

Future Changes in East Asian Summer Monsoon Circulation and Precipitation Under 1.5 to 5°C of Warming

Zhibo Li, Ying Sun, Tim Li, Yihui Ding and Ting Hu

2020.06.28

Email: 327602190@qq.com

个人简介

教育背景

- **2012.09 - 2016.06** 南京信息工程大学 大气科学（学士）
- **2016.09 - 2019.06** 南京信息工程大学 气象学（硕士）
研究方向：全球变暖下季风预估、海气相互作用
指导老师：李天明教授、孙颖研究员
- **2019.08 - 2020.07** 中科院大气所 - 季风系统研究中心 科研助理
指导老师：陈文研究员、孙颖研究员
- **2020.09 -** 北京大学 物理海洋学（博士）
研究方向：大陆演化与季风系统演变
指导老师：胡永云教授

已发表论文

1. **Li Zhibo**, Jia Liu, Tim Li*, Ying Sun. **(2019)** Relative roles of dynamic and thermodynamic processes in causing positive and negative global mean SST trends during the past 100 years. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 86(c), 18-32.
2. **Li Zhibo**, Ying Sun*, Tim Li, Yihui Ding, Ting Hu. **(2019)** Future changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation under 1.5 to 5°C of warming. *Earth's Future*, 7.

