



清华大学

Tsinghua University

# “亚洲水塔”之降水谜团

阳 坤

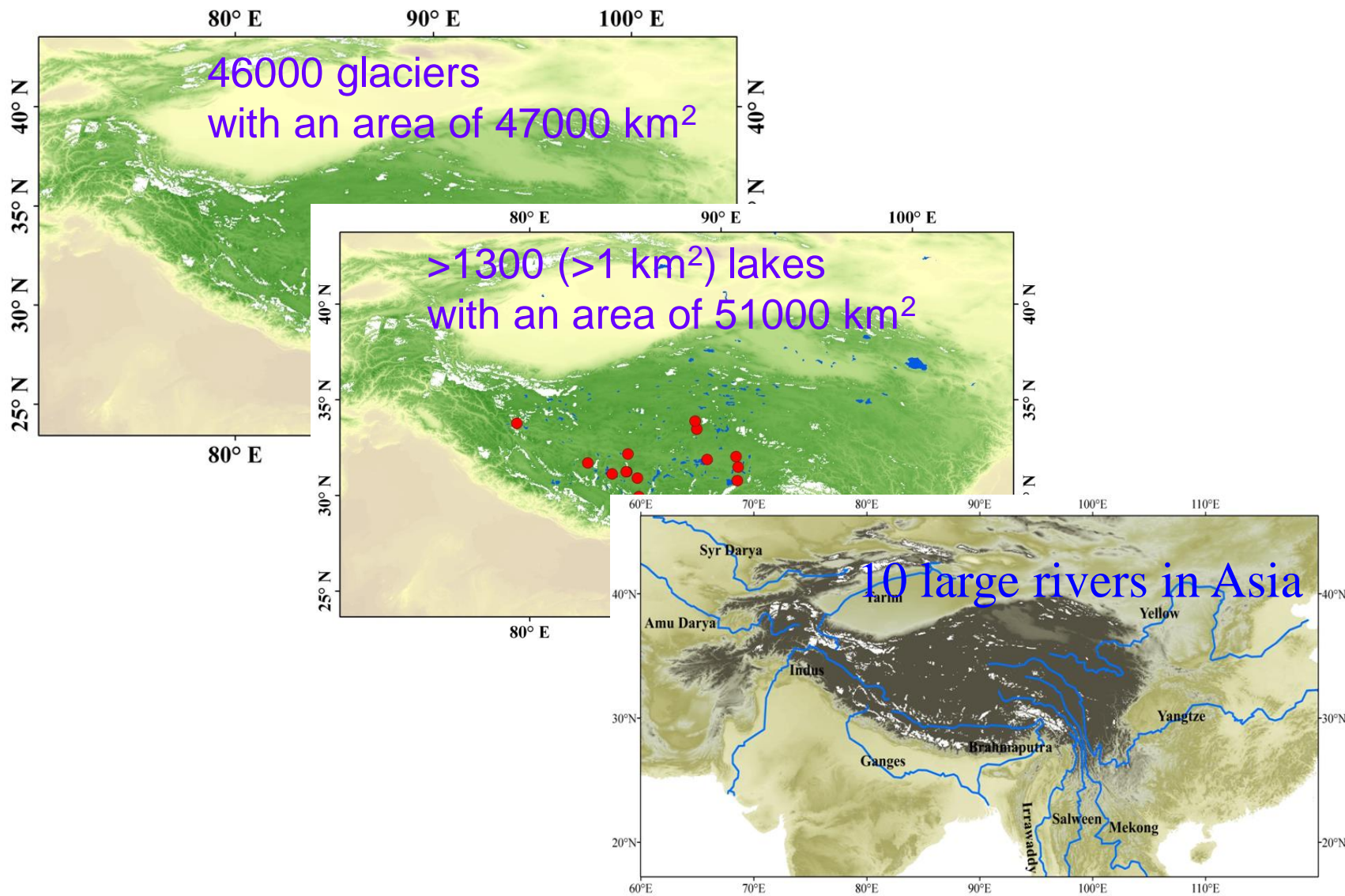
清华大学地球系统科学系

中科院青藏高原地球科学卓越中心

2020年5月19日

复旦大学

# “亚洲水塔” 基本状况





杨坤好! 有个问题请教: 第三极地区明年的降水量总和有没有估计吗? 是多少立方公里?



有参考文献最好, 多谢了 🙏🙏

2019年11月15日 下午14:30

我没有看到过, 可能是不确定性太大了, 不敢给数据吧



给出来怕挨骂



2019年11月15日 下午14:32



哇哈哈哈哈



用用再分析资料可以做呀?



这应该是你们搞大气的去做 😊



青藏高原总降水量估计在 15000 亿吨以上

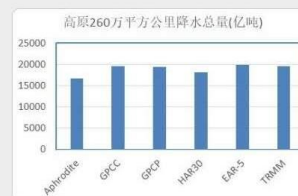


2019年11月16日 上午09:29



谢谢 🙏🙏

你撤回了一条消息



🙏🙏🙏🙏



有参考文献吗? 学习一下, 谢谢

刚算出来的



2019年11月16日 上午09:42



🙏🙏🙏



期待大作

不敢发表



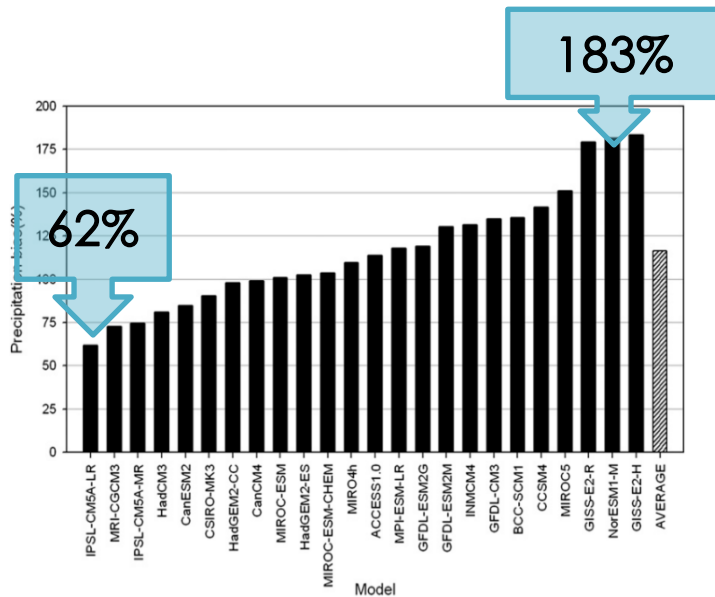


# 报告提纲

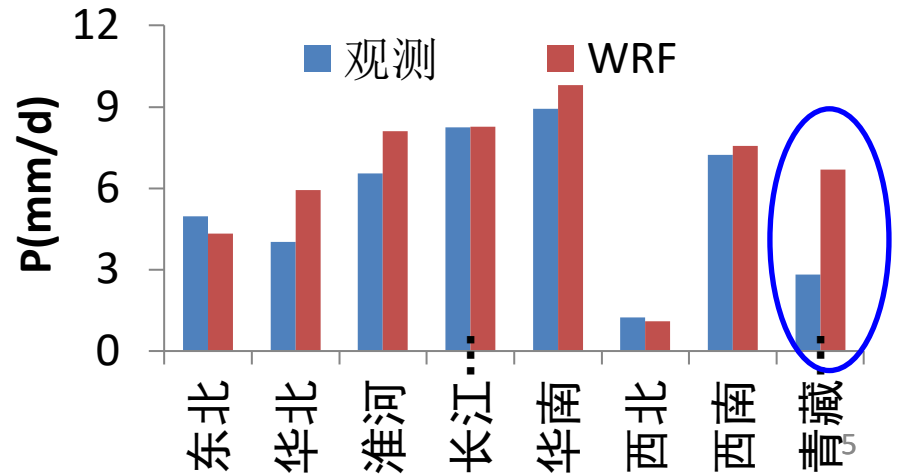
- “亚洲水塔”研究的挑战性问题
- 青藏高原降水格局的观测与分析
- 区域气象模式中复杂地形的处理
- 青藏科考降水研究计划

# 全球/区域气候模型严重高估高原降水

## 全球模型的湿偏差



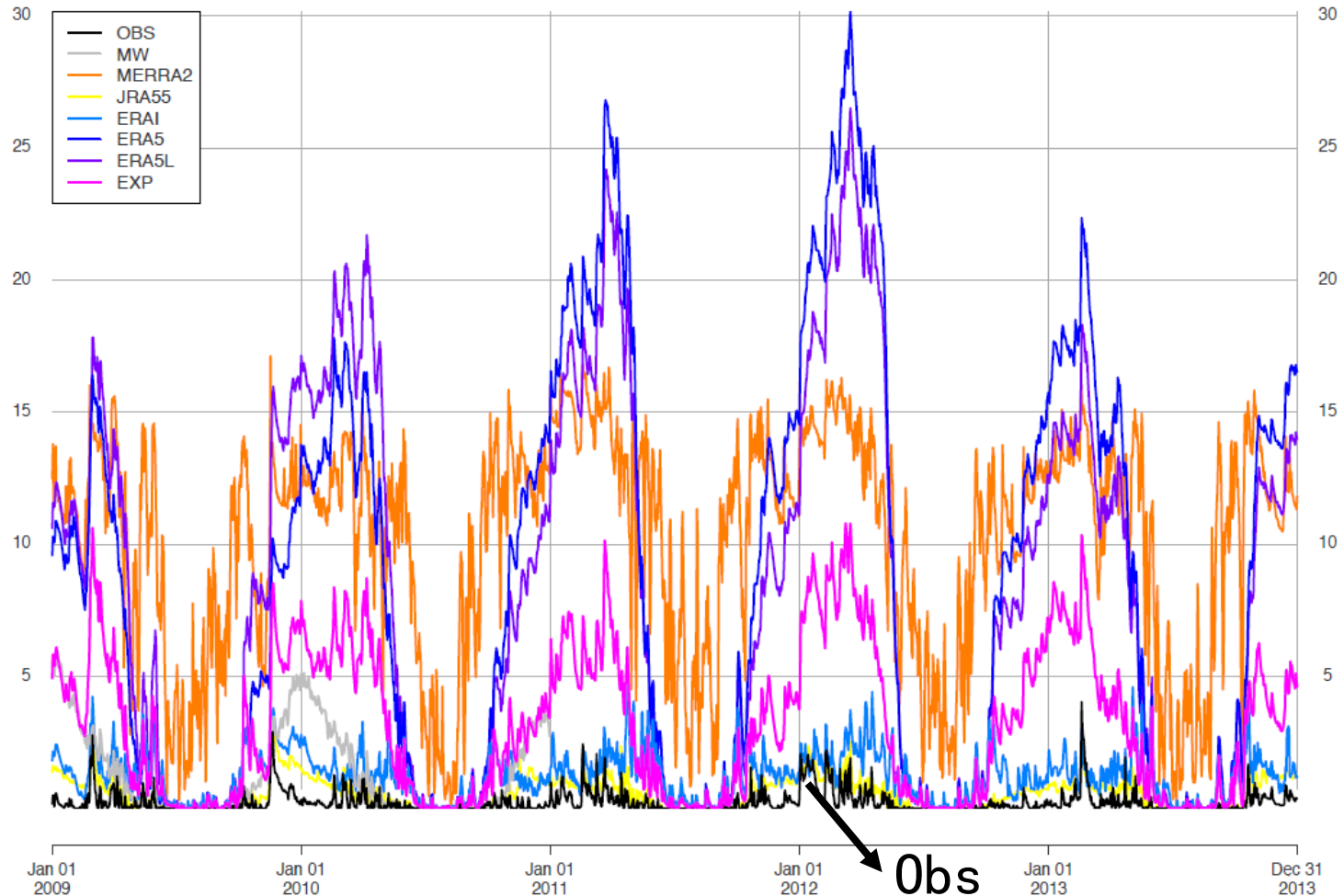
## WRF的湿偏差



(Su Fengge et al., 2013, Flato et al., 2013; Mueller & Seneviratne, 2014)

(Ma Jiehua et al., 2015; Gao Yanhong et al., 2015)

