



# 2015年尼泊尔 $M_S$ 8.1级地震形变过程

孟国杰，苏小宁，吴伟伟，赵国强

中国地震局地震预测研究

中国地震局地震预测重点实验室

# 提纲

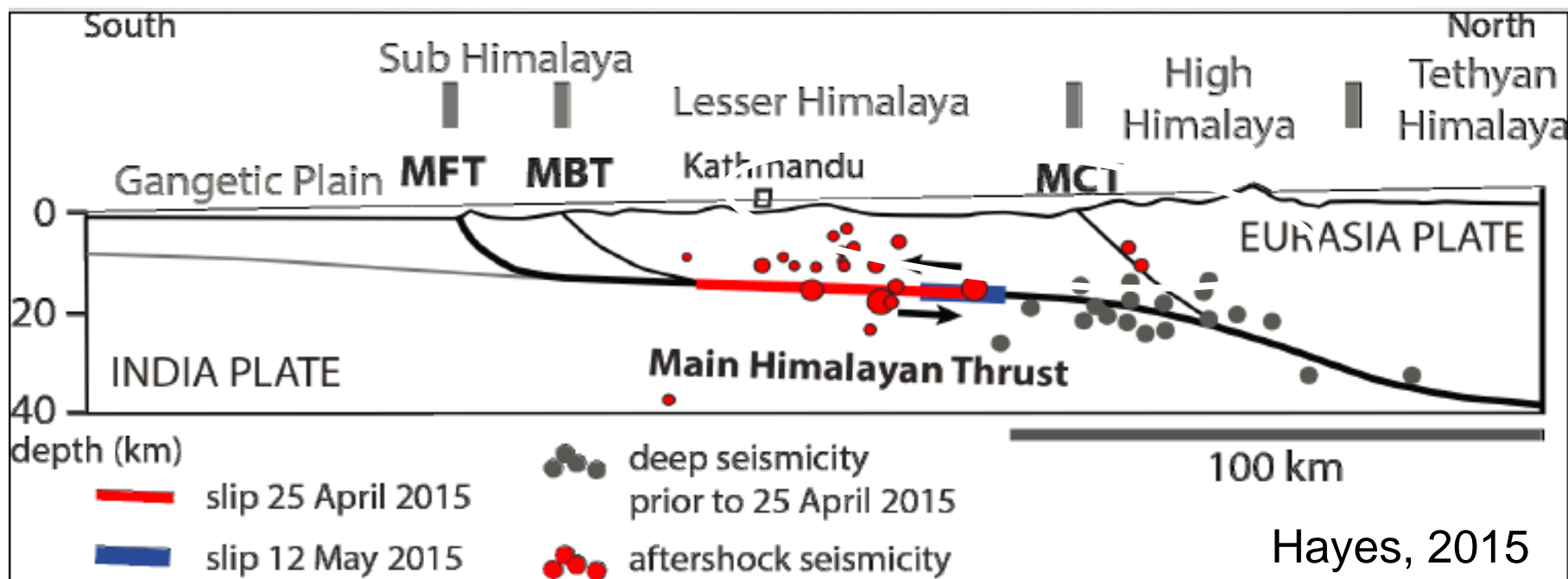
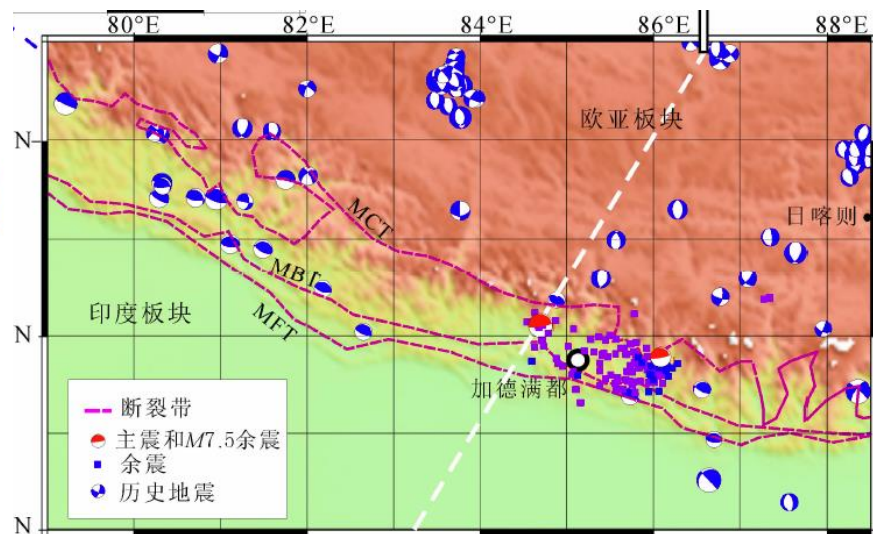
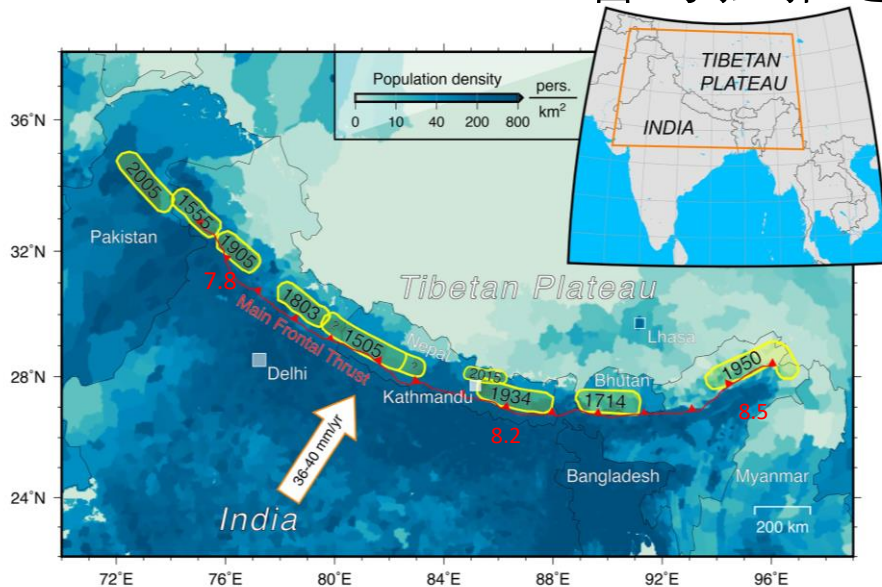
➤ 震前形变