1

简单介绍亚澳夏季风

2

定义EASM环流和降水指数

3

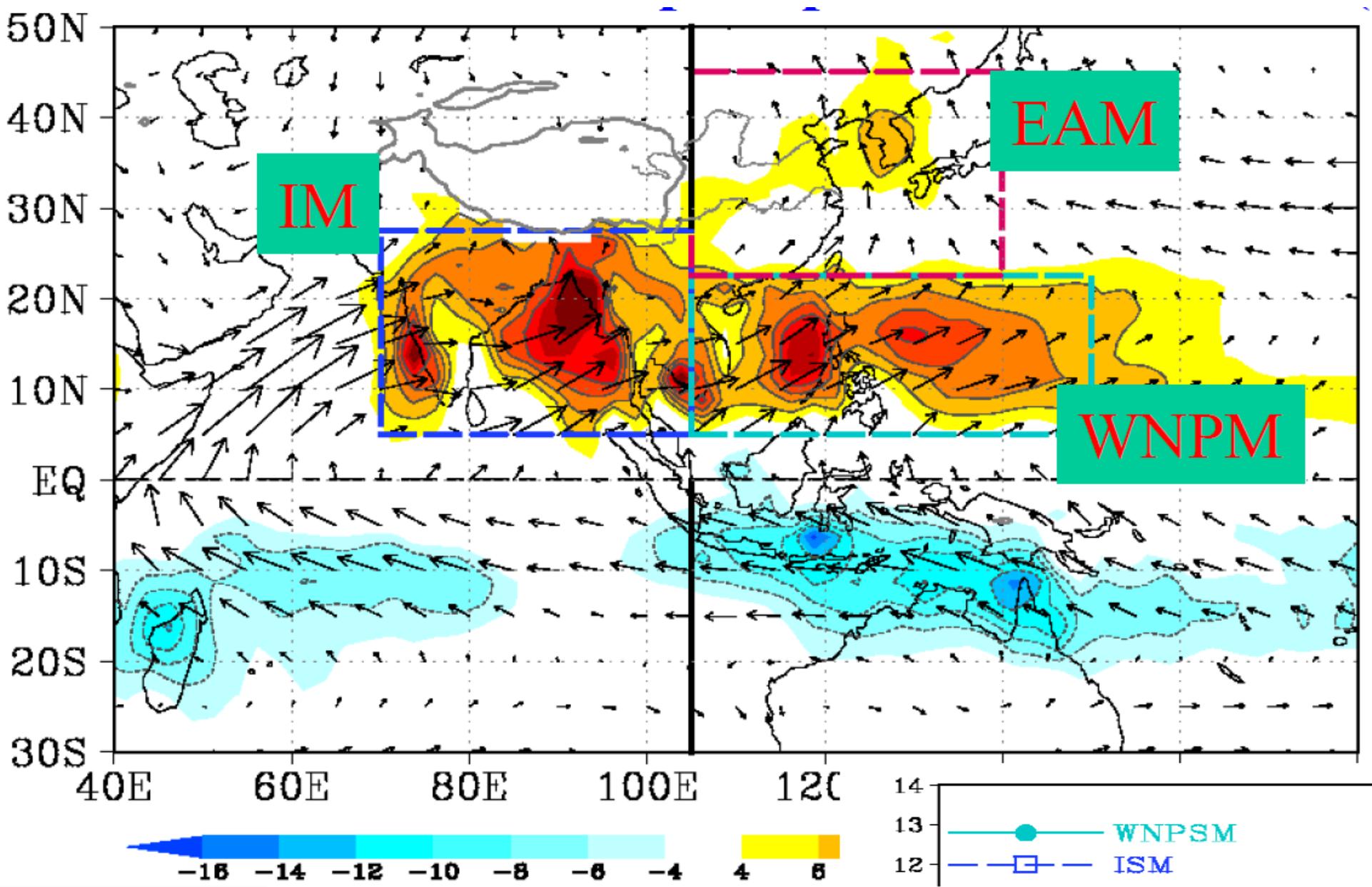
基于CanESM2大样本模式预估EASM变化

4

机理解释

5

结论



1

简单介绍亚澳夏季风

2

定义EASM环流和降水指数

3

基于CanESM2大样本模式预估EASM变化

4

机理解释

5

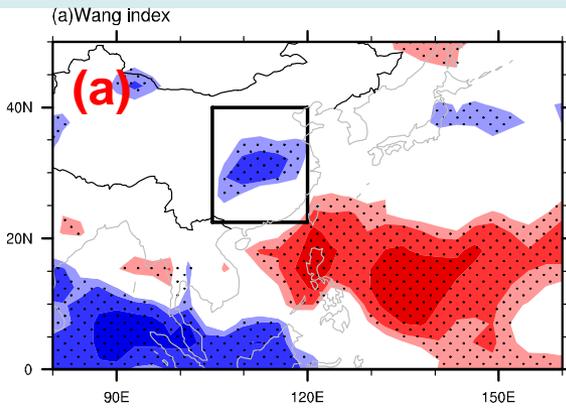
结论

繁多的EASM环流指数

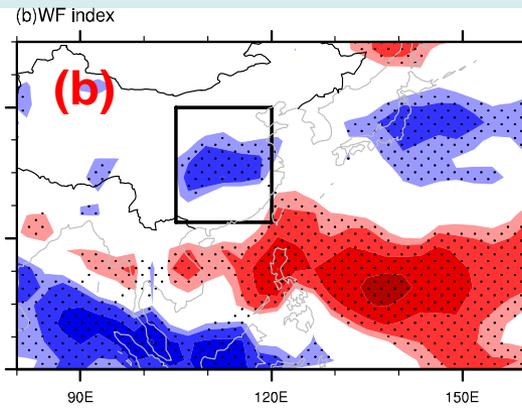
| Index | Reference | Defining variable(s), level (hPa), and regions | Correlation with PC1 and PC2 | | Combined skill (%) |
|-----------|--------------------------|---|---------------------------------|--------------|-----------------------|
| | | | PC1 | PC2 | |
| I_{GOY} | Guo (1983) | SLP gradient, (10°–50°N, 110°–160°E) | –0.34 | 0.49 | 12.6 |
| I_{SZ} | Shi and Zhu (1996) | SLP gradient, (20°–50°N, 110°–160°E) | 0.02 | 0.70 | 8.3 |
| I_{PSN} | Peng et al. (2000) | Φ gradient, 500, (10°–50°N, 110°–150°E) | 0.25 | 0.63 | 12.2 |
| I_{ZZ} | Zhao and Zhou (2005) | SLP gradient, (30°–50°N, 110°–160°E) | –0.01 | 0.78 | 8.9 |
| I_{WY} | Webster and Yan (1999) | u , 850–200, (10°–40°N, 110°–140°E) | –0.57 | –0.40 | 16.6 |
| I_{WDJ} | Wang et al. (1998) | u , 850–200, (5°–15°N, 90°–130°E) | –0.86 | –0.15 | 20.0 |
| I_{ZHW} | Zhu et al. (2000) | u , 850–200, (0°–10°N, 100°–130°E); SLP | –0.55 | –0.51 | 17.4 |
| I_{HSX} | He et al. (2001) | u , 850–200, (0°–10°N, 100°–130°E) | –0.89 | 0.04 | 19.3 |
| I_{WF} | Wang and Fan (1999) | vorticity, 850, (5°–32.5°N, 90°–140°E) | –0.97 | 0.06 | 21.1 |
| I_{ZTC} | Zhang et al. (2003) | vorticity, 850, (10°–35°N, 100°–150°E) | –0.93 | –0.03 | 20.1 |
| I_{LKY} | Lau and Yang (2000) | vorticity, 200, (20°–50°N, 110°–150°E) | –0.38 | –0.39 | 12.3 |
| I_{HY} | Huang and Yan (1999) | vorticity, 500, (20°–60°N, 125°E) | –0.38 | –0.08 | 8.9 |
| I_{LZ} | Li and Zeng (2002) | v , 850, (10°–40°N, 110°–140°E) | 0.93 | 0.03 | 20.0 |
| I_{WHI} | Wang (2002) | u , v , 850, (20°–40°N, 110°–125°E) | 0.70 | –0.14 | 16.3 |
| I_{QCZ} | Qiao et al. (2002) | u , v , 850, (20°–40°N, 110°–140°E) | 0.81 | –0.20 | 14.0 |
| I_{JOC} | Ju et al. (2005) | u , v , 850, (22°–32°N, 112°–135°E); OLR | 0.59 | 0.14 | 14.0 |
| I_{WN} | Wu and Ni (1997) | v , 850, (20°–30°N, 110°–130°E) | 0.56 | –0.02 | 12.2 |
| I_{WWO} | Y. F. Wang et al. (2001) | v , 850, (20°–40°N, 110°–140°E) | 0.69 | 0.28 | 17.8 |
| I_{LZh} | Li and Zhang (1999) | u , v , 850, (7.5°–17.5°N, 105°–125°E) | –0.44 | 0.05 | 9.8 |
| I_{LWY} | Liang et al. (1999) | u , v , 850, (5°–20°N, 105°–120°E); OLR | –0.89 | 0.10 | 19.8 |
| I_{WL} | Wu and Liang (2001) | u , v , 850, (5°–20°N, 105°–120°E); OLR | –0.35 | 0.23 | 10.0 |
| I_{ZLY} | Zhang et al. (2002) | u , v , 850, (5°–20°N, 105°–120°E); OLR | –0.57 | 0.21 | 14.5 |
| I_{DXZ} | Dai et al. (2000) | u , v , 850, (5°–20°N, 105°–120°E) | –0.93 | 0.07 | 20.7 |
| I_{LC} | Lu and Chan (1999) | v , 1000, (7.5°–20°N, 107.5°–120°E) | –0.51 | 0.12 | 12.1 |
| I_{YO} | Yao and Qian (2001) | Moisture PV, 850, (10°–20°N, 105°–120°E) | 0.06 | –0.42 | 12.7 |

不同的EASM指数及其与JJA降水的相关系数

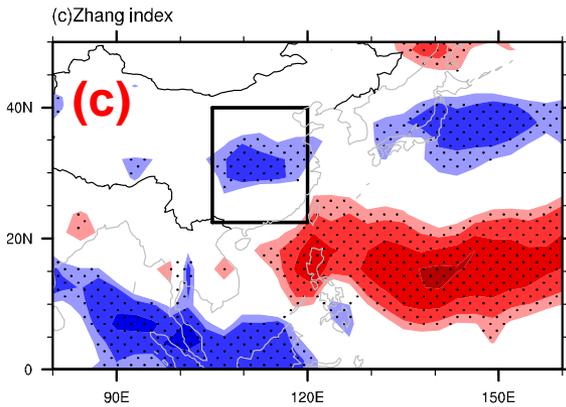
Wang et al.
1998



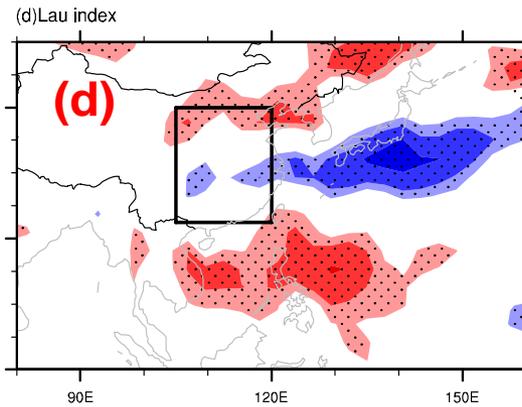
Wang and Fan
1998



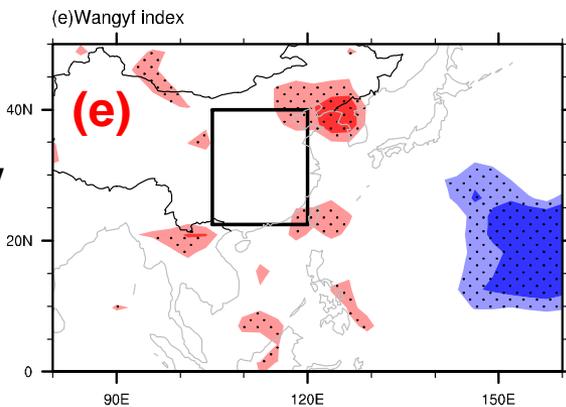
Zhang et al.
2003



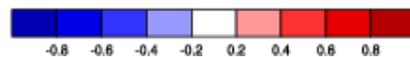
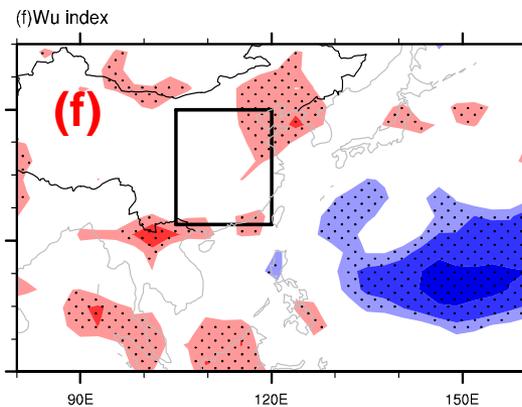
Lau and Yang
2000



Wangyf 850V
(20-40N,110-125E)



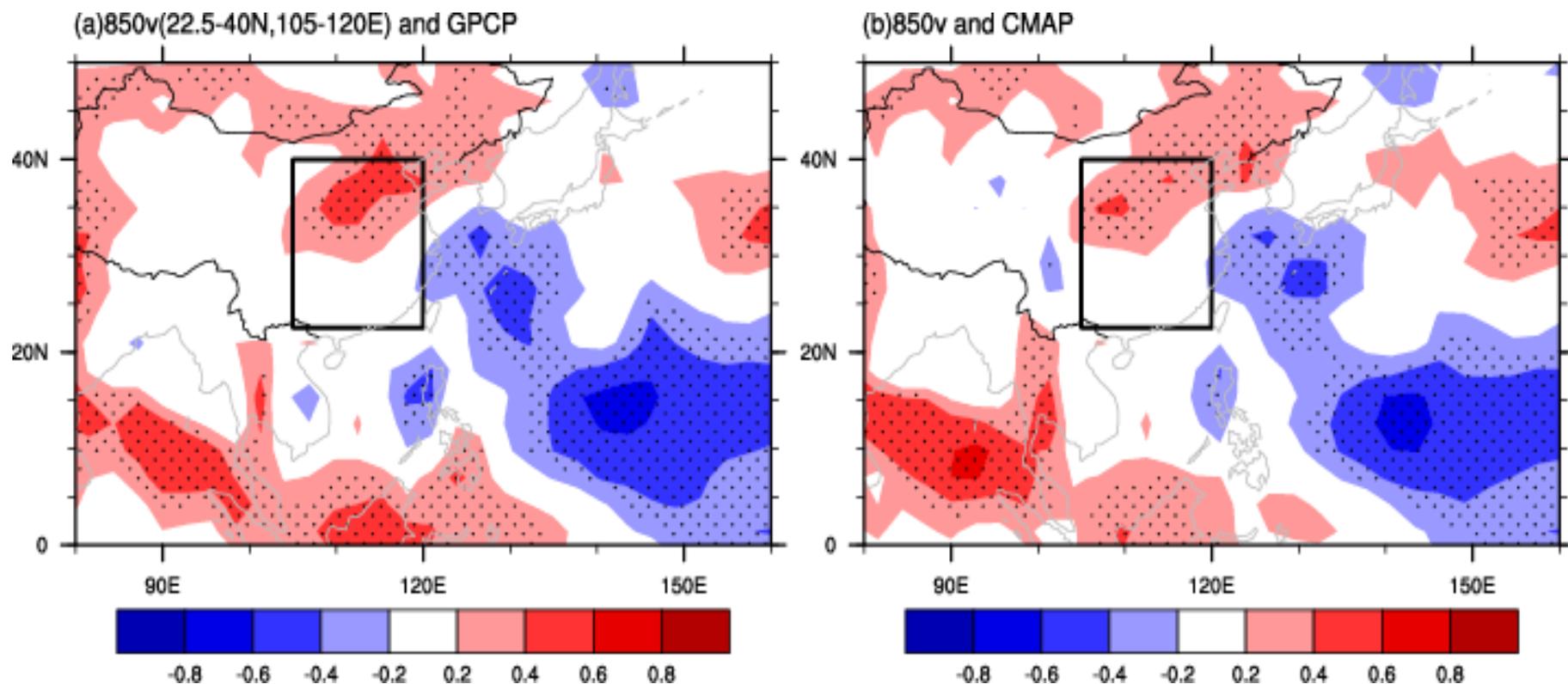
Wu 850V (20-30N,110-130E)



