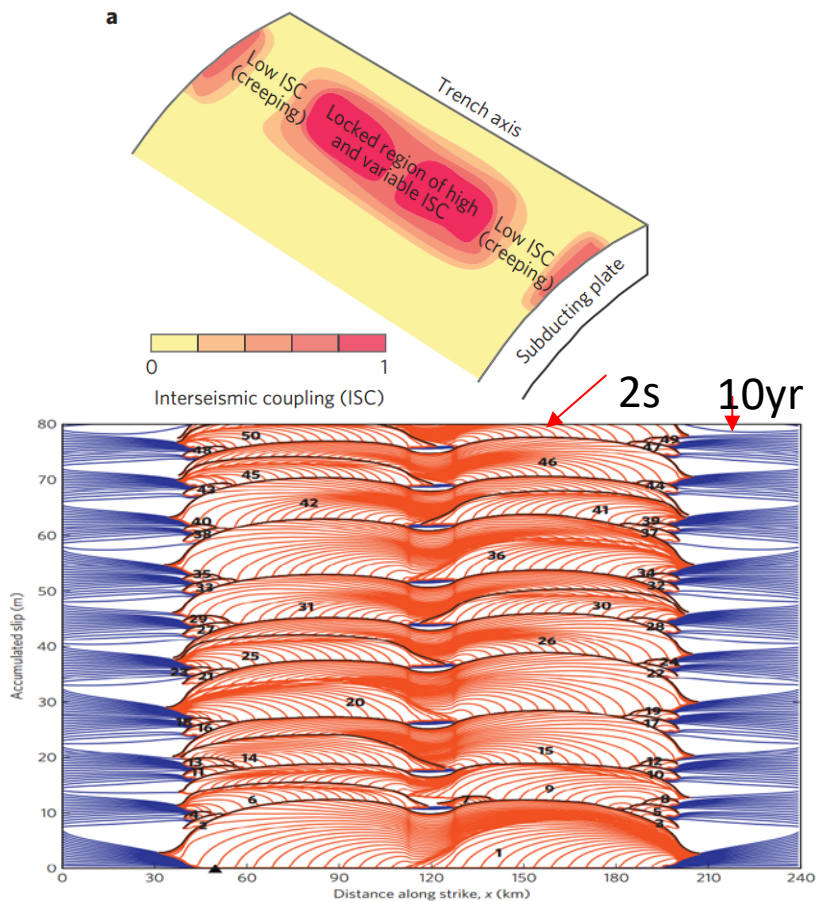
通过其他资料获得

- 地震周期特征/Insar观测得到的震间应变积累、同震应变释放或震后蠕变
- 重复地震序列的相互作用
- GPS/蠕变仪/Insar观测得到的震间应变积累、同震应变释放或震后蠕变