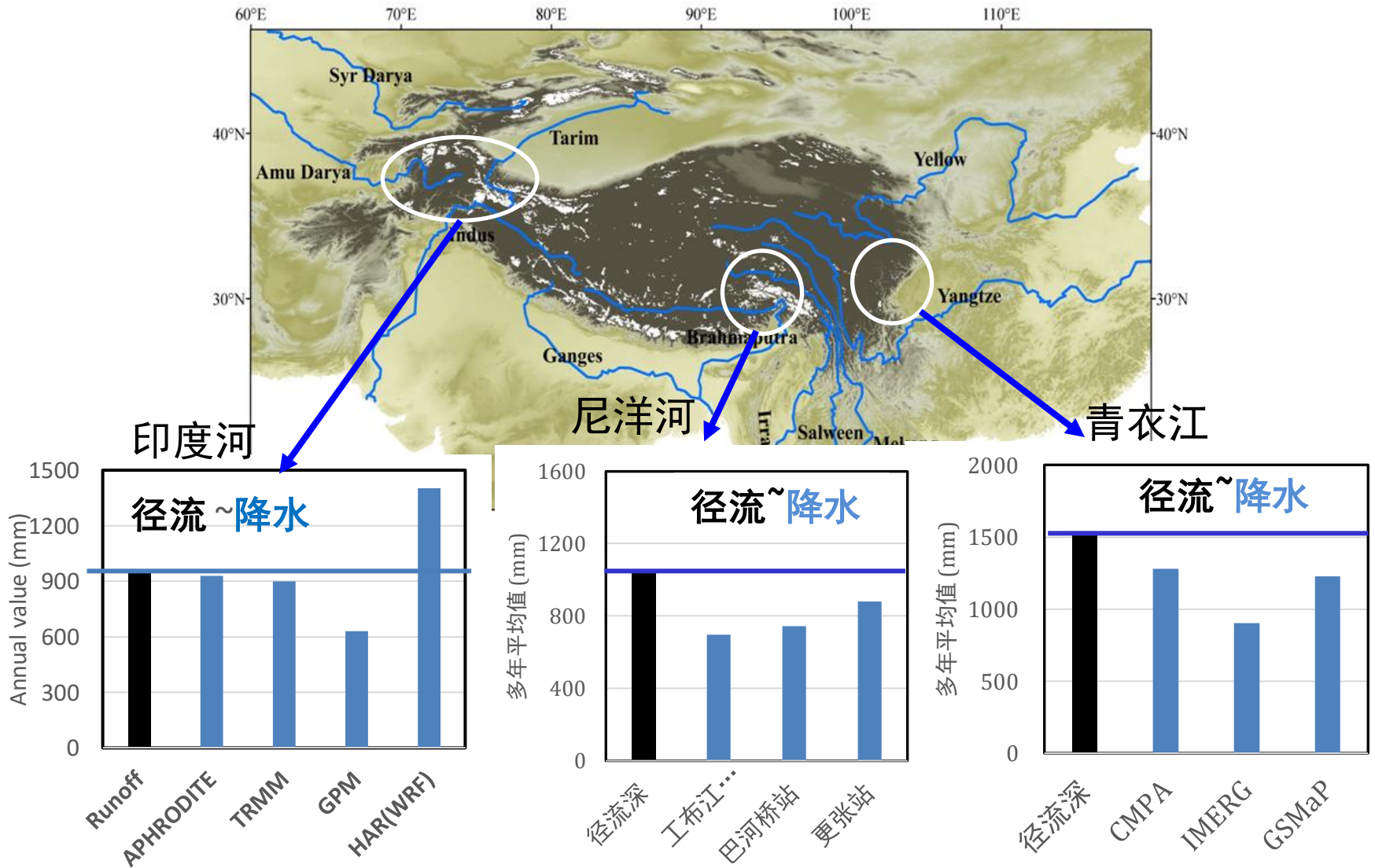
# 冬季积雪模拟严重偏多



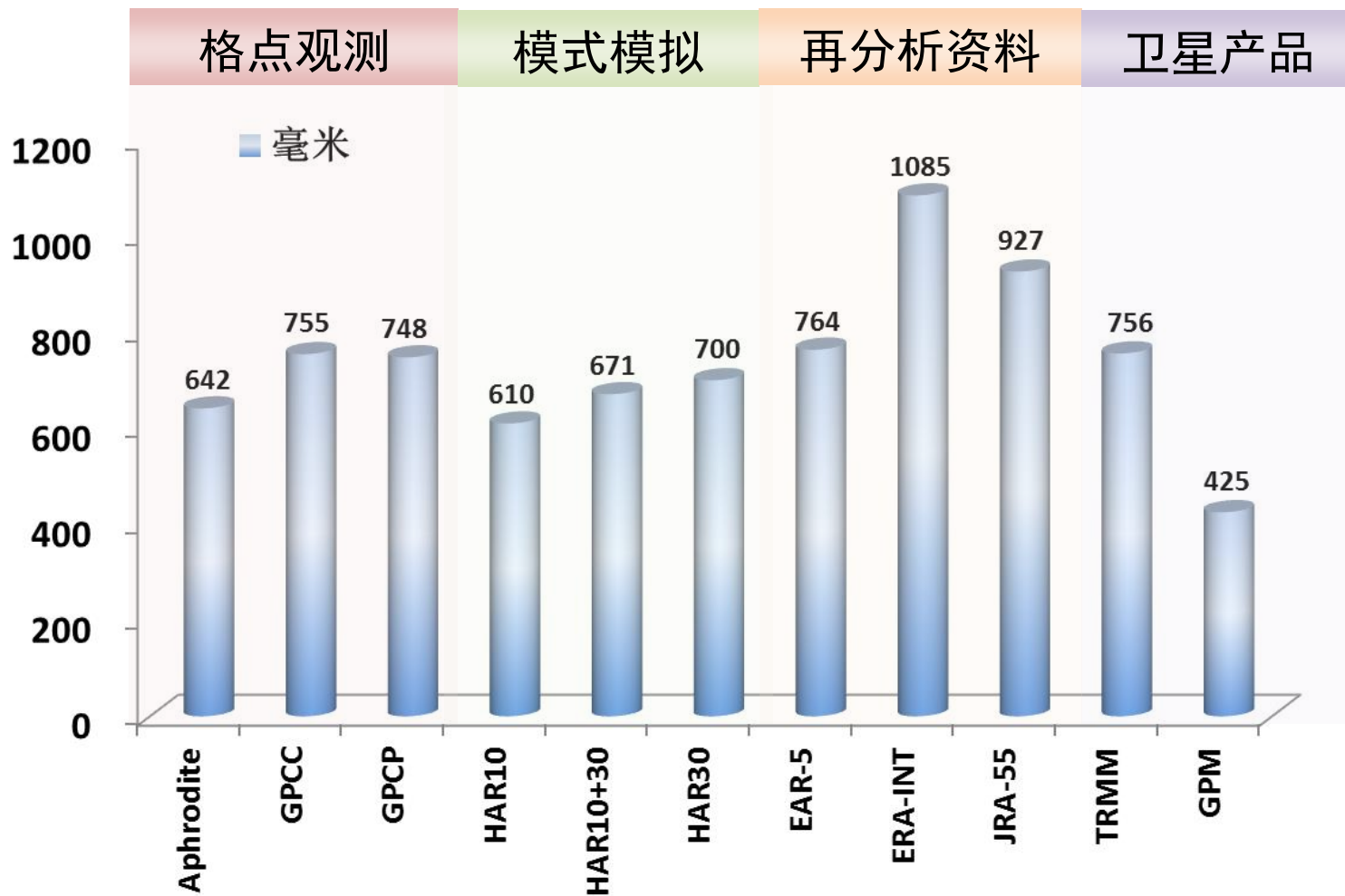
ERA-INT ERA-5 OBS:station data MERRA2 JRA55

(Yvan Orsolini et al., 2019, The Cryosphere)

# 很多山区流域水量不平衡 观测径流深 > “观测” 格点降水



(未发表材料, 请勿使用)



2001 - 2013年青藏高原海拔2500米以上区域的年平均降水量 (mm)

不同资料中相对可信资料反映的高原年降水量的量级相近，约为730mm (2.4万亿吨) (除ERA-Interim及GPM外)。

(未发表材料，请勿使用)

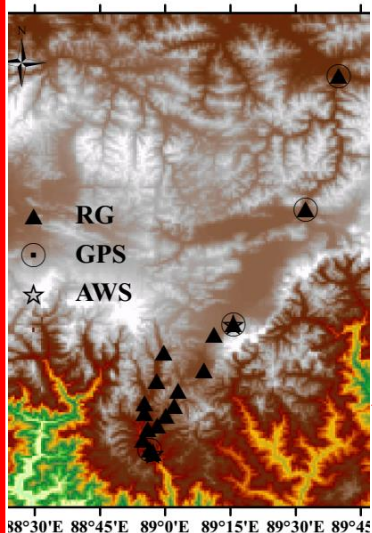


# 报告提纲

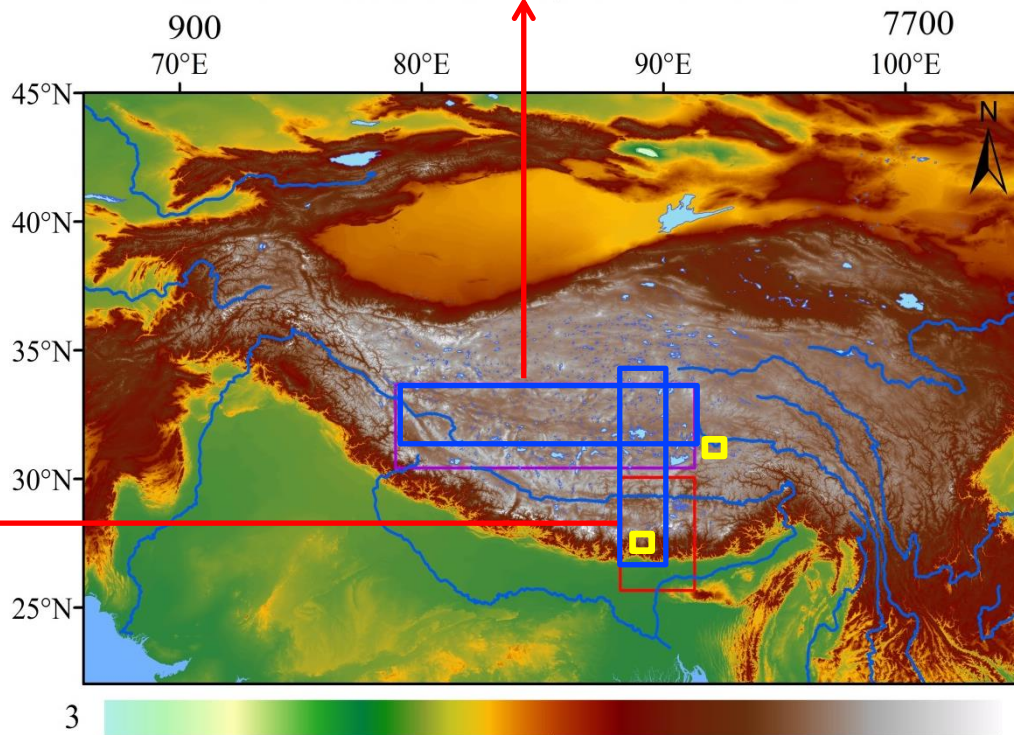
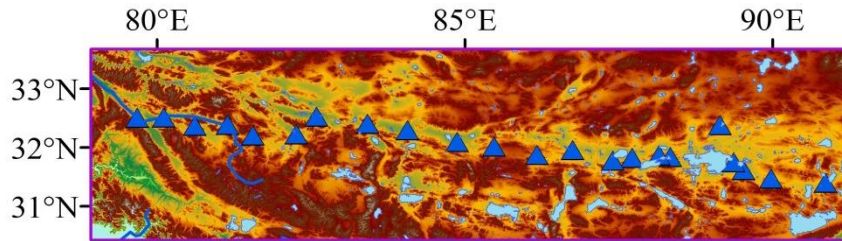
- “亚洲水塔”研究的挑战性问题
- 青藏高原降水格局的观测与分析
- 区域气象模式中复杂地形的处理
- 青藏科考降水研究计划

# 青藏高原南北断面和东西断面降水观测站

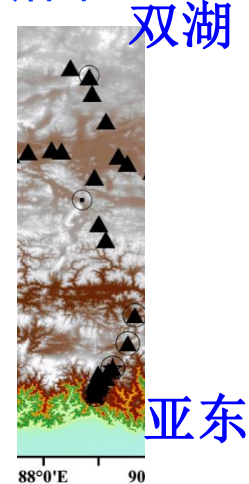
亚东河谷的水文气象观测



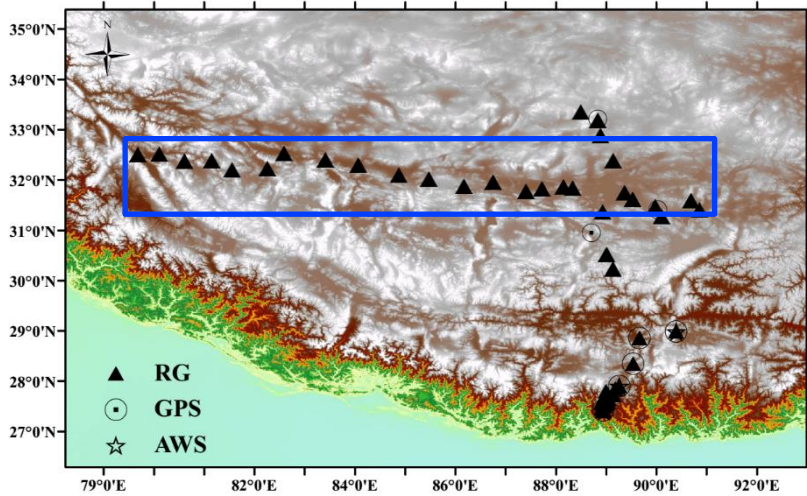
狮泉河-那曲降雨观测东西断面



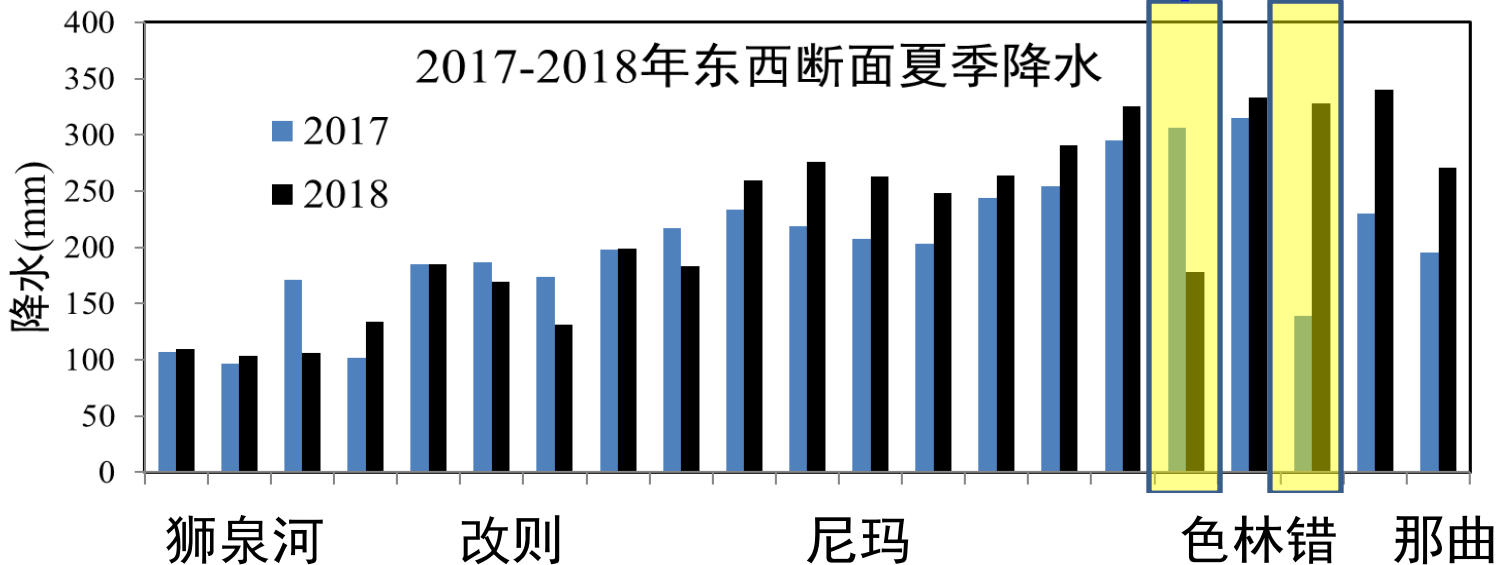
亚东-双湖降水和水汽观测南北断面



# 东西断面观测显示降水从西到东逐步增加， 但在大湖边出现剧烈年际振荡

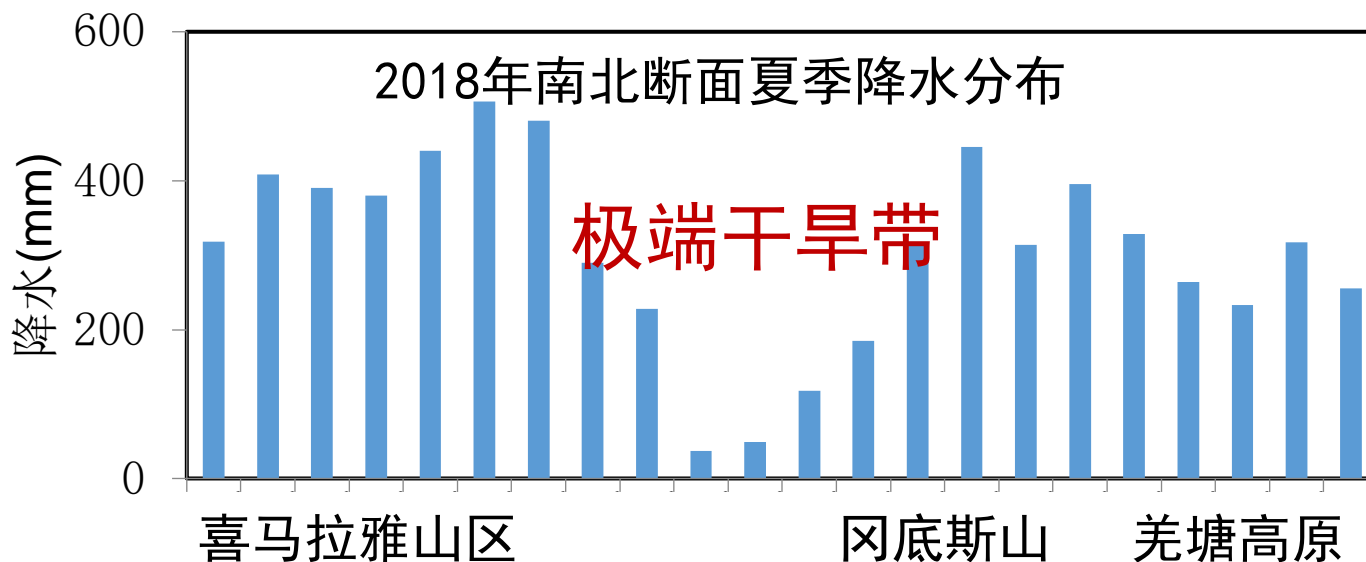
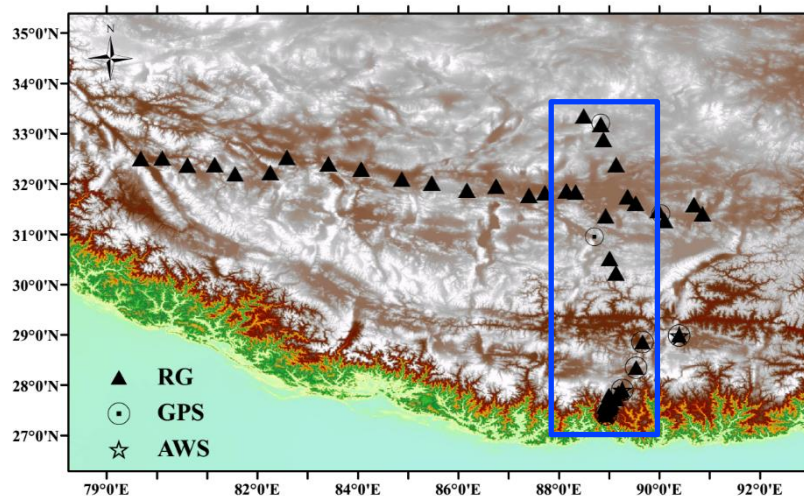


降水	湖泊西侧	湖泊东侧
2017	306	139
2018	178	328



(未发表材料，请勿使用)