本工作用到的EASM指数

环流指数: JJA区域平均(22.5 - 40N, 105 - 120E) 850hPa经向风
(e. g. Wang 2001; Zhou et al. 2009; He et al. 2019)

降水指数: JJA区域平均(22.5 - 40N, 105 - 120E)降水



1

简单介绍亚澳夏季风

2

定义EASM环流和降水指数

3

基于CanESM2大样本模式预估EASM变化

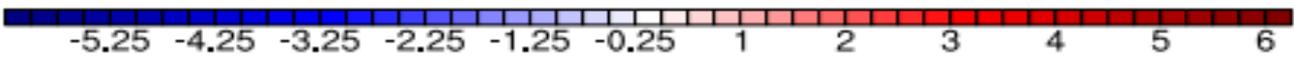
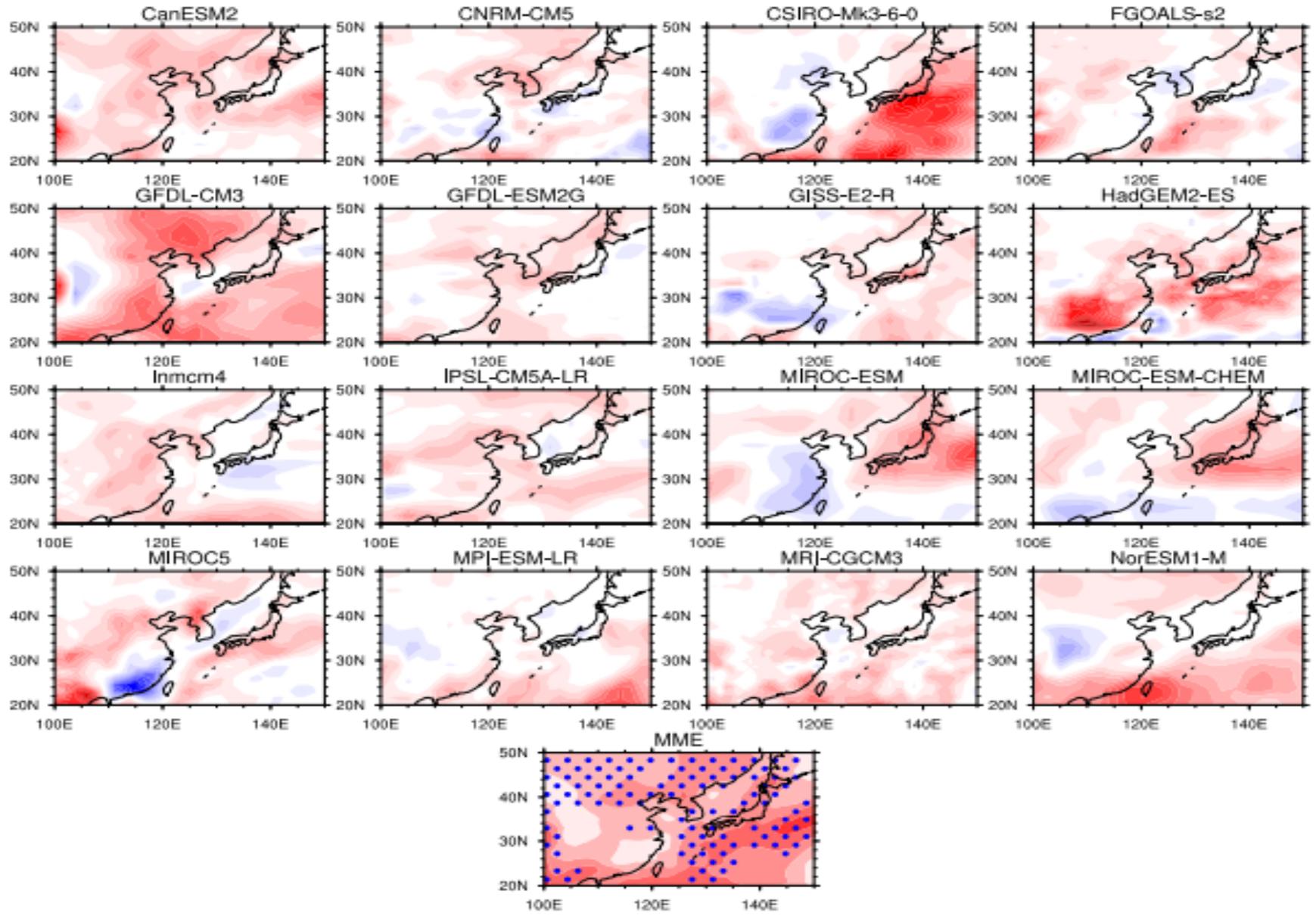
4

机理解释

5

结论

CMIP5多模式RCP4.5情境下未来东亚JJA降水变化



资料:

| | | | |
|-------------------------------------|-----------|--------|-----------|
| ERA-interim | 1979-2016 | NCEP1 | 1979-2016 |
| GPCP | 1979-2016 | CMAP | 1979-2016 |
| CanESM2 Large Ensemble (50 members) | | | |
| Historical | 1950-2005 | RCP8.5 | 2006-2100 |

多模式集合平均的缺点: 将不同的增暖信号杂糅在一起

本工作的研究亮点:

预估未来**特定增暖水平下**, 东亚夏季风系统的**线性/非线性变化**

相对工业化前的特定增暖水平:

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| 1.0度: 1995-2004年(Current Climate) | 1.5度: 2007-2016年 |
| 2.0度: 2021-2030年 | 3.0度: 2042-2051年 |
| 4.0度: 2061-2070年 | 5.0度: 2079-2088年 |

评估模式时, CanESM2时间为1977-2006, 观测为1986-2015 (增暖0.7度)

模式集合平均和观测的空间相关系数(20S-70N, 40E-180E)