➤ 同震形变

➤ 震后形变

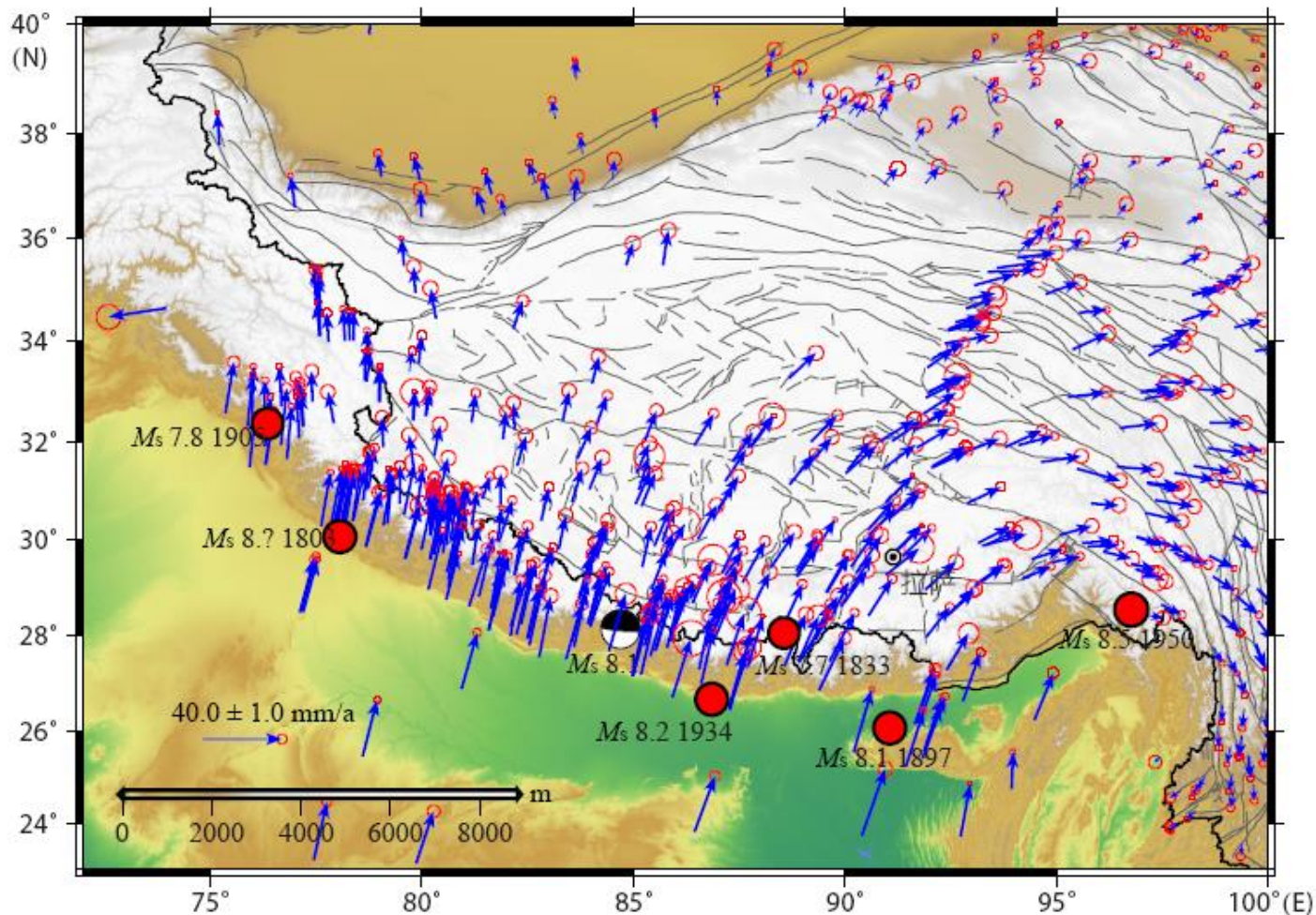
➤ 结论

# 喜马拉雅逆冲带地震构造



Hayes, 2015

# 青藏高原GPS速度场(相对欧亚参考框架)



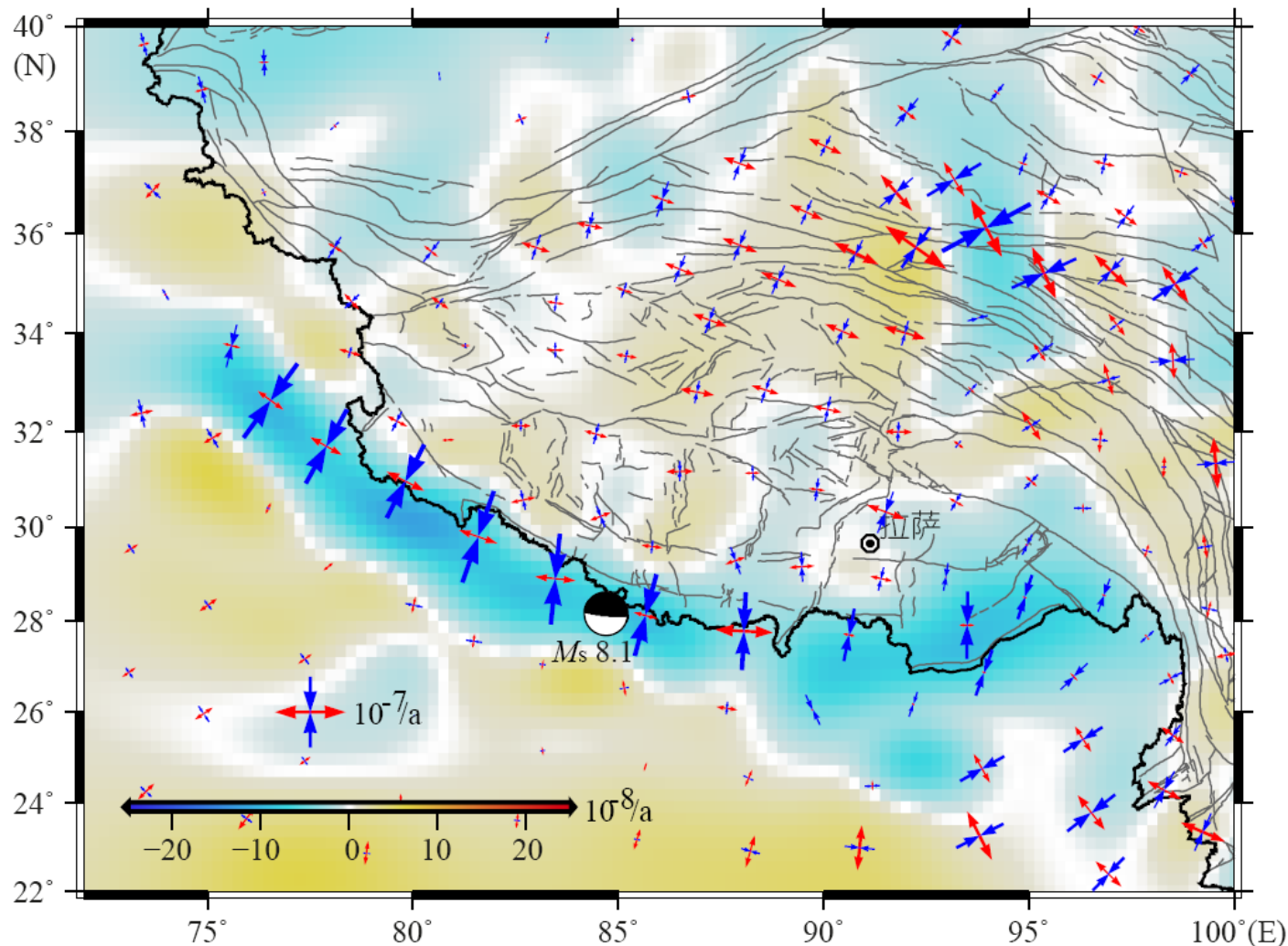
数据范围: 1997-2015

沿弧形走向汇聚速度非均匀

东南段大于西北段

- 东部:  $21.7 \pm 1.3$  mm/a
- 中部:  $21.6 \pm 2.0$  mm/a
- 西部:  $18.28 \pm 1.4$  mm/a

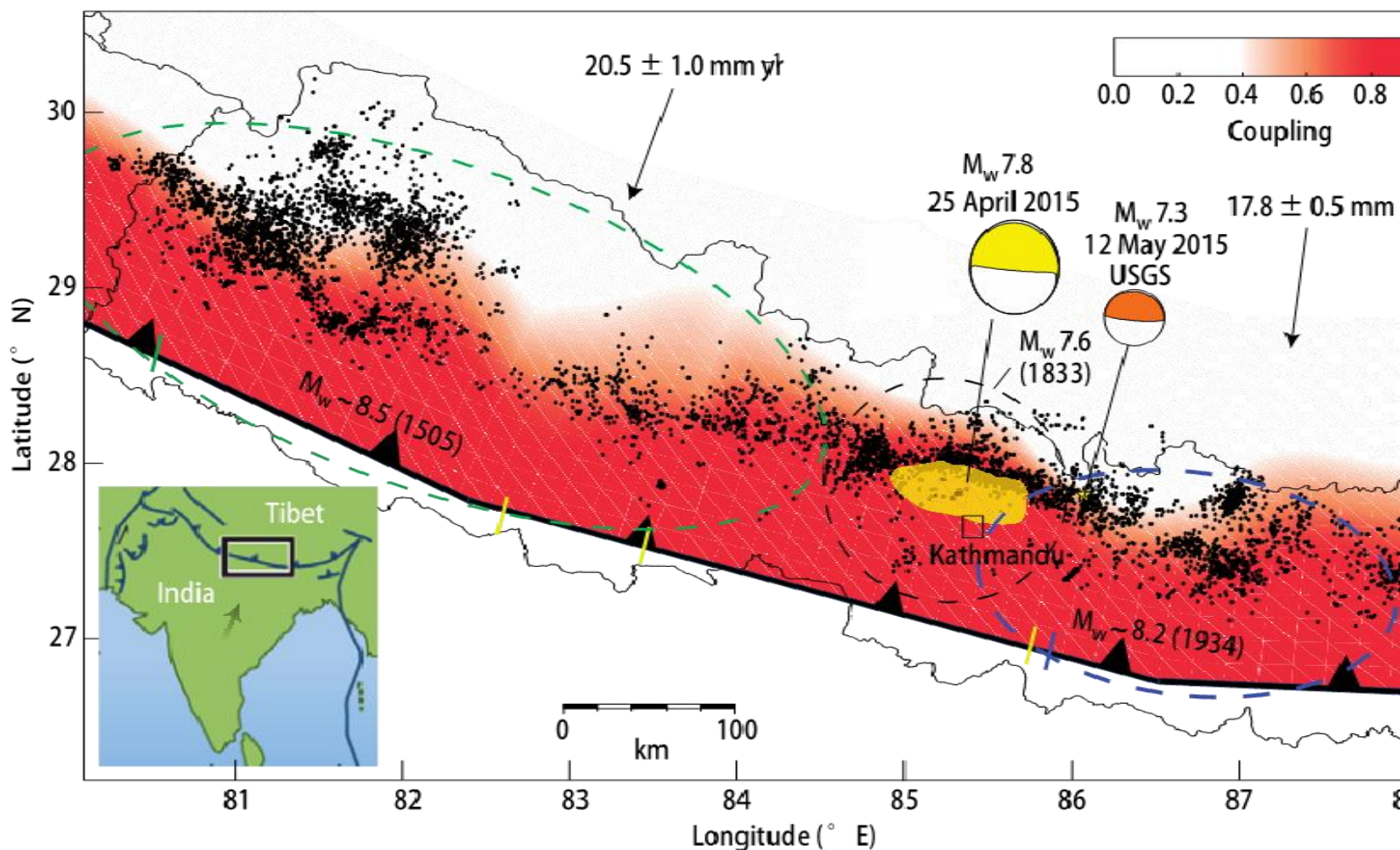
# 青藏高原及其周边区域GPS面应变率/主应变率场



应变场解算方法：  
多尺度球面小波；  
尺度因子选择3-6；

- 1 喜马拉雅逆冲带整体上表现为压缩，压缩区宽度为200-300 km
- 2 尼泊尔 $M_s$  8.1级地震发生在主压应变率为主的区域，最大主应变率为 $13.8 \times 10^{-8}/a$
- 3 最大主压应变率最大的区域位于震中的西北区域，距震中500 km左右，量值为 $20.2 \times 10^{-8}/a$

