



暨南大学环境与气候研究院

JINAN UNIVERSITY INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL AND CLIMATE RESEARCH

第六届区域气候变化监测与检测学术研讨会

北半球夏季风对全球变暖的纬向 非均匀响应机制

汇报人：何超¹

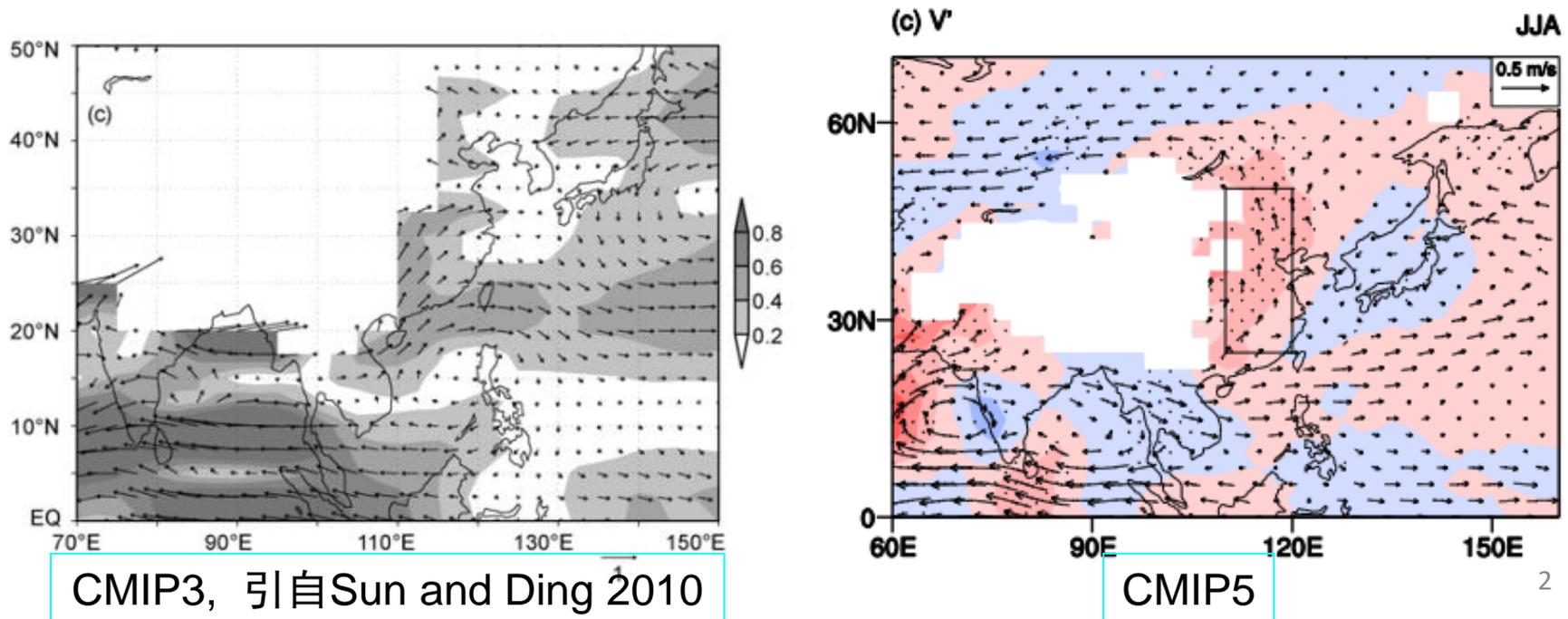
合作者：Tim Li², 周天军³, 王子谦⁴, 周文⁵

(1.暨南大学环境与气候研究院；2.南京信息工程大学大气科学学院；
3.中国科学院大气物理研究所LASG；4.中山大学大气科学学院；5.
香港城市大学能源及环境学院)

东亚夏季风(EASM)对全球变暖的响应

- CMIP3, CMIP5及其他绝大部分气候模式一致地预估EASM环流随着全球变暖 (GW) 而加强(Sun and Ding 2010; Jiang and Tian 2013; 丁一汇等 2013; Kamae et al. 2014; Kitoh 2017), 雨带北抬

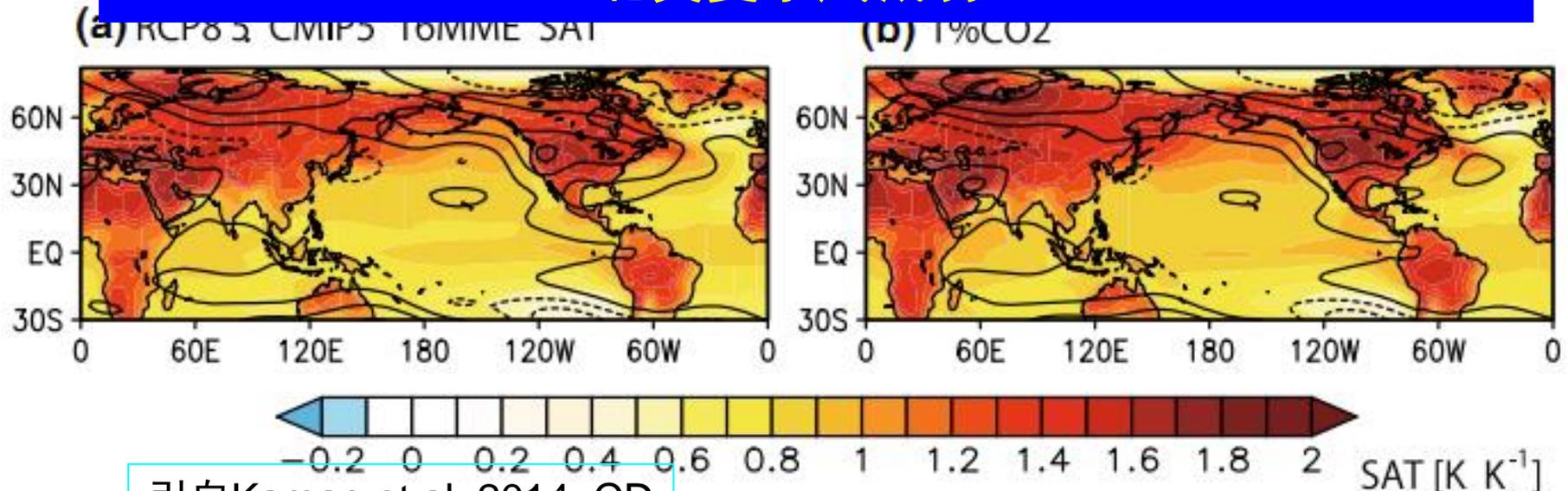
CMIP3和CMIP5预估试验的850hPa风对GW的响应



东亚夏季风环流增强的原因

- ▶ 前人认为GW导致EASM环流增强的原因是东亚陆地表面的升温幅度强于西北太平洋，纬向海陆热力差异加大（e.g. Jiang and Tian 2013; 丁一汇等 2013; Kamae et al. 2014）
- ▶ 并非全球所有区域的夏季风都随着GW而增强，特别是北美夏季风随着GW而减弱（e.g., Kitoh et al. 2013; Wang et al. 2020）