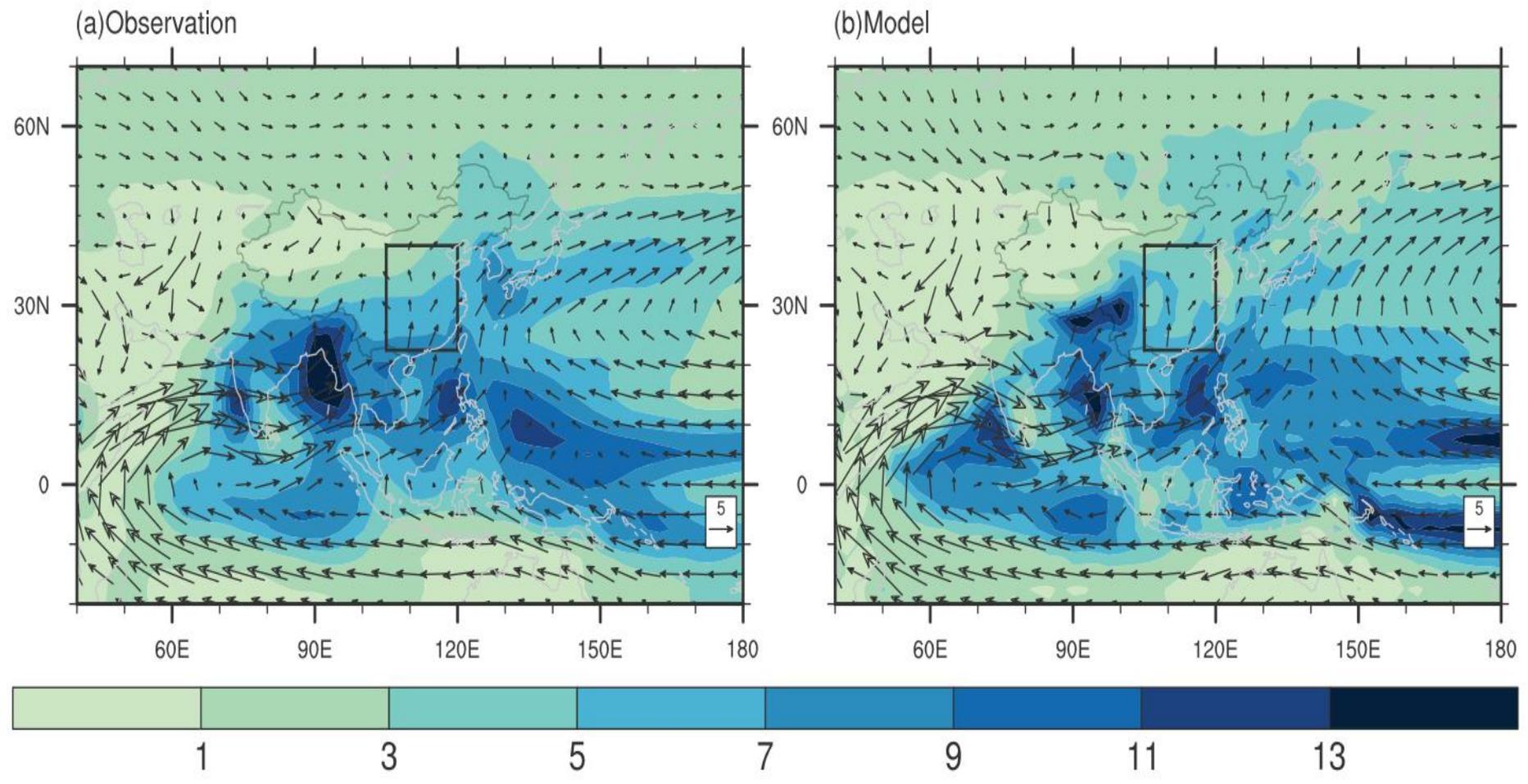
First annual cycle: 夏季(JJA)减冬季(DJF)降水

Second annual cycle : 春季(MAM) 减秋季(SON)降水

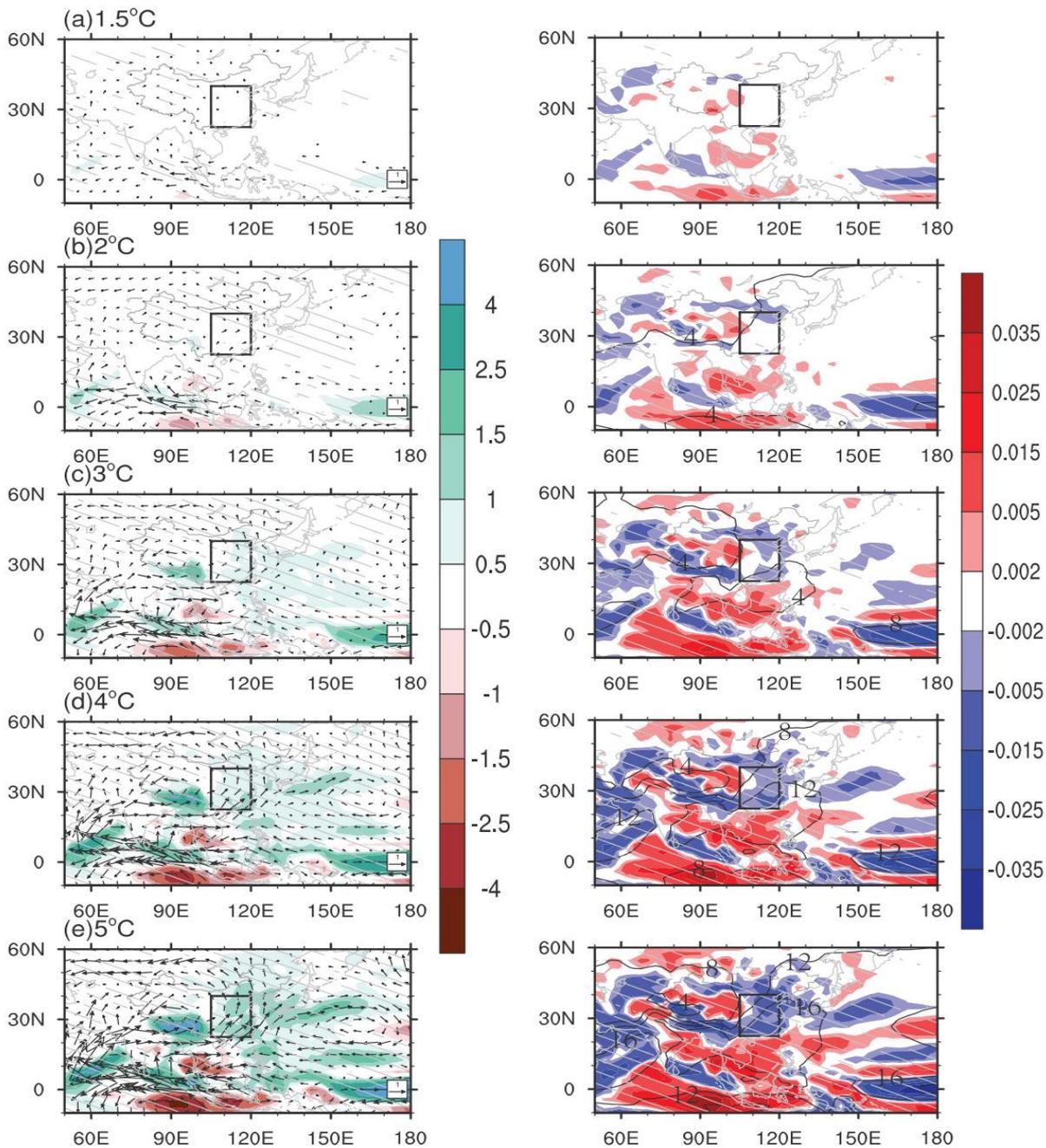
| PCC | ERA-interim/GPCP | NCEP1/ CMAP |
|---------------------|------------------|-------------|
| V-850hPa | 0.90 | 0.93 |
| Precipitation | 0.78 | 0.83 |
| Q-1000~300hPa | 0.94 | 0.84 |
| Omega-500hPa | 0.72 | 0.70 |
| First annual cycle | 0.79 | 0.81 |
| Second annual cycle | 0.85 | 0.86 |

EASM关键区内模式(50-run的中位数)和观测的标准差，括号内代表模式5%-95%的范围

| STD | Model | ERA-interim/GPCP | NCEP1/ CMAP |
|---------------|---------------------|------------------|-------------|
| V-850hPa | 0.59(0.44-0.71) | 0.52 | 0.49 |
| Precipitation | 0.51(0.41-0.61) | 0.51 | 0.44 |
| Q-1000~300hPa | 0.25(0.17-0.32) | 0.21 | 0.19 |
| Omega-500hPa | 0.0059(0.005-0.008) | 0.0069 | 0.0057 |