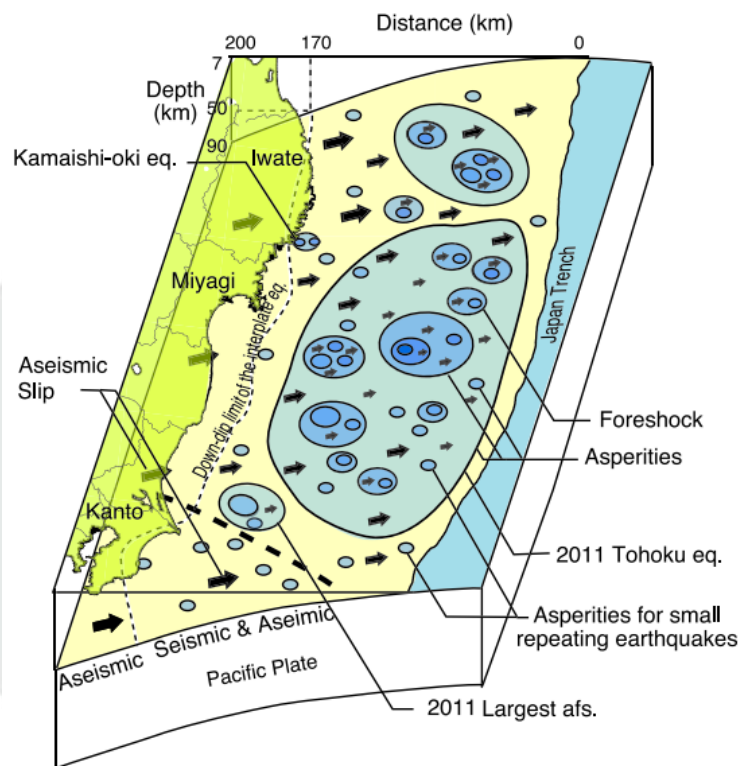
强震轮回和级联破裂

- 鲜水河断裂带强震活动
- 日本海沟



Kaneko et al., 2010

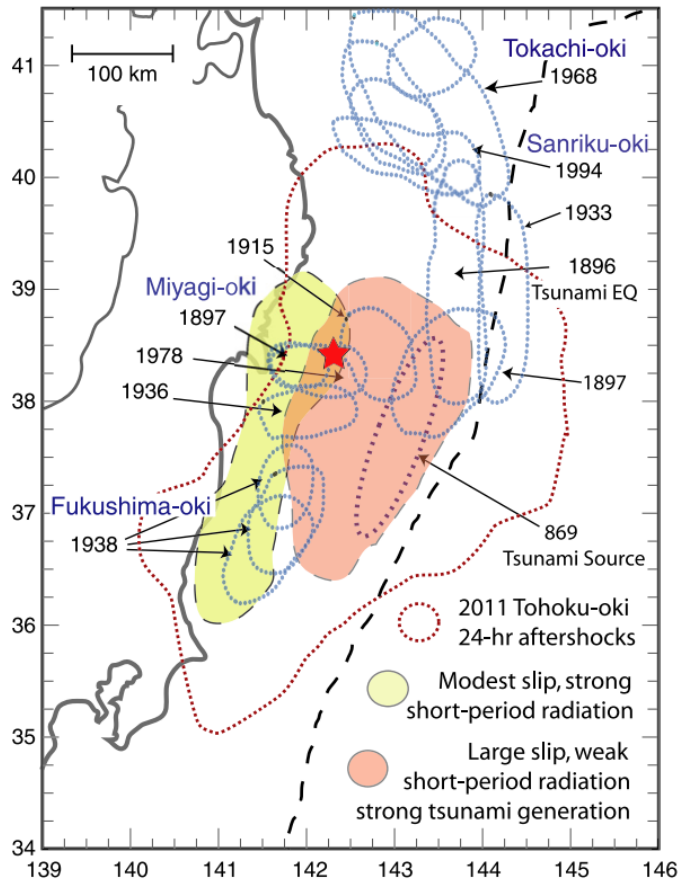
多层次凹凸体/条件稳定性模型



Uchida & Matsuzawa, 2011

强震轮回和级联破裂

● 2011年 M_W 9.0 Tohoku-Oki强震