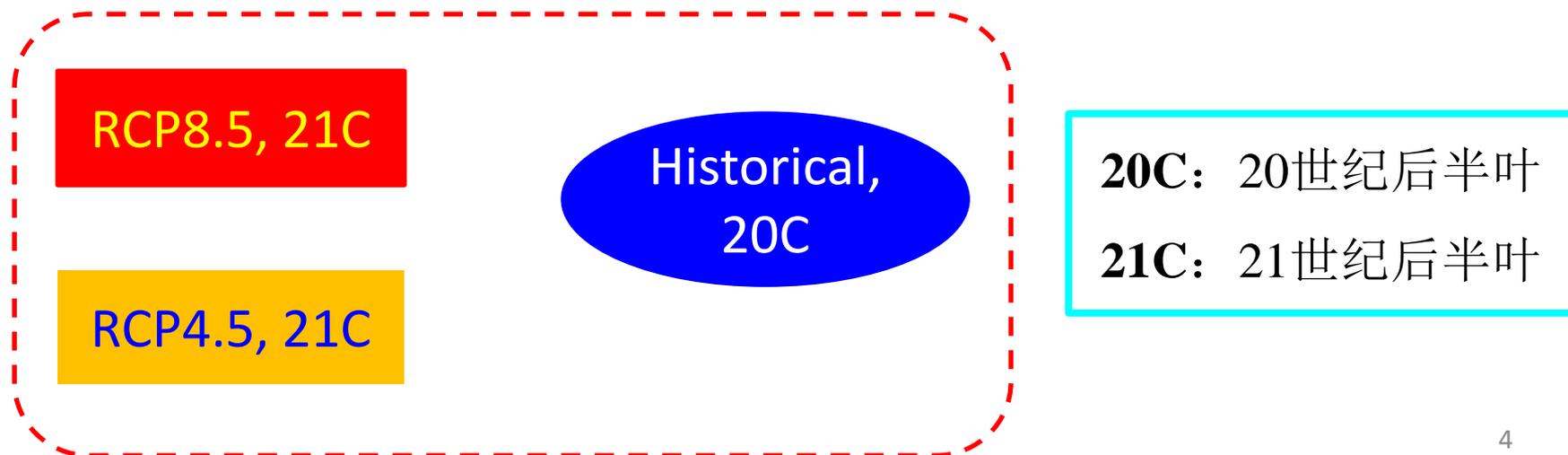
在海陆温差普遍增大的背景下，为什么东亚夏季风增强但北美夏季风减弱？



引自Kamae et al. 2014, CD

研究思路

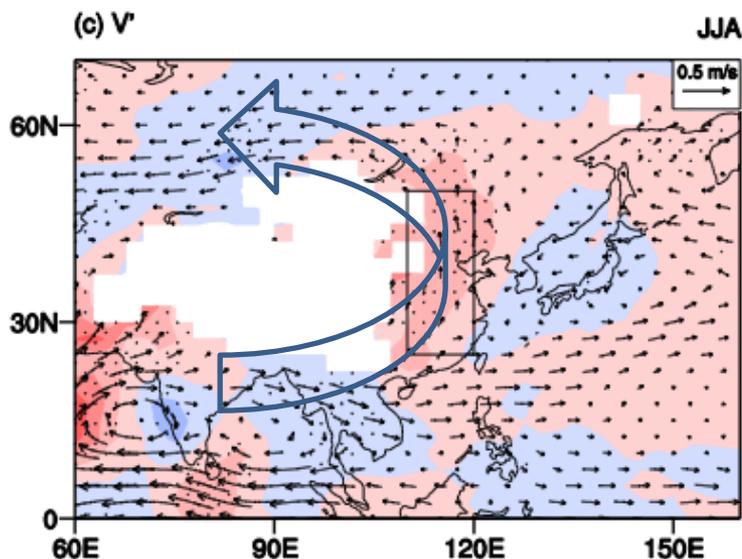
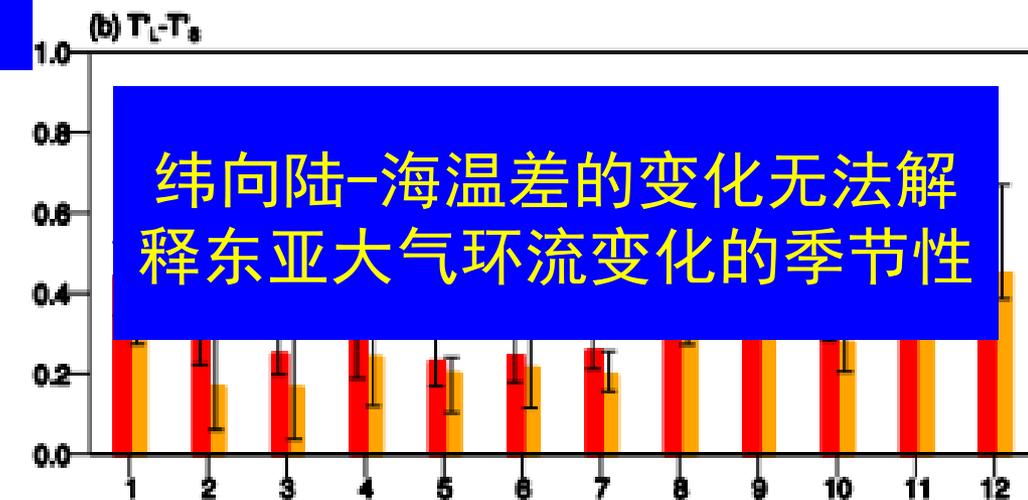
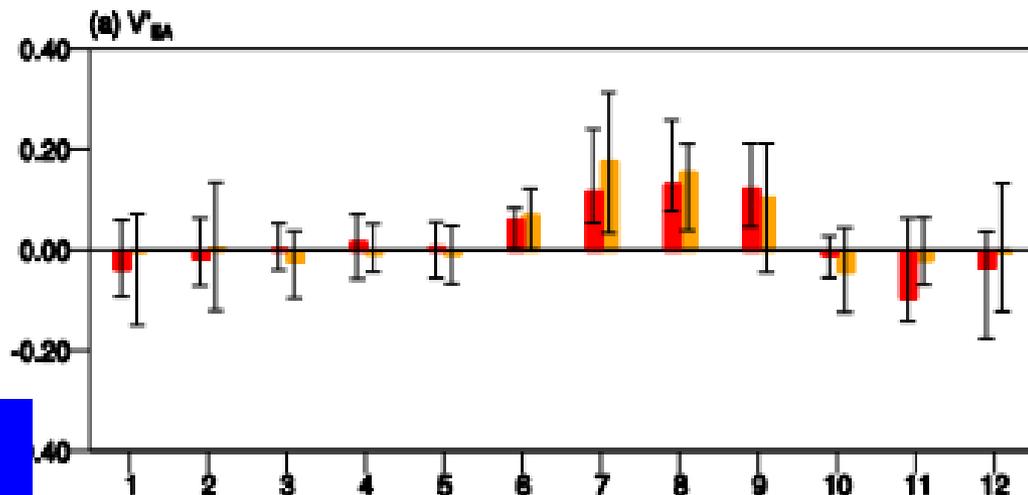
- 第五/六轮国际耦合模式比较计划(CMIP5, CMIP6)协调国际上各个气候模式研发机构开展标准化试验
 - ✓ Historical试验：观测的外强迫(温室气体、气溶胶等)驱动模式
 - ✓ RCP/SSP预估试验：未来温室气体排放浓度情景驱动模式
- 利用CMIP5或CMIP6的30个模式的集合中位数，削减模式随机误差和气候系统的内部变率，提取外强迫造成的气候响应



全年各月经向风和纬向陆-海温差的变化

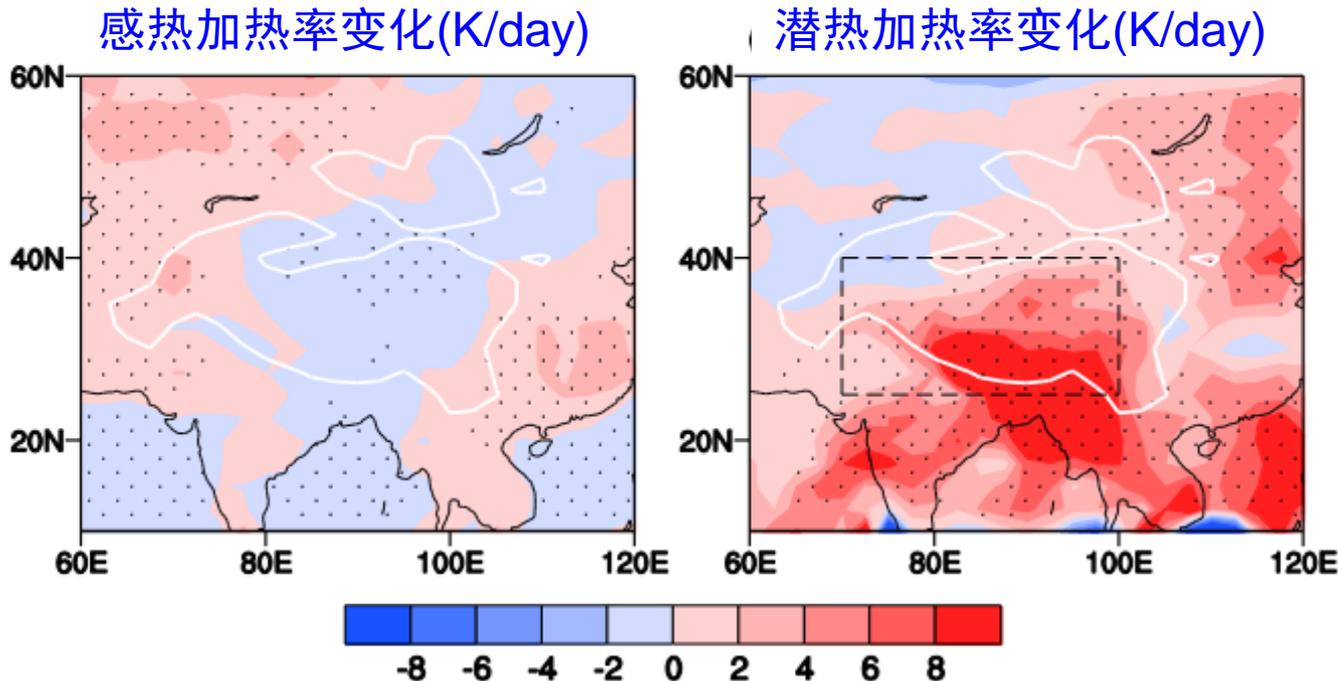
- ▶ 全年陆地升温幅度均大于海洋，冬季尤甚
- ▶ 预估试验当中的东亚低层经向风仅在6-9月存在显著变化