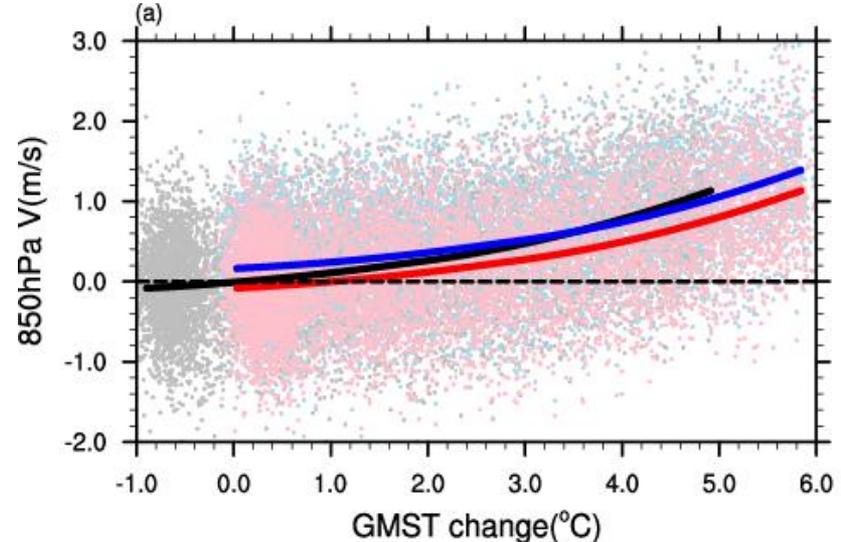


阴影：
降水
箭头：
850hPa风场

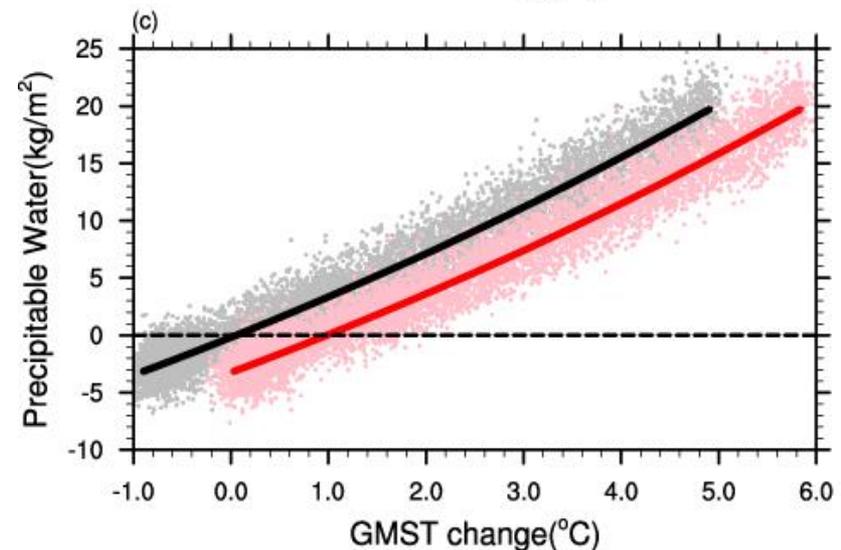
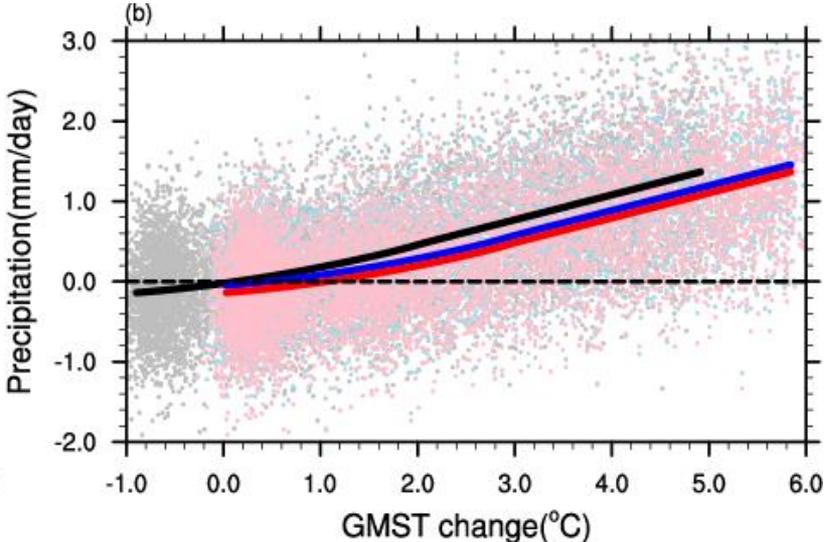


阴影：
500hPa垂直
速度(ω)
等值线：
可降水量

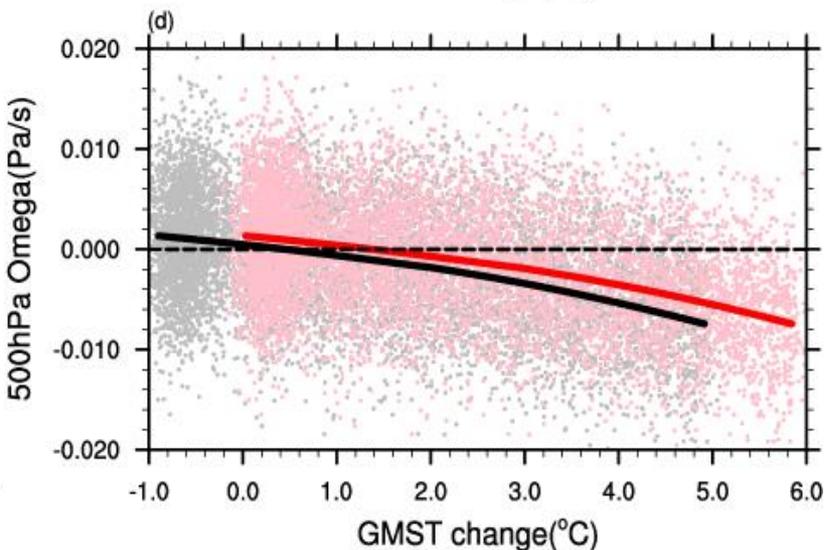
环流指数



降水指数

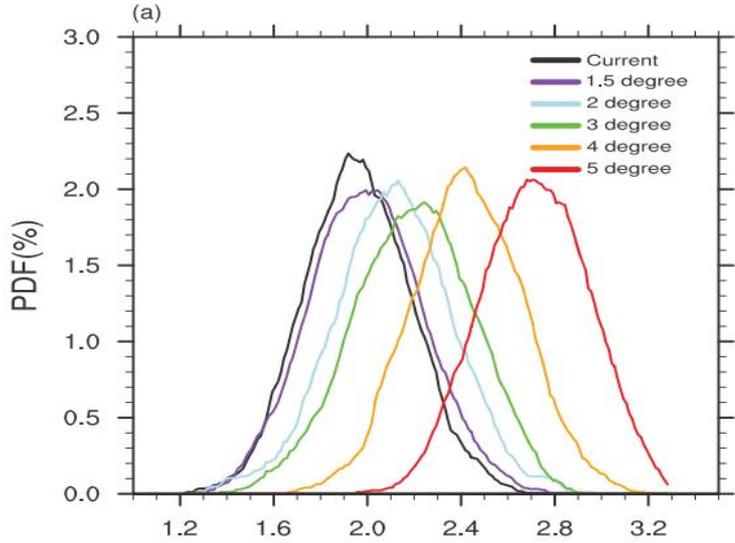


可降水量

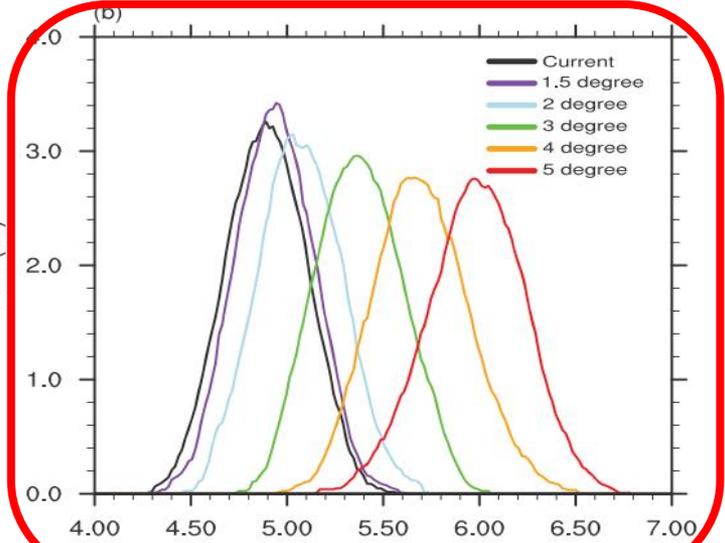


500hPa垂直速度(omega)

