



不同天气状况下的风场日变化响应和暴雨成因

陈桂兴

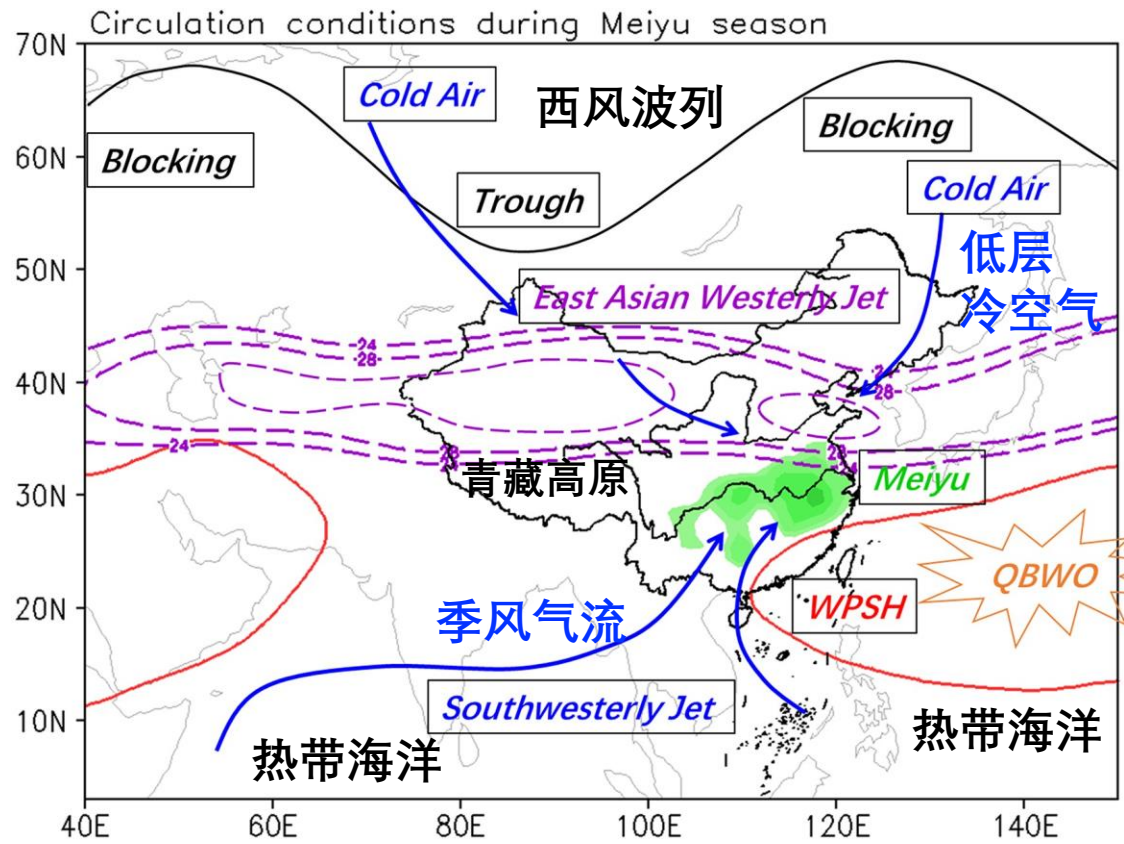
曾文馨 (5-30)、吴若婷、刘碧琪、刘旋钰、阮天明...

中山大学 大气科学学院

<https://atmos.sysu.edu.cn/> (PPT公开)

<https://pan.baidu.com/s/1ztOT6-KtgcxbRion375c5A> 提取码: j3om

影响中国天气气候的大气环流和外源强迫 (中后场作用)



以2020年梅雨为例:

- 中高纬西风带扰动
- 低层冷空气入侵
- 热带海洋
- QBWO
- 副热带高压
- 夏季风气流
- 青藏高原

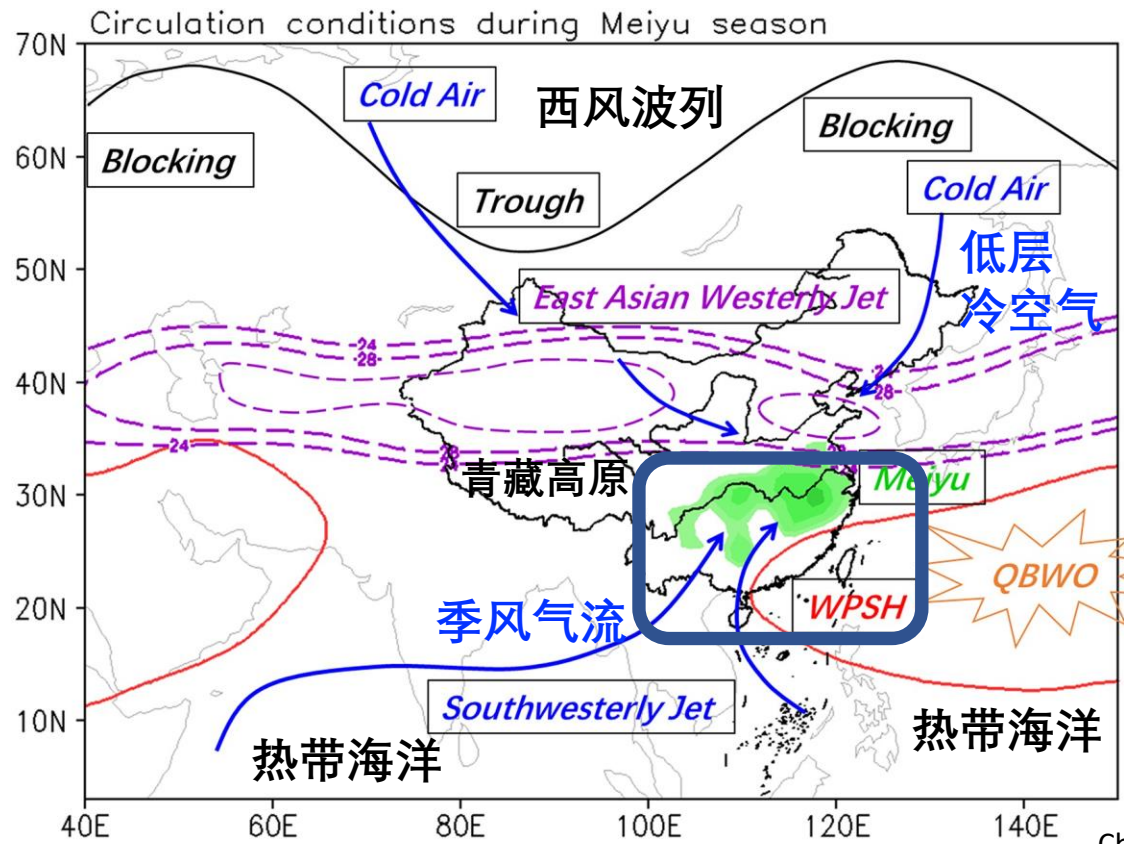
- 区域日变化?

Fig. 11. Schematic diagram of atmospheric circulation conditions for the formation of the record breaking meiyu in 2020.

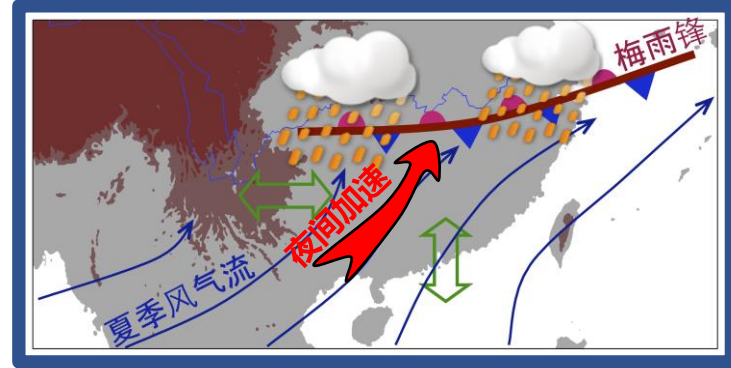
Ding et al. 2021 AAS <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0361-2>
 Pan et al. 2021 AAS <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0433-3>

Liu et al. 2020 GRL <https://doi.org/10.1029/2020GL090342>
 Zheng and Wang, 2021 <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9758-9>

影响中国天气气候的区域强迫 (前锋作用)



“临门一脚”的关键区



- 承接作用 (联系外源强迫)
- 快速发力 (体现区域强迫)

季风气流在中国东南部上岸向北流动, 受到区域海陆地形的热力动力强迫

→受太阳辐射日变化, 季风气流的热力动力发生日变化, 短时间尺度的区域强迫影响下游对流降水。

Chen et al. 2009 JGR <https://doi.org/10.1029/2009JD012181>

Fig. 11. Schematic diagram of atmospheric circulation conditions for the formation of the record breaking meiyu in 2020.