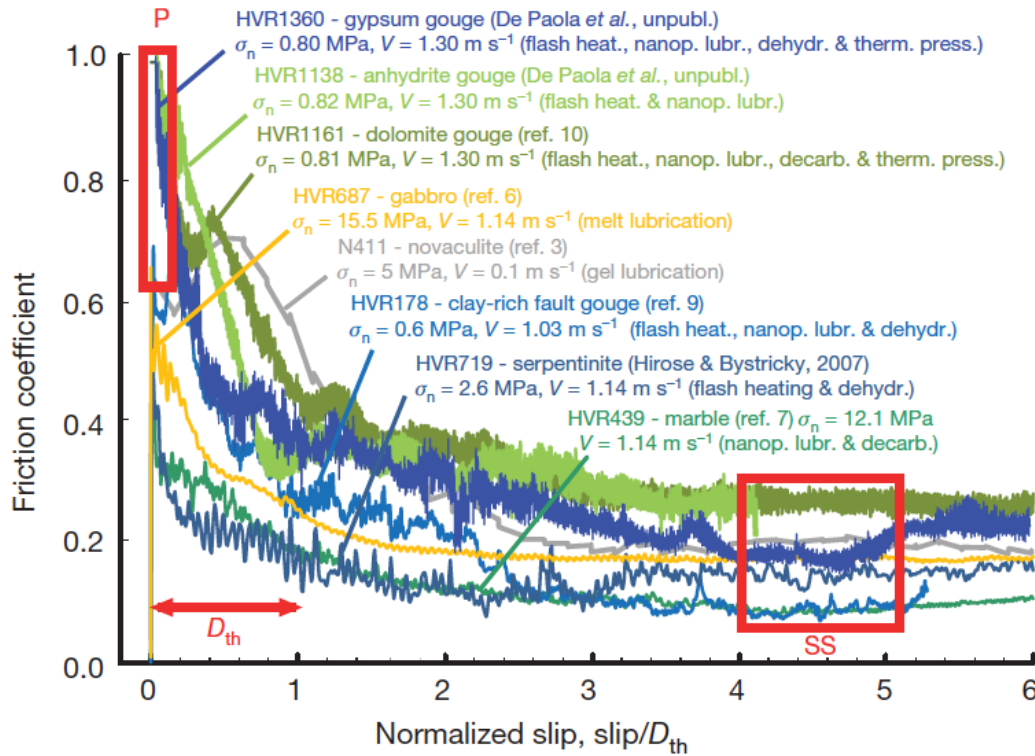


Tajima et al., 2012

1. 浅部破裂区（蠕滑/闭锁??）滑动位移远大于深部
2. 破裂起始与深部，约40s后向浅部传播
3. 深部高频辐射，浅层低频辐射

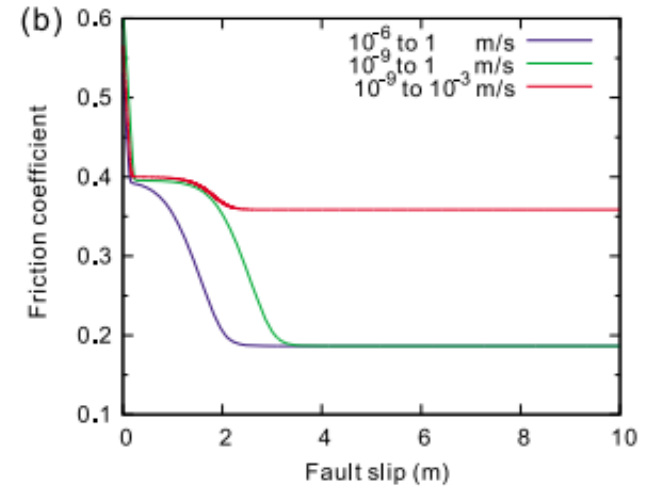
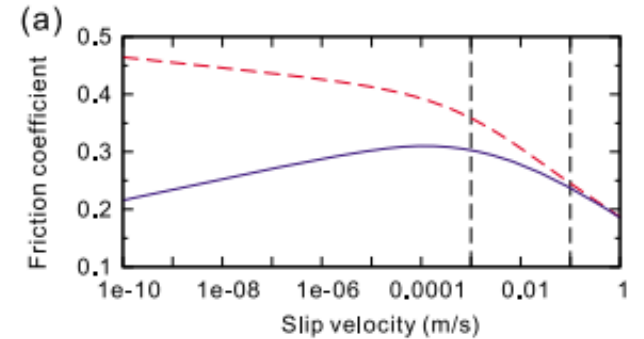
同震弱化效应