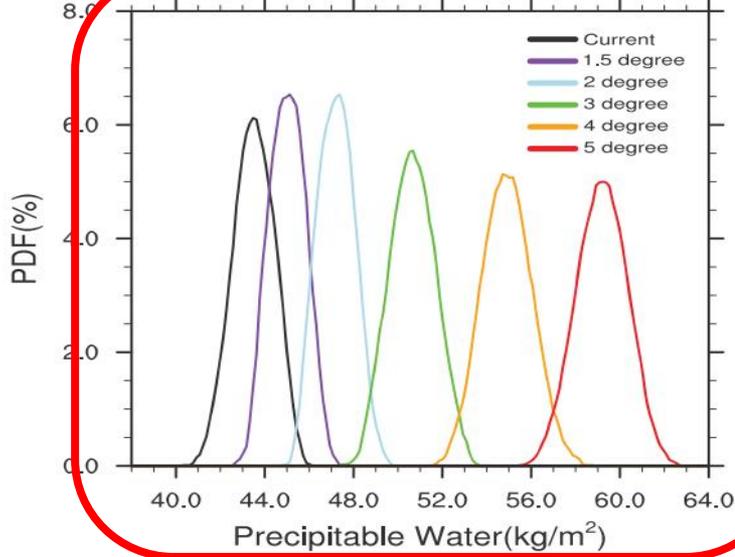
环流指数



降水指数

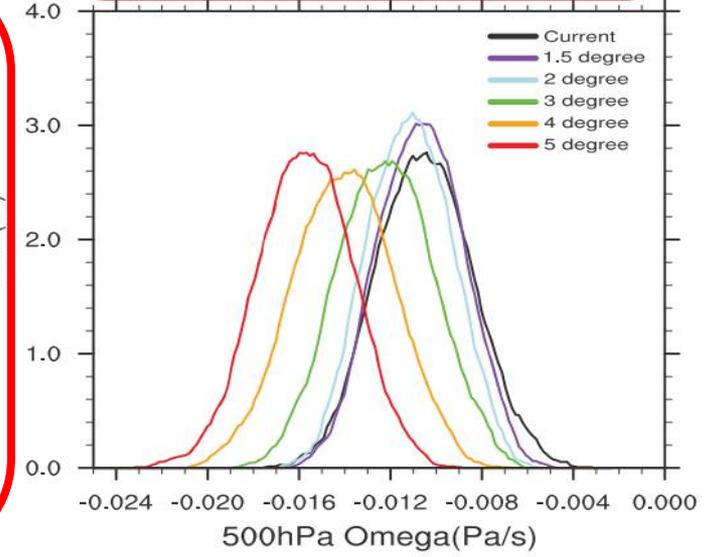


850hPa V(m/s)



可降水量

Precipitation(mm/day)



500hPa垂直速度(omega)

每度增暖时各物理量变化百分比

| | 2° C | 3° C | 4° C | 5° C |
|--------------------|-------|-------|------|------|
| EASM-可降水量 | 7.8 | 8.5 | 8.5 | 8.1 |
| EASM-降水 | 3.5 | 6.0 | 6.1 | 5.0 |
| EASM-850 hPa经向风 | 4.2 | 6.9 | 9.9 | 14.8 |
| EASM-500 hPa垂直速度 | 3.1 | 9.6 | 14.1 | 12.4 |
| EASM-静力稳定度 | 2.2 | 2.4 | 2.1 | 1.9 |
| Global-可降水量 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 6.8 |
| Global-降水 | 1.6 | 1.3 | 1.1 | 1.1 |
| Global-500 hPa垂直速度 | -11.6 | -15.0 | -5.1 | -2.1 |
| Global-静力稳定度 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 1.9 |

静力稳定度：400~300hPa位温 - 1000~850hPa位温

科学问题

1. 为什么东亚夏季风环流和降水随全球变暖呈非线性变化？
2. 是否可以定量诊断热力和动力过程对降水变化的相对贡献？

1

简单介绍亚澳夏季风

2

定义EASM环流和降水指数

3

基于CanESM2大样本模式预估EASM变化

4

机理解释

5

结论

东西向海陆热力对比与850hPa经向风的关系

EASM低层南风主要受大尺度东西向海陆热力对比调控（海陆热容量不同）

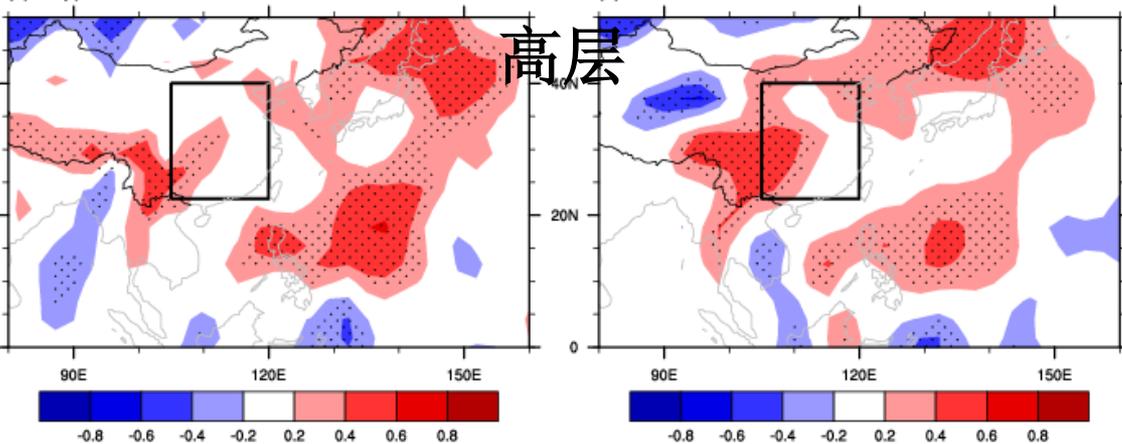
东西向(TE_{upper} ; TE_{lower}) 的海陆热力对比(区域平均的厚度场)：

$TE_{upper} \approx (200 - 500 \text{ hPa}) Z (100 - 115\text{E}, 22.5 - 40\text{N}) - Z (135 - 150\text{E}, 22.5 - 40\text{N})$

$TE_{lower} \approx (500 - 850 \text{ hPa}) Z (100 - 115\text{E}, 22.5 - 40\text{N}) - Z (135 - 150\text{E}, 22.5 - 40\text{N})$

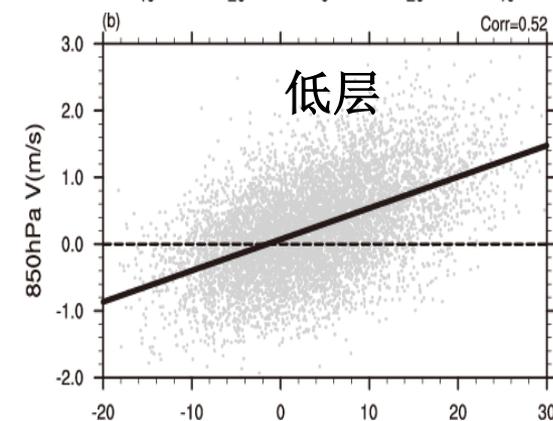
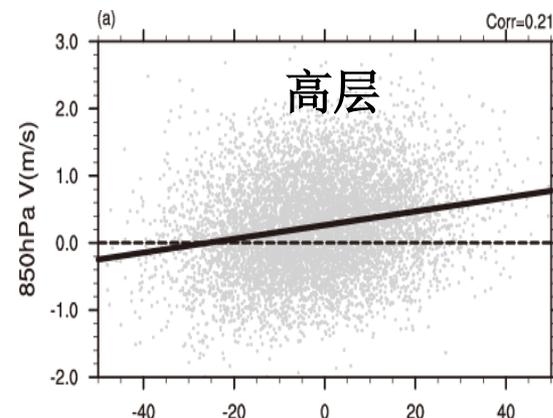
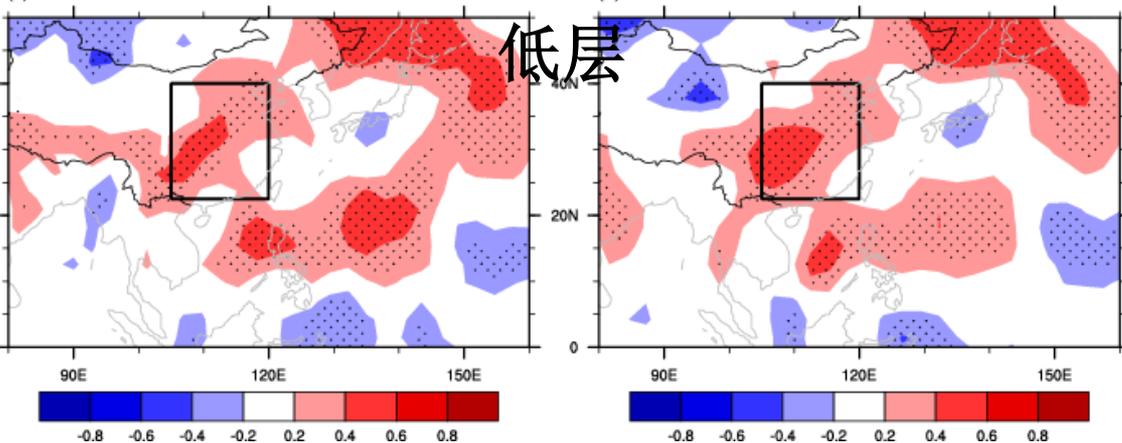
(a) $TE_{upper}-850V$