EA夏季的异常南风是不是TP强迫的结果？

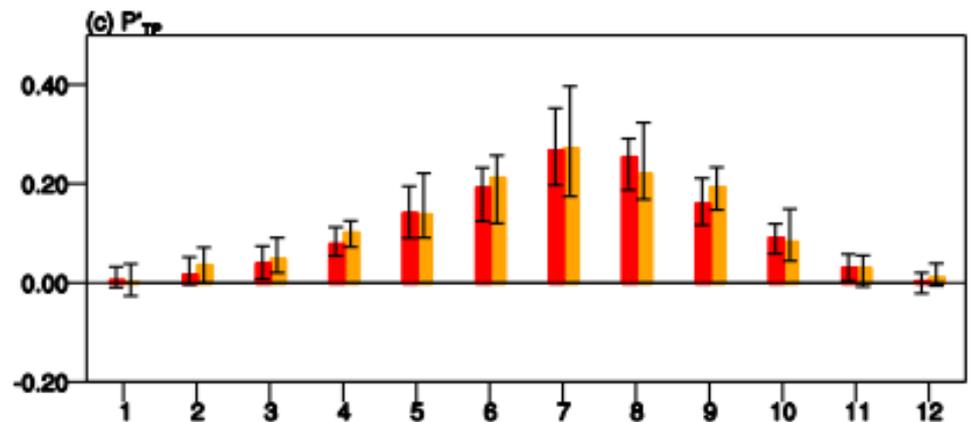


红色柱: RCP8.5 橙色柱: RCP4.5

TP加热率的变化



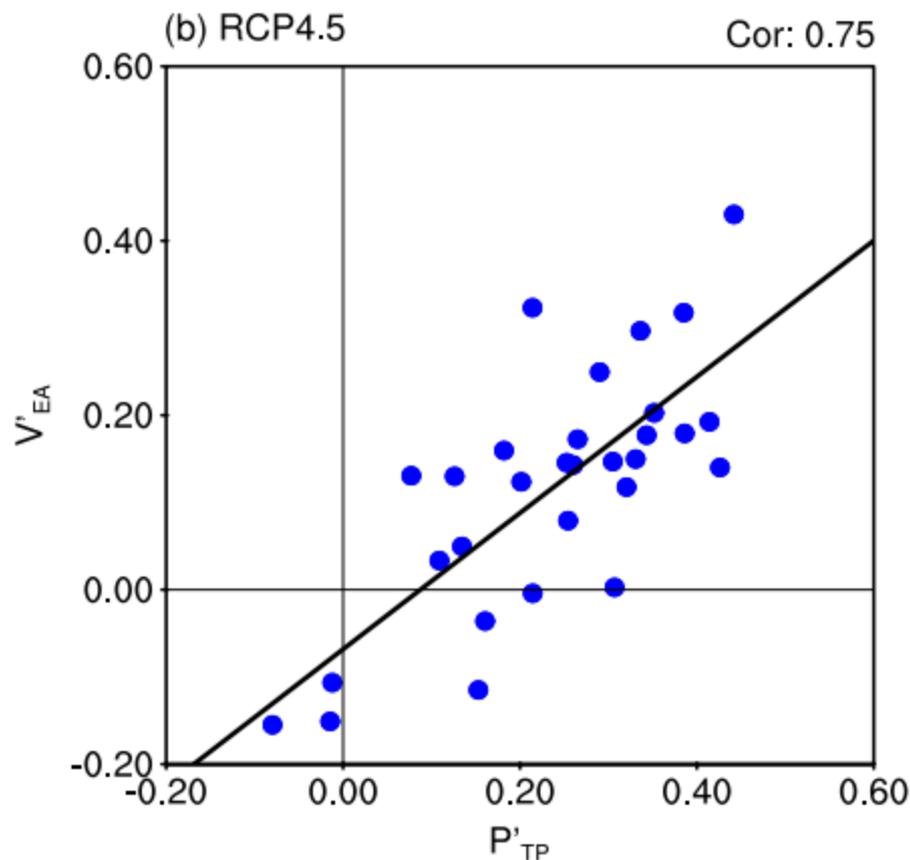
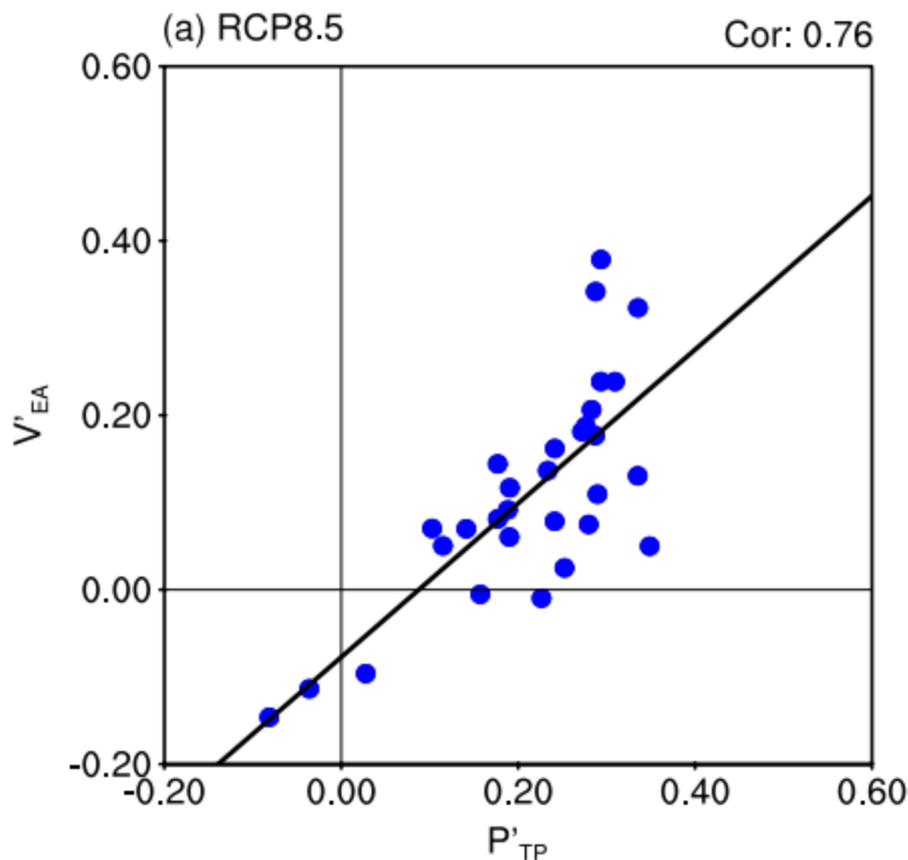
- ▶ TP潜热加热的增强在夏季和初秋最强烈，服从“湿季变湿”特征（Huang et al. 2013），与东亚低层南风从夏季到初秋显著增强一致。



红色柱：RCP8.5 橙色柱：RCP4.5 6

模式间不确定性的来源

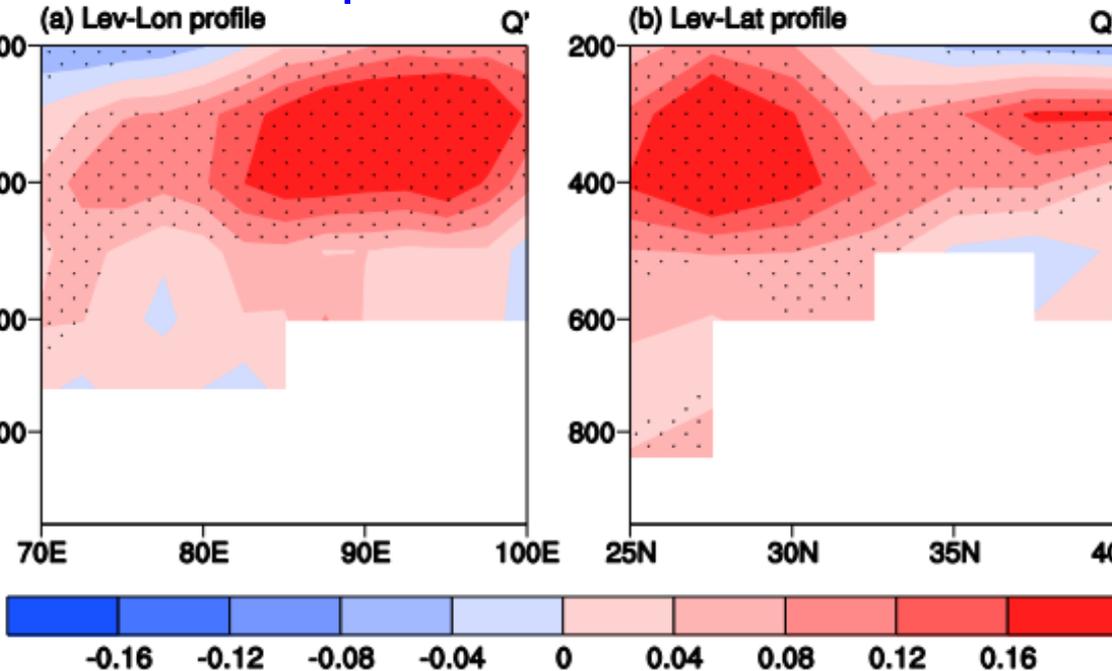
- ▶ TP潜热加热增强越明显的模式，东亚夏季低层南风的增强也越明显。
- ▶ 不论在何种排放情景下，TP潜热加热的变化均能解释东亚低层经向风变化的一半以上模式间方差



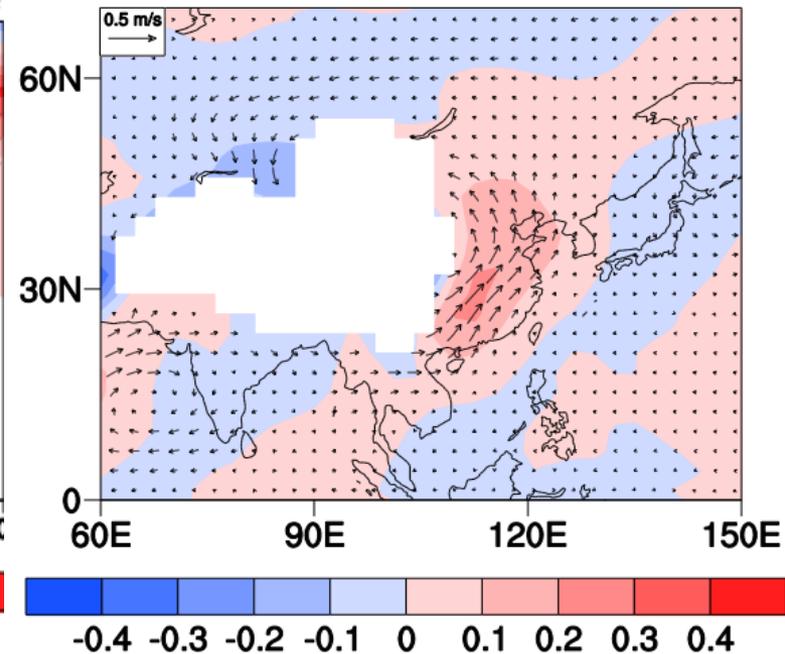
大气环流对TP潜热加热增强的响应

- 用线性斜压模式（LBM, Watanabe and Kimoto 2000）检验大气环流对TP潜热加热增强的响应
- 用TP潜热加热变化的三维结构驱动LBM的试验显示，TP潜热加热增强会驱动围绕TP的异常气旋，伴随着东亚南风增强