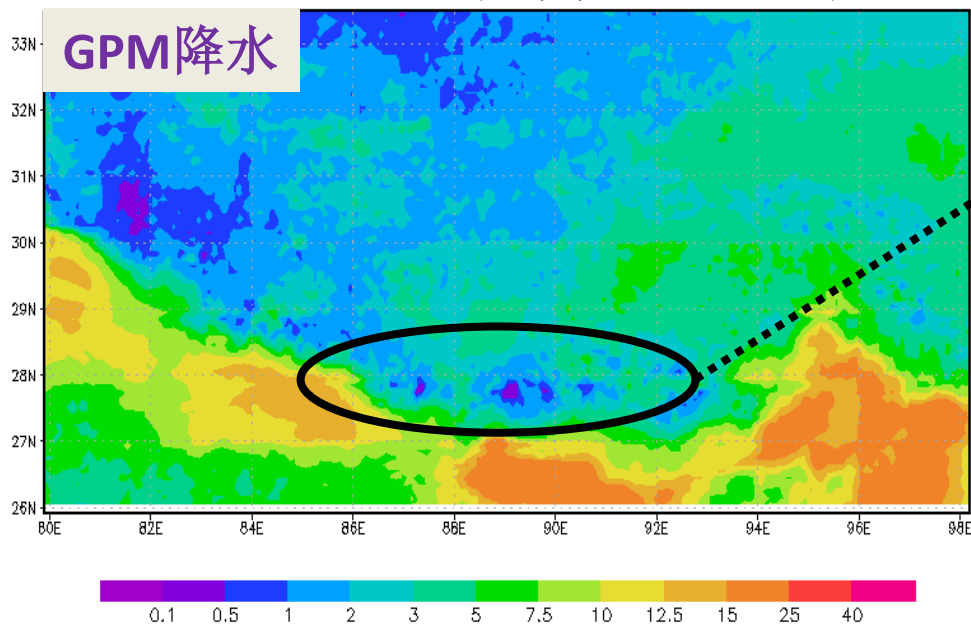
# 南北断面降水观测站显示双峰双谷，特别是在喜马拉雅山区北侧形成极端干旱带



(未发表材料，请勿使用)



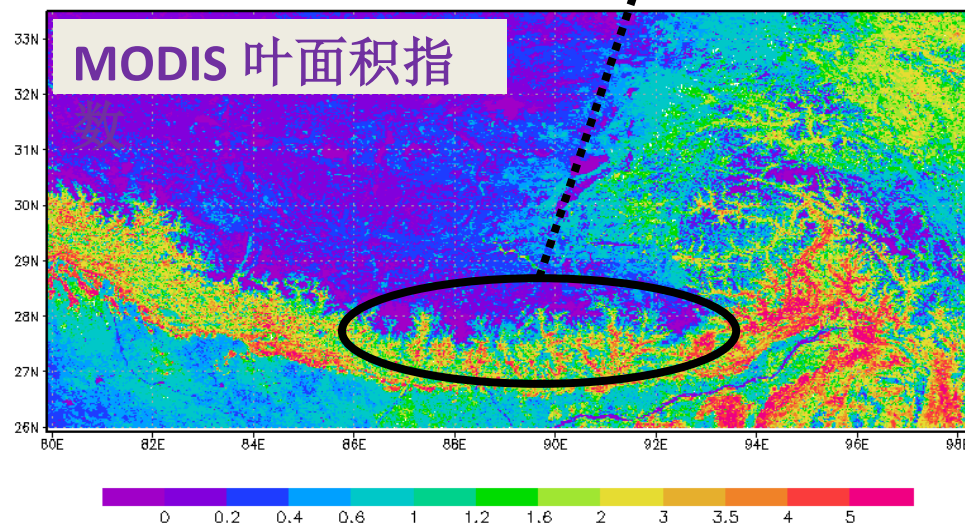
# 喜马拉雅山北坡干旱带形成机理



喜马拉雅山北坡存在明显的“少雨带”

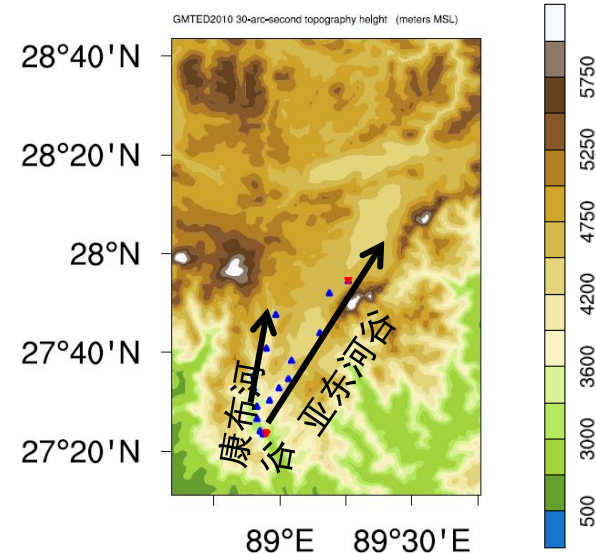
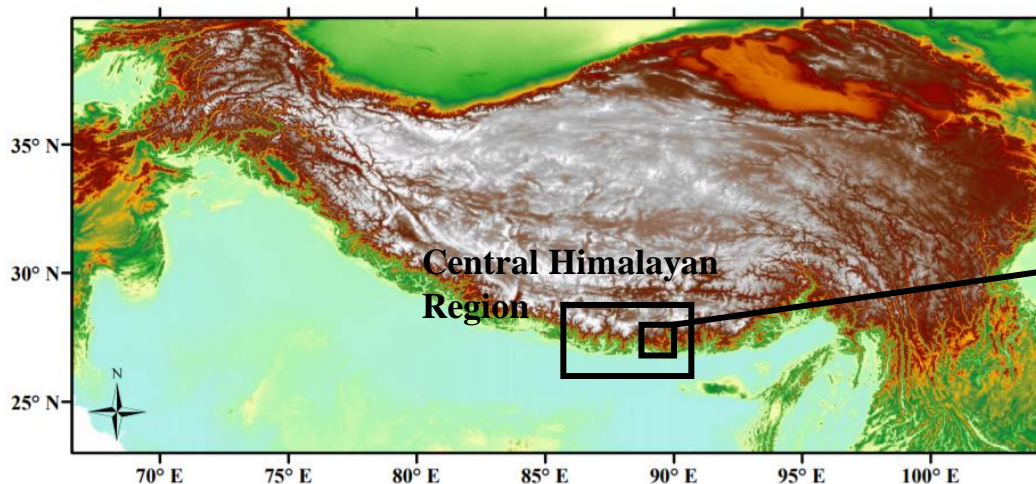
对环境生态有很大影响

背风坡焚风效应不改变降水量，但推迟降水日变化峰值

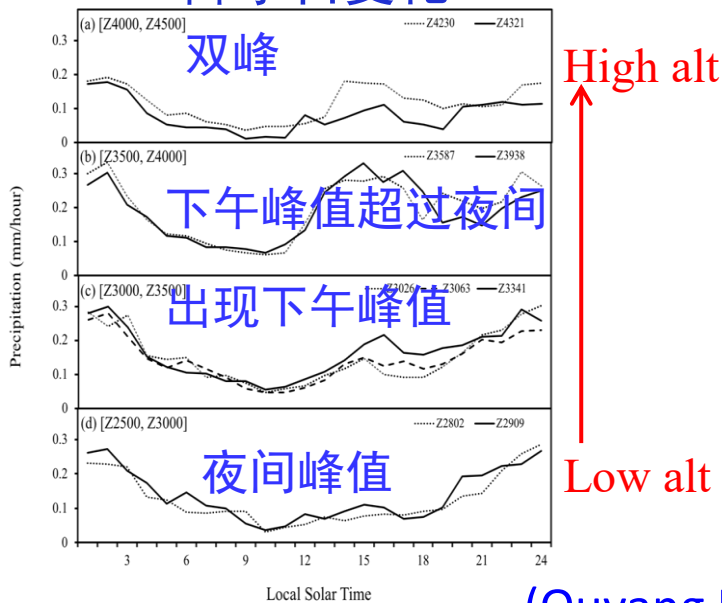




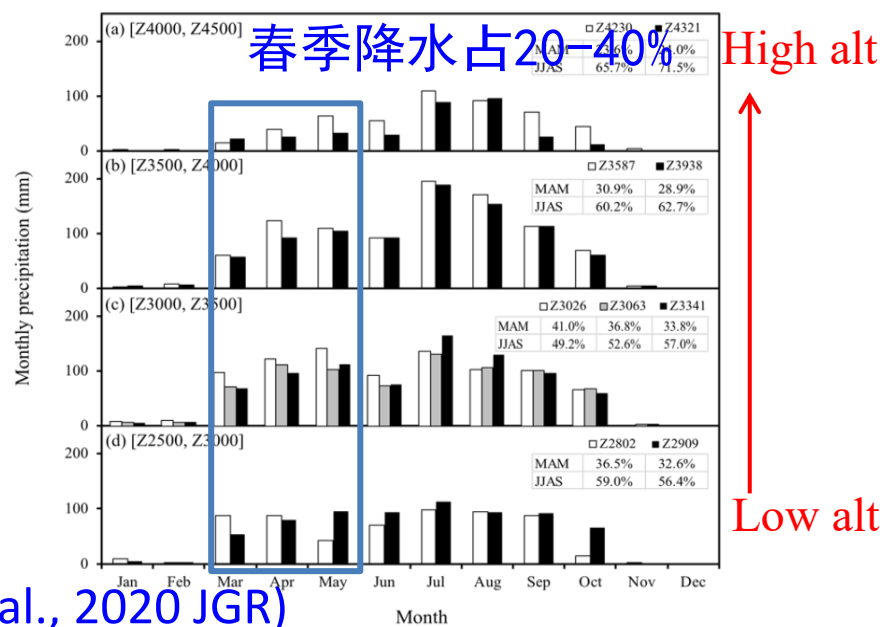
# 喜马拉雅中部河谷降水日变化出现双峰，春季降水比例高达20-40%



## 降水日变化



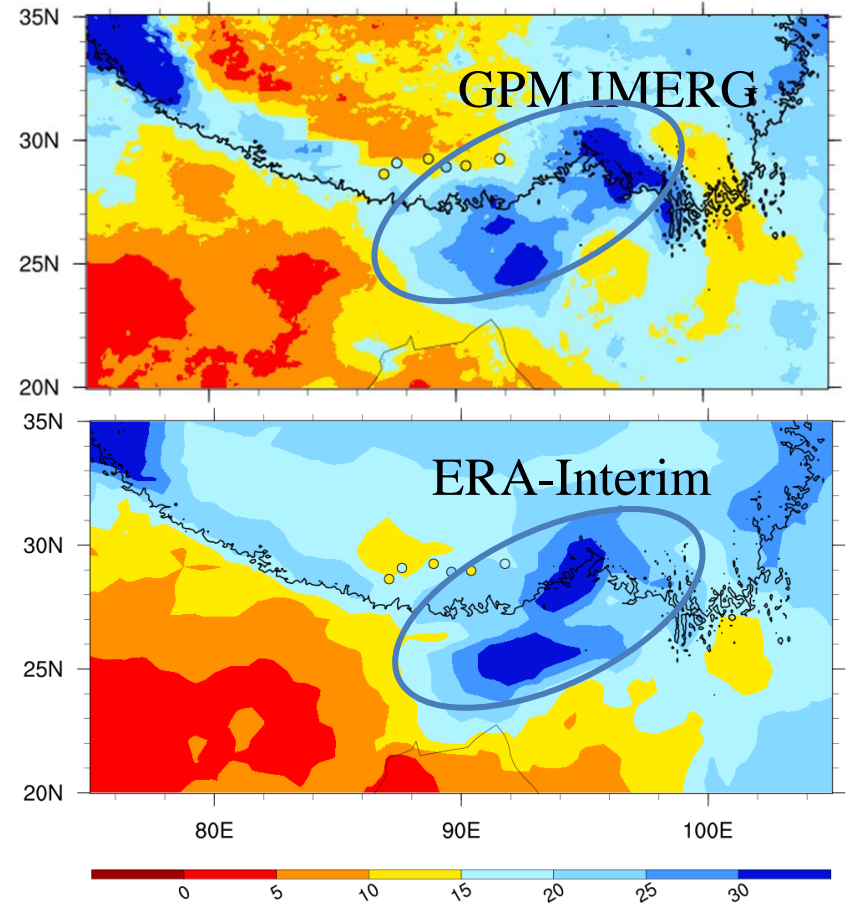
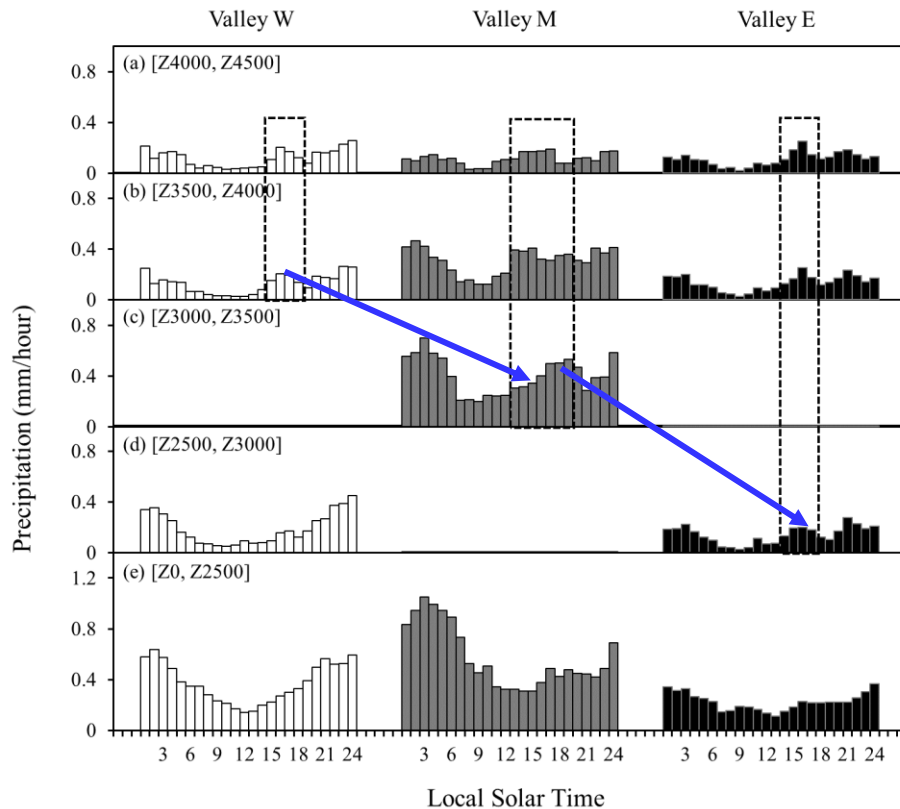
## 降水季节变化



(Ouyang Lin et al., 2020 JGR)

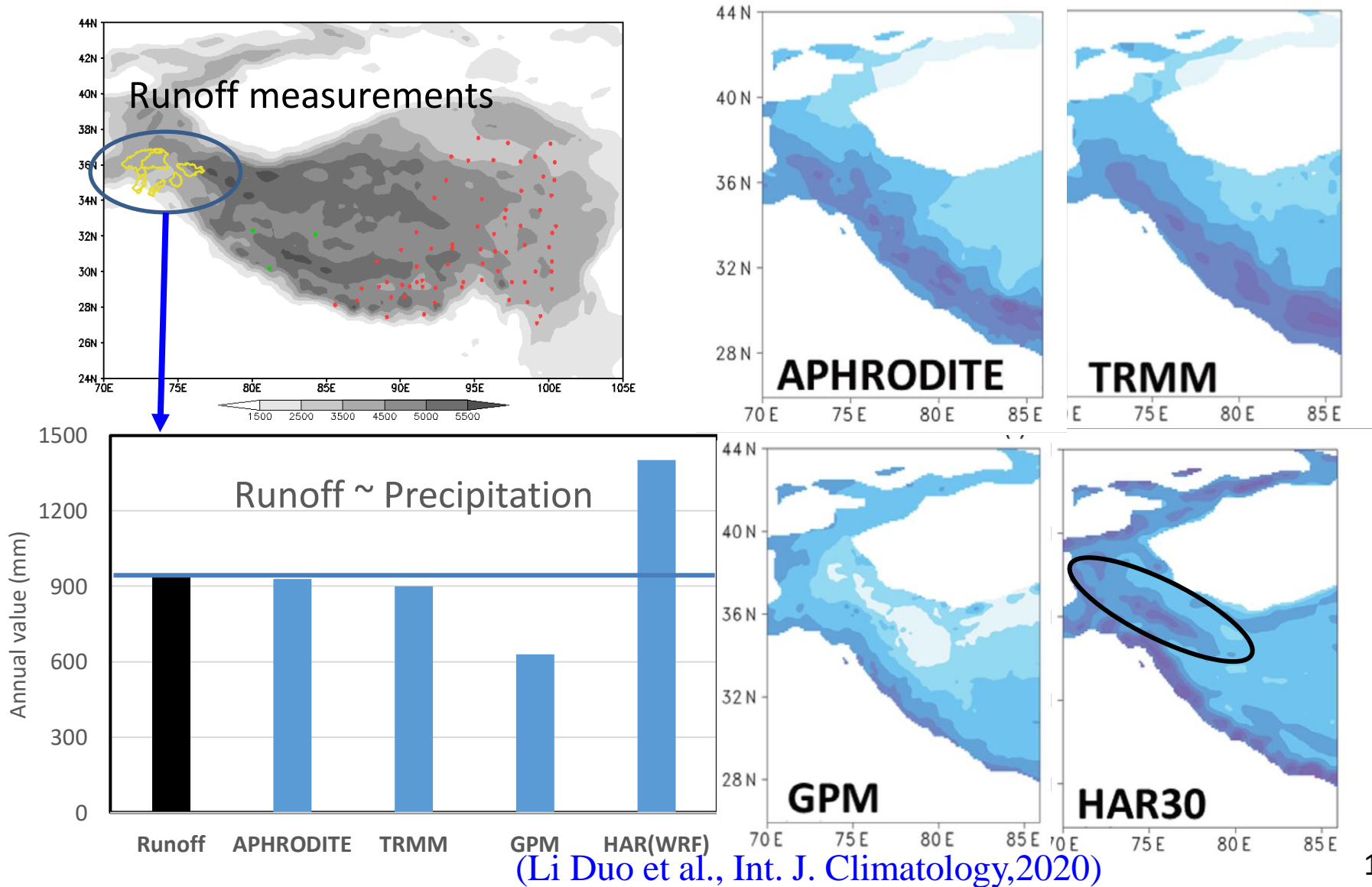
# 根据GPM降水，从喜马拉雅中部到藏东南，日变化双峰和高春季降水占比是一个普遍现象