Ding et al. 2021 AAS <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0361-2>

Liu et al. 2020 GRL <https://doi.org/10.1029/2020GL090342>

Pan et al. 2021 AAS <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0433-3>

Zheng and Wang, 2021 <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9758-9>

影响中国天气气候的区域强迫 (前锋作用)

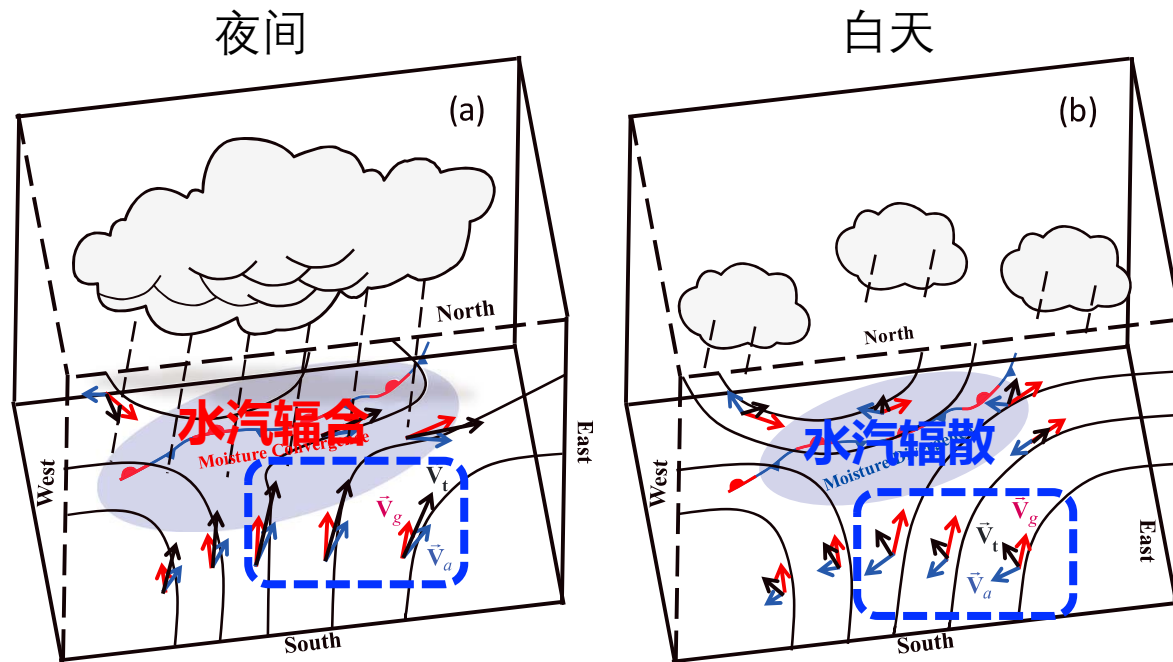
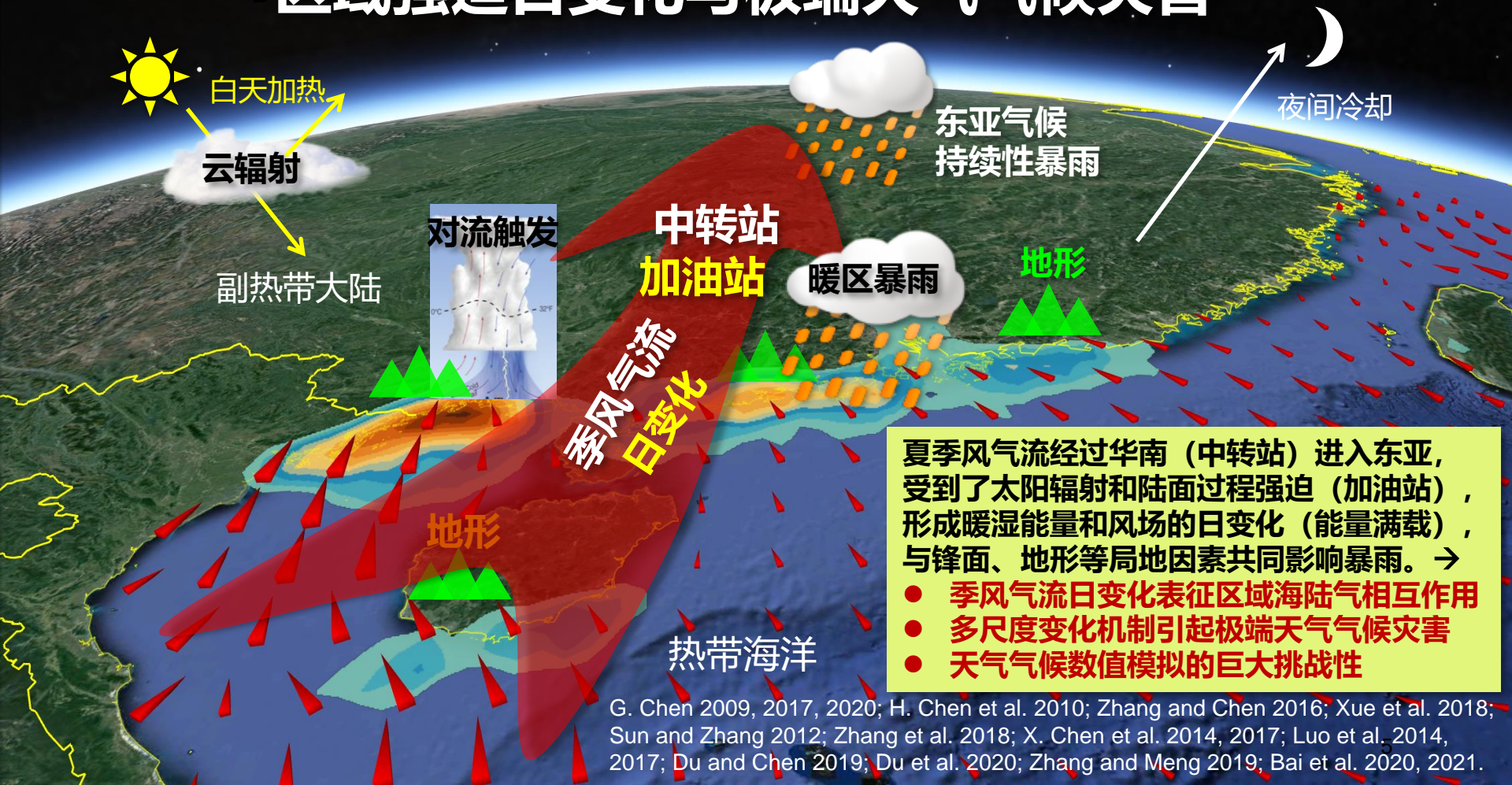


Figure 17. Conceptual diagram of diurnal variations of wind fields, including the total wind V_t (black arrows), geostrophic wind V_g (red arrows), and ageostrophic wind V_a (blue arrows) over the Meiyu rainband region in the (a) early morning and (b) late afternoon. The geopotential height contours also shown with black lines and the quasi-stationary Meiyu front is marked by standard symbols.

区域强迫日变化与极端天气气候灾害



夏季季风气流经过华南（中转站）进入东亚，受到了太阳辐射和陆面过程强迫（加油站），形成暖湿能量和风场的日变化（能量满载），与锋面、地形等局地因素共同影响暴雨。→

- 季风气流日变化表征区域海陆气相互作用
- 多尺度变化机制引起极端天气气候灾害
- 天气气候数值模拟的巨大挑战性

G. Chen 2009, 2017, 2020; H. Chen et al. 2010; Zhang and Chen 2016; Xue et al. 2018; Sun and Zhang 2012; Zhang et al. 2018; X. Chen et al. 2014, 2017; Luo et al. 2014, 2017; Du and Chen 2019; Du et al. 2020; Zhang and Meng 2019; Bai et al. 2020, 2021.