# 震前闭锁空间分布特征

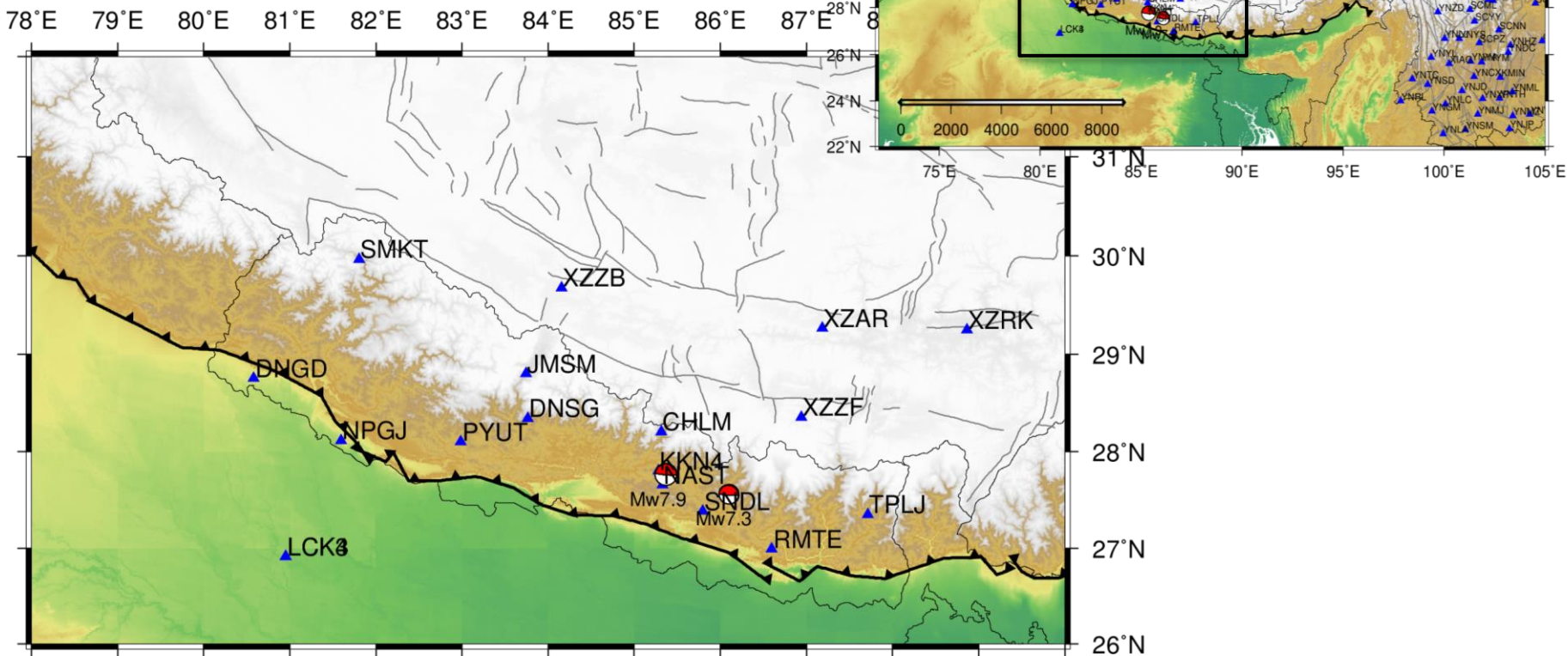


均匀闭锁 vs 非均匀闭锁?  
震中区为强闭锁区

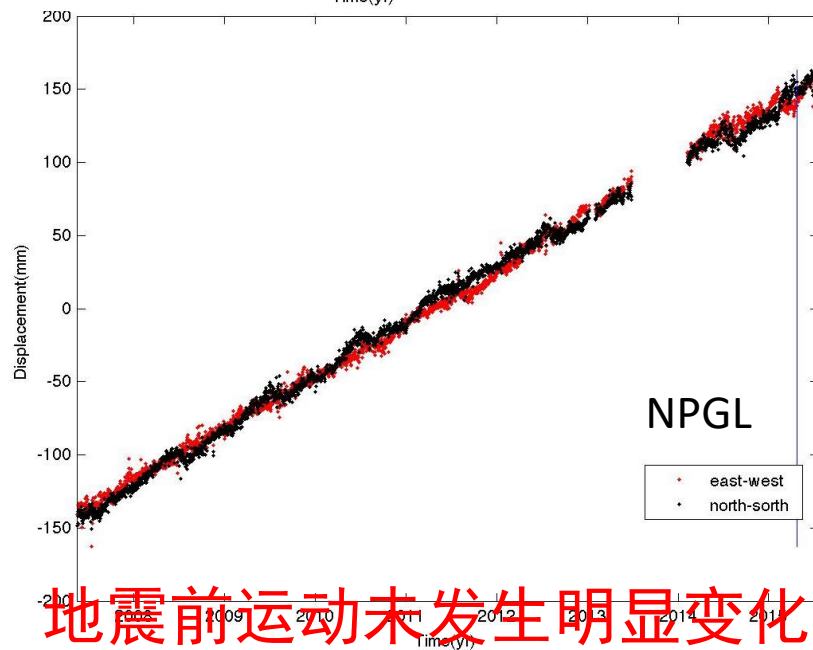
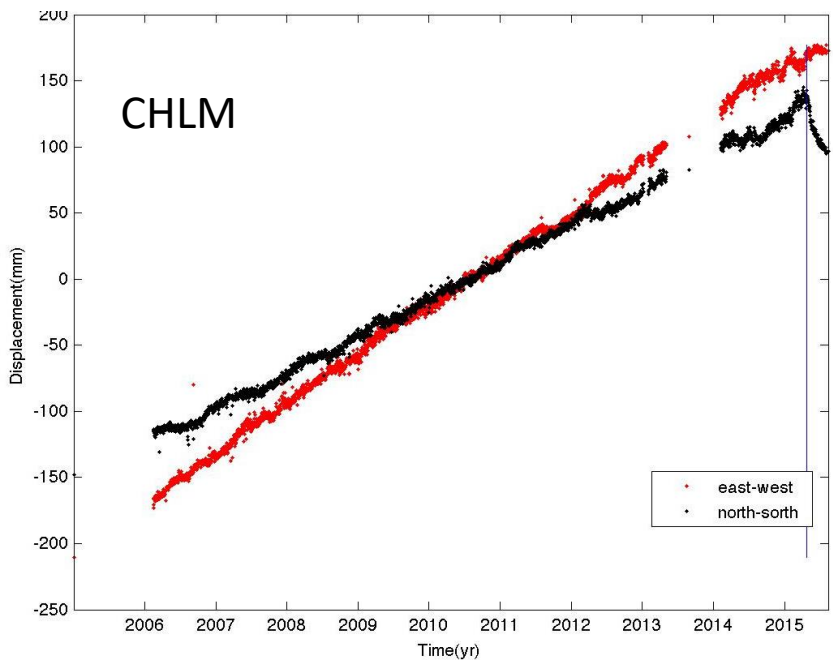
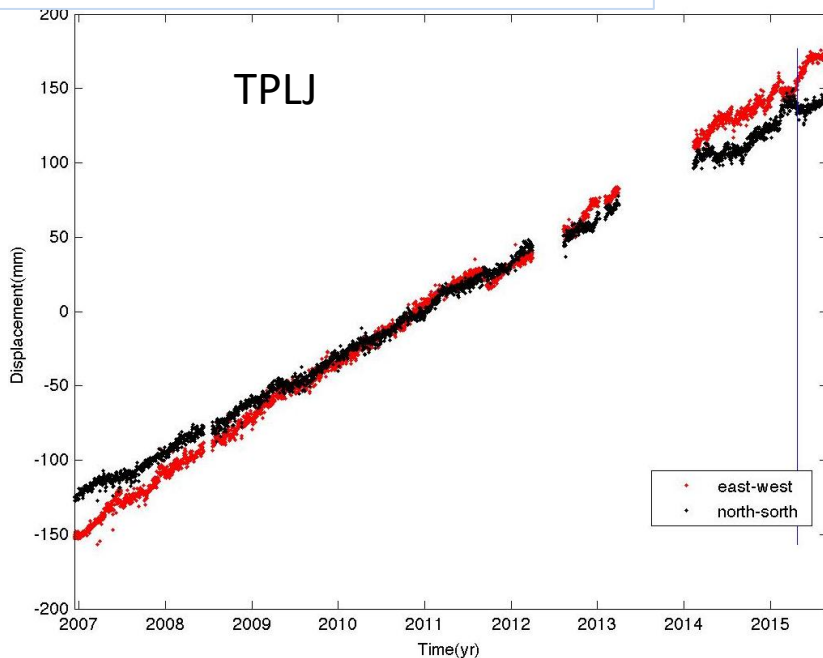
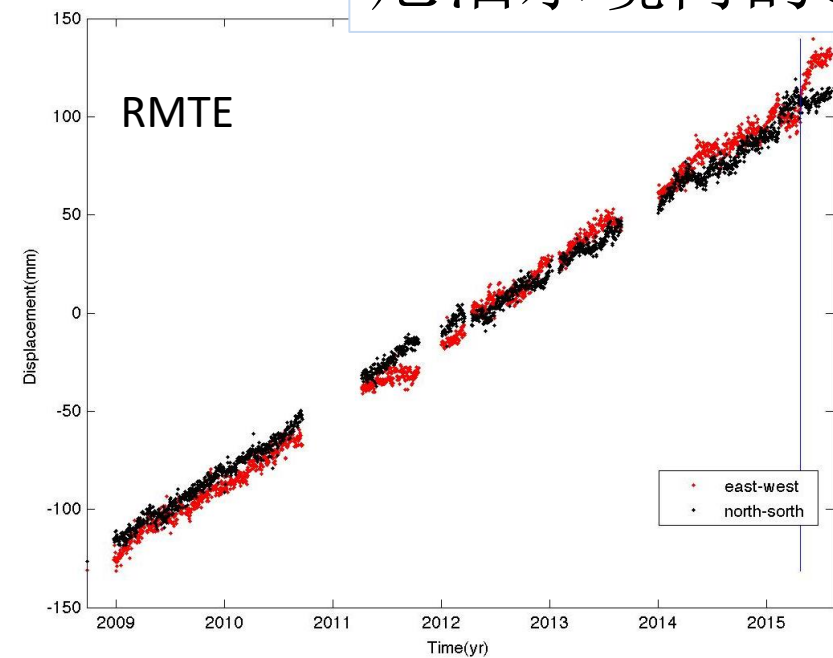
# GPS连续站坐标时序变化