## 喜马拉雅山区中部的三条河谷

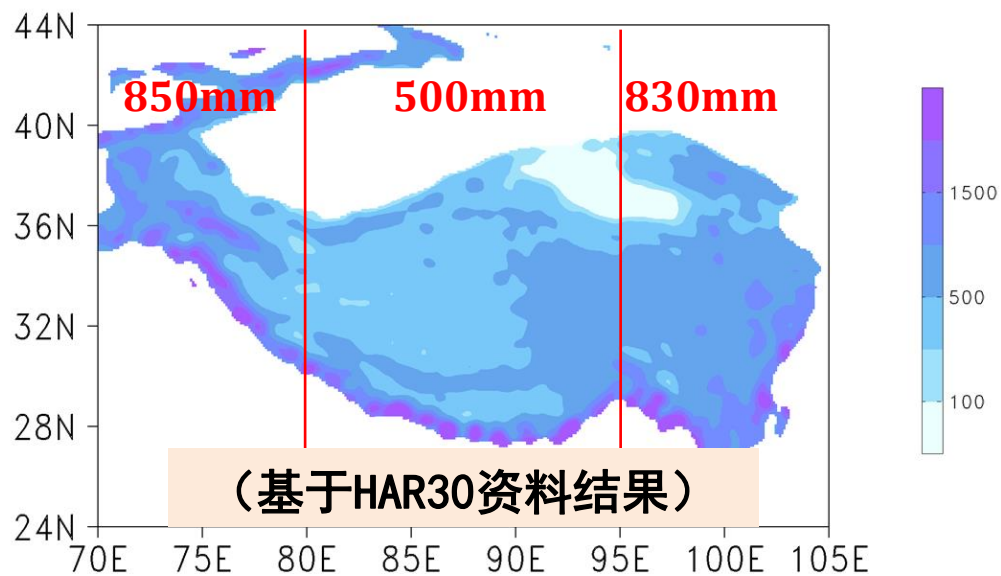
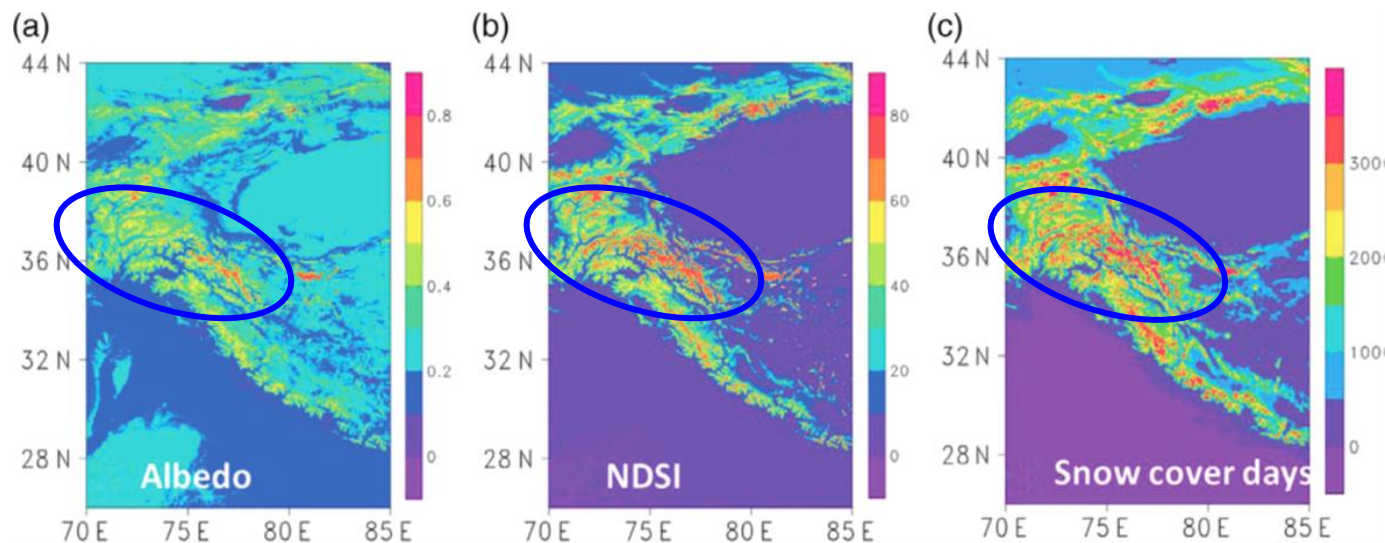


越往东，降水双峰出现的海拔越低

# 高原西部的降水量：多数遥感和站点产品给出的降水量小于观测径流



# 青藏高原西部降水量(冬春季降雪为主)与东部相当, 远多于中部降水



(Li Duo et al., IJoC, 2020)

# 降水时空格局小结

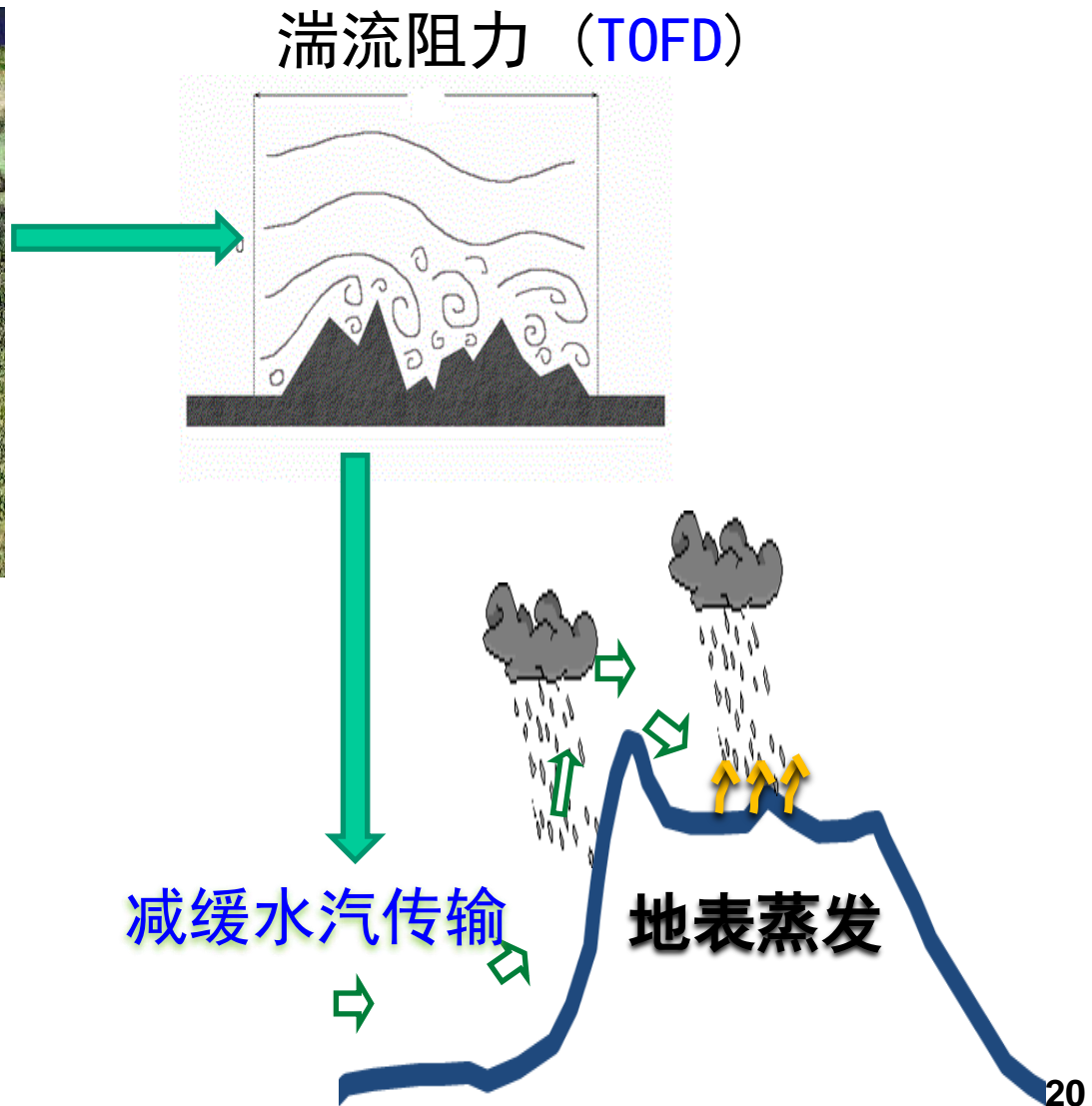
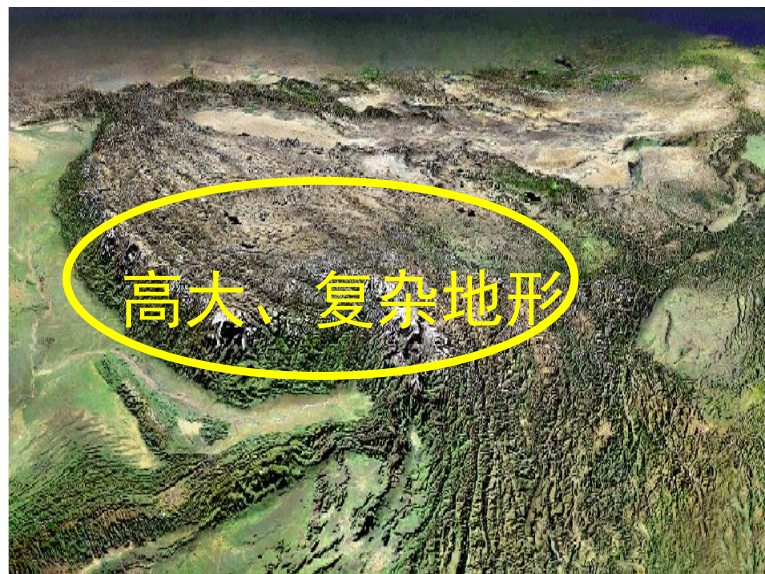
- 高原中部南北断面降水观测站显示双峰双谷，特别是在喜马拉雅山区北侧存在极端干旱带
- 从喜马拉雅中部到藏东南，降水日变化存在下午和夜间峰值；春季降水量相当可观。这些发现对于理解该地区冰雪过程极为重要
- 青藏高原西部以冬春季降雪为主，年降水量与东部相当，而远多于高原中部



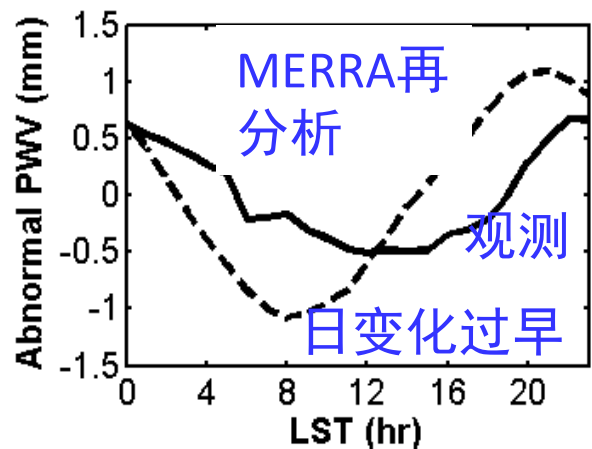
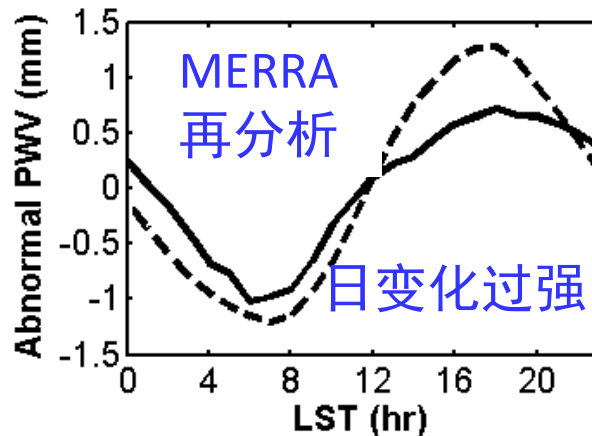
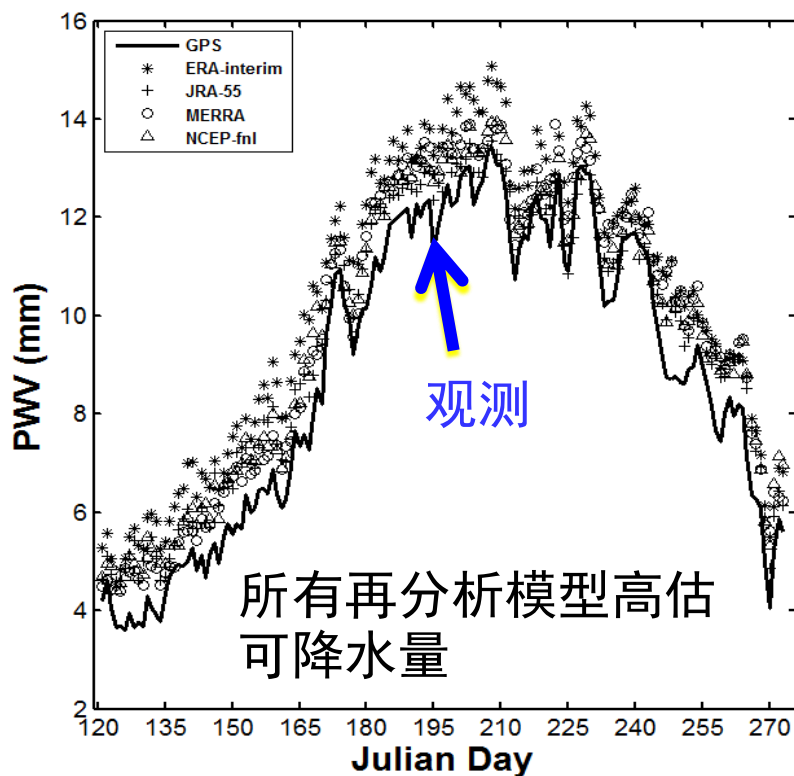
# 报告提纲

- “亚洲水塔”研究的挑战性问题
- 青藏高原降水格局的观测与分析
- 区域气象模式中复杂地形的处理
- 青藏科考降水研究计划

**假设：**高原周边地形复杂，通过湍流阻力减弱水汽向高原的输送。高分辨率模式能表达高大地形的影响，但并没有表达复杂地形的影响，导致了过多水汽输送到高原，形成过多降水



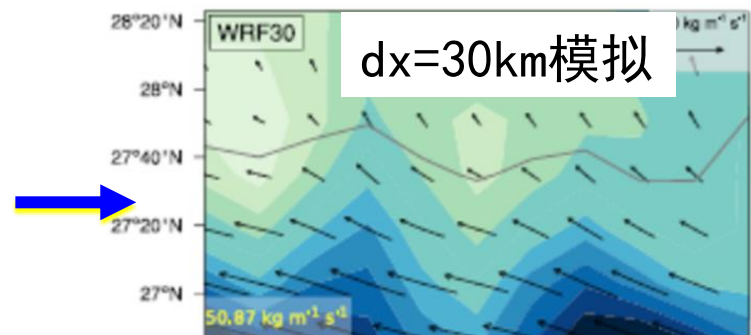
# GPS观测水汽与模型再分析资料对比显示：所有再分析模型(没有考虑复杂地形)高估了高原南部可降水量，且日变化峰值过早过强