主要内容

1. 不同**天气状态**下的风场日变化的响应规律
2. 极端**暴雨**事件的风场日变化对不同大气环流的响应
3. 外雨带对**台风**环流和陆面强迫日变化的响应

科学问题1：亚洲季风区低空风场日变化

► 低空风场日变化的特征和机制

随着东亚夏季风的爆发，低层风场转为偏南风，偏南季风表现出明显的日变化
强的季风往往伴随更大的季风日变化，在夜间-清晨达到峰值(diurnal monsoon variability DMV)

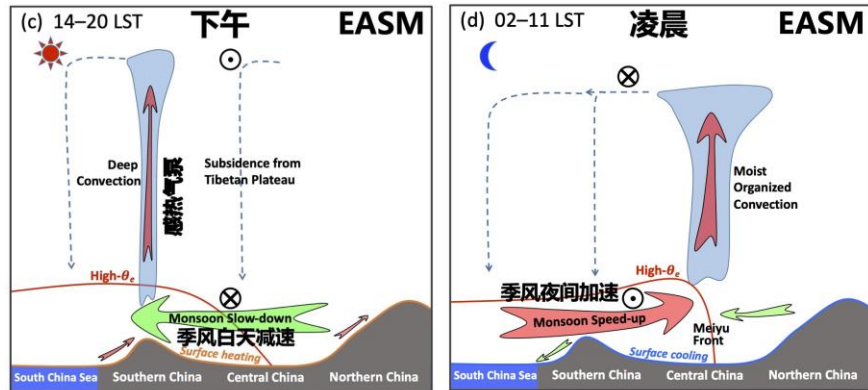
(G. Chen et al. 2009, 2013; H. Chen et al. 2010)

低层风场的日变化往往受局地热力驱动(Blackadar 1957)

强的季风气流日变化往往发生在较暖的条件下(Xue et al. 2018; Chen 2020)

→ 隐含季风气流日变化可能是对辐射强迫的响应

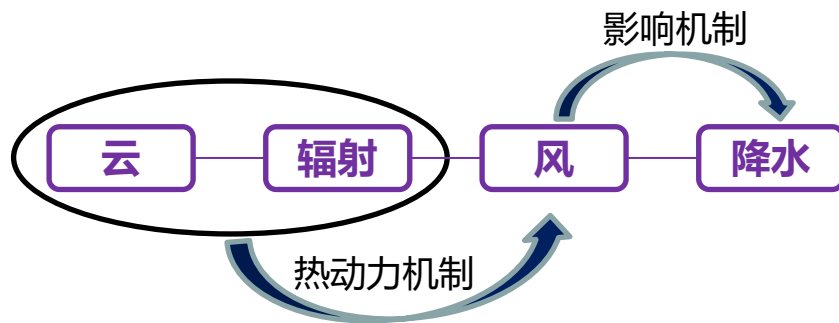
风场日变化调节下游降水



(Chen 2020)

南边暖湿能量 $\xrightarrow{\text{风场日变化}}$ 北边降水

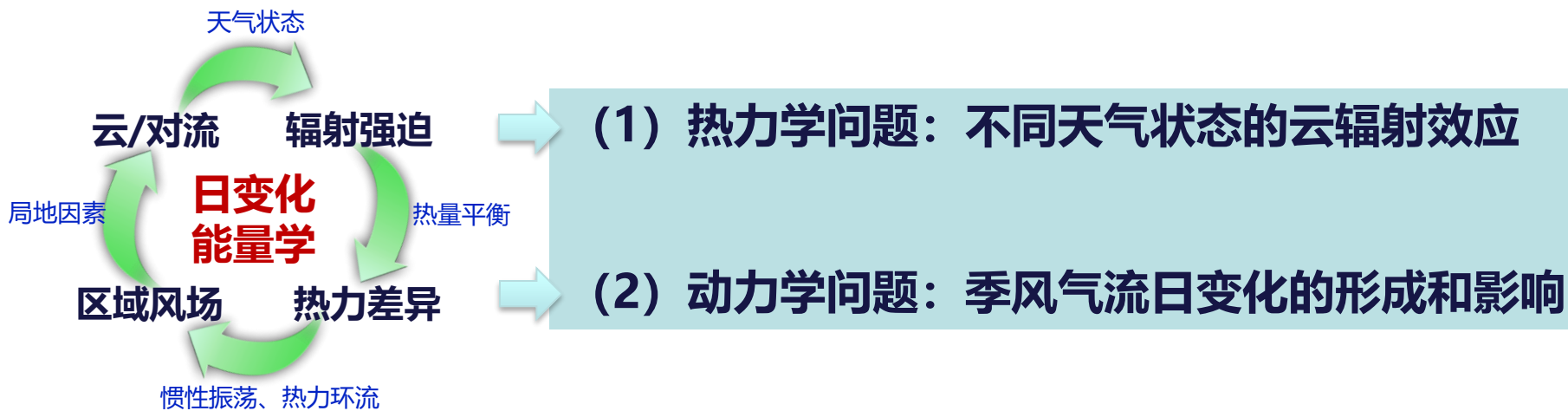
跨区域影响



陆面强迫日变化的热力和动力机制 →
关键问题：夏季风日变化的云-辐射-风-降水相互作用？

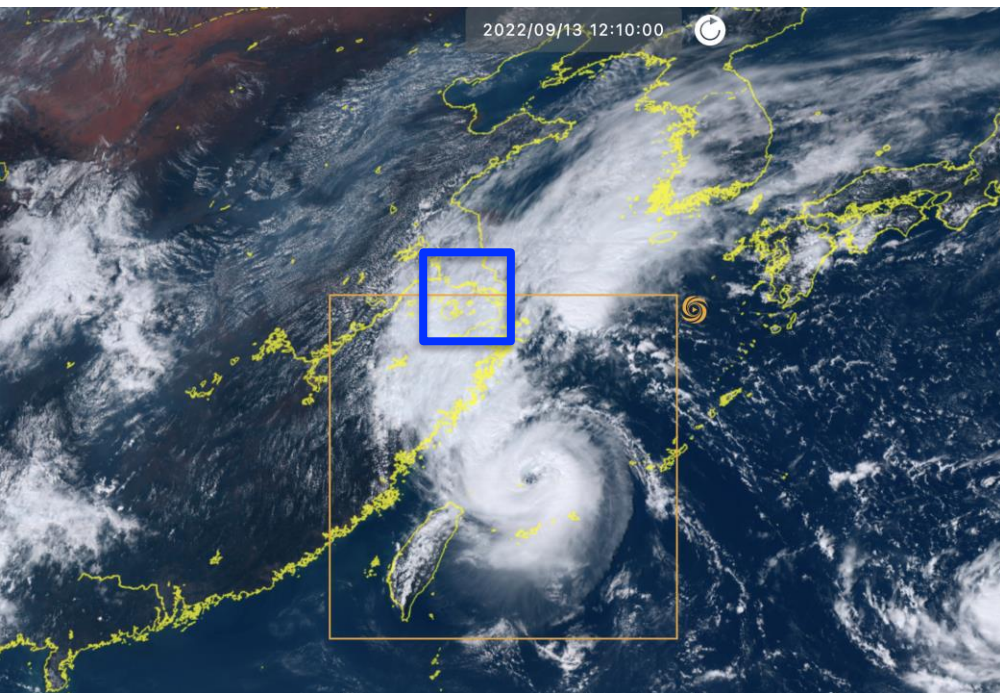
科学问题1：区域热力强迫对风场日变化的调节

- **关键问题**：辐射强迫如何调节区域**热力差异**，进而调节风场日变化的**动力响应**
- ➔ **具体问题**：**华南不同天气状态的云辐射**如何影响季风气流日变化？

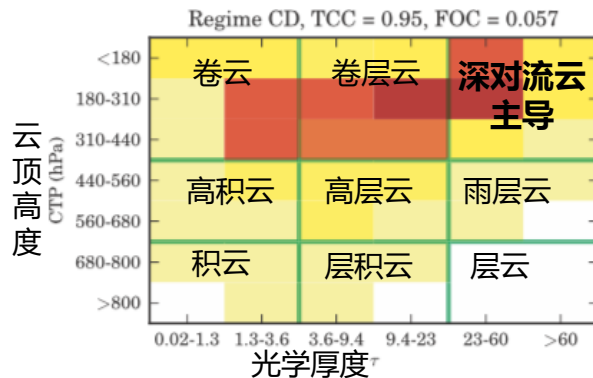


天气气候系统“引擎”
的关键链条之一

■ 数据和方法 如何定义天气状态 (Cloud Regime or Weather State)