Q' profile



v' v & (u,v) response



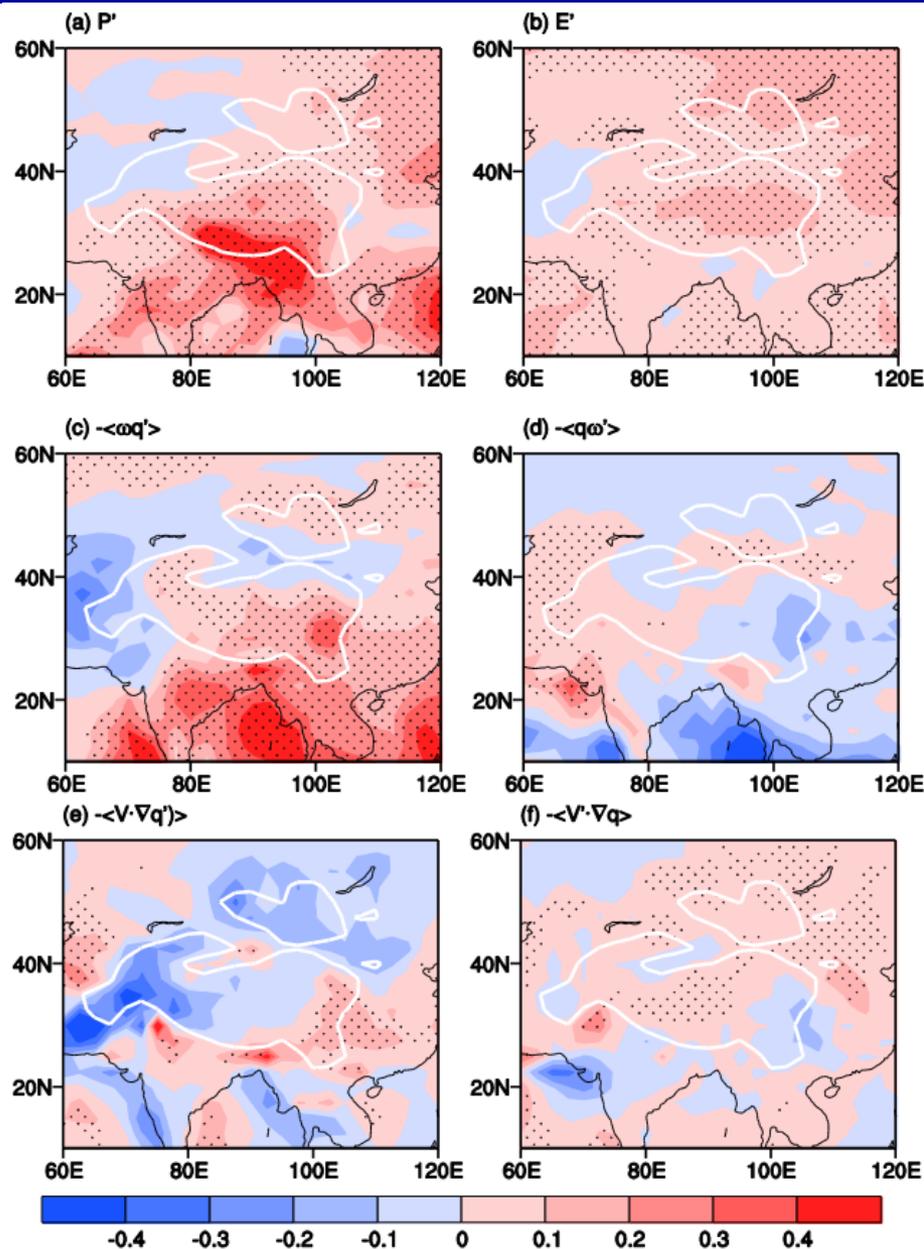
为什么TP潜热加热增强？

- 水汽收支诊断方程 (Chou et al. 2009)

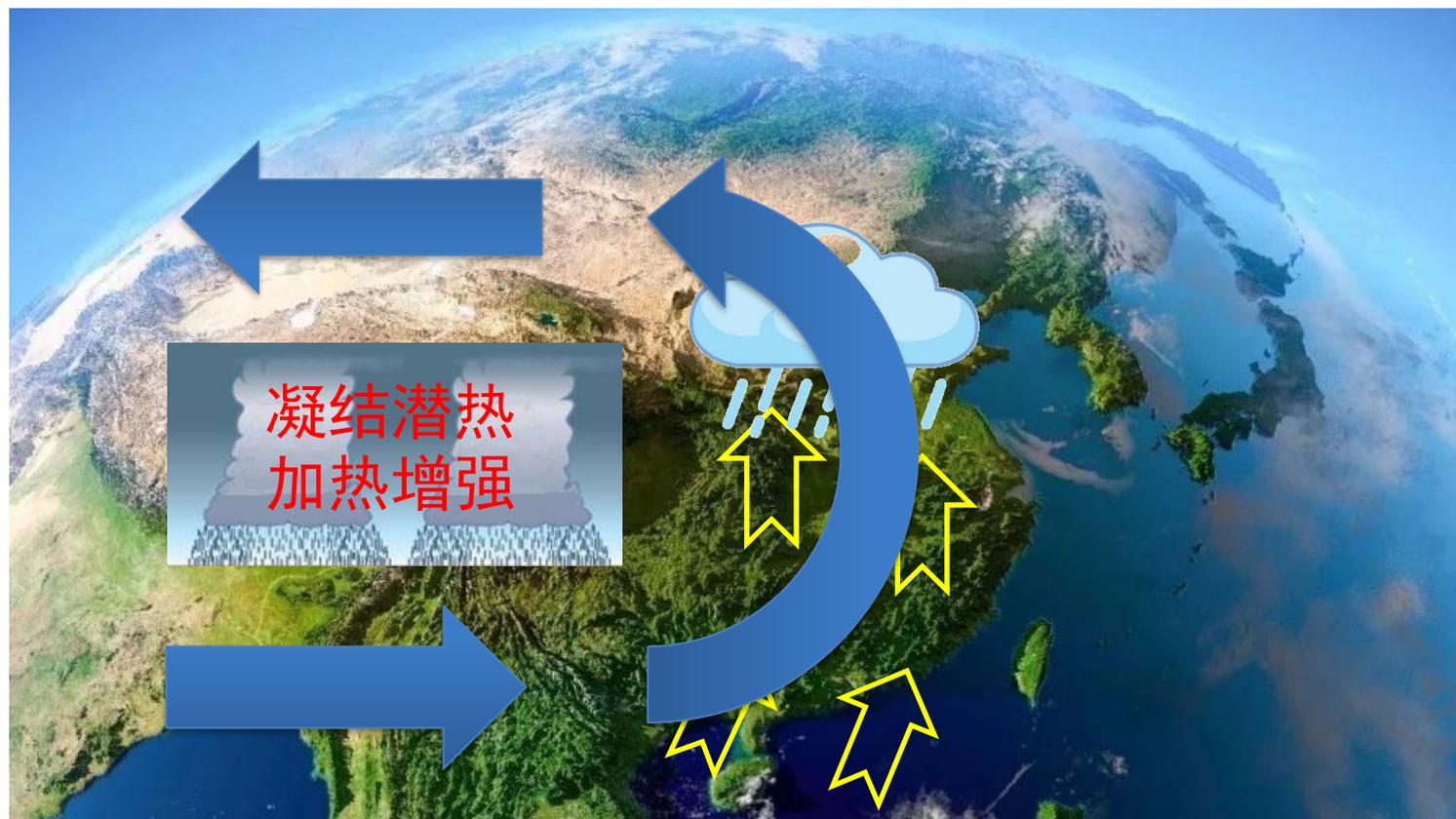
$$P' = E' - \langle \bar{\omega} \frac{\partial q'}{\partial p} \rangle - \langle \omega' \frac{\partial \bar{q}}{\partial p} \rangle$$
$$- \langle \bar{V} \cdot \nabla q' \rangle - \langle V' \cdot \nabla \bar{q} \rangle + R$$

- TP降水的增多主要来自热力过程的贡献：
 - ✓ TP南坡：平均态比湿增大引起垂直水汽平流增大
 - ✓ TP内部：水汽内循环增强

水汽收支方程各项→



小结：GW背景下EASM环流的增强机制



He C, Wang Z, Zhou T, Li T (2019) Enhanced Latent Heating over the Tibetan Plateau as a Key to the Enhanced East Asian Summer Monsoon Circulation under a Warming Climate. *J Climate* 32 (11):3373-3388.

讨论：EASM对GW和间冰期的不同响应机制

- 间冰期EASM的强烈增强主要是西太副高环流增强所致
- 全球变暖情景下，西太副高无显著变化，青藏高原热力强迫的增强导致了EASM增强
- 海洋慢响应的存在与否是决定上述不同响应的关键过程

(a) Interglacial

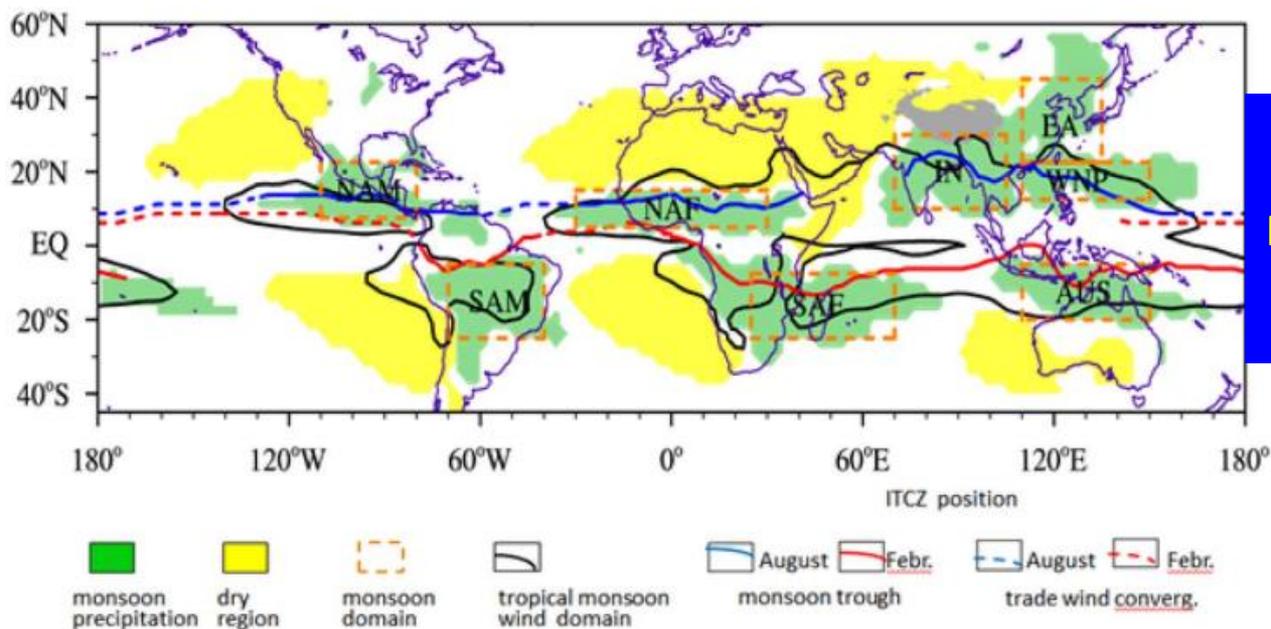


(b) global warming



He C, Zhou W (2020) Different Enhancement of the East Asian Summer Monsoon under Global Warming and Interglacial Epochs Simulated by CMIP6 Models: Role of the Subtropical High. *J Climate* 33 (22):9721-9733.