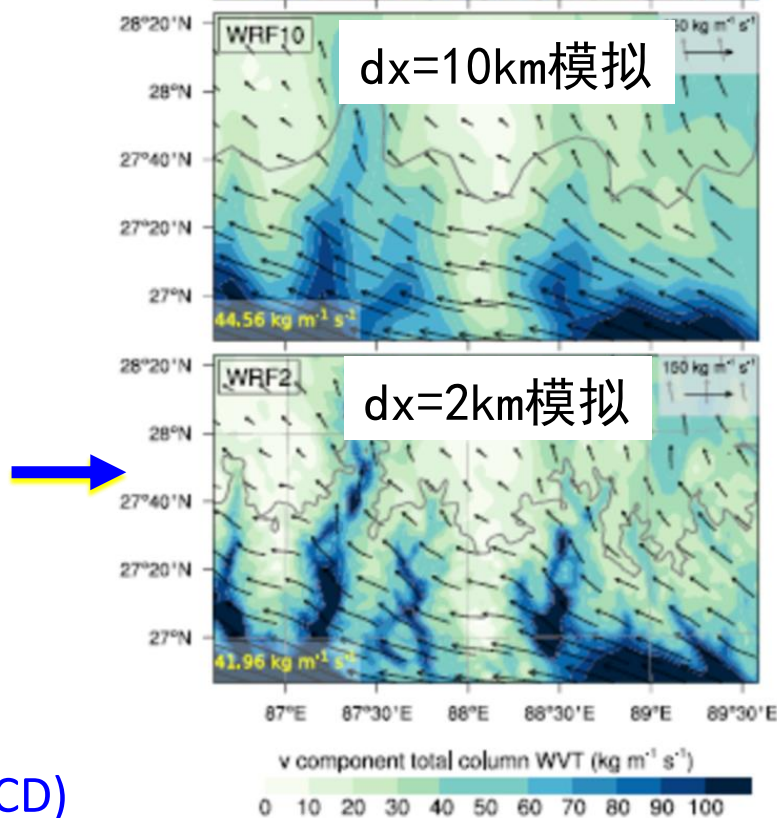
(Wang Yan et al., 2017, JC)

# 模拟的从南亚进入高原的水汽通量依赖于分辨率

- 粗分辨率(30km)模拟的风速很强，导致大量水汽进入高原



- 高分辨率(2km)模拟的风速明显减小，水汽主要从河谷进入高原



(Lin Changgui et al., 2018, CD)

# 引入新的次网格地形湍流参数化方案

## Turbulent scale (<5km) orographic form drag (TOFD)

- Original in WRF(Jimenez and Dudhia, 2012)(JD12)
  - The TOFD exerts on the surface layer
- New scheme in WRF (Beljaars et al., 2004 )(BBW)
  - The TOFD directly exerts on all layers

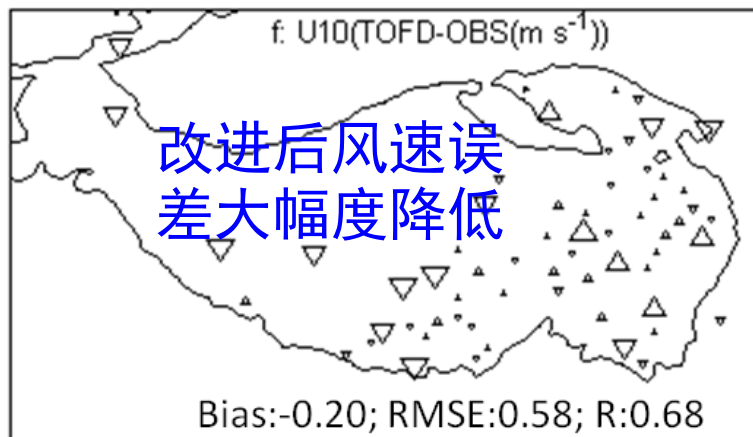
$$\text{BBM scheme} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_x}{\rho} \right) = -C |U(z)| u(z) \exp \left[ - \left( \frac{z}{1500} \right)^{1.5} \right] z^{-1.2} f(\sigma_{flt}) \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_y}{\rho} \right) = -C |U(z)| v(z) \exp \left[ - \left( \frac{z}{1500} \right)^{1.5} \right] z^{-1.2} f(\sigma_{flt}) \end{array} \right.$$

(Zhou Xu et al., 2018, CD)

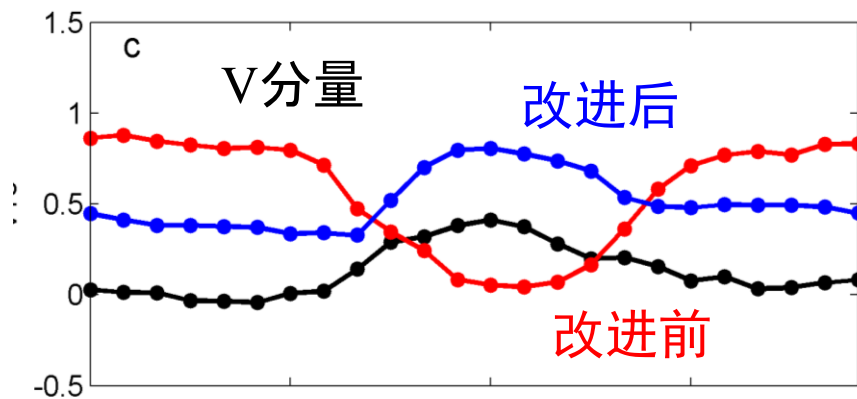
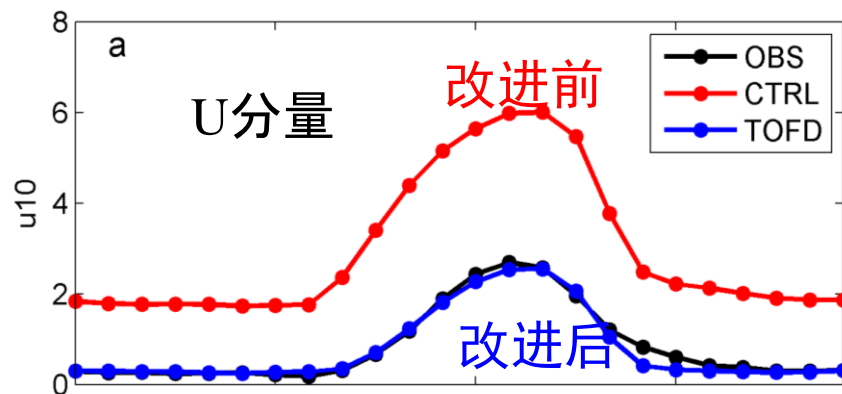


# 粗分辨率模式中引入次网格复杂地形参数化方案，大大减小了高原上中低空风速的模拟误差

## 对风速大小的改进



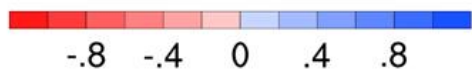
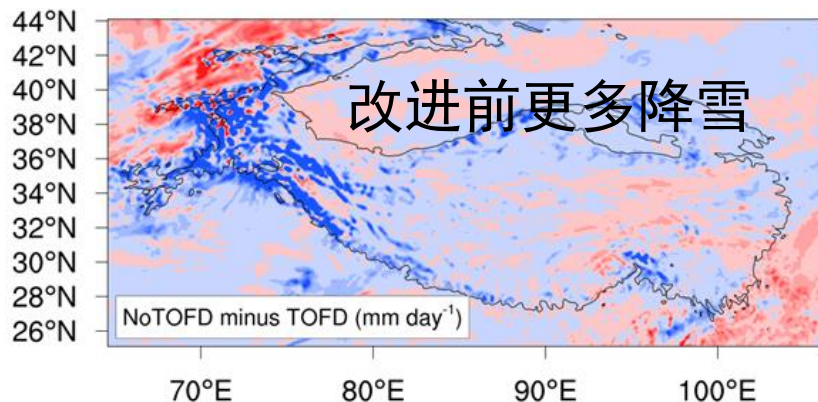
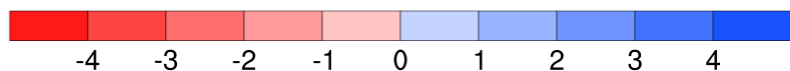
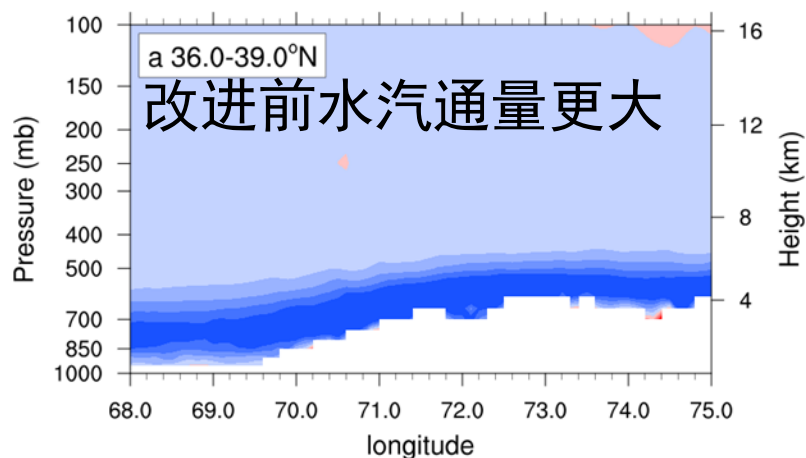
## 对风速日变化的改进



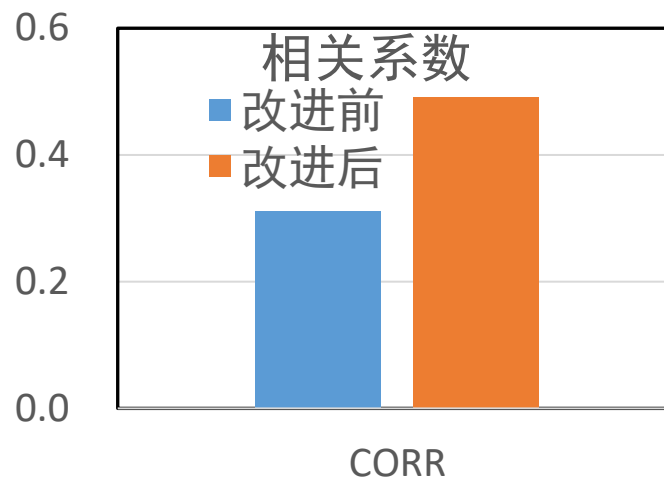
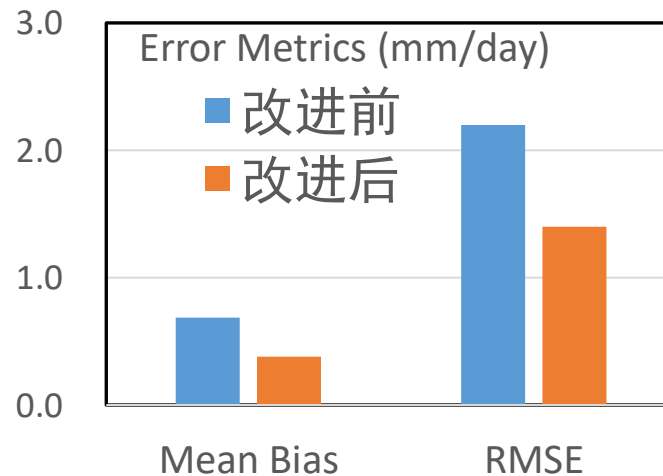
(Zhou et al., 2019, CD)

# TOFD参数化方案对高原西部水汽输送和降水模拟的影响

(改进前 - 改进后)