统计区域内各个像素的云类型的出现频率，判定主导的天气状态



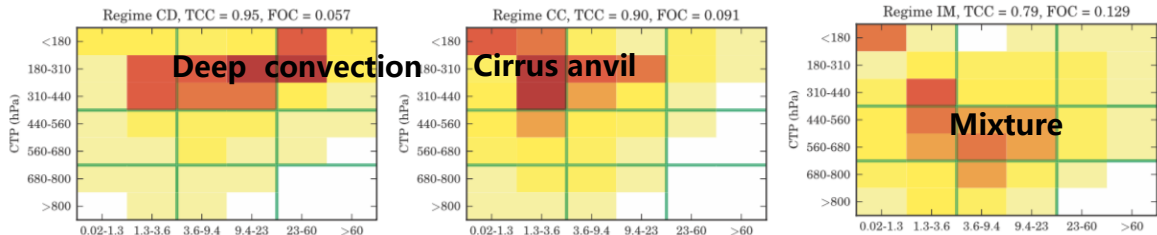
更加客观地表征一个区域的天气状况

对云顶气压和光学厚度的联合频率直方图（大量样本），进行聚类分析得到的几种主要模态（天气状态）。

(Jakob and Tselioudis 2003)

数据和方法

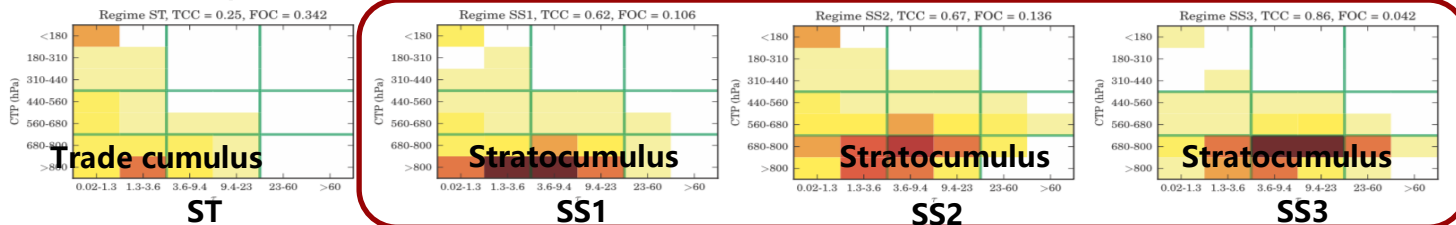
Cloud Regimes 的主要模态 (七种)



(Tan et al. 2013) **CD: 深对流 成熟**

CC: 深对流 消散

IM: 中等对流

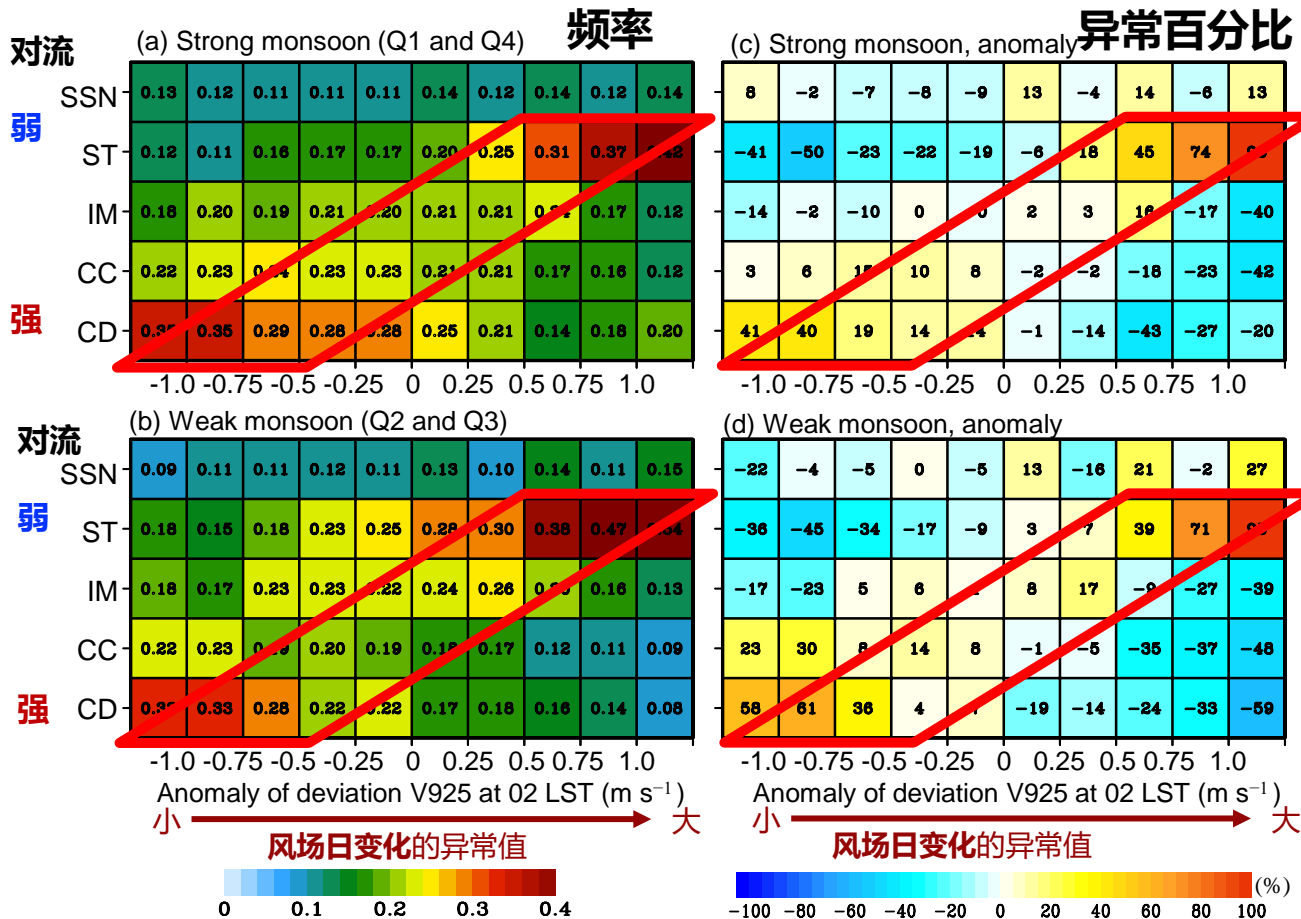


对流不活跃

变量	数据集	水平分辨率	时间分辨率	选取年份
Cloud Regime	ISCCP-IR-only	2.5°x2.5°	3h	1984-2007
辐射通量	ISCCP-FH	1°x1°	3h	1984-2007
大气条件	JRA-55	1.25°x1.25°	6h	1984-2007
降水	TRMM 3B42V7	0.25°x0.25°	3h	1998-2007
降水	GPCP	2.5°x2.5°	Monthly	1984-2007

(Wu and Chen 2021 JCLIM; Li et al. 2022 AAS)

白天天气状态频率与夜间风场加速的关系



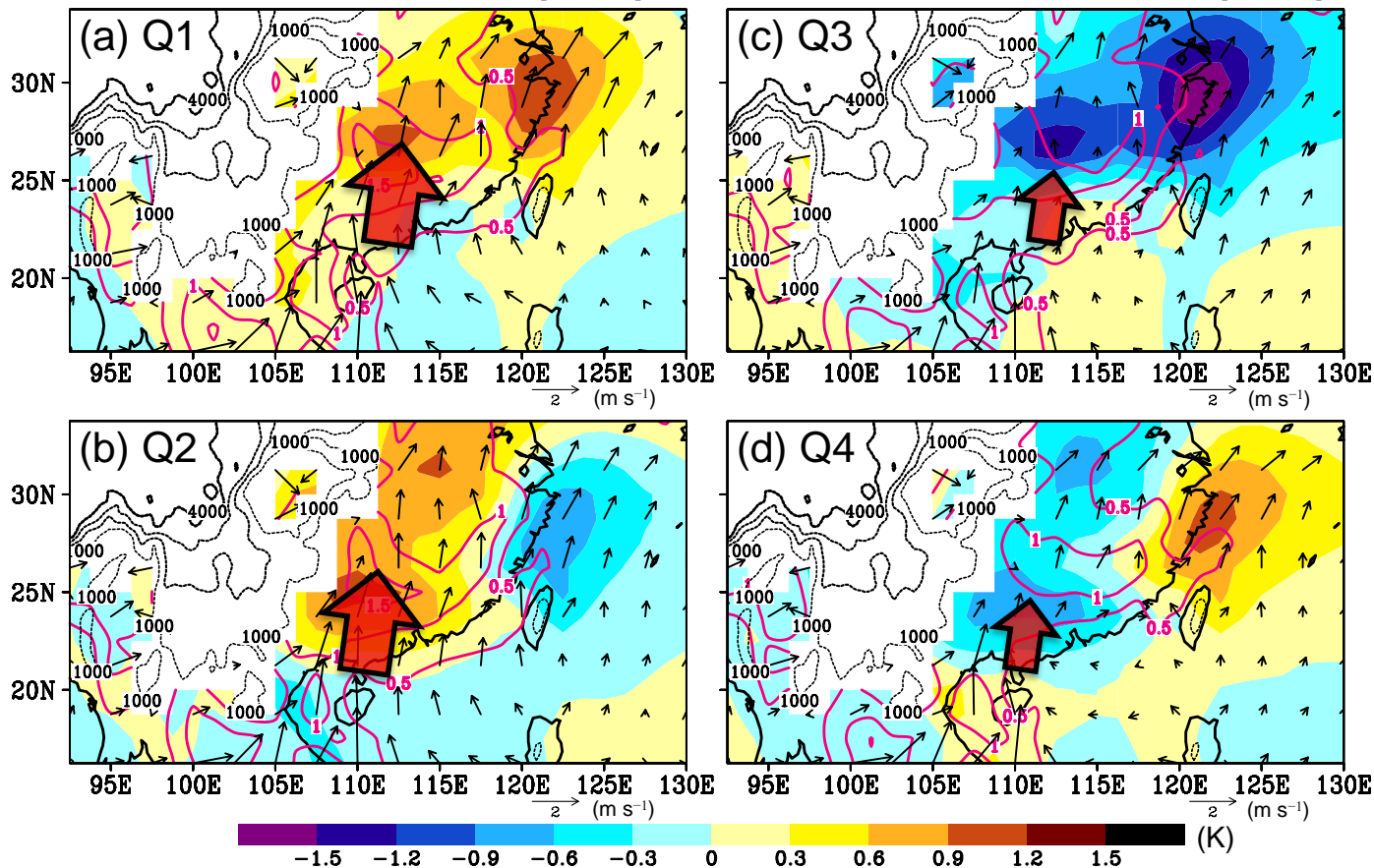
云-风场的关系
(天气状态超前于风场)