全球季风(Global monsoon)



季风区定义(北半球为例):
 $P(\text{MJJAS}) - P(\text{NDJFM}) > 2.5 \text{ mm/d}$
且 $P(\text{MJJAS}) > 55\% * P(\text{Annual})$

引自Wang et al. 2017,
Earth Sci Rev

- 全球季风(Wang and Ding 2008)的概念提供了不同区域季风的统一化的定义方法
- CMIP5和CMIP6模式一致显示：亚洲、北非季风降水随着全球变暖而总体增多，但北美季风降水减少(Kitoh et al. 2013; Lee and Wang 2014; Chen et al. 2020; Wang et al. 2020)

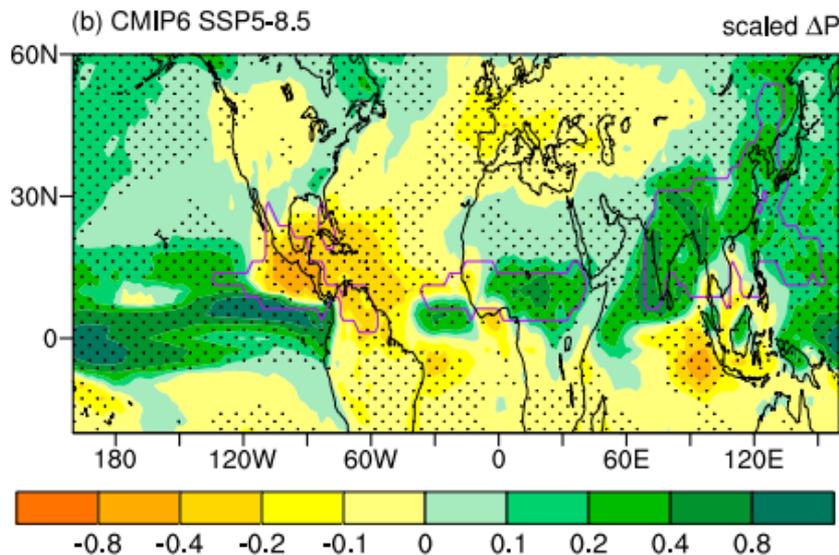
CMIP6模式预估的北半球季风降水变化

采用30个CMIP6模式

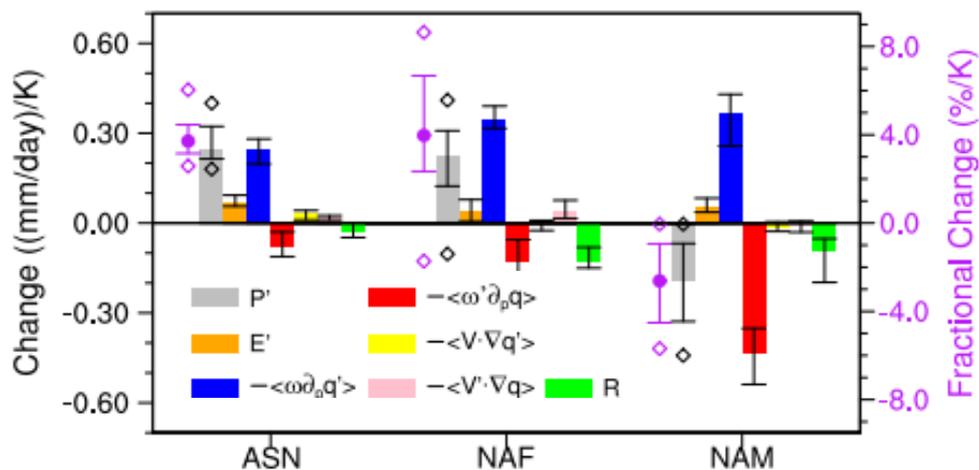
SSP5-8.5
21C

Minus

Historical
20C

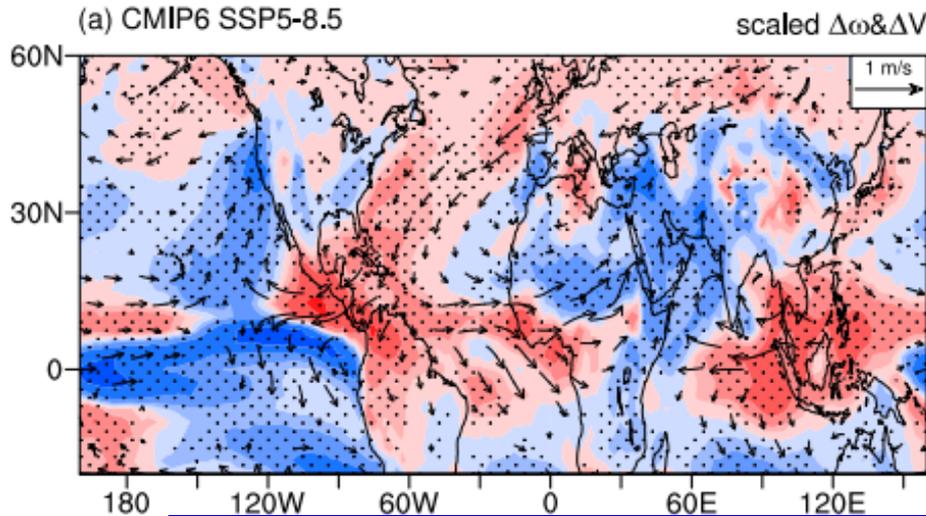


$$P' = E' - \left\langle \bar{\omega} \frac{\partial q'}{\partial p} \right\rangle - \left\langle \omega' \frac{\partial \bar{q}}{\partial p} \right\rangle - \langle \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla q' \rangle - \langle \mathbf{V}' \cdot \nabla \bar{q} \rangle + R$$



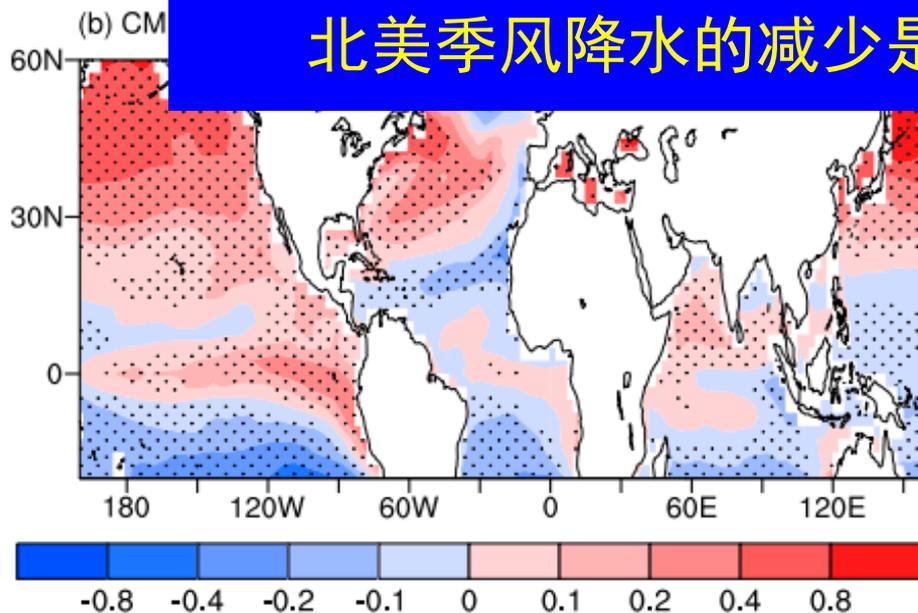
- 在GHG浓度升高的强迫下，亚洲、北非季风降水增多，但北美季风降水反而显著减少
- 亚洲、北非季风降水增多的直接原因是大气水汽含量增多
- 北美季风降水的减少的直接原因是垂直抬升运动减弱

预估的垂直速度和SST*的变化



← 500 hPa垂直速度和SST*的响应。SST*是指SST与同时期热带平均SST之差

➤ 北美季风区垂直抬升运动显著减弱



北美季风降水的减少是SST变化的结果吗？

导致

(Rauscher et al. 2011; Wang et al. 2020a,b):