降水误差评估



# 喜马拉雅山区降水模拟：TOFD+高分辨率

## Model setup

### Simulation period :

Spin up: 2018.7.19-2018.7.20

Result: 2018.7.21-2018.8.10

Atmosphere forcing: ERA-Interim

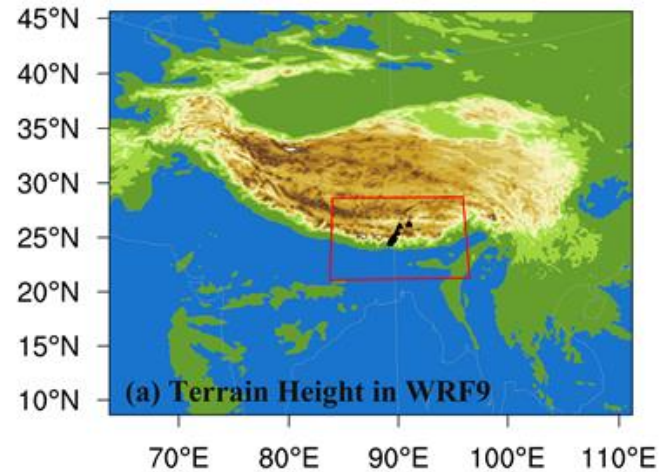
Land surface scheme: Noah-LSM

### Simulations:

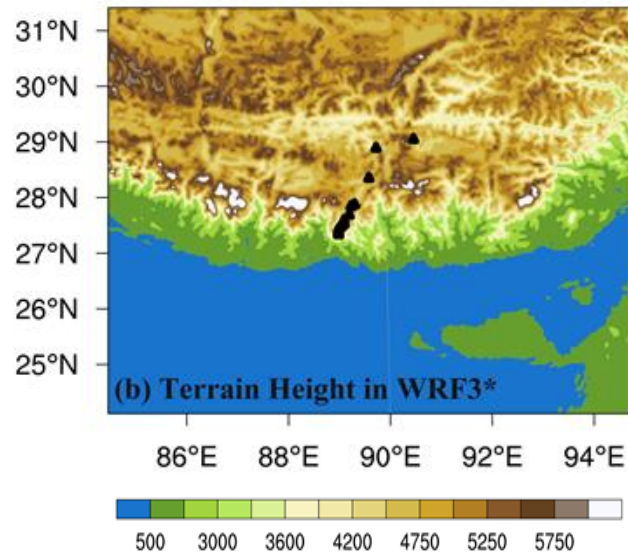
WRF10km

WRF3km

WRF3km+TOFD

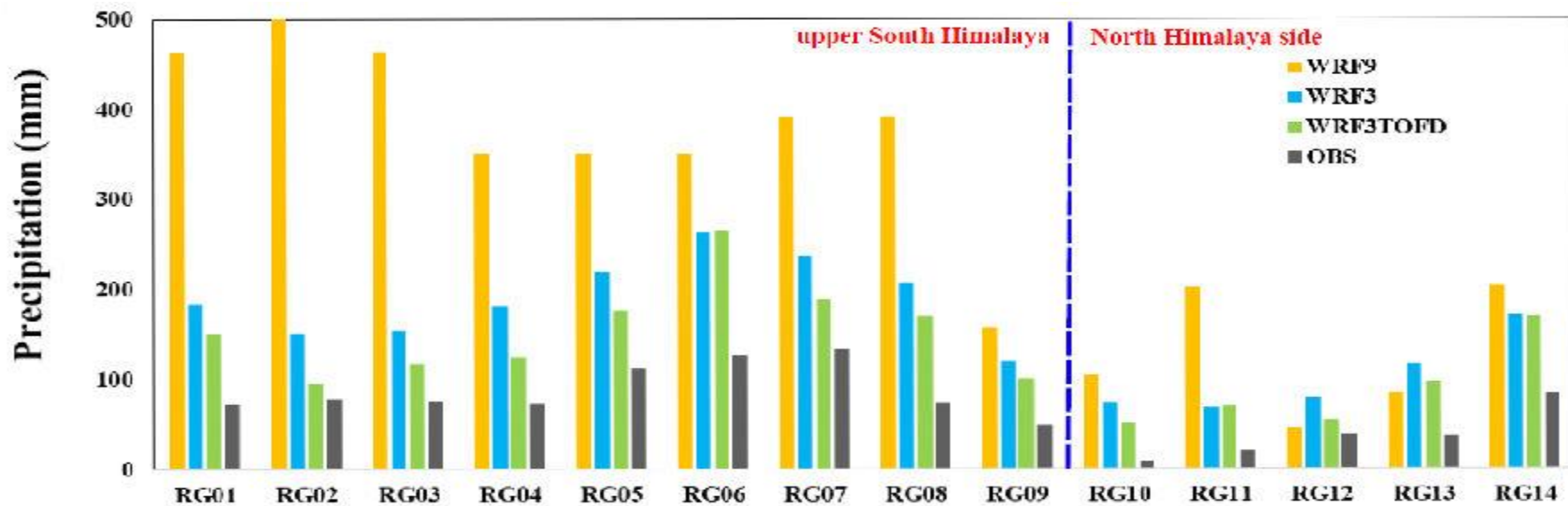


Domain for  
dx=10km



Domain for  
dx=3km

3km 和10 km的WRF模拟结果在高原主体差别不大，但是在喜马拉雅山区3km模拟显著优于10km，引入复杂地形TOFD参数化可以进一步改进模拟精度



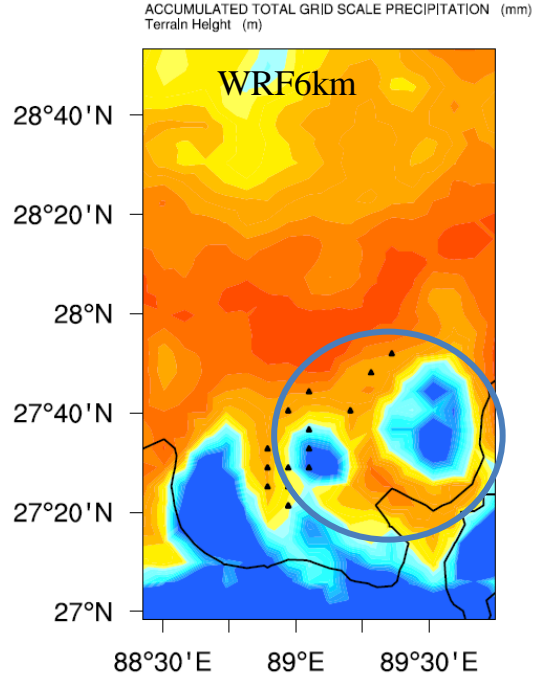
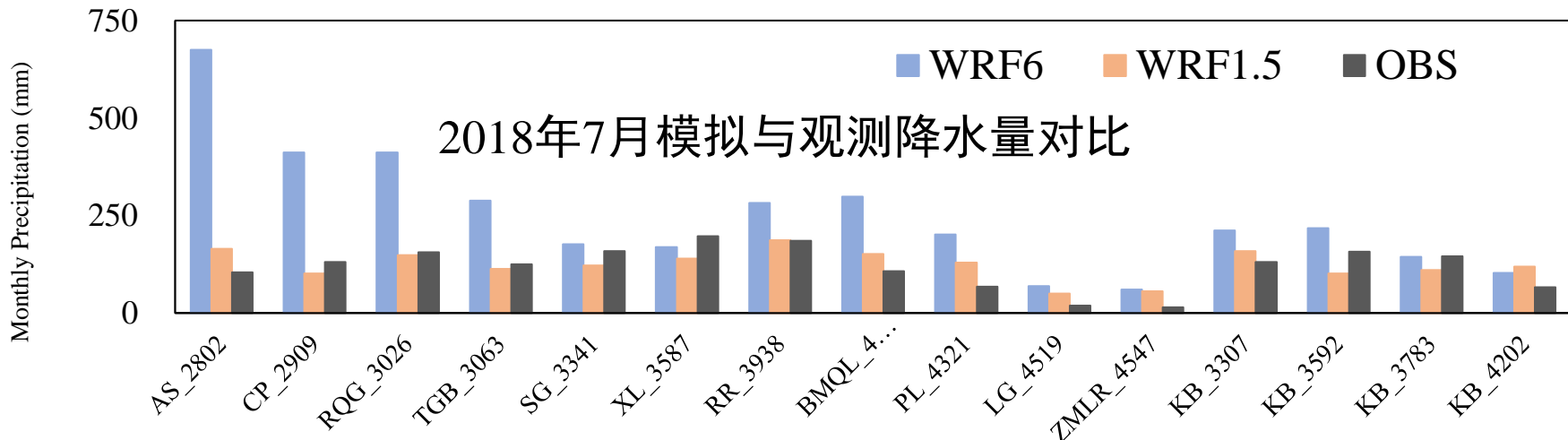
喜马拉雅山区南坡高海拔

喜马拉雅山区北侧

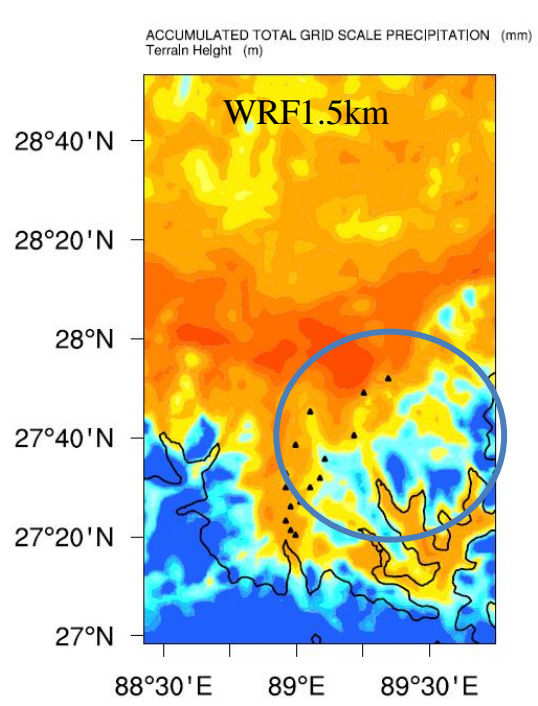
降水总量  
统计指标

	WRF9	WRF3	WRF3TOFD
CC	0.39	0.94	0.88
RB(%)	385	127	86
RRMSE(%)	537	133	97

# 格点距离提高至1.5km，可以进一步改进模拟降水精度



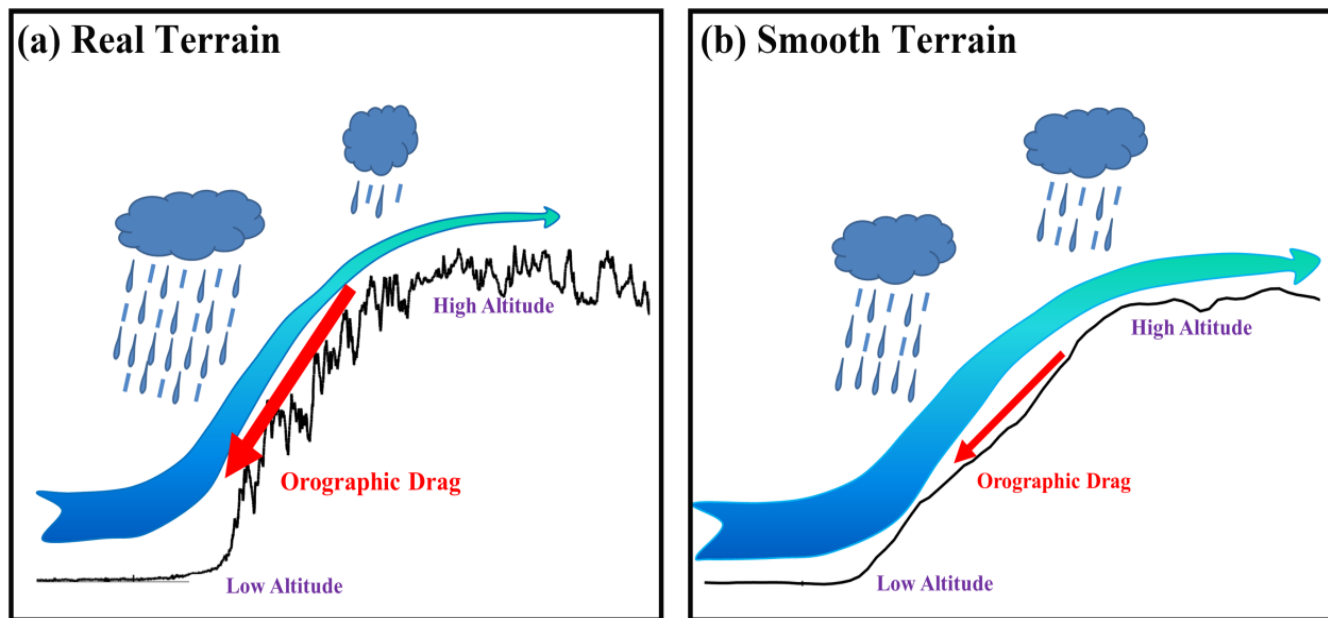
高分辨率模拟与站点观测对应更好并不是单纯因为站点的空间代表性的问题，而是不同分辨率模拟的空间pattern不一致



(未发表材料，请勿使用)



# 复杂地形湍流拖曳力影响喜马拉雅南坡水汽输送和降水的示意图

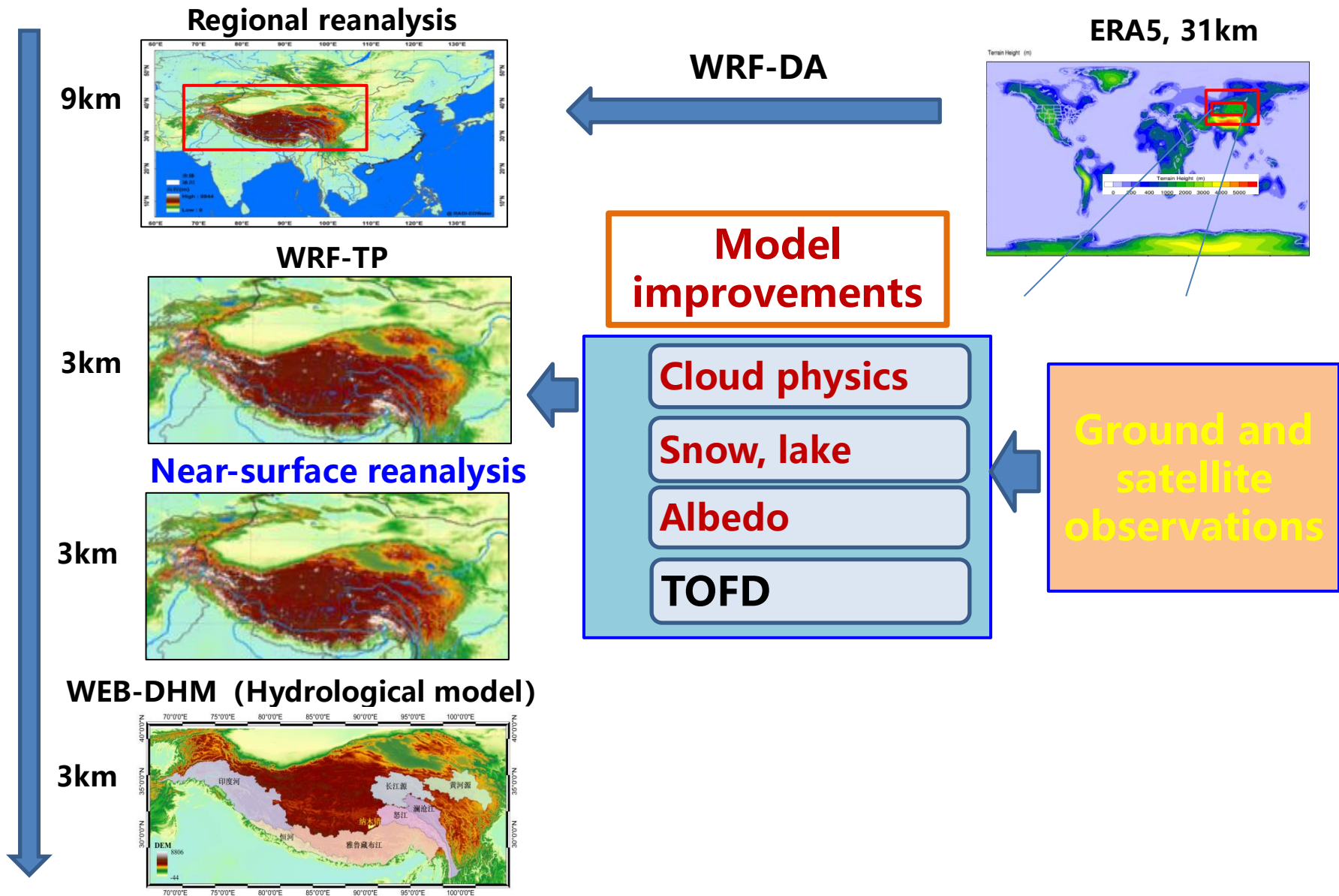


在地形高度复杂的区域，有必要使用公里级的格点反映中尺度地形的影响，TOFD 方案反映小尺度地形的影响

# 报告提纲

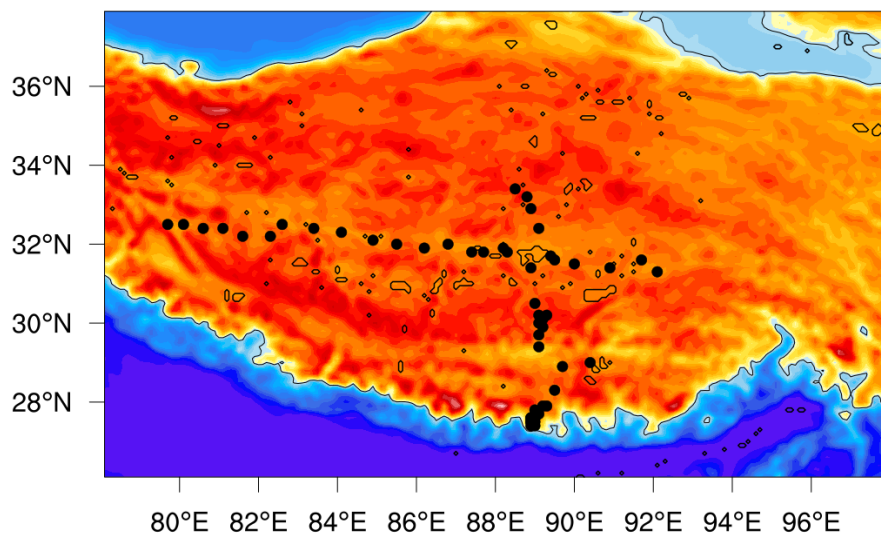
- “亚洲水塔”研究的挑战性问题
- 青藏高原降水格局的观测与分析
- 区域气象模式中复杂地形的处理
- 青藏科考降水研究计划