快速滑动导致动态弱化



Di Toro *et al.*, 2011

速率强化——速率弱化

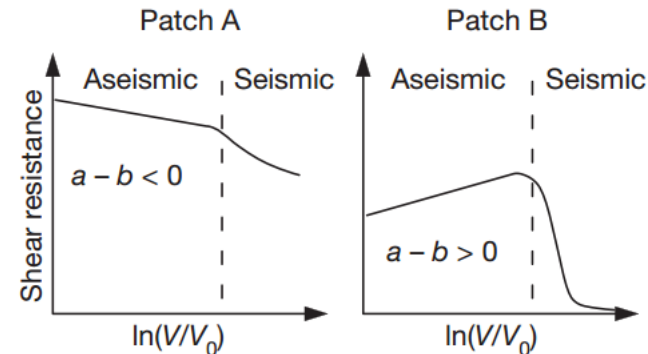
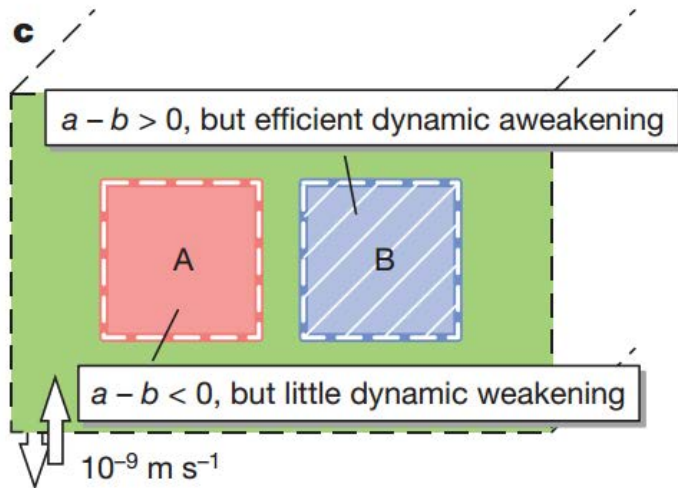
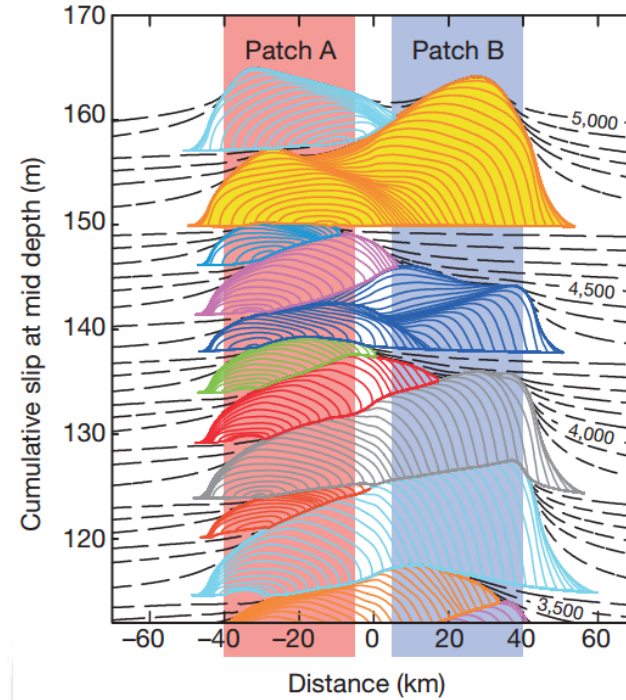
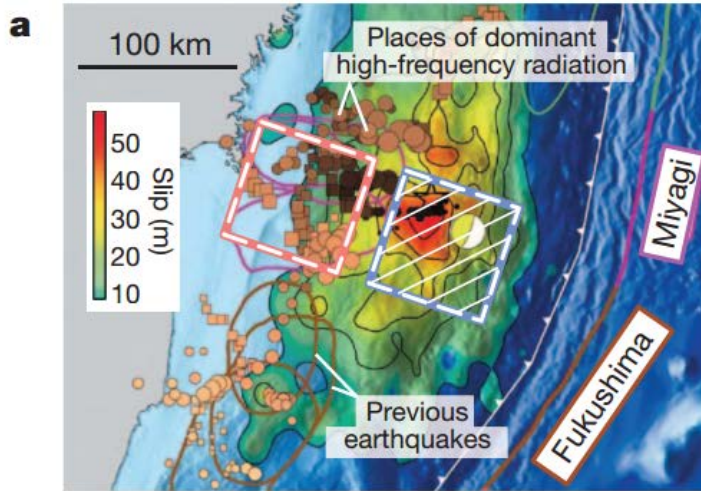