白天对流天气状态越活跃，
则风场日变化的振幅越小。

反之，天气状态越晴好，
则风场日变化越显著。

白天云状态→傍晚温度→夜间风场偏差的关系

20时的低空温度异常 (填色)、次日02时的风场夜间加速 (箭头)



温度-风场的关系

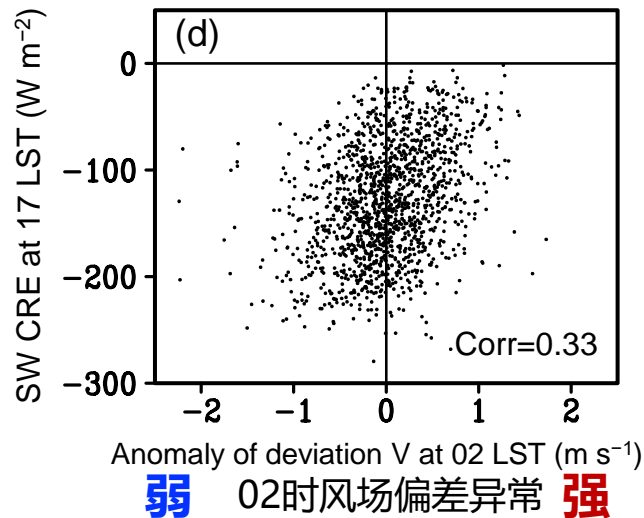
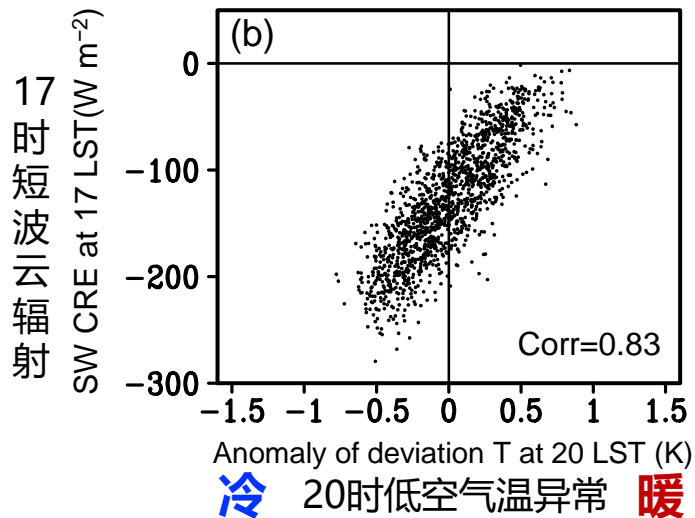
陆地偏暖, 则风场
日变化振幅偏大。

(Blackadar 1957; Chen 2020)

西南风平流偏强,
则东海异常偏暖。

下午短波云辐射与傍晚气温、夜间风场的关系

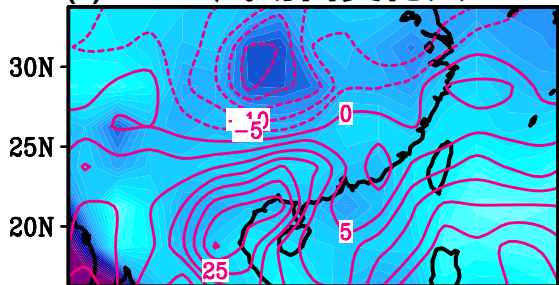
下午短波云辐射（冷却）会明显调节低空气温（边界层湍流混合），进一步影响风场日变化（夜间加强振幅）。



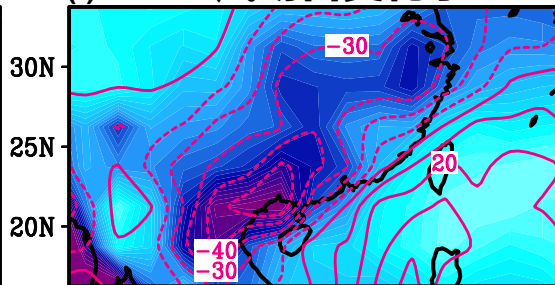
大气层顶短波云辐射效应 (SW CRE)
=大气层顶向外短波_{clear-sky} - 大气层顶向外短波_{all-sky}