# Plan for high-resolution modeling

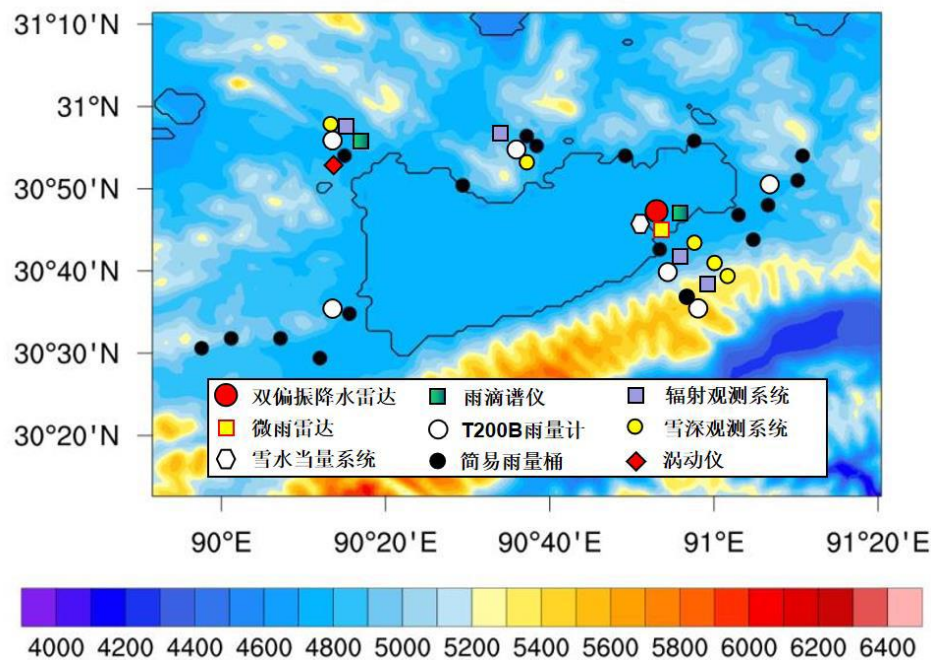


# 观测计划

东西断面和南北断面共70个站



纳木错流域水循环综合观测基地设计



✓ 补充关键区域降水观测

✓ 发现新的观测事实，改进模型，开展气候模拟

✓ 研究降水数据的空间升尺度方法，研发卫星降水产品

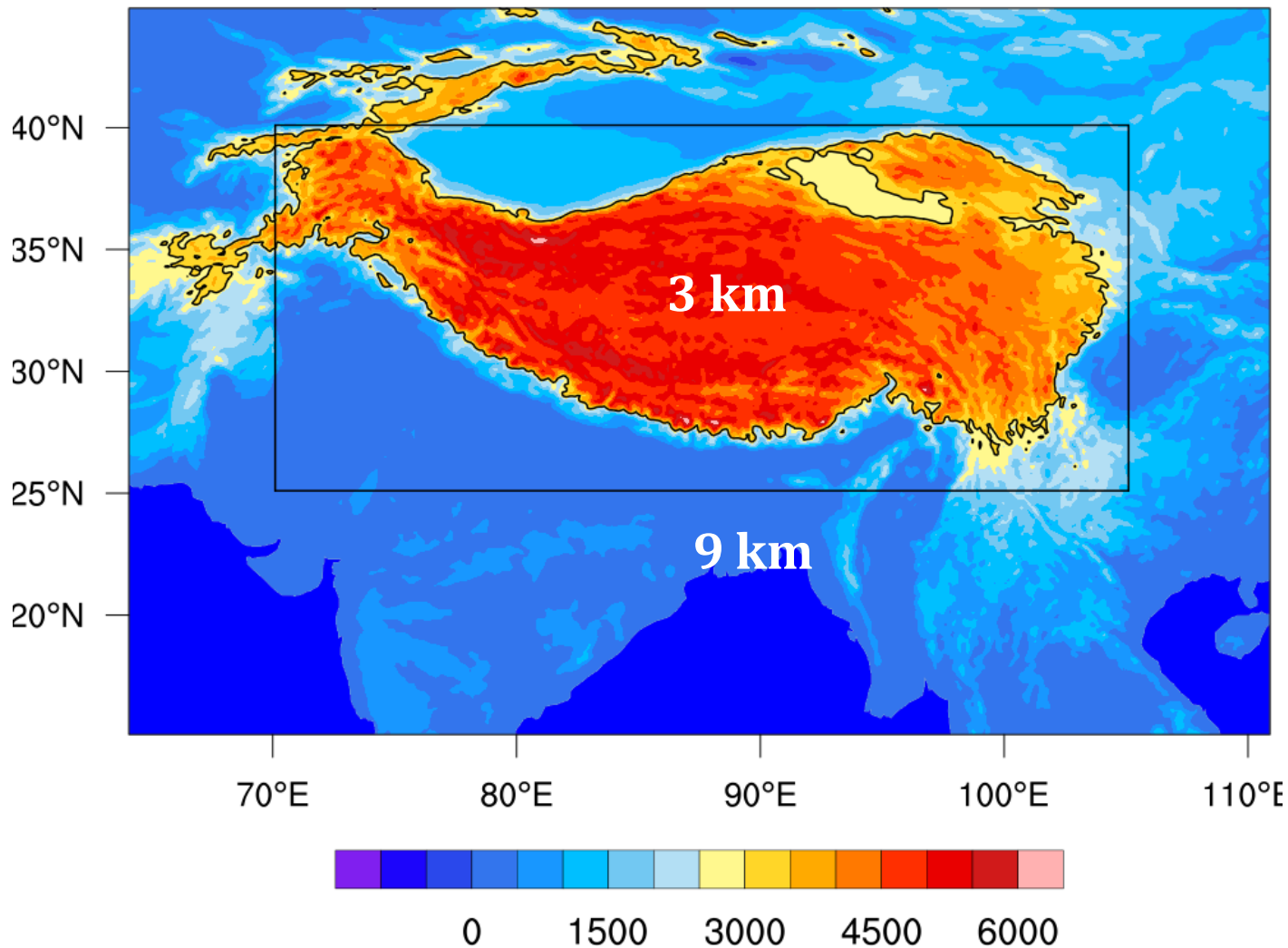
# 模式参数化研究计划

- 复杂地形水文过程
- 湖气相互作用
- 积雪融雪过程
- 湍流参数化过程
- 陆面参数优化
- 模式集成



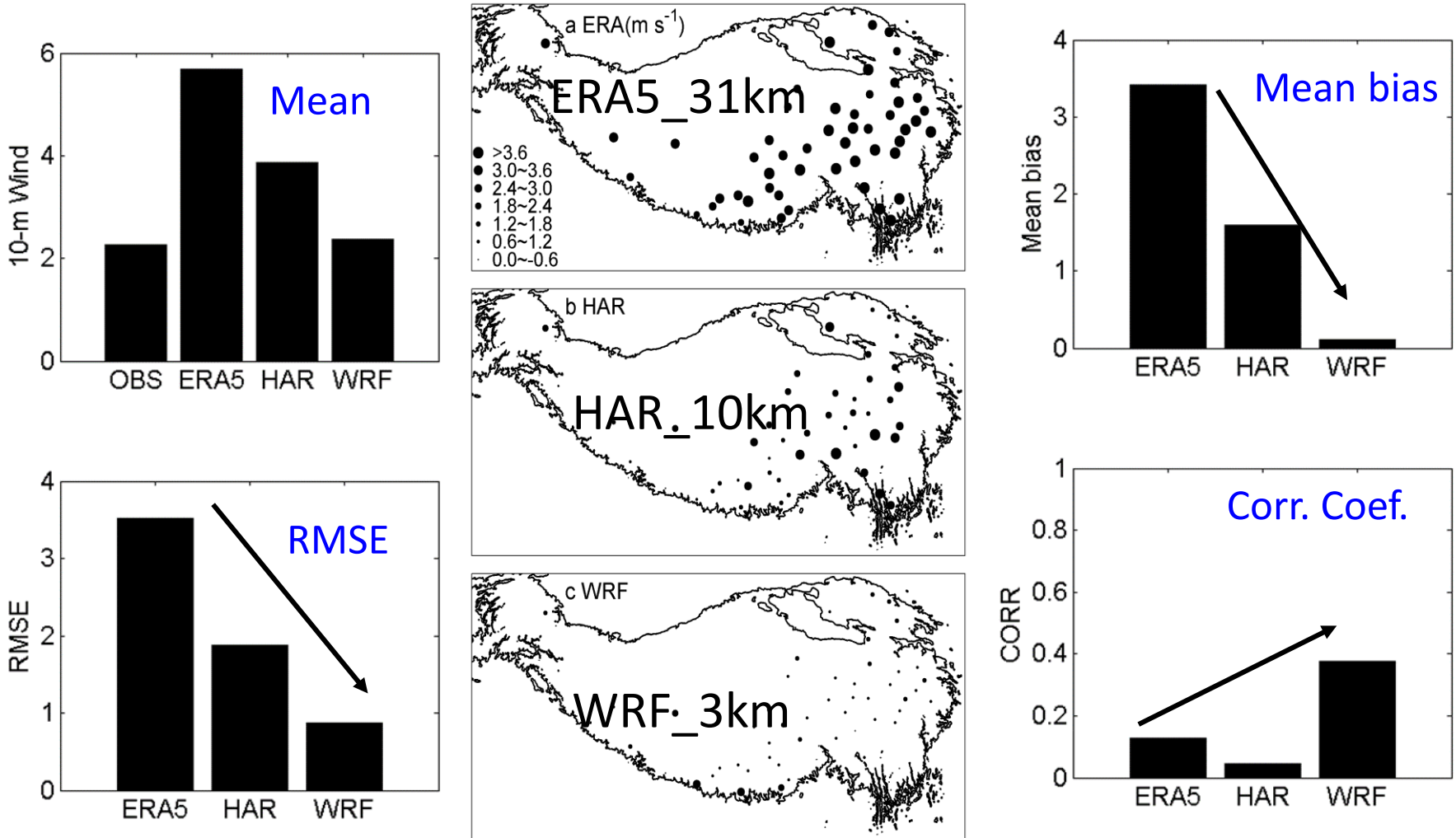
# 青藏高原高分辨率动力降尺度-test for for JJA, 2013

9km reanalysis domain and 3 km downscaling domain



# 基于站点10m风速的评估

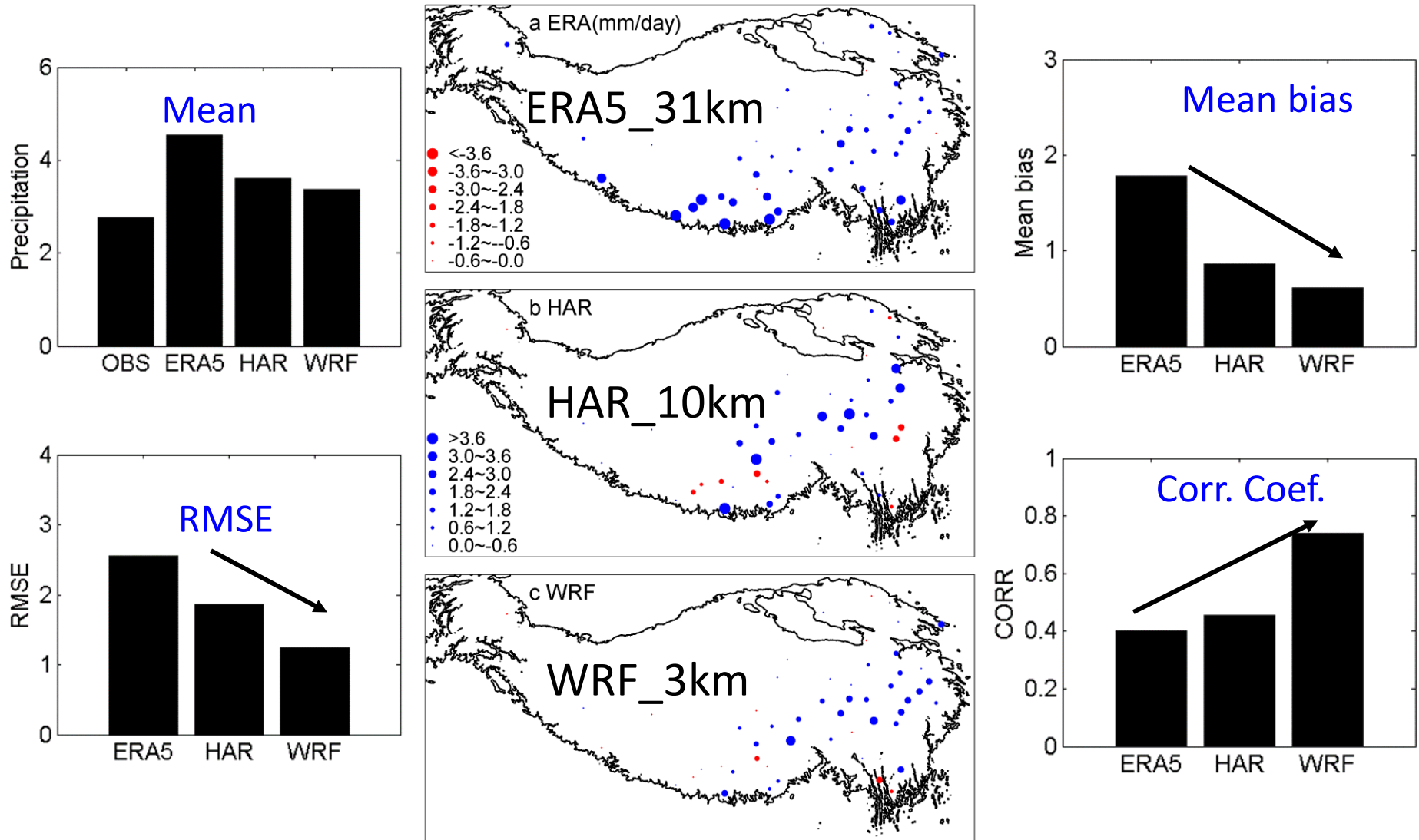
对比 ERA5 (31km)、HAR10 (10km)、WRF (3km) 与观测



(Zhou Xu et al., submitted)

# 基于站点降水量的评估

对比 ERA5 (31km)、HAR10 (10km)、WRF (3km) 与观测



(Zhou Xu et al., submitted)

# 总结

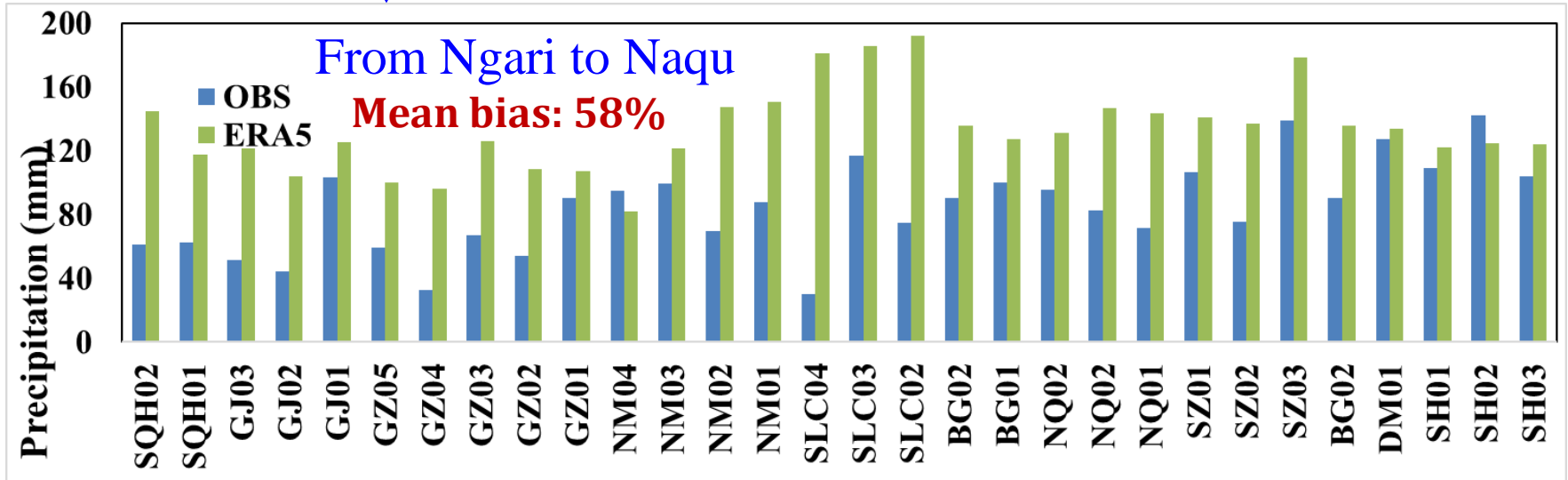
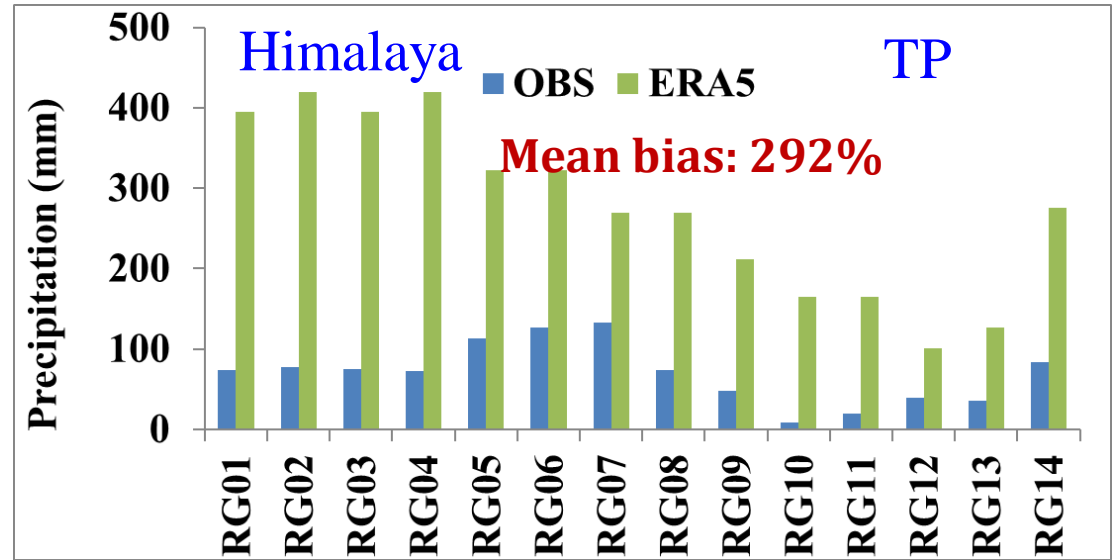
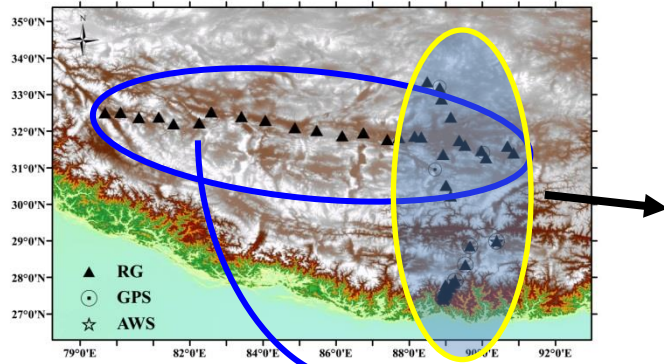
- 青藏高原降水量以及流域水量不平衡仍然是待解之谜。
- 高分辨率模拟可能是揭示高原水循环过程的有效途径，反过来要求加强缺资料地区的地面观测，提高气象模拟精度。
- 提高分辨率和反映地形湍流阻力可有效提高降水模拟精度，但是对高原边缘降水的日变化模拟仍然很困难。
- 中小尺度效应（复杂地形、陆-气、湖-气、冰-气、云物理）的合理表达可能是最终实现该地区降水高精度模拟的根本。