收集震中1000km以内GPS连续观测站数据；

采用GAMIT/GLOBK解算



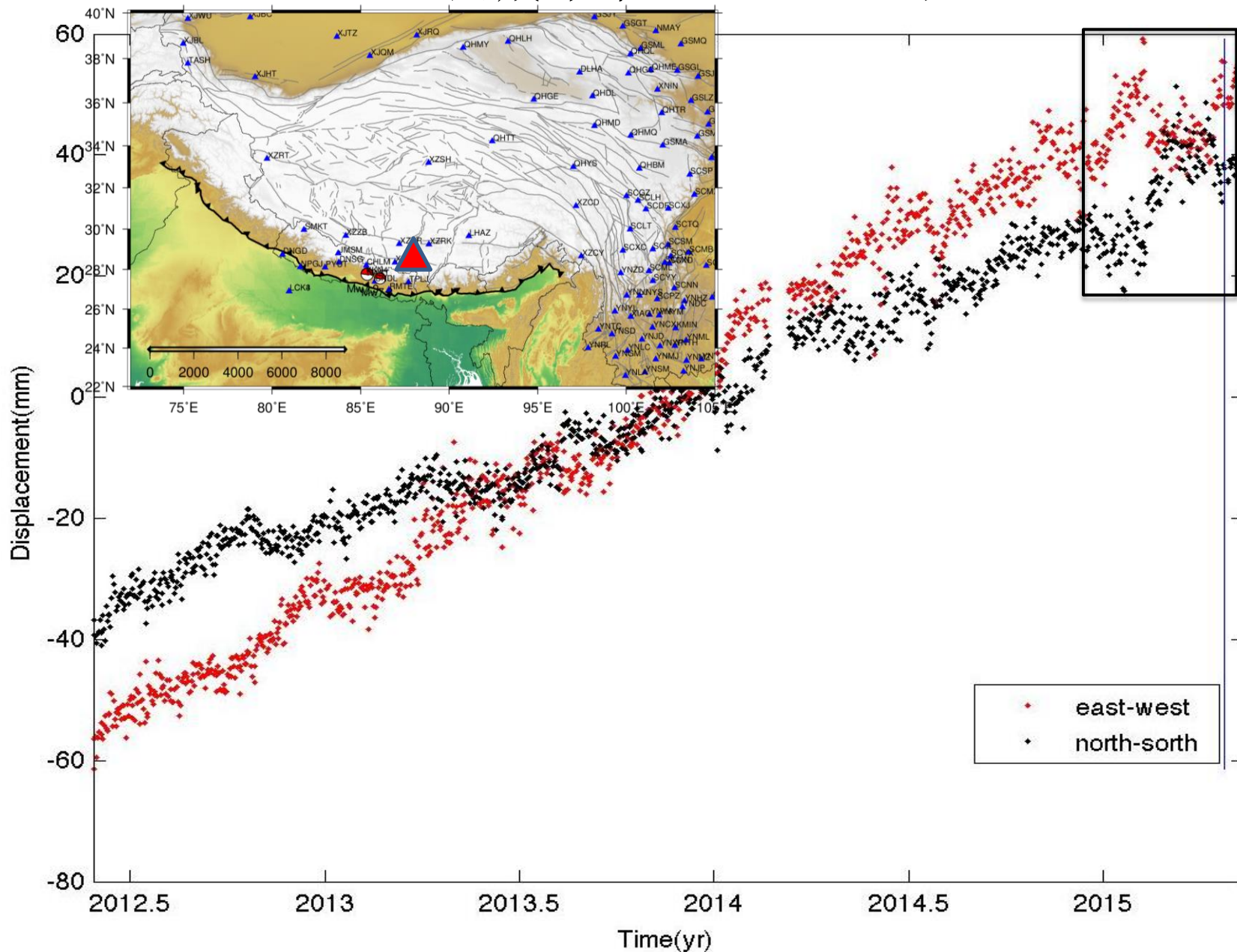
# 尼泊尔境内的GPS测站坐标时间序列



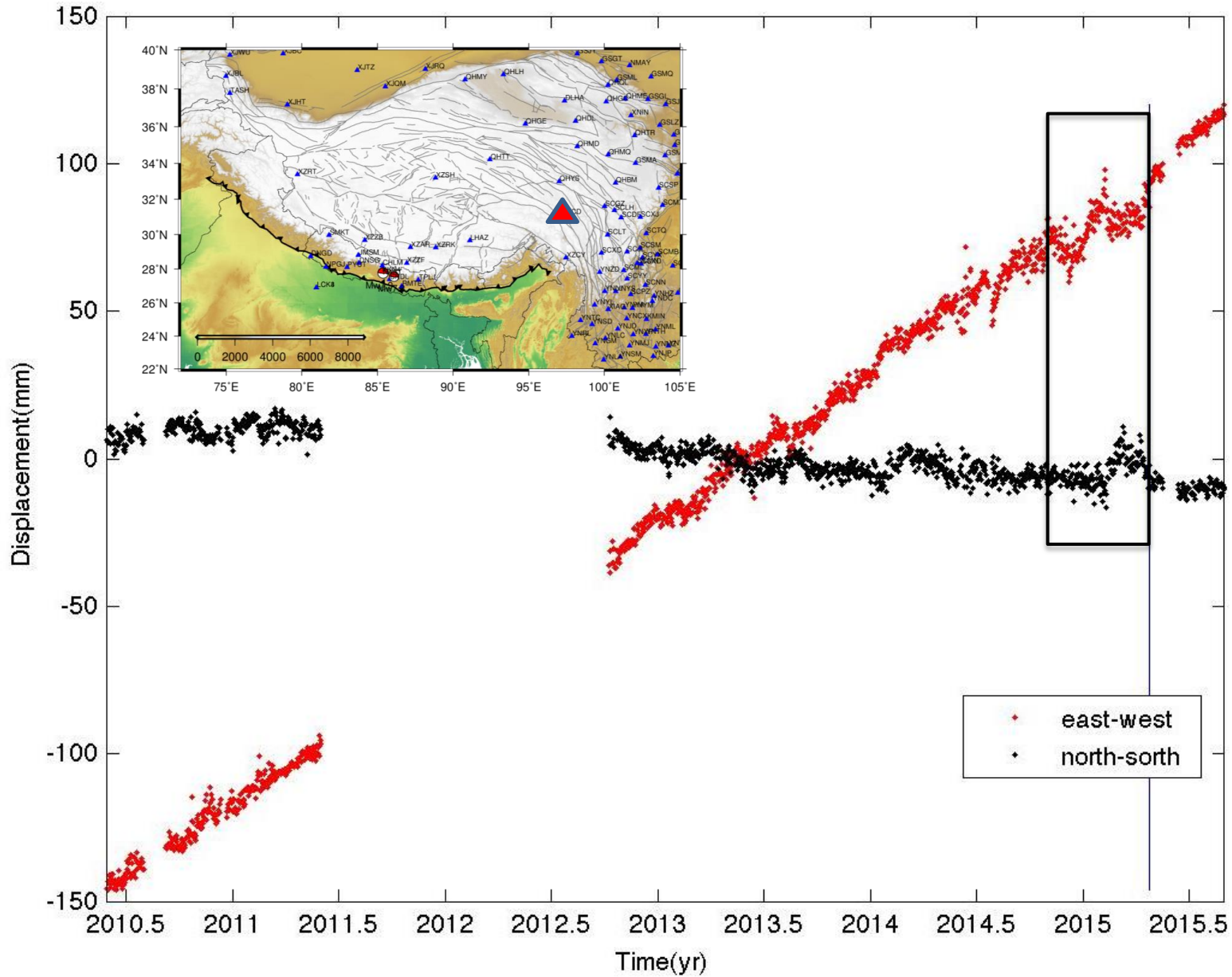
地震前运动未发生明显变化



# 西藏珠峰 (XZZF) GPS站



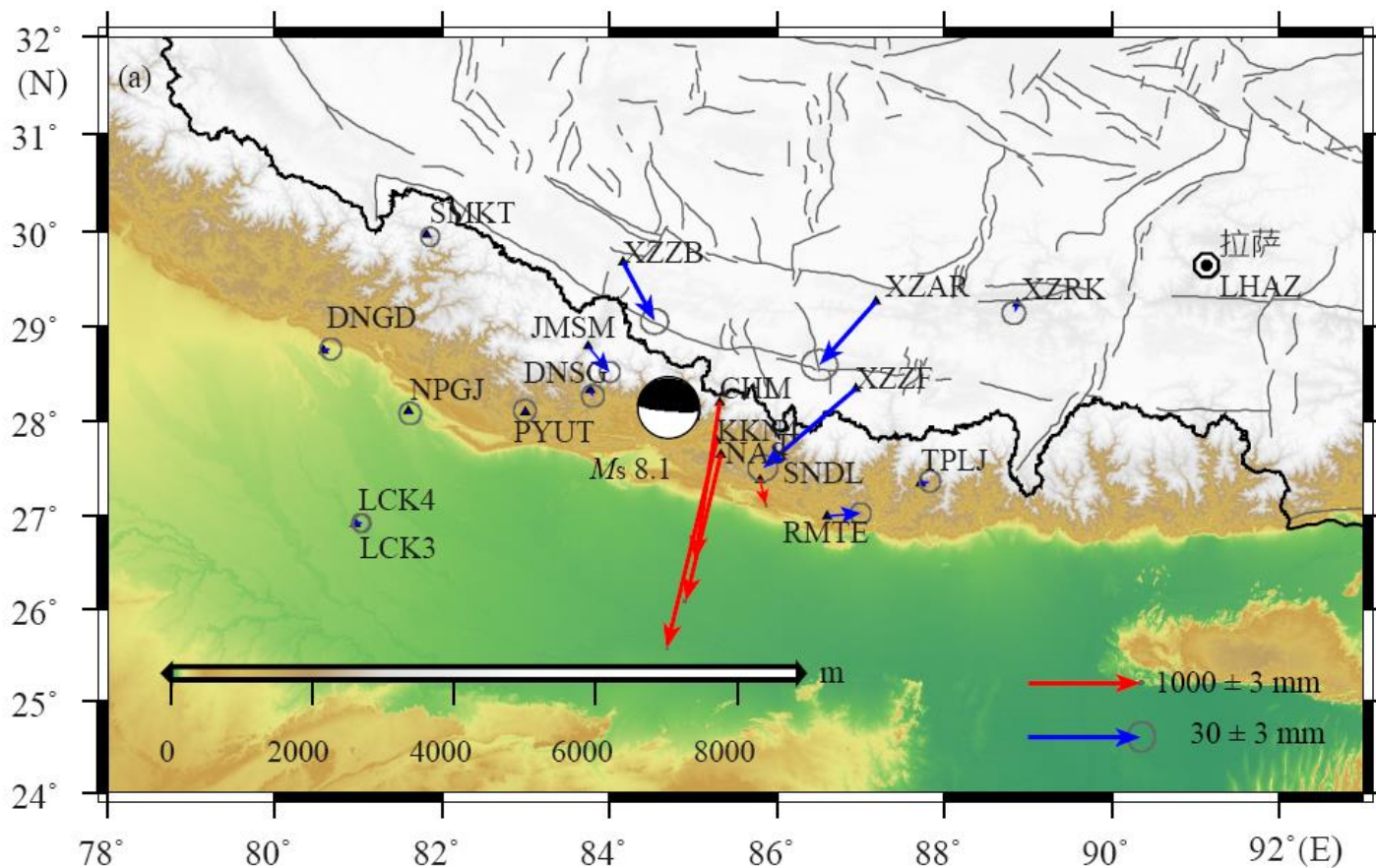
# 西藏昌都 (XZCD) GPS站



# 提纲

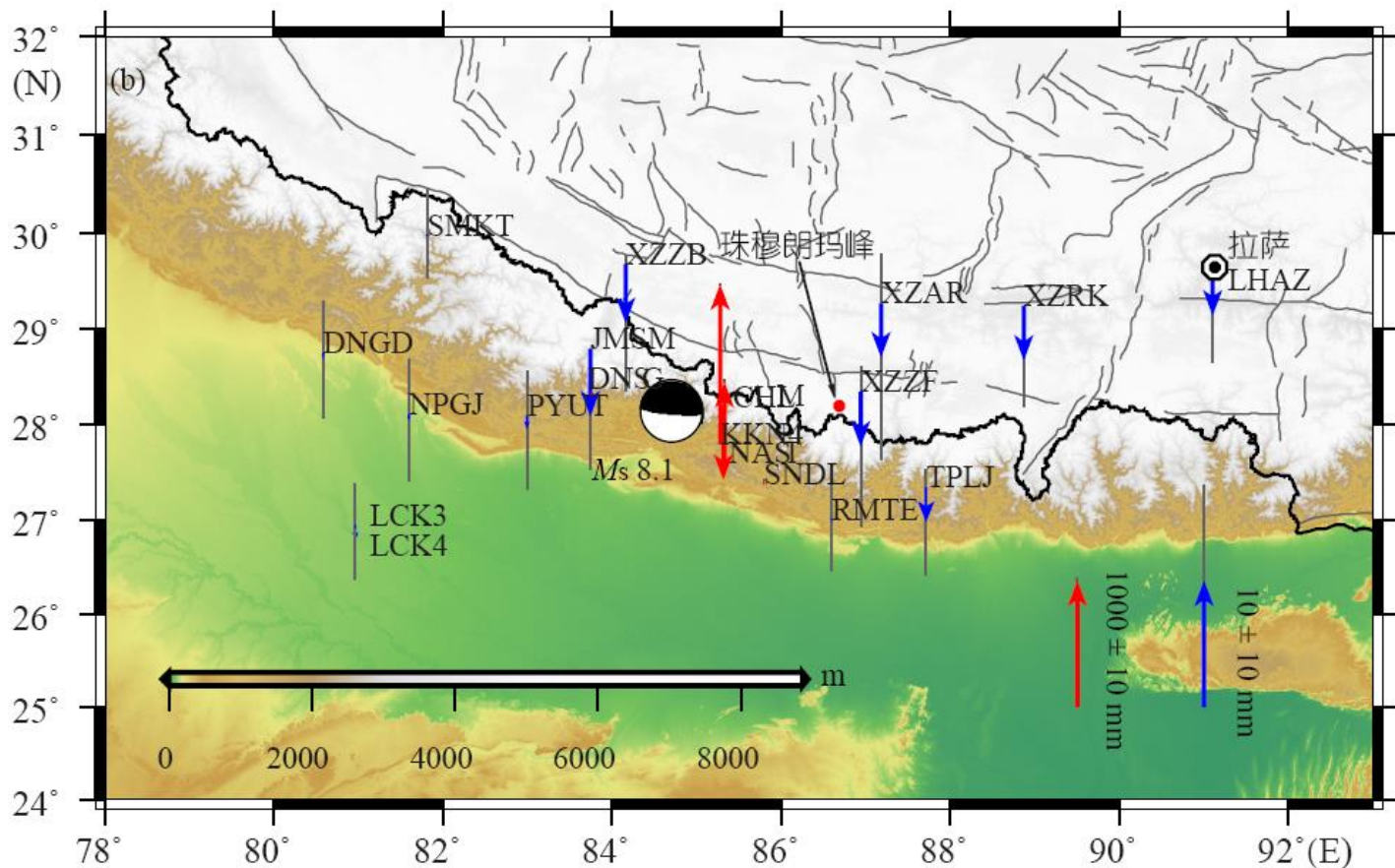
- 震前形变
- 同震形变
- 震后形变
- 结论

# GPS水平向同震位移



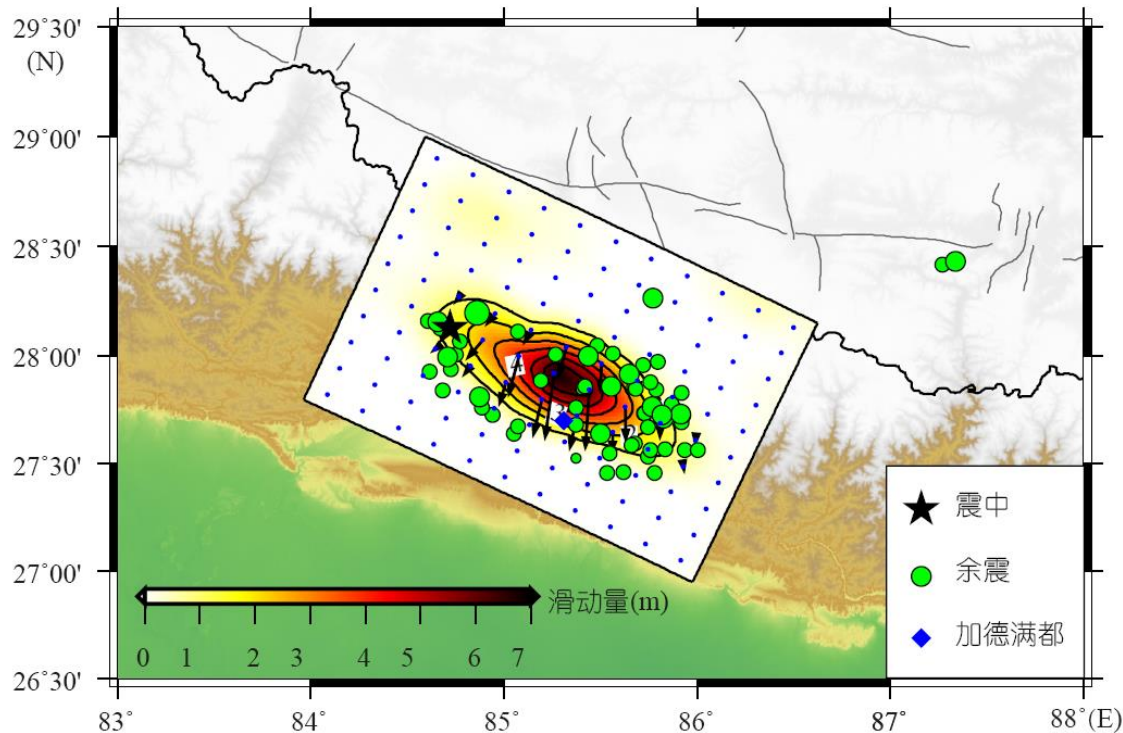
- 在95%的置信水平，9个测站观测到明显的同震位移，整体表现为南向运动
- 同震位移最大的测站为位于震中东南距震中72.1 km的KKN4测站，其EW向位移为 $-444.4 \pm 1.1$  mm，NS向位移为 $-1840.4 \pm 1.2$  mm，垂向为 $1260.6 \pm 4.0$  mm
- 在中国境内有3个测站观测到同震位移：珠峰站(XZZF)，仲巴站(XZZB)和昂仁站(XZAR)，位移方向大致指向震中

# GPS垂向同震位移



- ◆ 在95%的置信水平下，6个测站观测到明显的垂向同震位移；
- ◆ 垂向同震位移上升的测站有3个，分别是KKN4，NAST和SNDL，这3个测站均位于震中的东南侧；
- ◆ 在中国境内距离震中最近的5个测站，均观测到约4 mm的同震下降，推测此次地震引起珠穆朗玛峰的沉降约为4 mm

# 震源破裂滑动分布



## 震源几何模型：

- 走向和倾角分别为 $295^\circ$ 和 $11^\circ$ 的平面断层，面积为 $220\text{km} \times 150\text{km}$
- 滑动方向约束在 $108^\circ \pm 45^\circ$
- 非负最小二乘反演方法

- 1 滑动的优势分布表现为NW-SE向的展布特征，与喜马拉雅地震带的走向基本一致
- 2 滑动量在加德满都市以北约25km处达到最大（6.84m）
- 3 4 余震主要分布在滑动量较大区域的外围，符合板块间地震的特征