Tsutsumi *et al.*, 2011; Ujiie & Tsutsumi, 2010

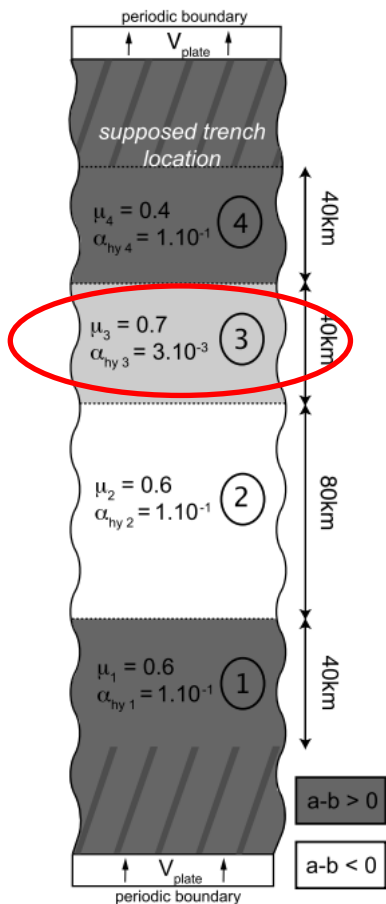
对同震过程的处理引入高速滑动导致的速率弱化和热效应

断层弱化机制

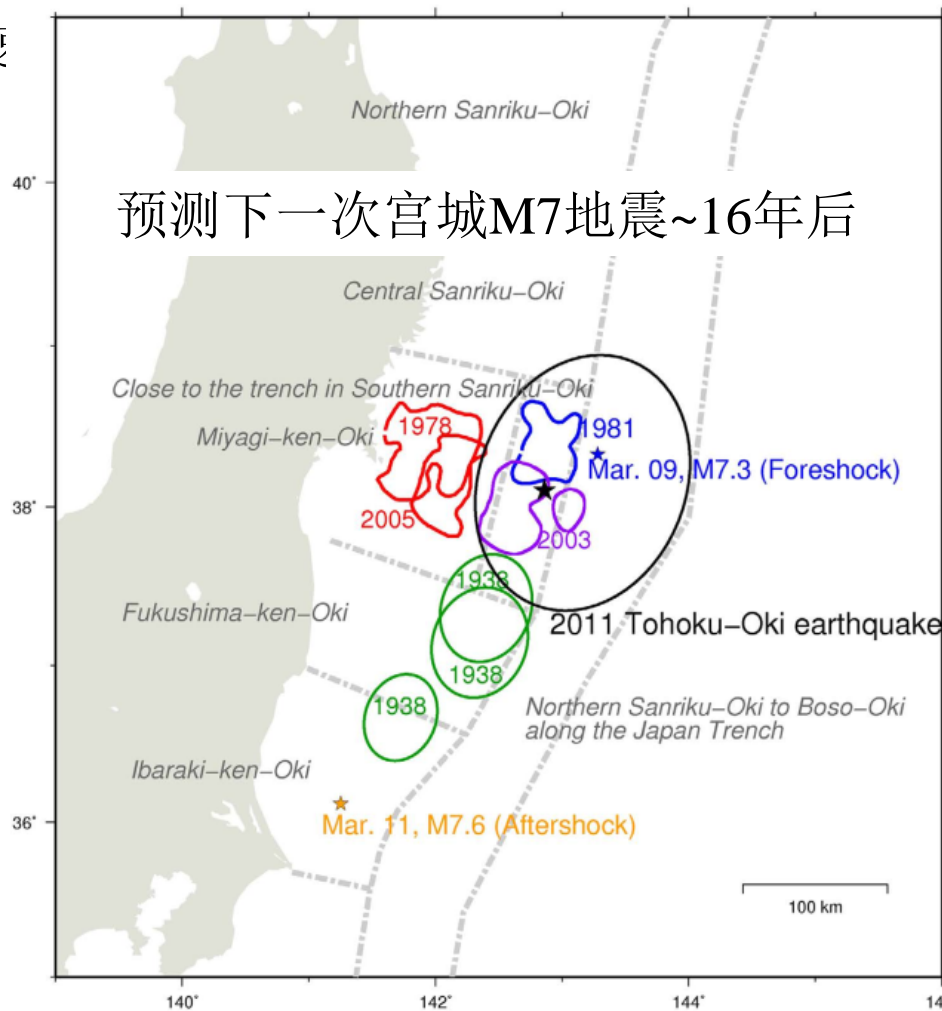
VS区发生同震破裂，考虑动态弱化和热增压效应



断层弱化机制



浅层区