- ✓ 赤道太平洋SST变暖呈现类El Nino型空间结构
- ✓ 副热带北大西洋存在相对变冷

CMIP6 CGCM的快响应和慢响应

采用CMIP6的42个模式的abrupt-4xCO₂试验和piControl试验

快响应：abrupt-4xCO₂试验的第1年相对于piControl试验的变化

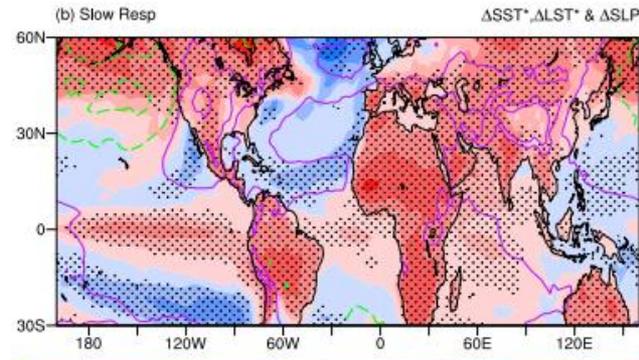
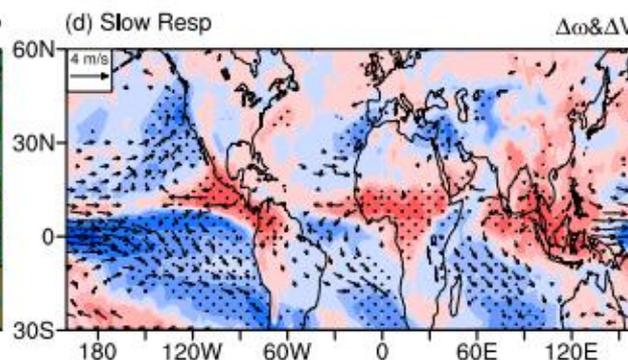
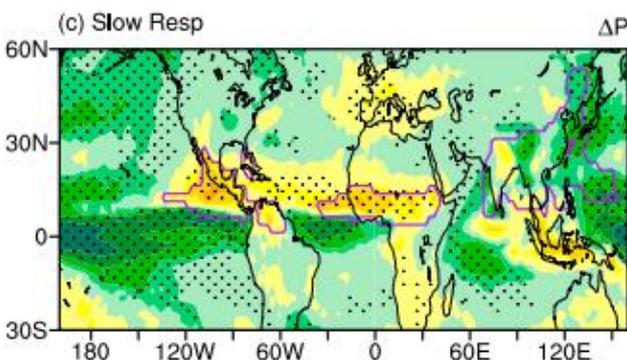
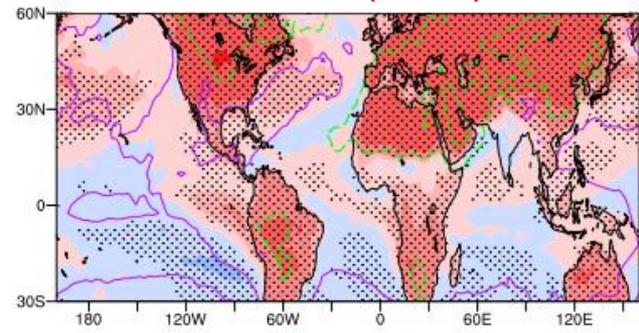
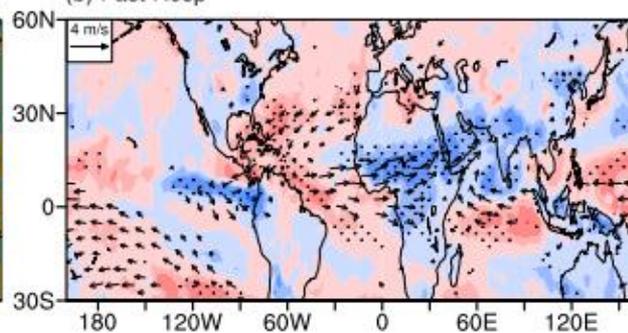
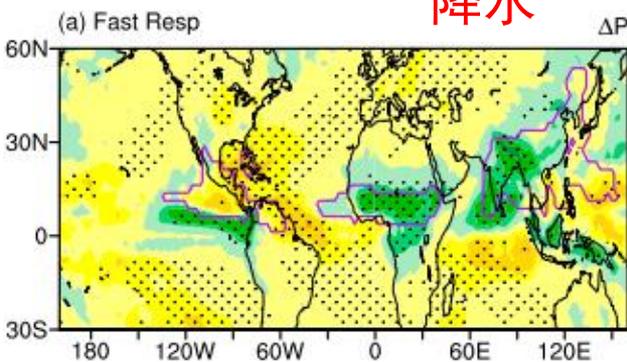
慢响应：abrupt-4xCO₂试验的第101-150年相对于第1年的变化

紫/绿：SLP升高/降低

SST* & LST*(填色), SLP

降水

ω_{500} & V_{850}



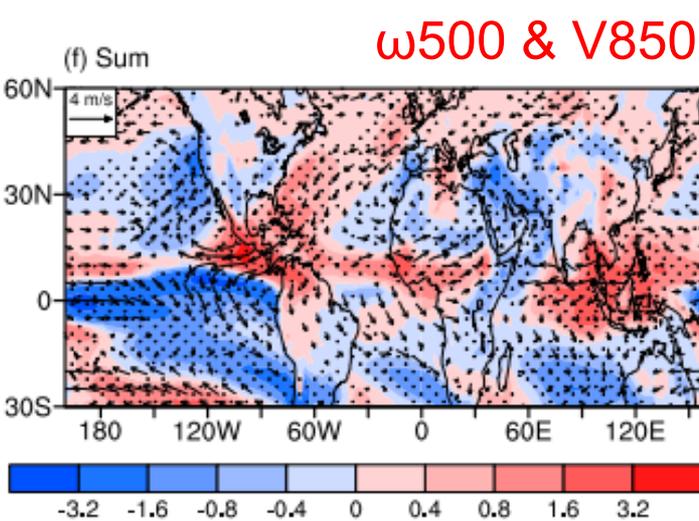
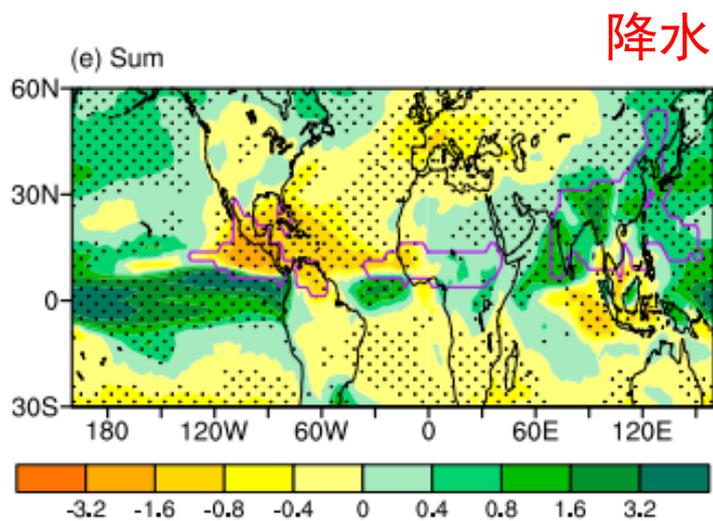
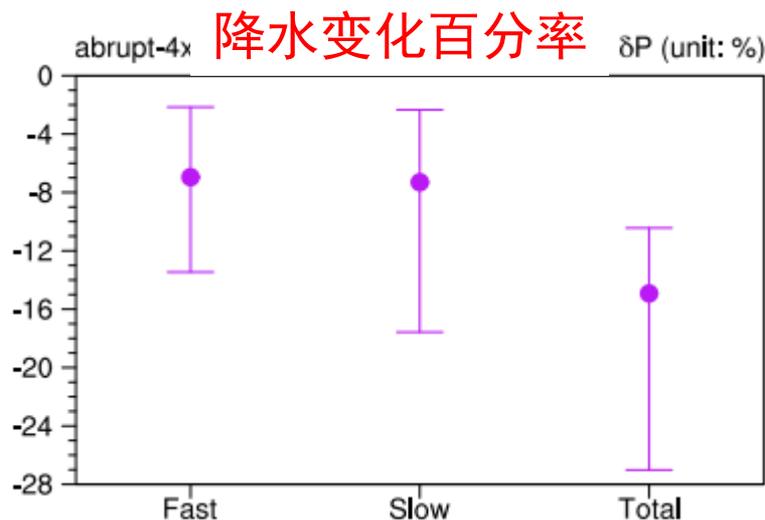
-3.2 -1.6 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.6 3.2

-3.2 -1.6 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.6 3.2

-3.2 -1.6 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.6 3.2

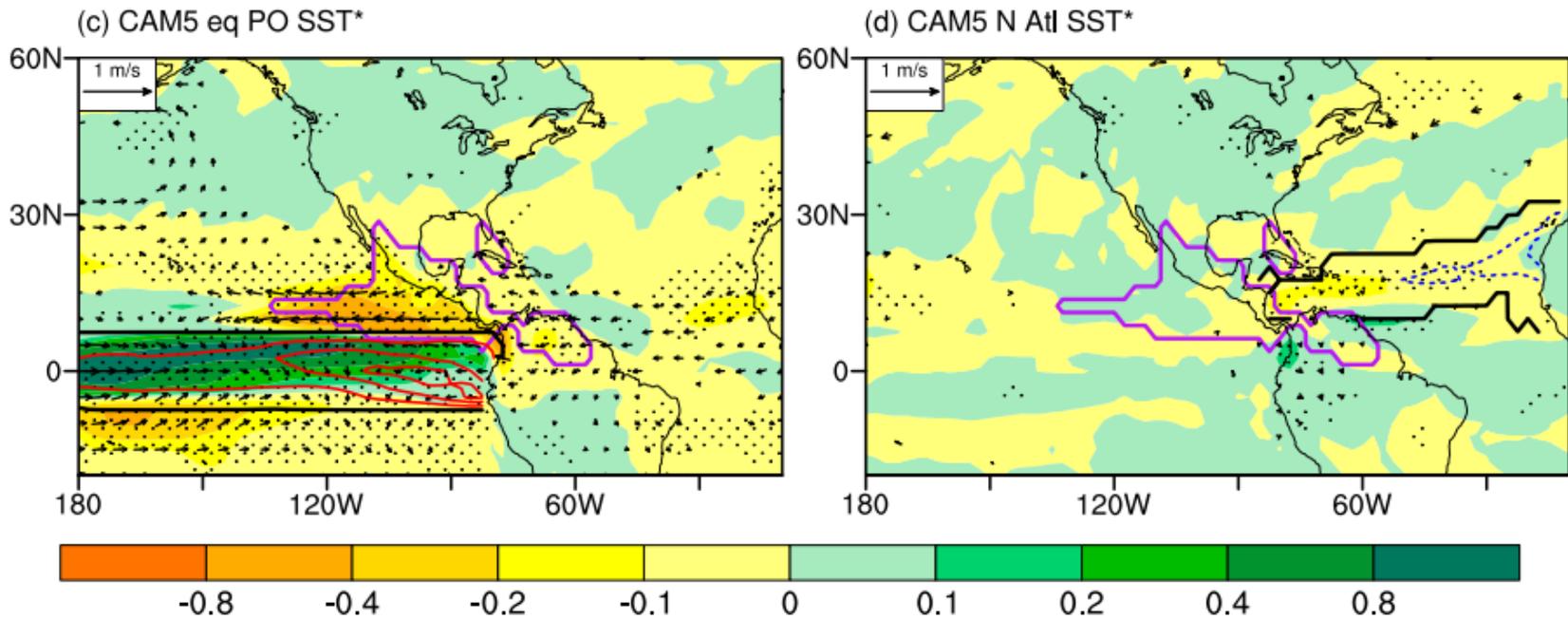
CMIP6 CGCM的总响应和定量降水变化

- ▶ 快响应阶段，北美季风区和整个北大西洋的辐合抬升减弱，降水减少
- ▶ 慢响应阶段，赤道太平洋降水明显增加，其北侧降水减少
- ▶ CO₂增加4倍后总响应的空间结构非常类似于SSP5-8.5情景预估结果
- ▶ CO₂直接辐射强迫和SST变化对北美季风降水的减少各有一半贡献



哪个区域的SST变化进一步削弱了NAM?