# 提纲

➤ 震前形变

➤ 同震形变

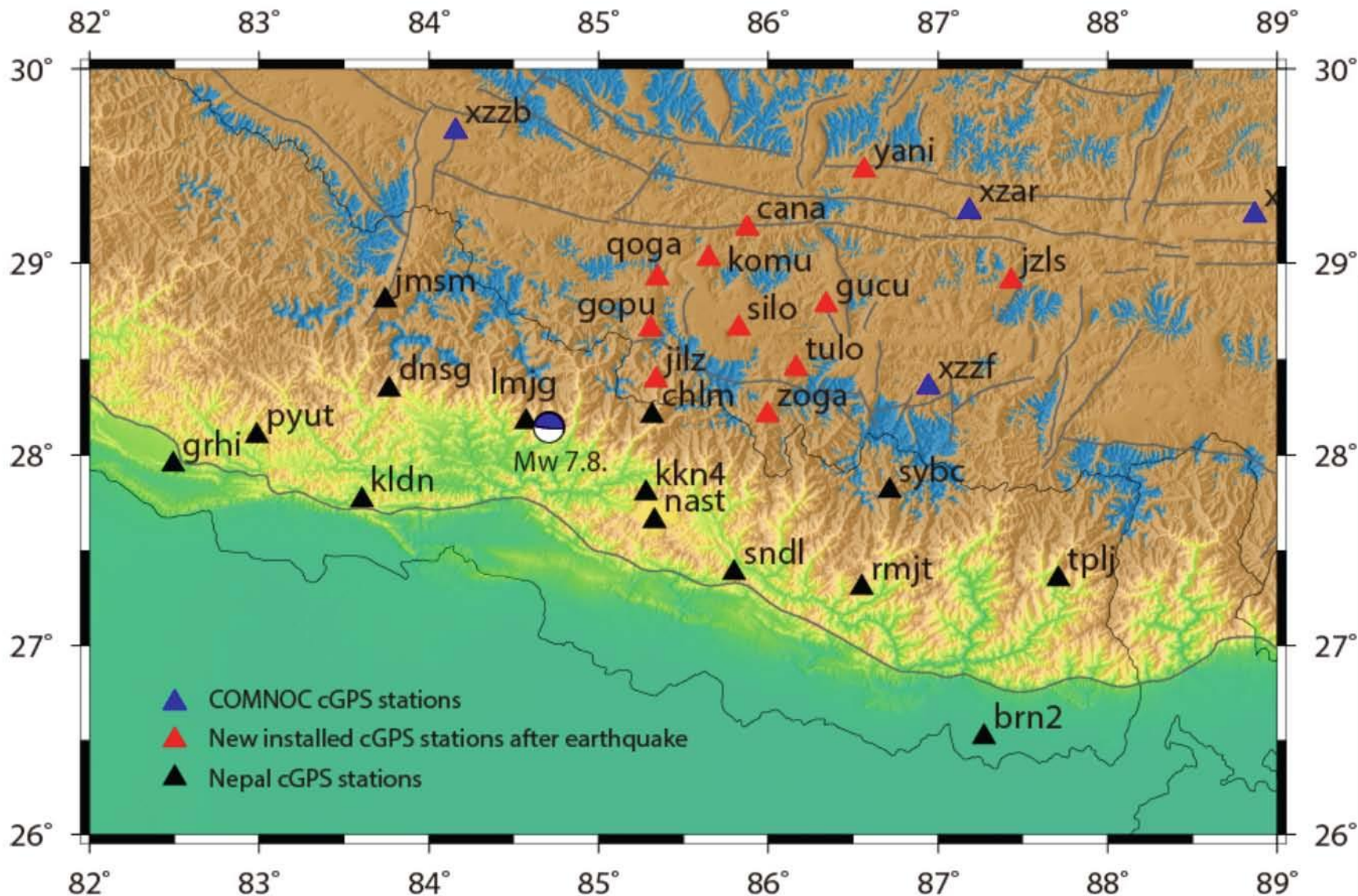
➤ 震后形变

➤ 结论

# 震后GPS观测



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

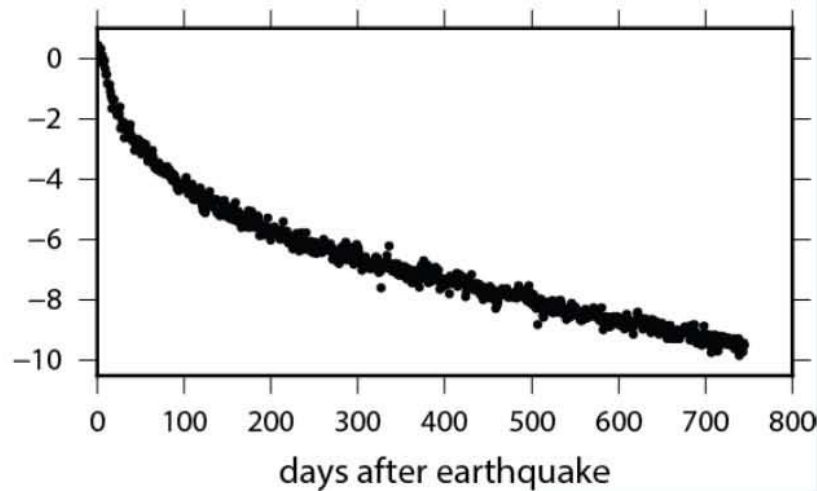
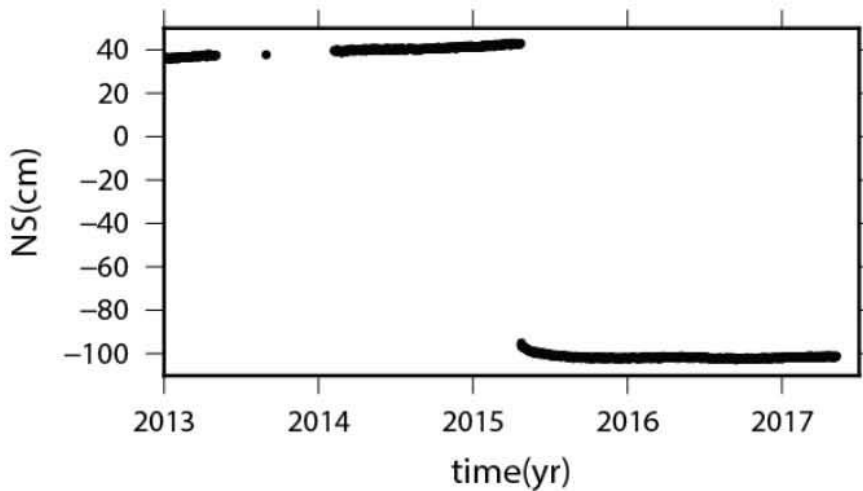
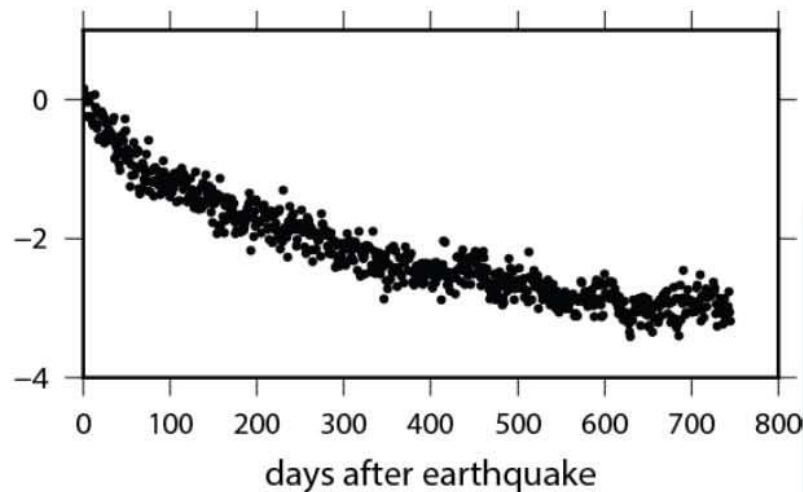
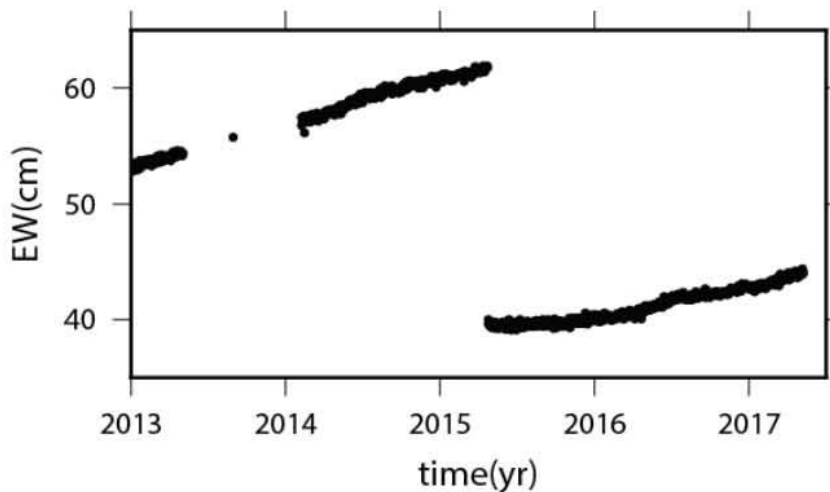