预测下一次宫城M7地震~16年后

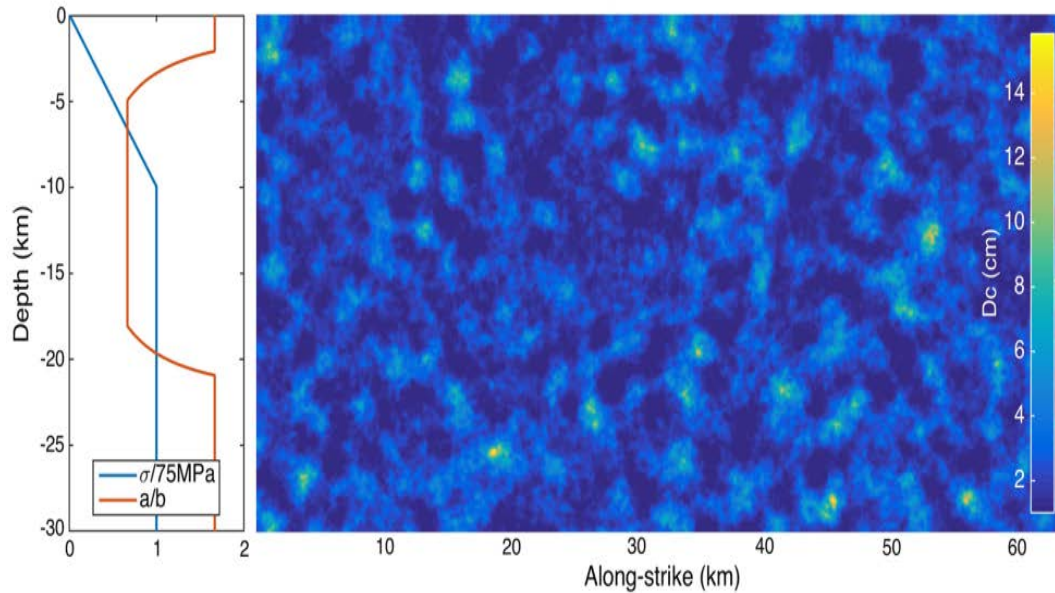
滑动

闭锁

地震序列模拟

摩擦参数 a , b , D_c 非均匀分布

$D_c = \text{mm} \sim \text{m}$

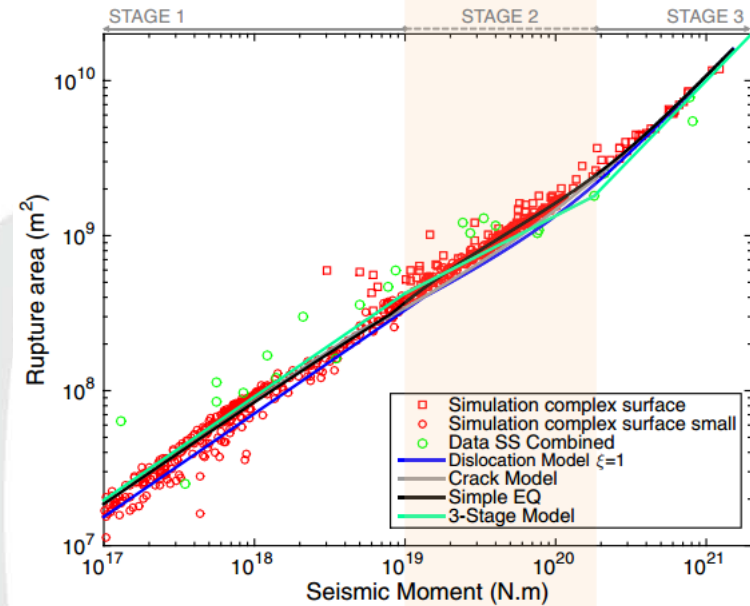


Luo et al., 2017

震源特征研究：应力降

$M_0 - A$

.....