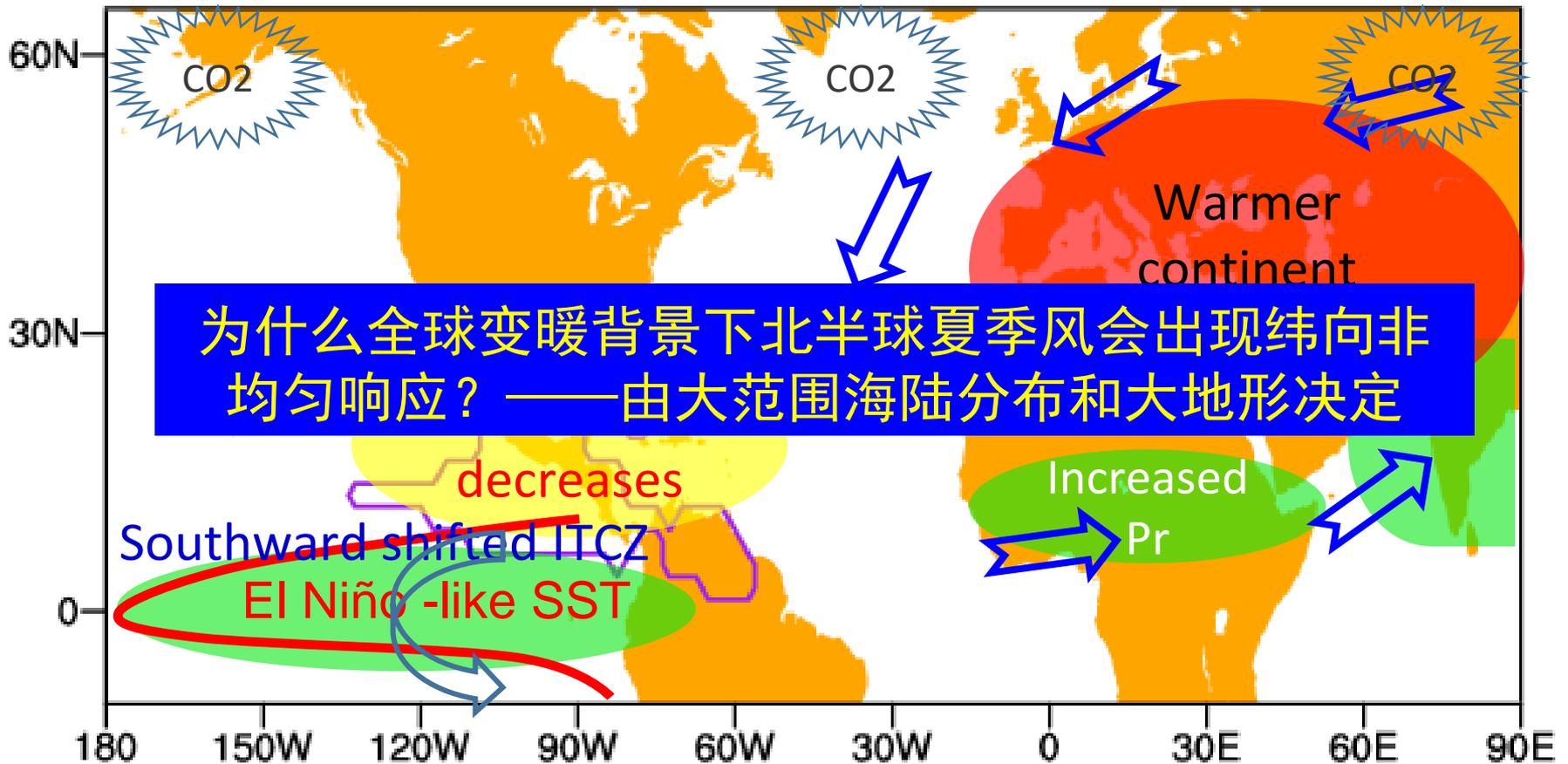
分别用预估的赤道太平洋的暖SST*和副热带北大西洋的冷SST*强迫CAM5，得到降水和850hPa风响应



- 赤道太平洋SST的类El Nino型变暖结构通过抑制ITCZ向北摆动而削弱北美夏季风降水，是慢响应阶段NAM进一步减弱的主因

小结：北美夏季风减弱机制

- ▶ 两个机制发挥着同等重要的作用：一是CO₂直接辐射强迫，二是赤道太平洋海温变暖的空间结构

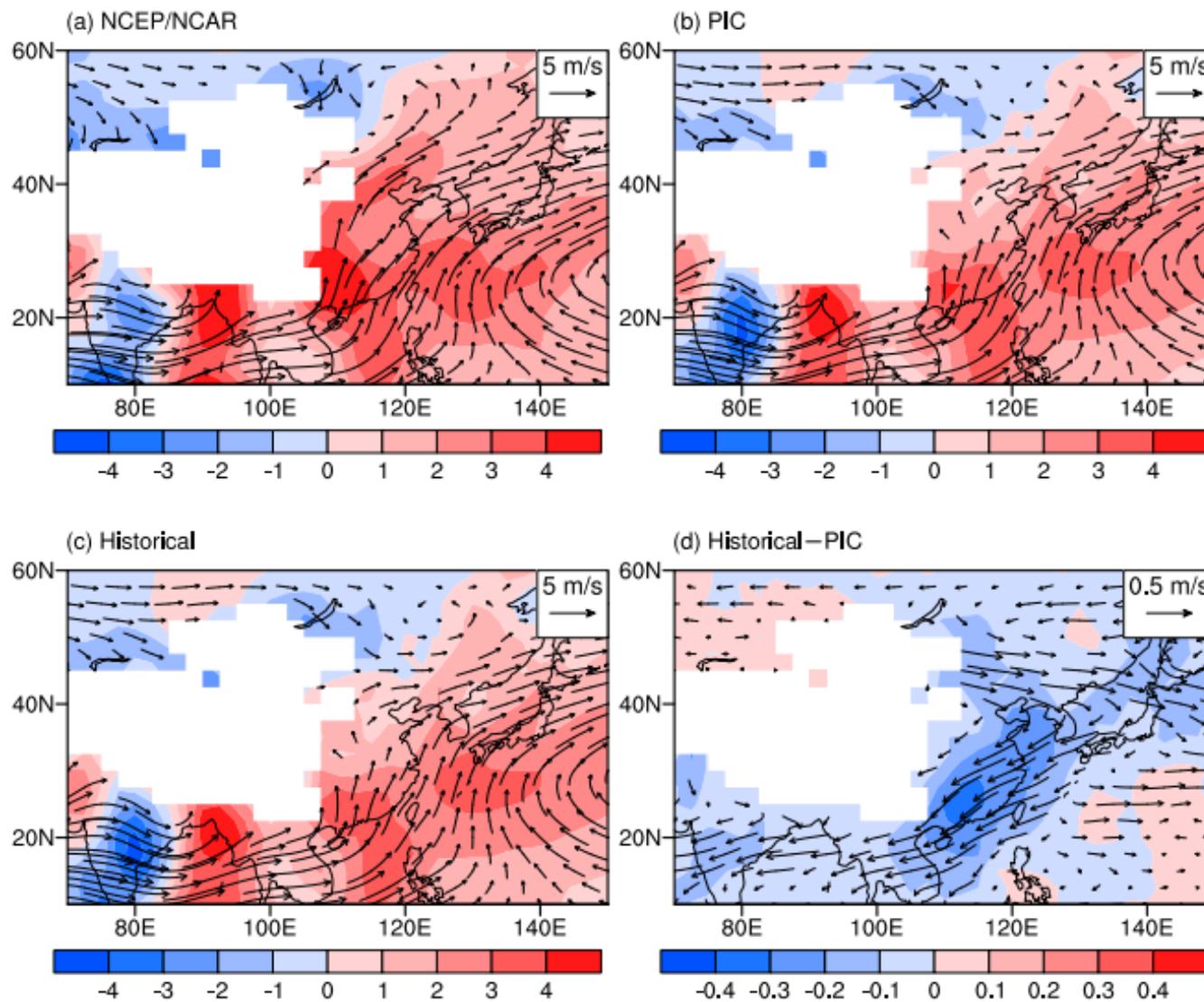


He C, Li T, Zhou W (2020) Drier North American Monsoon in Contrast to Asian–African Monsoon under Global Warming. *J Climate* 33 (22):9801-9816.



谢谢!

请各位专家指正!