# GPS 测站CHLM的坐标时序



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



震后形变衰减过程

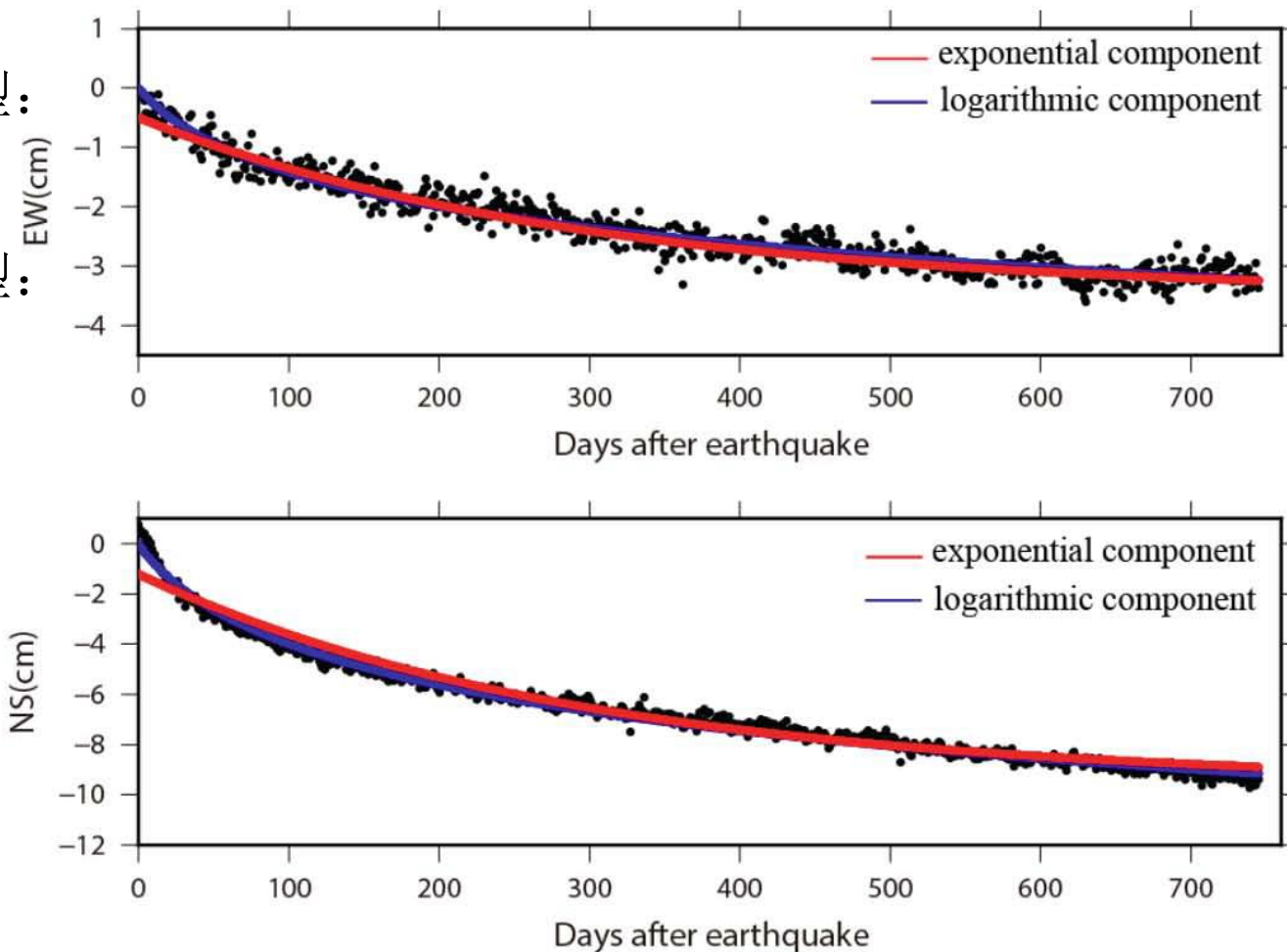


# 单个模型拟合的不足

INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

1) 对数模型:  
滑动摩擦

2) 指数模型:  
粘弹性松弛



在震后的0-50天，两种拟合模型给出的模型值和观测值均存在系统性差异，尤其是指数模型存在显著差异，说明利用单一模型不能够精确地表达GPS测站所观测到的震后形变。

# 基于组合模型的震后位移拟合

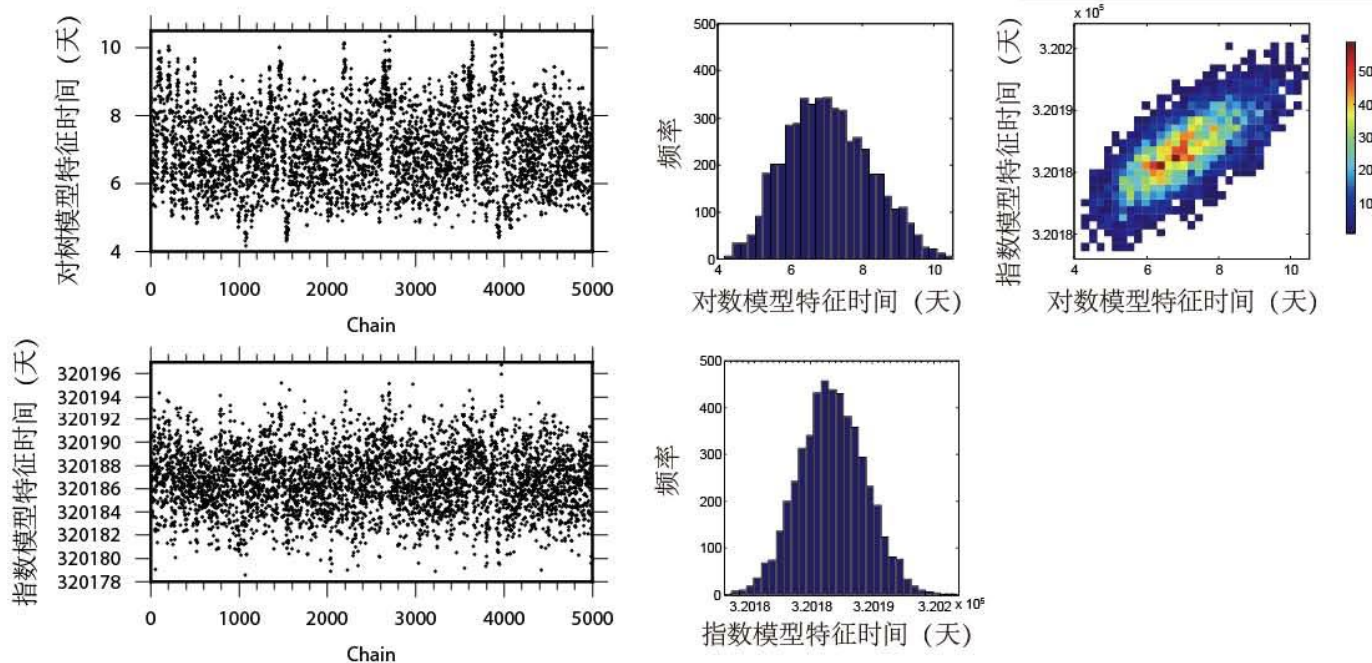


INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

$$d_p = d_a \cdot \log(t/t_c + 1) + d_b \cdot (1 - e^{-t/t_r})$$

计算方法：  
贝叶斯-马尔柯夫链方法

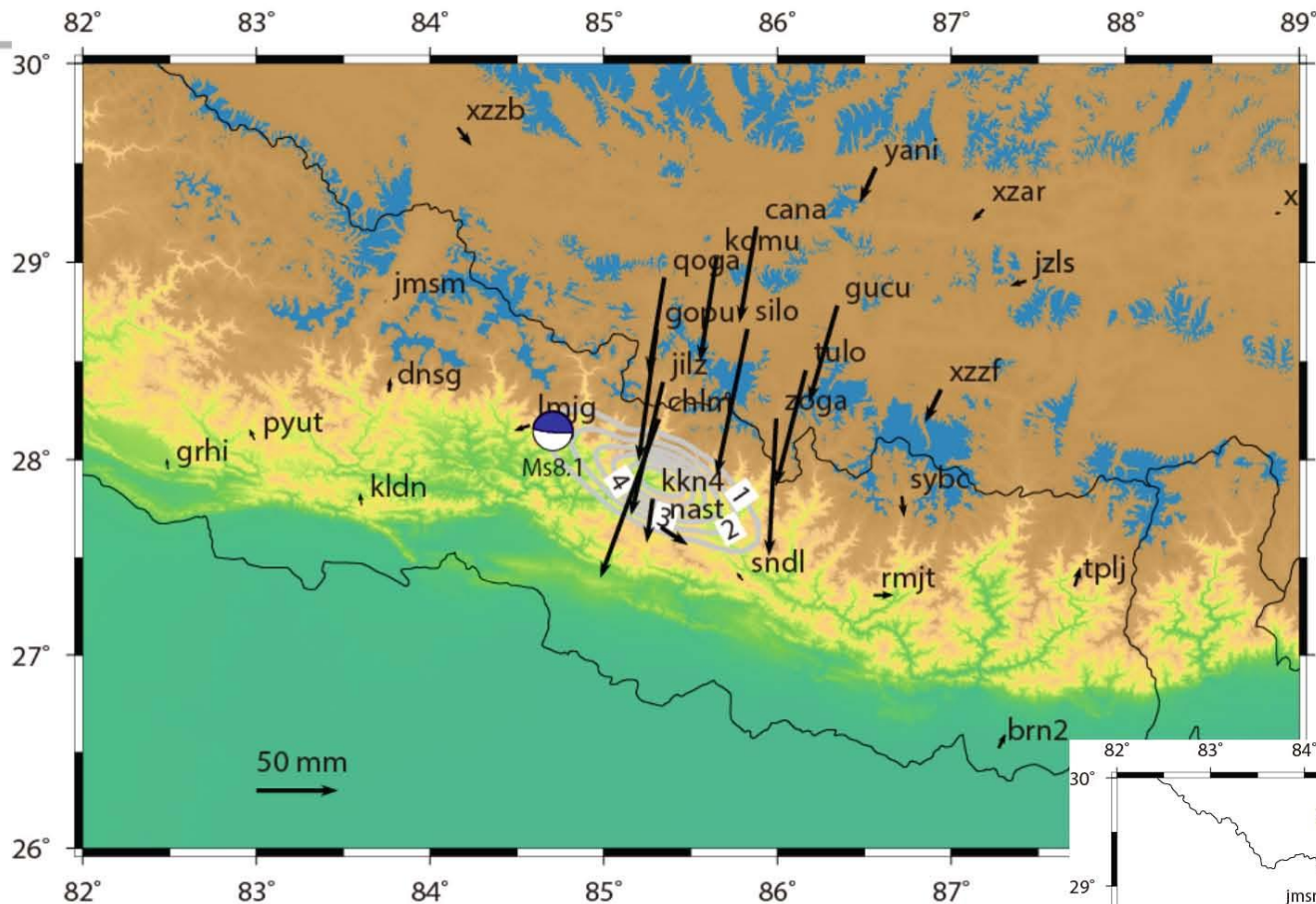
选择CHLM、NAST、KKN4等3个数据信噪比较高的测站，约束  
这些测站具有相同的特征时间，并与其他待求参数一并解算。



对数模型的特征时间为6.7天，指数模型的特征时间为320186.7天（876.623年）

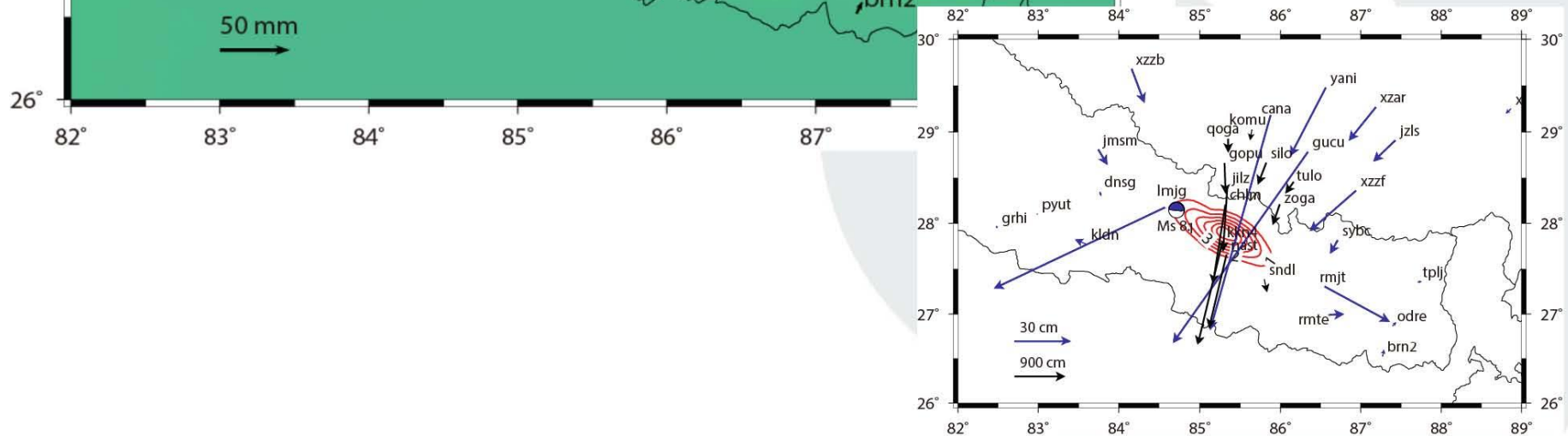
取剪切模量为30 GPa，得到等效粘滞系数为 $8.30 \times 10^{20} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