与ETAS结合=ERS模型

RSQSim地震模拟器

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

准动态方法

短期的群集事件，长期统计

$10^5 \sim 10^7$ 个事件

长时间，数千年

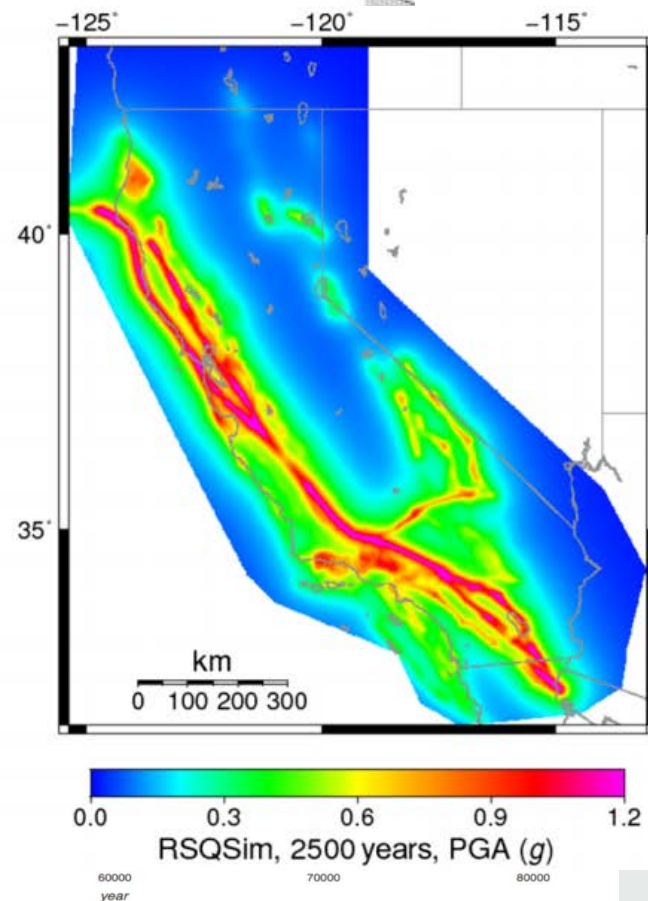
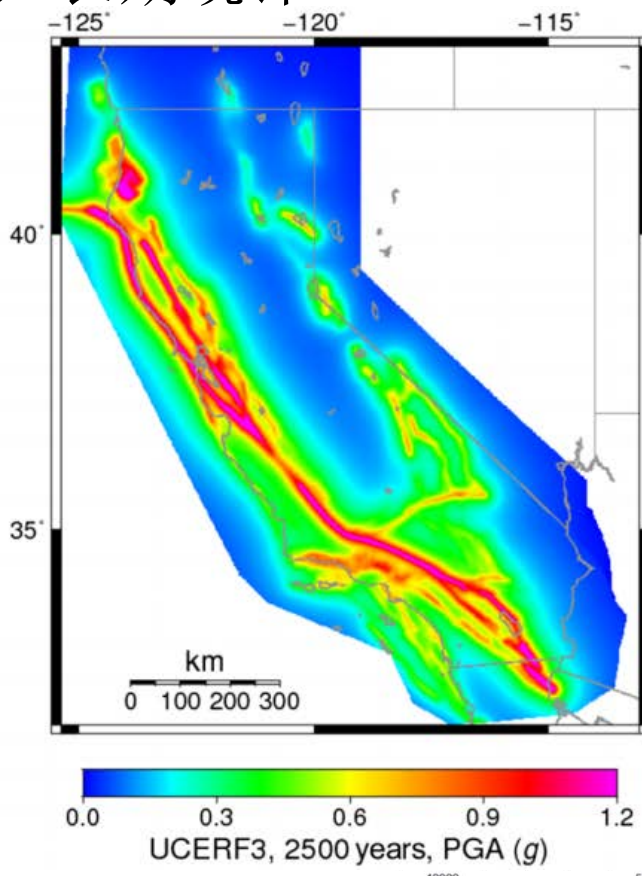
不同的滑动模式

地震活动

应力变化

触发地震

诱发地震(injection-induced)





谢谢！
请批评指正