短波云辐射的强度（填色）和异常（等值线）

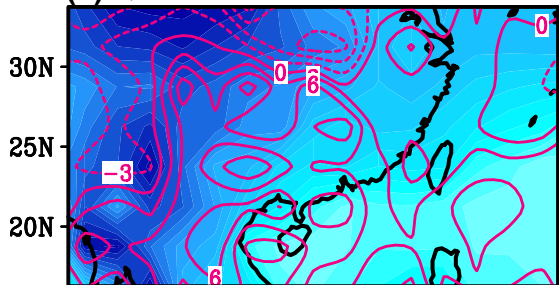
(a) Q1/CD 风场日变化大



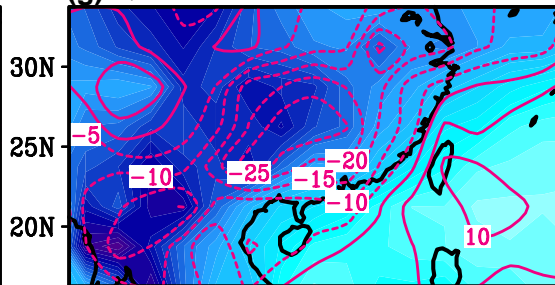
(f) Q4/CD 风场日变化小



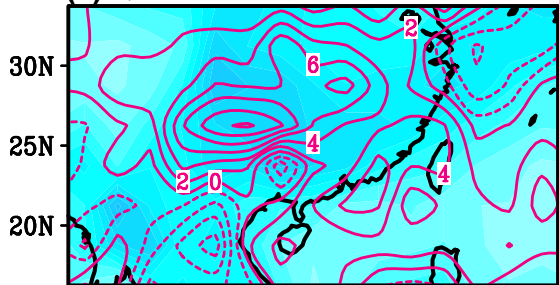
(b) Q1/CC



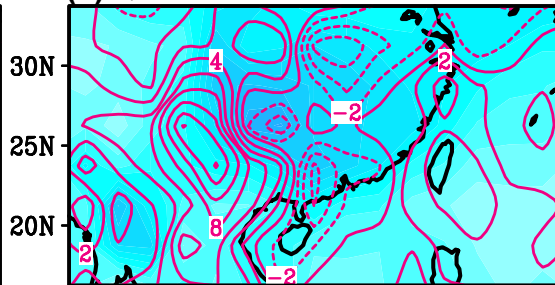
(g) Q4/CC



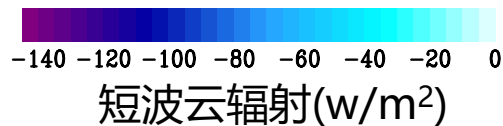
(c) Q1/IM



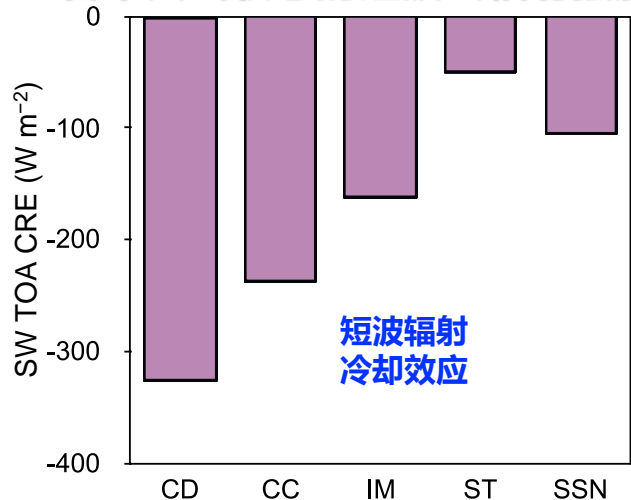
(h) Q4/IM



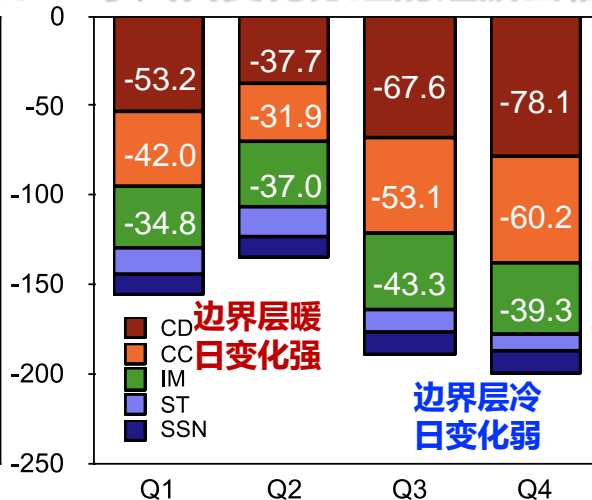
对流天气状态CD/CC起到较强的短波云辐射效应，其相应的异常冷却或加热，对应于不同类型的季风气流日变化。



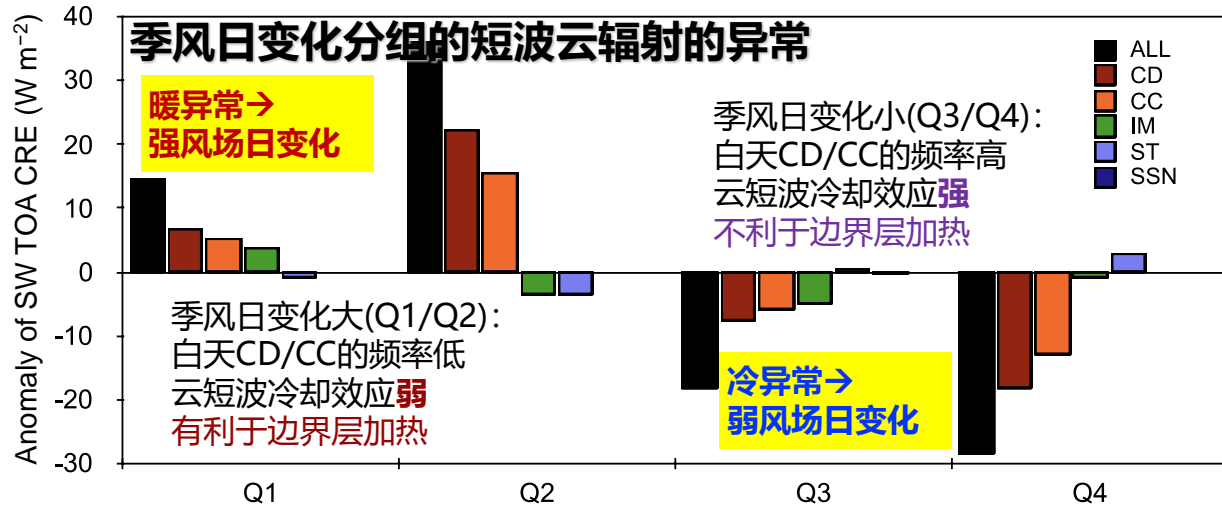
各个天气状态的短波云辐射强度



季风日变化分组的短波云辐射



与深厚对流有关的天气状态CD/CC是短波云辐射的关键，其异常变化对应于不同类型的季风气流日变化。



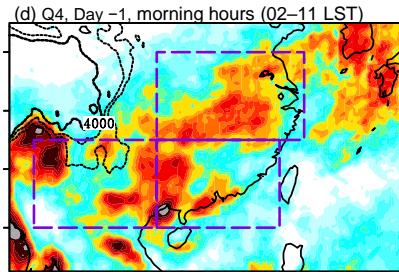
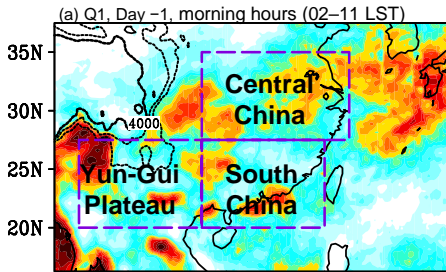
白天天气状态→云辐射效应→边界层热力→夜间风场加速

Q1 风场日变化强

Q4 风场日变化弱

风场和降水日变化的物理链条

前一天
早晨



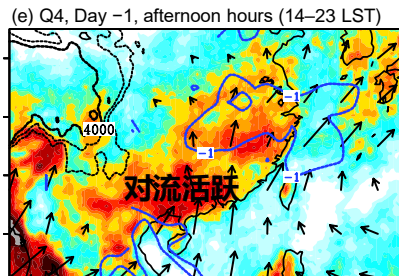
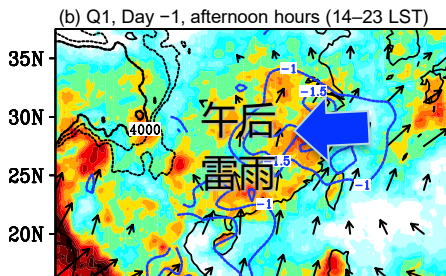
日变化大

雨带主要在30°N以北

日变化小

华中雨带偏南，降水量大
云贵高原东部大量降水

前一天
下午



降水量少，分布零散
局地、短时雷阵雨

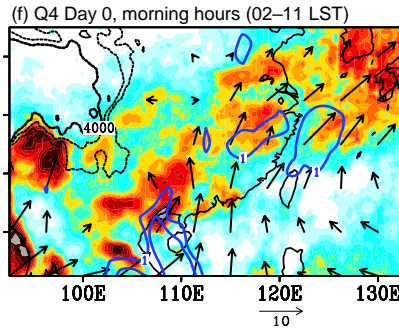
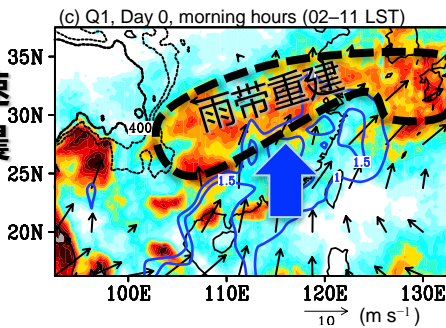
降水量大，连成一片
持续时间长有组织深对流



降水差异超前于
风场差异



季风加速
当天早晨



偏南风夜间加速明显

偏南风夜间加速不明显

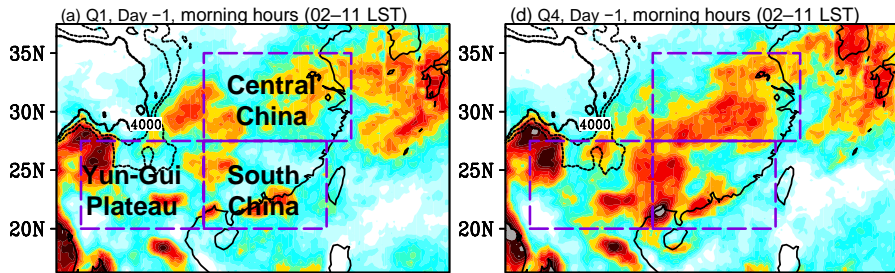
热力动力机制：天气状态→辐射强迫→风场日变化
影响机制：风场夜间加速→下游降水（雨带重建？）