# GPS观测到尼泊尔地震两年后所积累的震后位移



EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

震后形变集中于中震中北部  
位移达到100mm  
与同震位移场基本一致

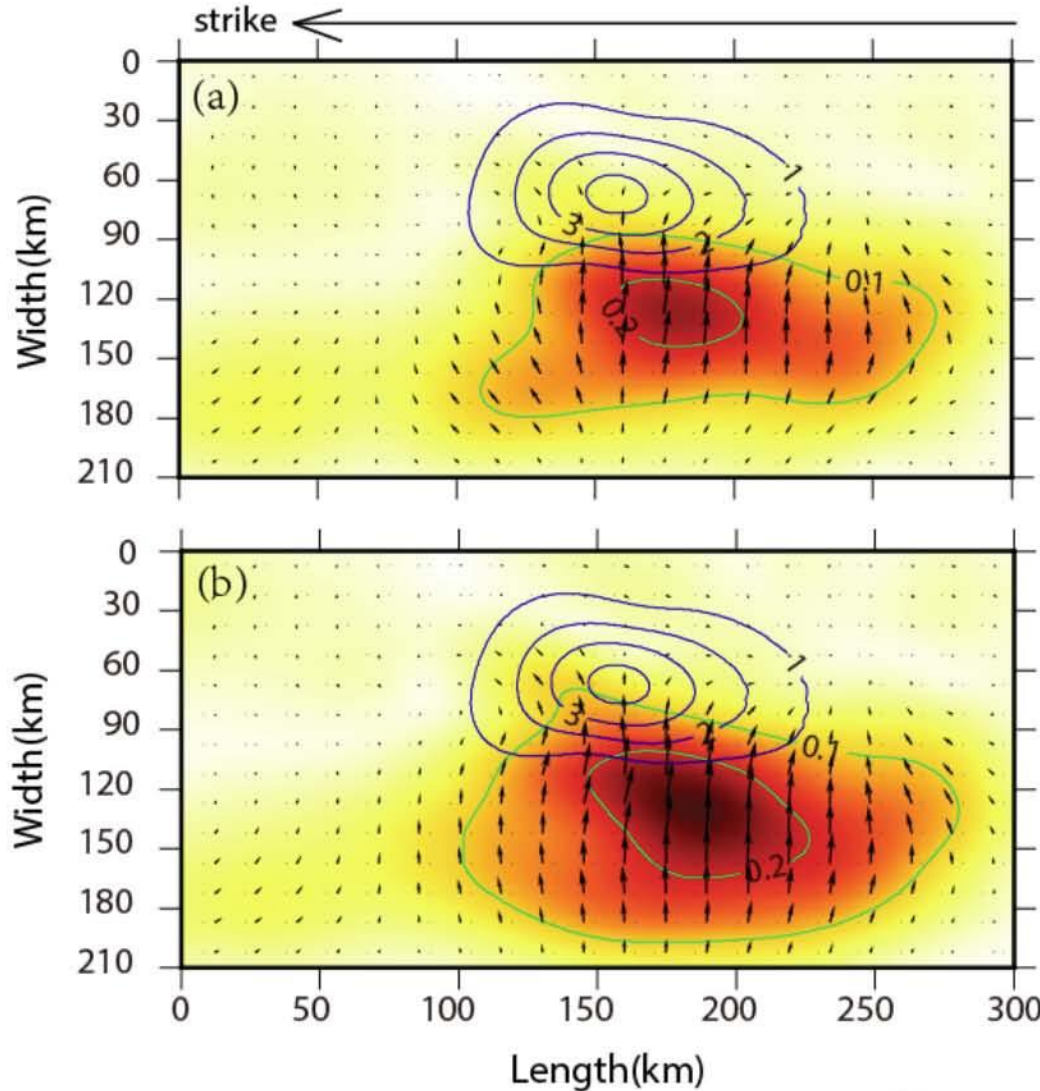


# 震后余滑模型



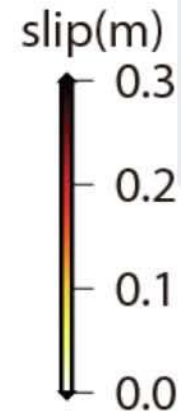
INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA

震后1年



1) 蓝色等值线为同震滑动分布

2) 红色为震后滑动分布

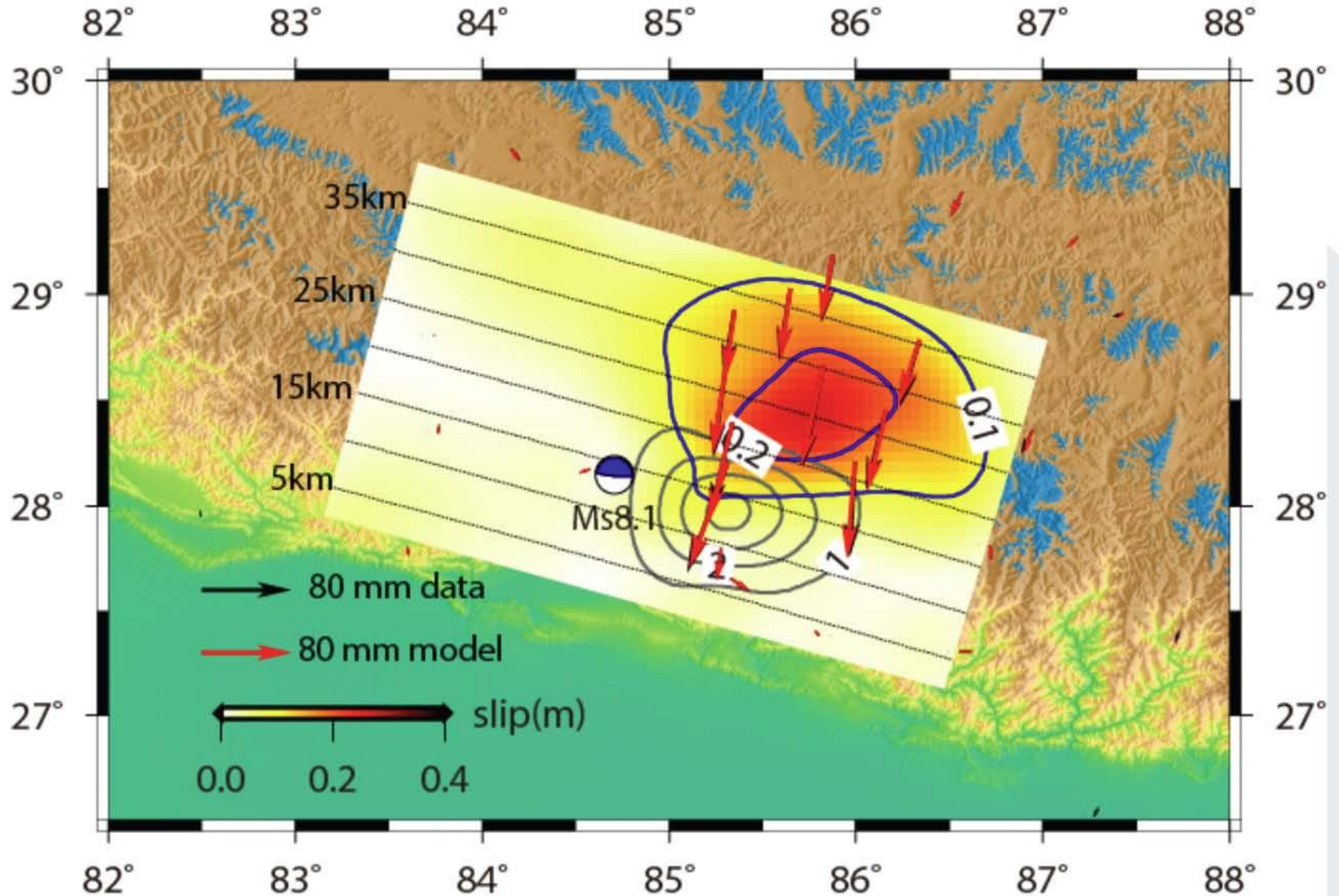


震后2年

# 震后余滑模型



INSTITUTE OF EARTHQUAKE FORECASTING, CEA



# 结论

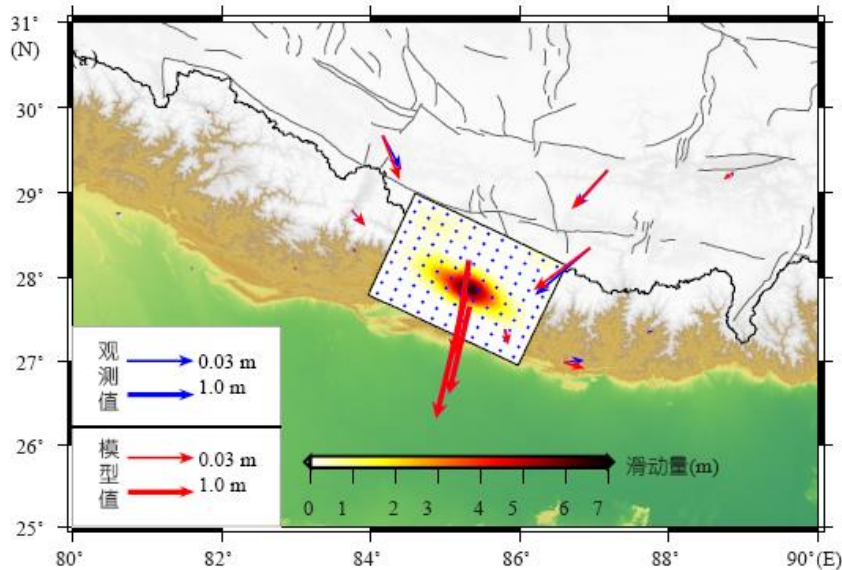
- 2015年尼泊尔发生在为铲型构造的强闭锁区，历史地震的破裂空段，震中区具有较高的应变积累；
- 中国境内GPS测站记录同震水平形变大致指向震中，垂直形变总体上表现为下降，推测尼2015年泊尔地震造成珠穆朗玛峰下降约为4 mm；
- 震源破裂在加德满都以北约25 km处达到最大，量值为6.84m；
- 震后余滑发生在同震破裂的下部，同震破裂西侧的破裂空段是地震危险性较高的区域。

谢谢

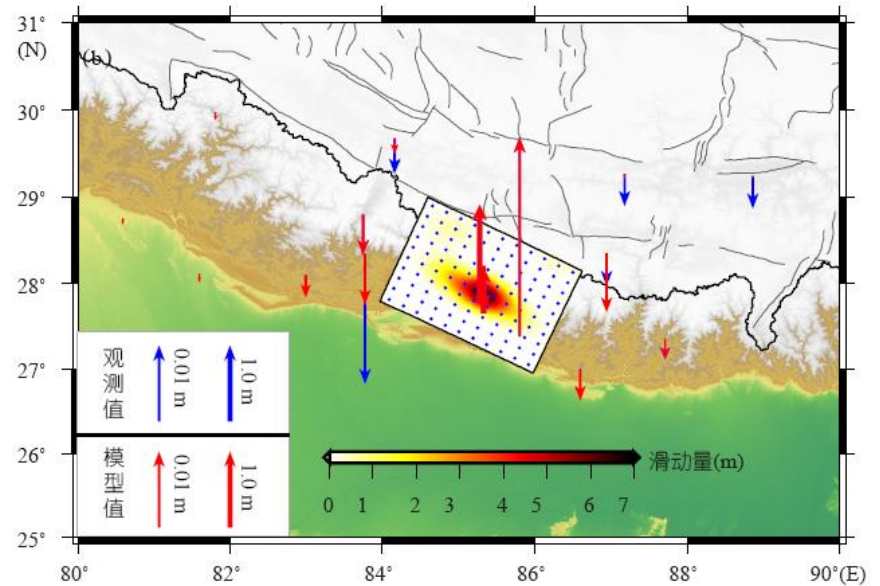
请批评指正



# 观测值与模型值对比



水平向同震位移



垂向同震位移

- 地表同震位移的模型值与观测值在水平和垂向分量都符合得很好，尤其是在同震位移较大的近场测站二者基本一致
- 同震位移较小的远场测站二者存在一定差异，其中最大差异出现在DNGD测站的垂向，量值为10.7 mm
- 反演的破裂滑动模型能较好解释GPS观测到的地表同震位移，但在垂向分量存在差异性，可能反映出局部的非弹性变形特征