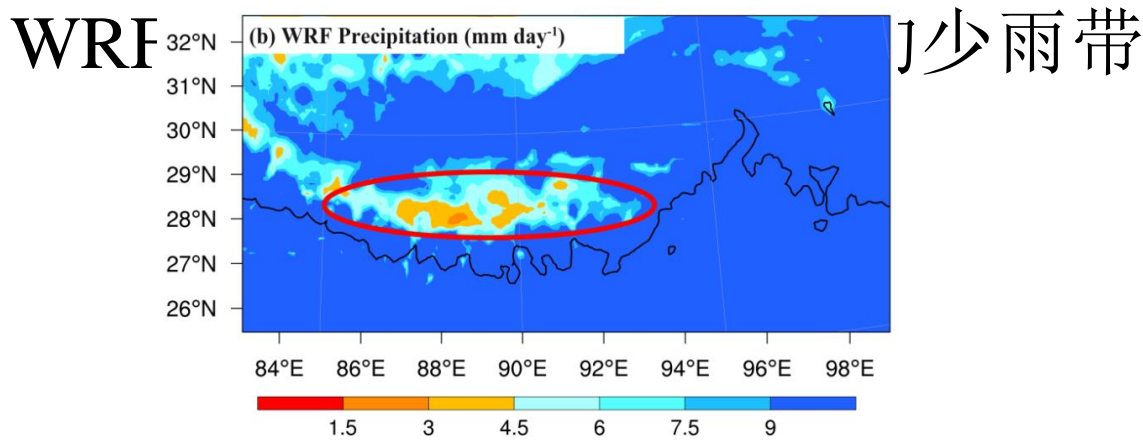


***Thanks for your attention!***

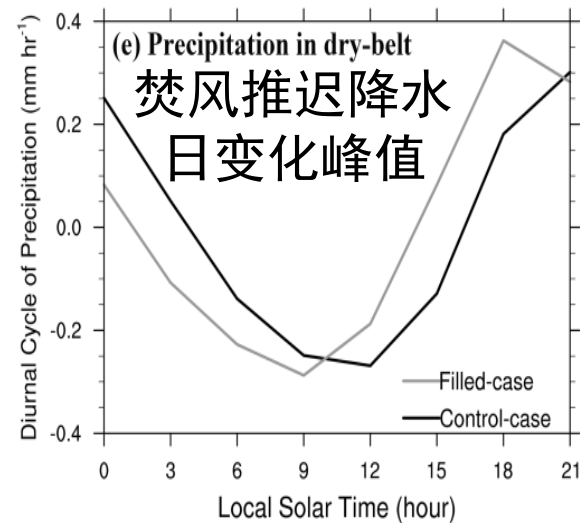
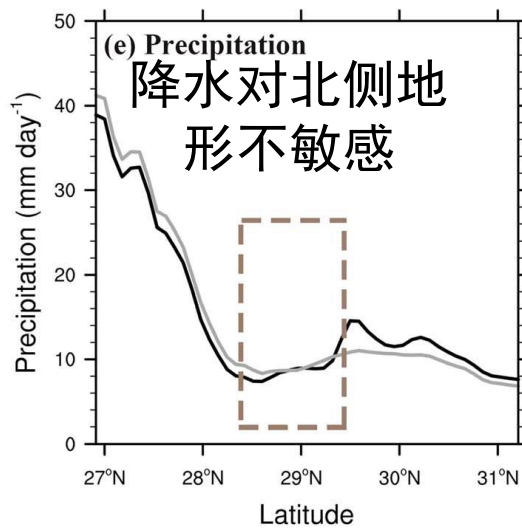
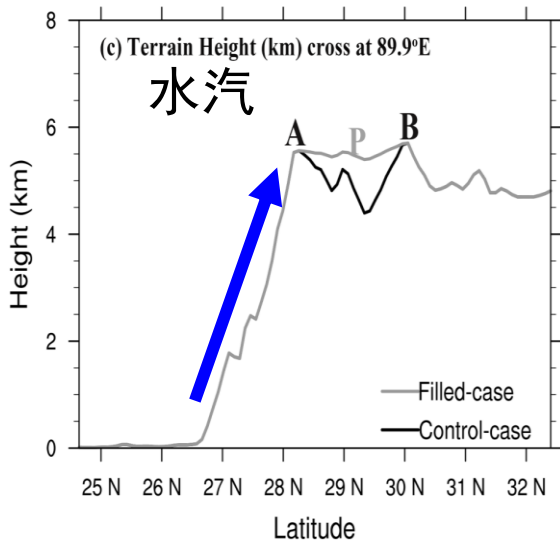


ERA5 has a much larger mean bias in precipitation in the upper Himalaya (292%) than the Qiangtang Plateau (58%)





但是，少雨带形成主要与南坡水汽的极度衰减有关，北侧的下沉气流主要推迟降水的日变化峰值，但不改变降水量



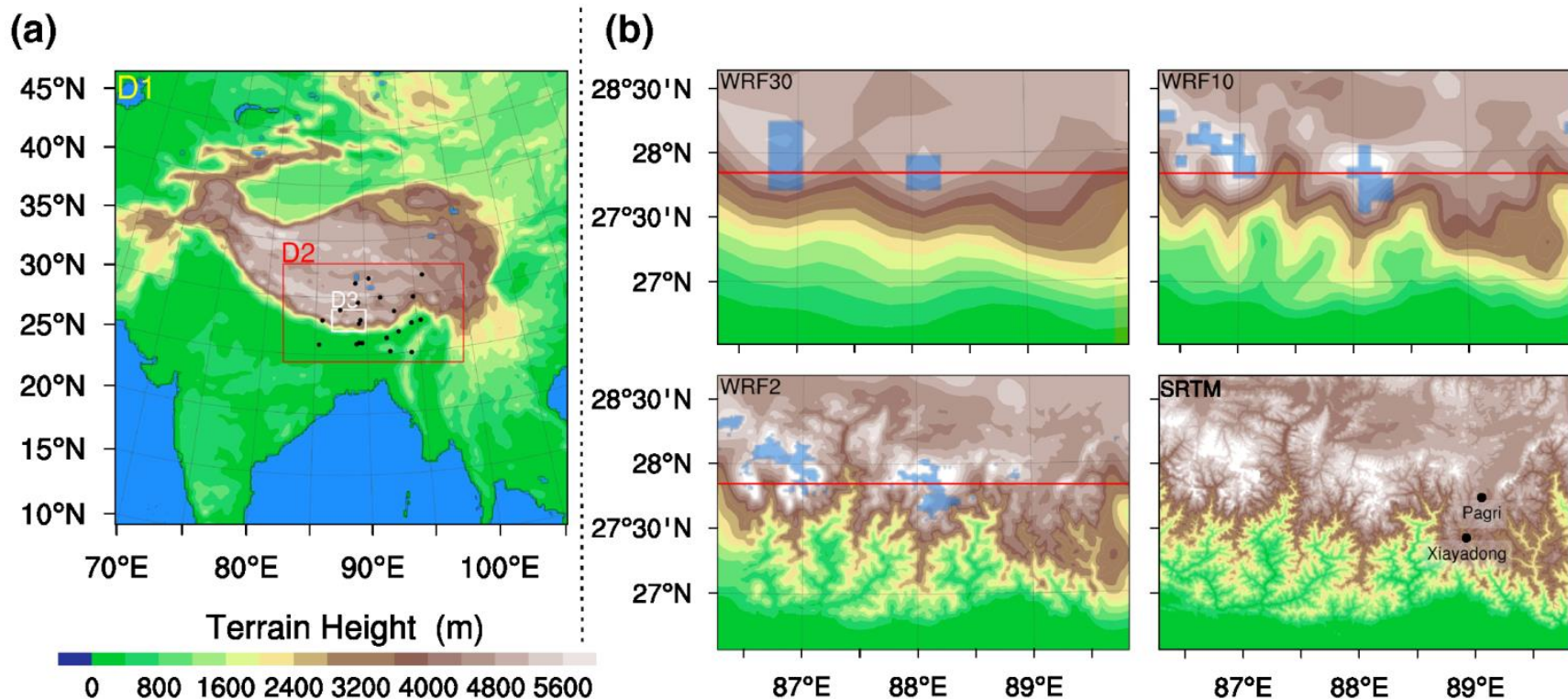
(Wang Yan et al., 2019 GRL)

# 开展不同分辨率模拟揭示喜马拉雅山区地形对水汽传输的影响：

$dx=30\text{km}$ ：不能反映高大地形

$dx=10\text{km}$ ：可反映高大地形但无法反映复杂地形

$dx=2\text{km}$ ：能体现主要复杂地形

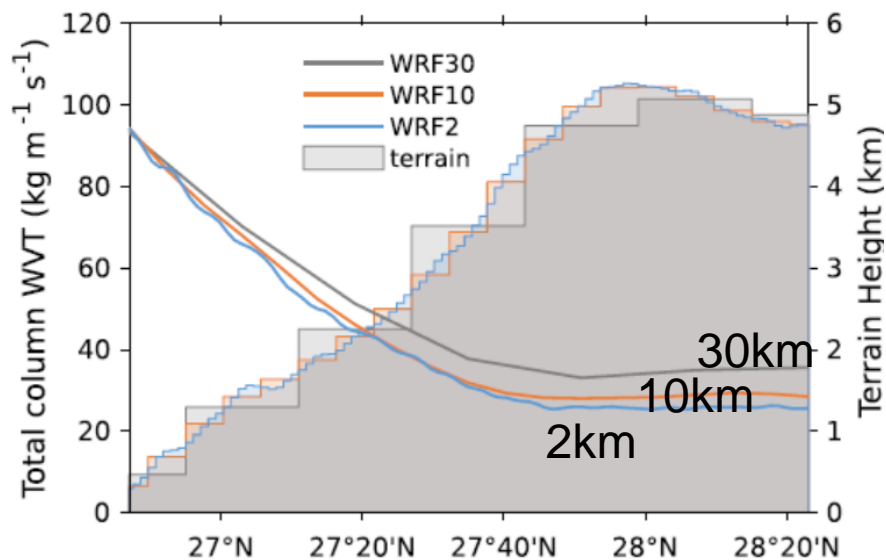


(Lin Changgui et al., 2018, CD)

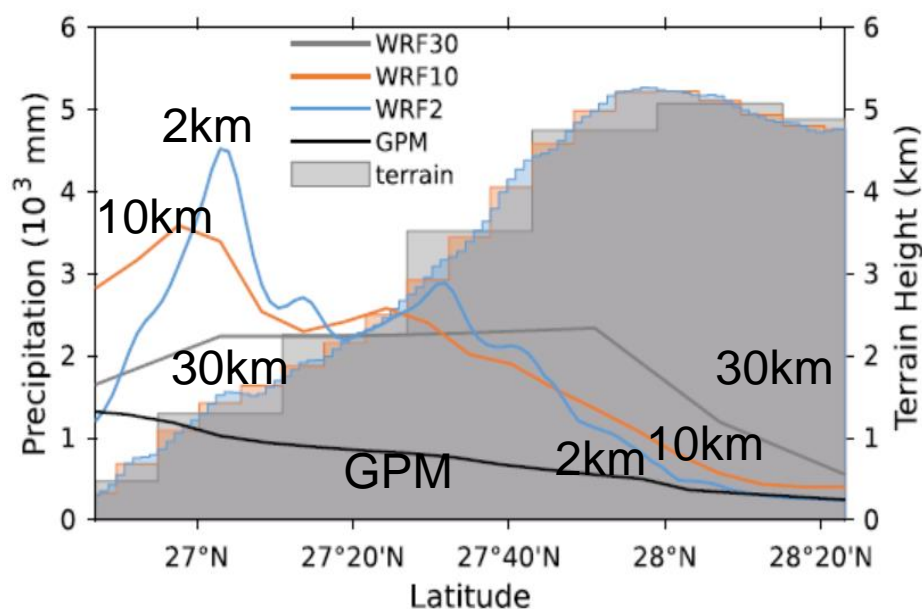
# 过高的水汽通量导致高原模拟降水空间分布误差大

在山脉南坡，高分辨率比粗分辨率模拟的降水大很多  
在山脉北坡，高分辨率比粗分辨率模拟的降水小很多

## 水汽随海拔的变化

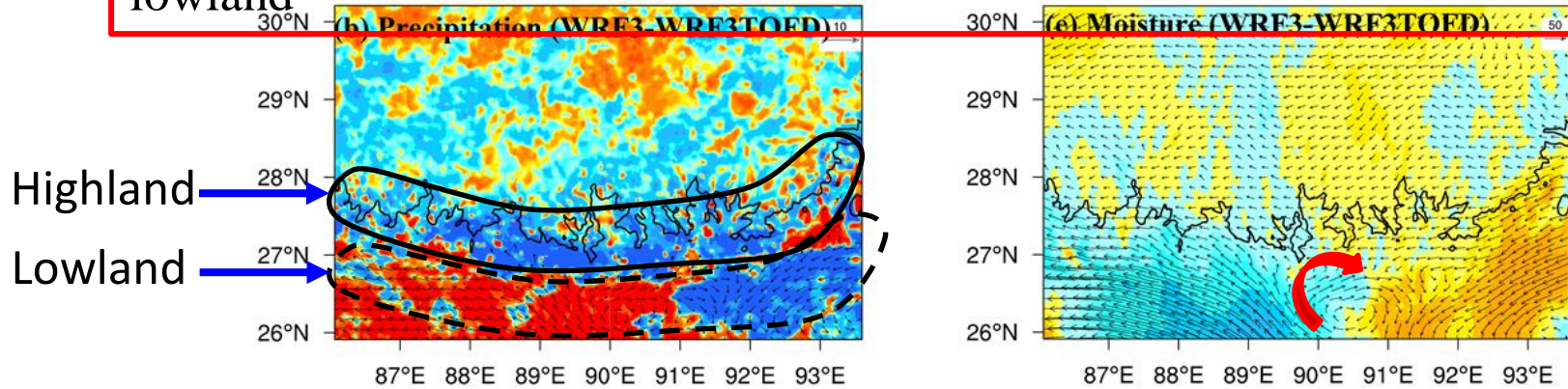


## 降水随海拔的变化

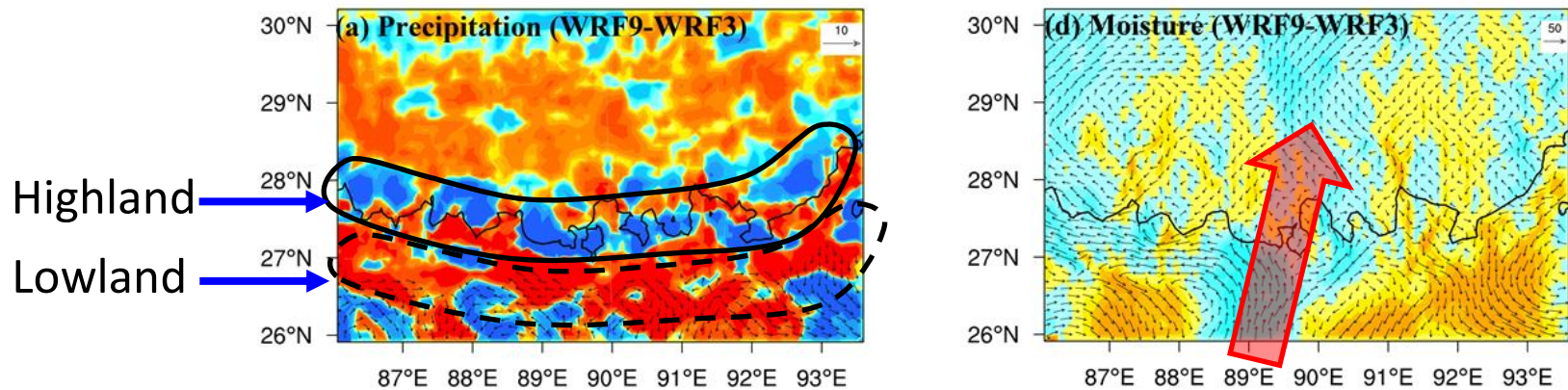




Without TOFD, 3km-WRF cannot simulate micro-scale orographic drag, causing more precipitation in the highland but less in the lowland



10km-WRF cannot simulate both micro-scale and meso-scale orographic drag, causing more precipitation in the highland but less in the lowland



(Wang Yan et al., 2020, CD)