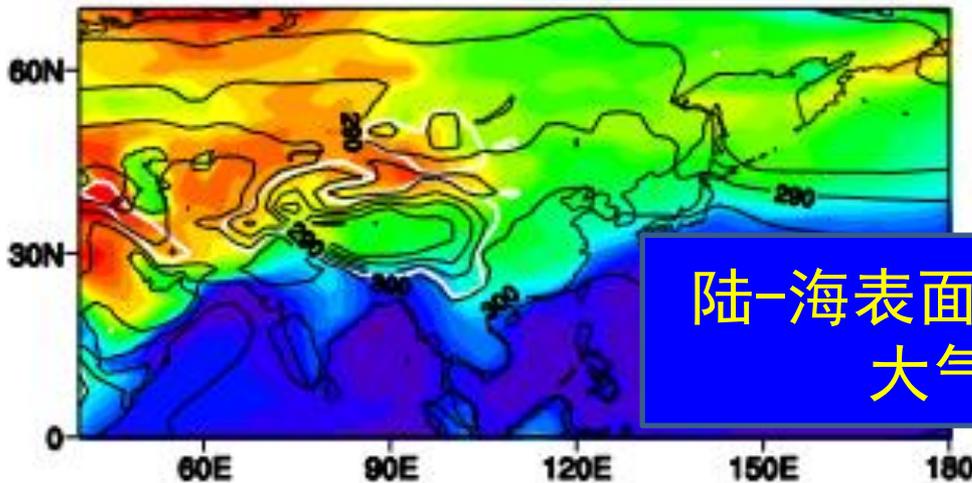
夏季气温和海陆温差的变化

- GW导致夏季纬向海陆热力对比在地表和底层增强，在对流层中上层减弱
- 上对流层的纬向海陆热力对比减弱

陆-海表面温差的变化是否能解释东亚大气环流变化的季节性？

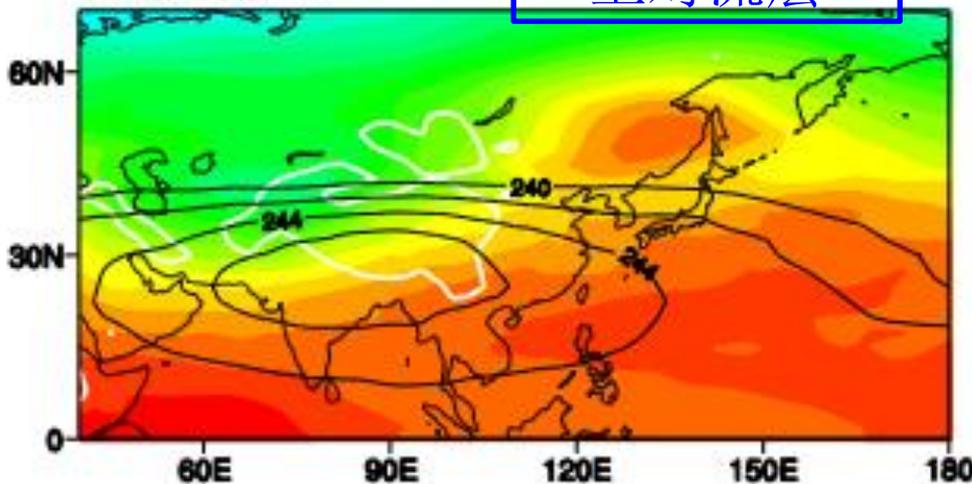
(a) T(SAT)

表面气温



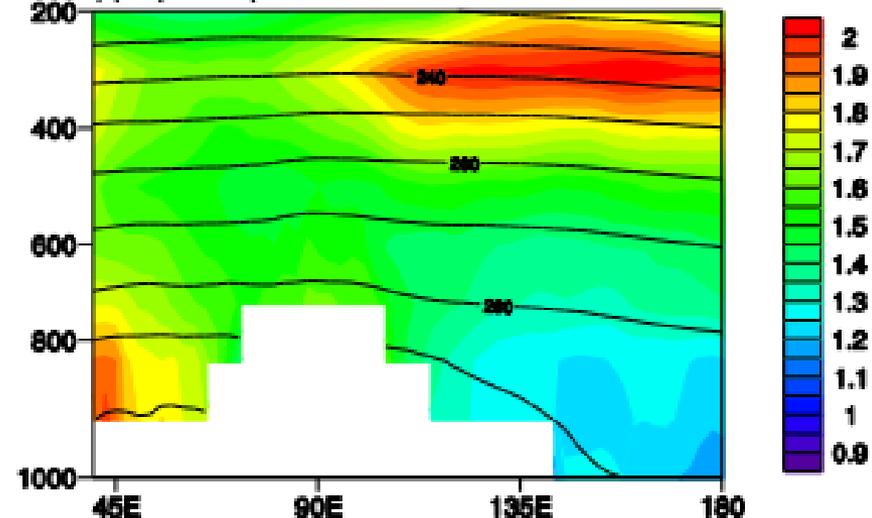
(b) T(200-500hPa)

上对流层



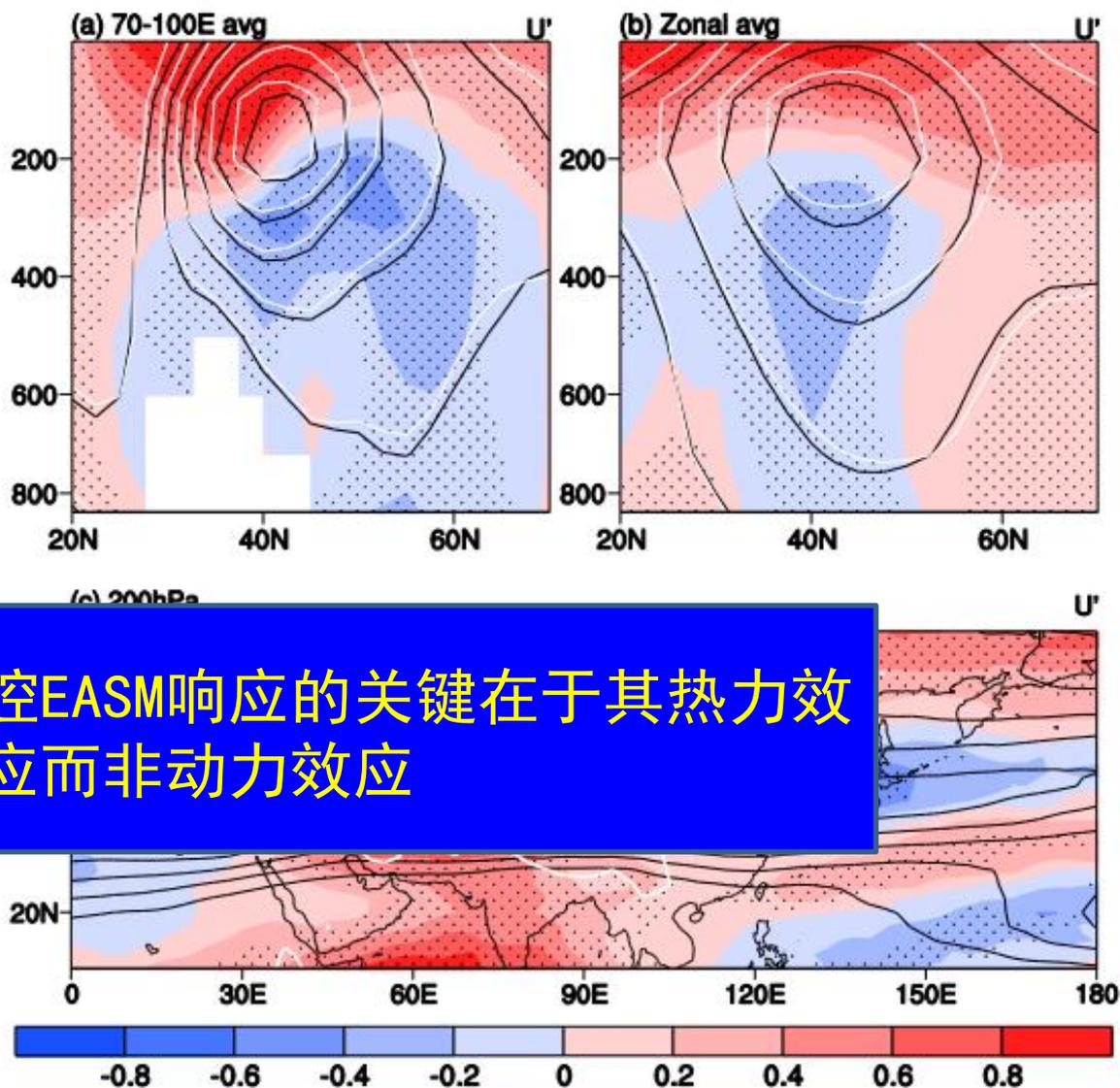
纬度-高度剖面

(c) T(25-50N)



TP的动力效应是否发挥了作用？

- ▶ TP可通过调控西风急流的经向位置而影响EASM的强度(Molnar et al. 2010; Chiang 2015,2017), 急流偏北则EASM偏强
- ▶ CMIP5模式显示TP周边西风急流轴向南移动并向上抬升, 不利于EASM



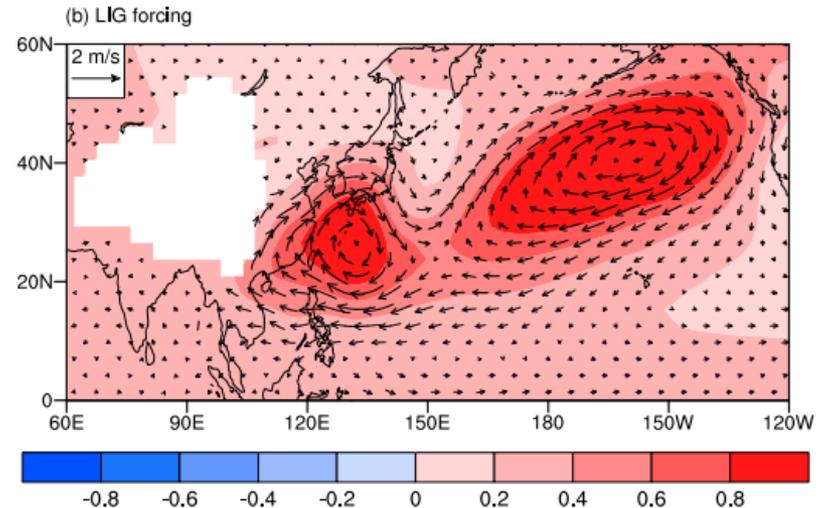
GW背景下, TP调控EASM响应的关键在于其热力效应而非动力效应

20C (白线)和21C(黑线)的纬向风及其变化(填色)

从冬到夏海陆热力差异的变化



- ▶ 温室气体导致一年四季都升温，海陆热力差异变化不大
- ▶ 间冰期北半球高纬地区夏/冬季接收太阳辐射量增多/减小，每年从冬到夏大陆的季节性升温幅度大于海洋，夏季海陆热力差异增大



用间冰期副热带北太平洋非绝热加热的变化量强迫LBM，模拟出西太副高增强

AGCM对CO2升高和SST变暖的响应