(b)



(c) $TE_{lower}-850V$

(d)



模式中热力对比与850hPa-V的关系

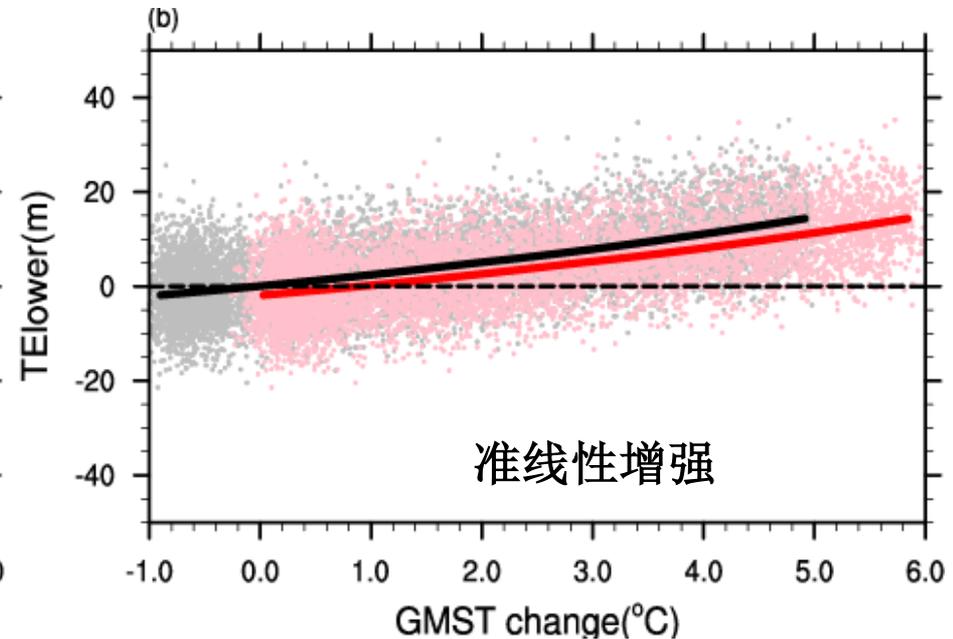
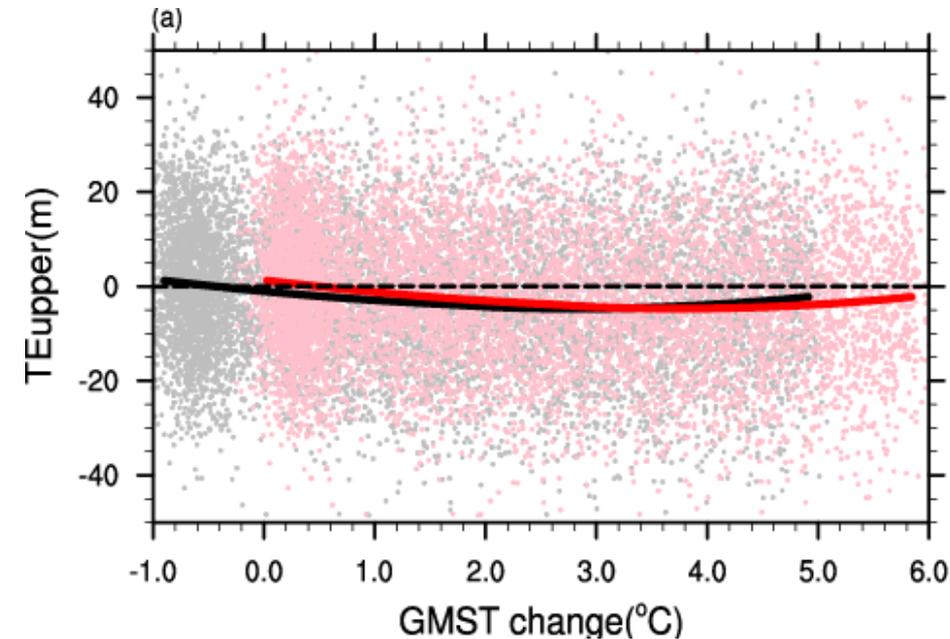
观测中热力对比与850hPa-V的相关系数

对流层低层东西向海陆热力对比越大，EASM低层南风越强

全球变暖下东亚夏季风局地正反馈机制

500-200hPa东西向热力对比

850-500hPa东西向热力对比



为何低层海陆热力对比的准线性增强会导致低层经向风非线性变化???

全球变暖下局地降水增强释放非绝热加热，进一步增强局地海陆热力对比，导致更强（非线性）的局地南风、降水、上升运动。

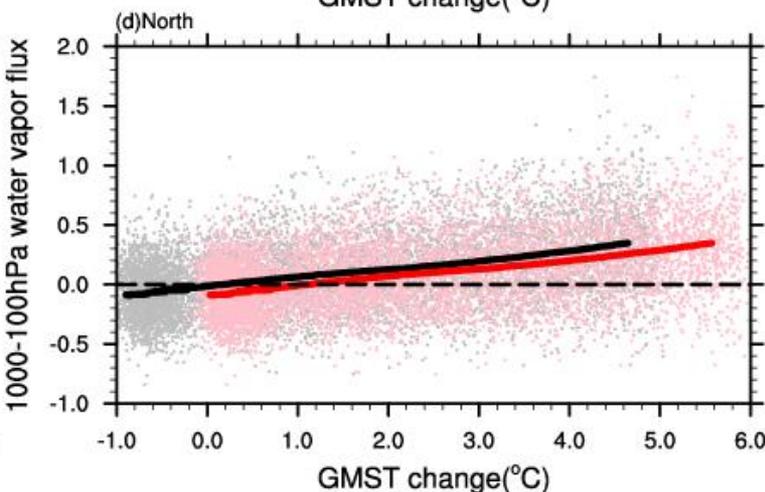
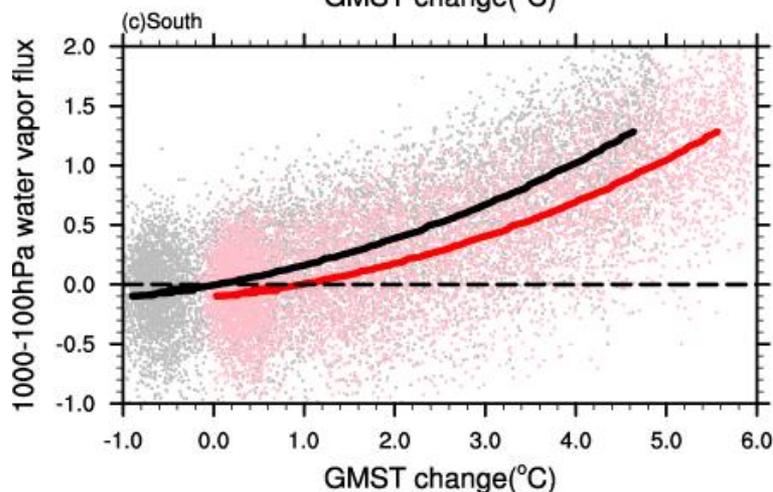
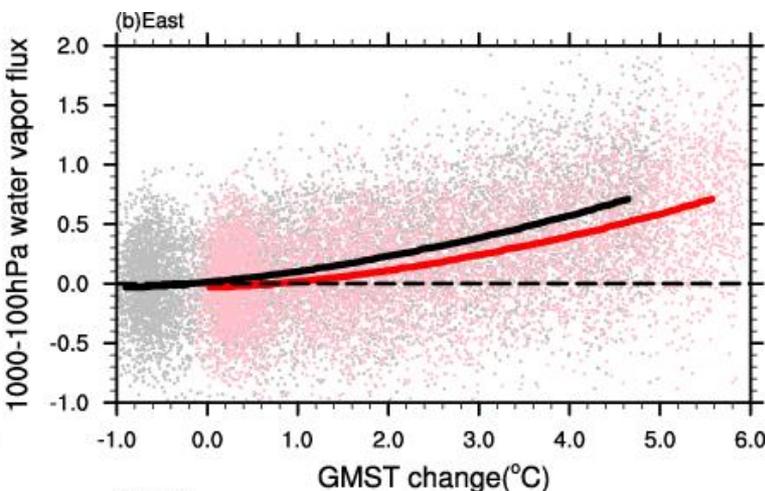
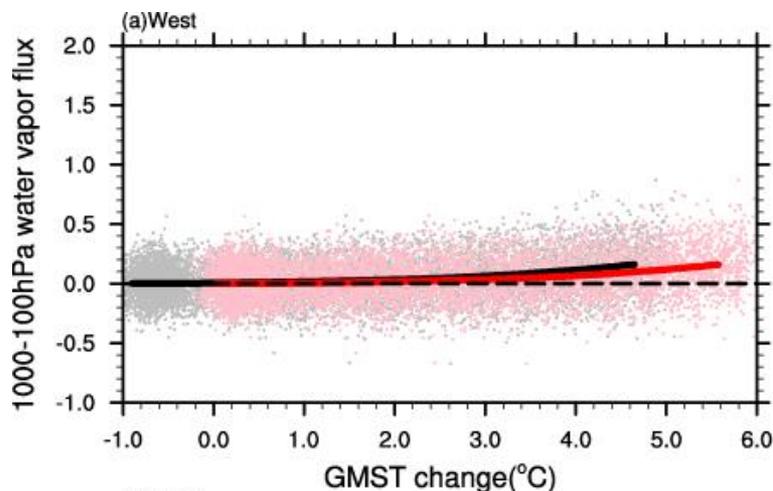
大尺度（线性）+ 局地小尺度（非线性） \longrightarrow 非线性