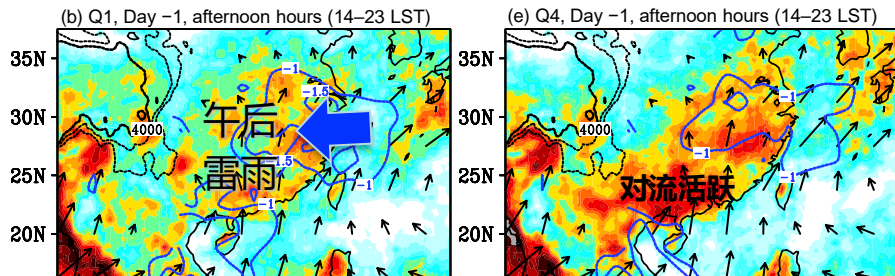
填色：降水量
箭头：925 hPa 的日平均风场
等值线：925 hPa 的02 LST经向风偏差

Q1 风场日变化强 Q4 风场日变化弱

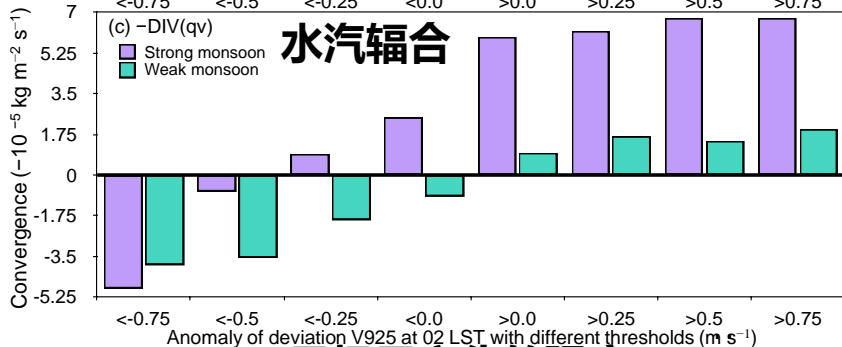
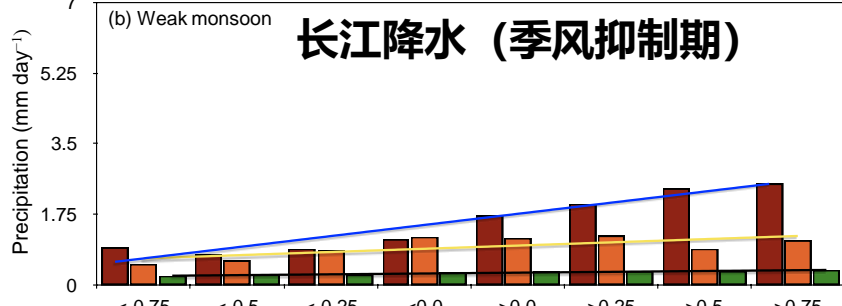
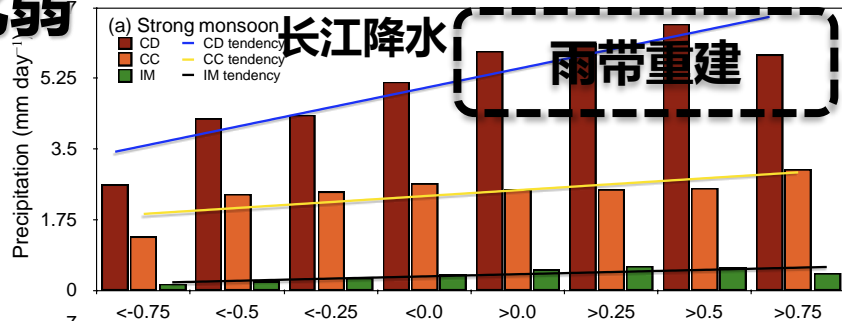
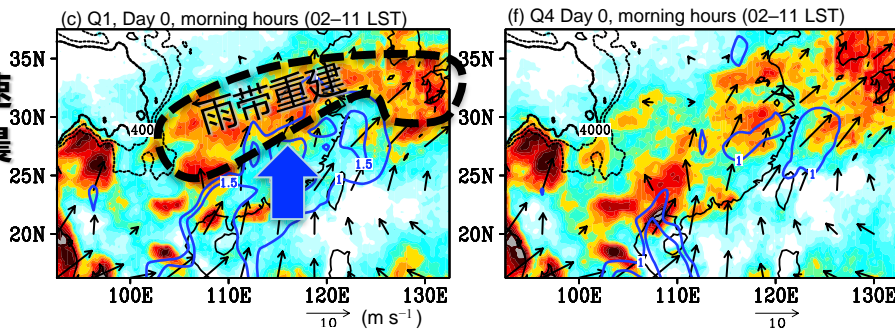
前一天
早晨



前一天
下午



季风加速
当天早晨

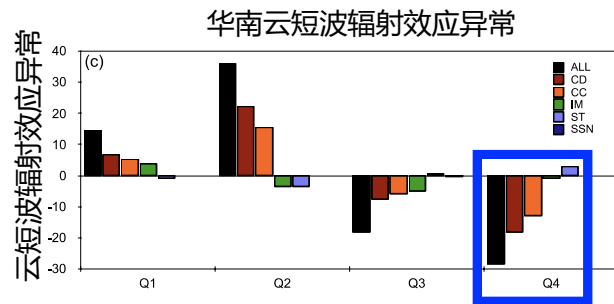
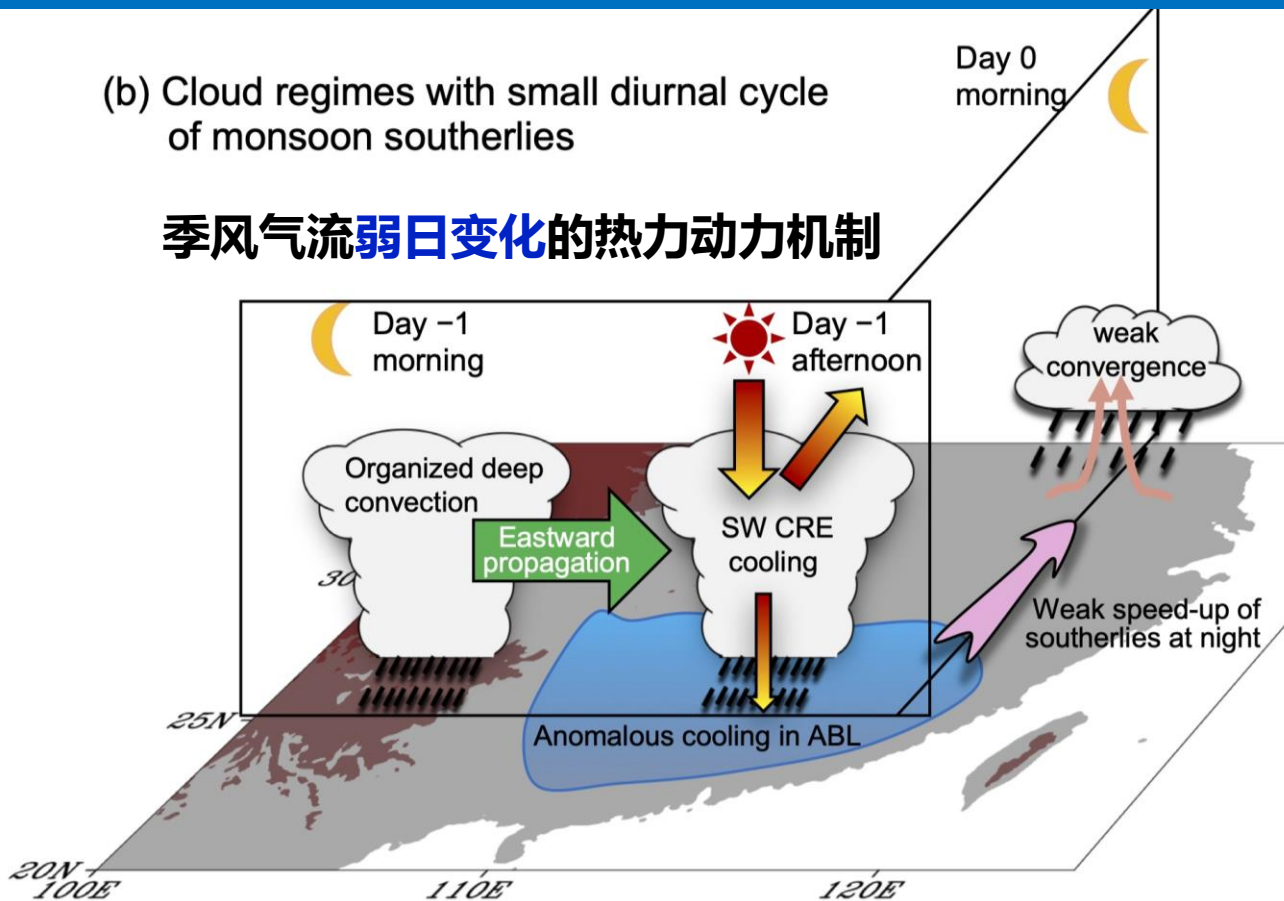