西边界
净流入

东边界
净流出

北边界
净流出

南边界
净流入



$$\langle \Delta(q \cdot \vec{V}) \rangle \approx \langle \vec{V} \cdot \Delta q \rangle + \langle \bar{q} \cdot \Delta \vec{V} \rangle$$

| 南边界 | 2° C | 3° C | 4° C | 5° C |
|-----|------|------|------|------|
| 热力 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 5.9 |
| 动力 | 3.7 | 5.4 | 9.6 | 10.9 |

热力和动力项对南边界水汽流入均为正贡献，热力项呈准线性增强，动力项呈非线性增强

不同增暖水平下降水方程诊断

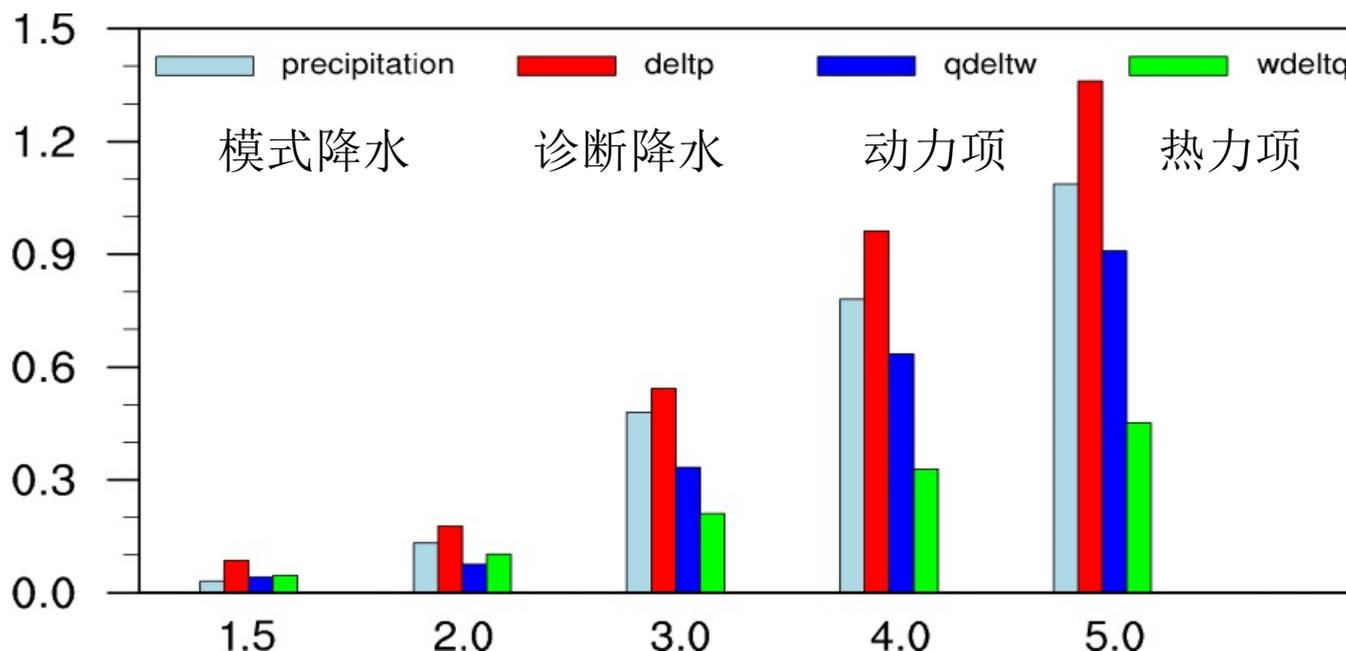
采用 **Huang et al. (2013)** 的简化水汽方程:

$$\Delta P = -\frac{1}{\rho g} (\Delta \omega \cdot \bar{q} + \bar{\omega} \cdot \Delta q)$$

降水 动力 热力

q 表面比湿 ω 500hPa垂直速度

| | 2° C | 3° C | 4° C | 5° C |
|----|------|------|------|------|
| 动力 | 3.2 | 9.7 | 14.5 | 13.2 |
| 热力 | 6.0 | 6.3 | 6.1 | 5.7 |



1. 动力项与热力项均对降水增加起**正贡献**作用
2. 增暖3度前，动力项与热力项的正贡献作用相当
3. 增暖3度后，**动力项**的正贡献作用逐渐占主导

1

简单介绍亚澳夏季风

2

定义EASM环流和降水指数

3

基于CanESM2大样本模式预估EASM变化

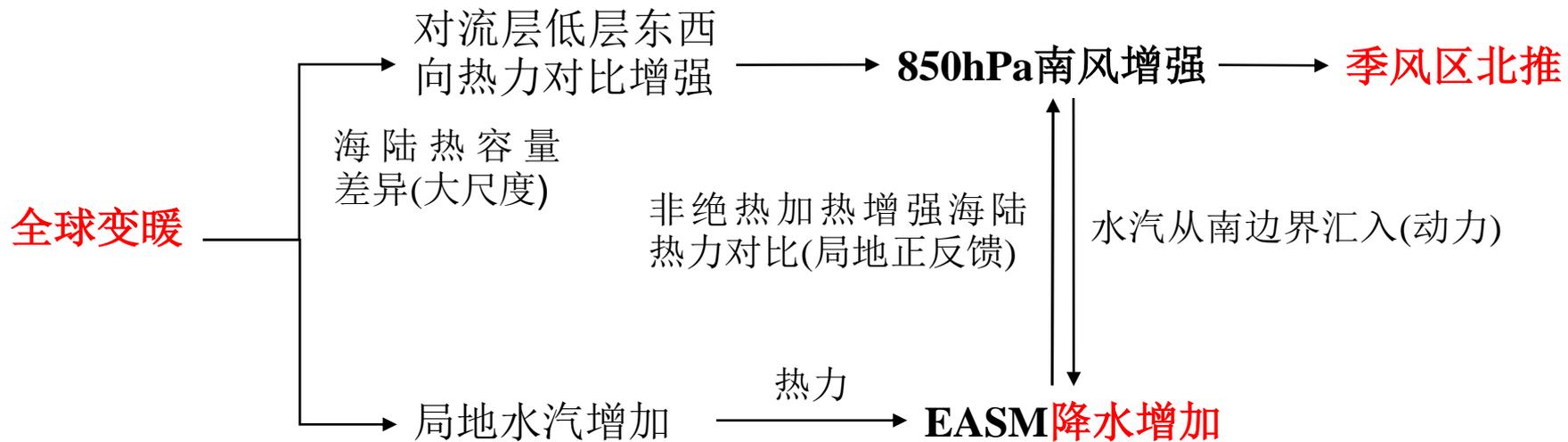
4

机理解释

5

结论

- EASM降水、850hPa经向风和500hPa垂直上升速度随全球变暖**非线性增强**，可降水量随全球变暖准线性增强，**夏季风区向中国北方推进**
- EASM环流增强主要是由于对流层**低层海陆热力对比增强**
- EASM关键区**南边界**向北的水汽输送是季风区水汽增加的主要贡献因子(蒸发项贡献很小，未展示)
- 当全球增暖小于2度时，动力项和热力项对EASM降水增加的正贡献相当，进一步增暖后，**动力项**逐渐成为主导



**谢谢！
欢迎交流学习！**

Email: 327602190@qq.com