风场日变化的强度

概念模型：季风日变化的云-辐射-风-降水相互作用

(b) Cloud regimes with small diurnal cycle of monsoon southerlies

季风气流弱日变化的热力动力机制



主要结论：

- 华南天气状态的云辐射强迫显著调节季风气流日变化。
- 华南季风气流日变化受云贵高压天气状态的东传影响，进而调节下游华中天气变化。
- 云-辐射-风-降水相互作用呈现时间滞后性，隐含东亚天气日变化的可预报性。

Wu, Chen and Luo 2023 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0330.1>

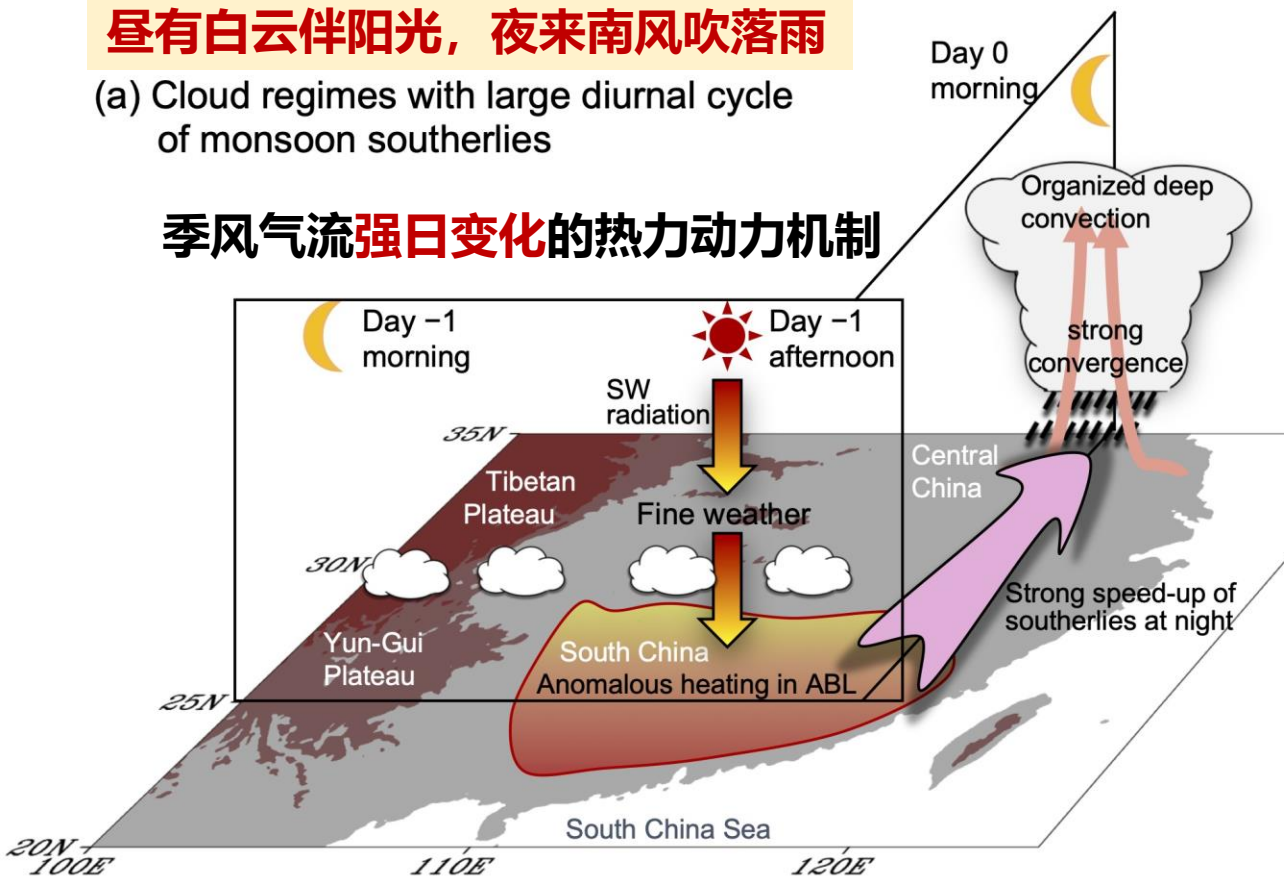
Wu and Chen 2021 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0992.1>

概念模型：季风日变化的云-辐射-风-降水相互作用

昼有白云伴阳光，夜来南风吹落雨

(a) Cloud regimes with large diurnal cycle of monsoon southerlies

季风气流强日变化的热力动力机制



- 华南天气状态的云辐射强迫显著调节季风气流日变化。
- 华南季风气流日变化受云贵高压天气状态的东传影响，进而调节下游华中天气变化。
- 云-辐射-风-降水相互作用呈现时间滞后性，隐含东亚天气日变化的可预报性。

Wu, Chen and Luo 2023 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0330.1>

Wu and Chen 2021 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0992.1>

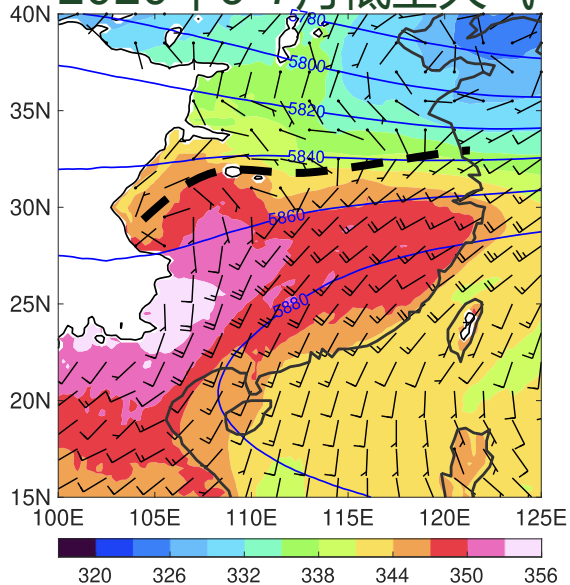
主要内容

1. 不同**天气状态**下的风场日变化的响应规律
2. 极端**暴雨**事件的风场日变化对不同大气环流的响应
3. 外雨带对**台风**环流和陆面强迫日变化的响应

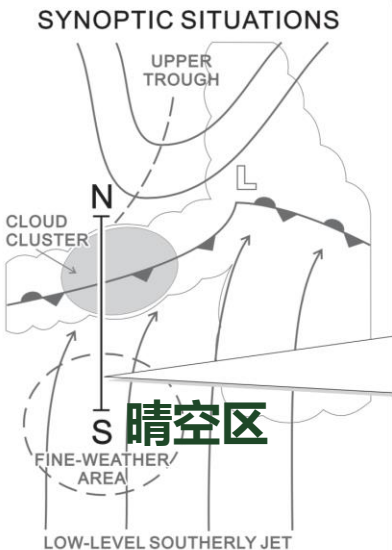
科学问题2：辐射强迫→夏季风气流日变化→极端暴雨？

➤ 关键链条：天气状态、辐射强迫、暖湿能量、急流、水汽输送抬升、对流不稳定、中尺度对流系统

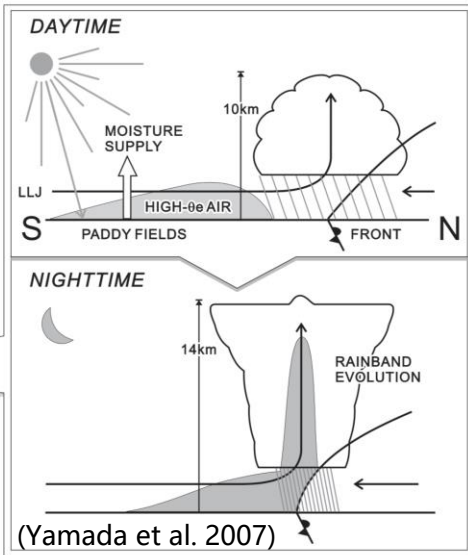
2020年6-7月低空大气



(Zeng et al. 2022)

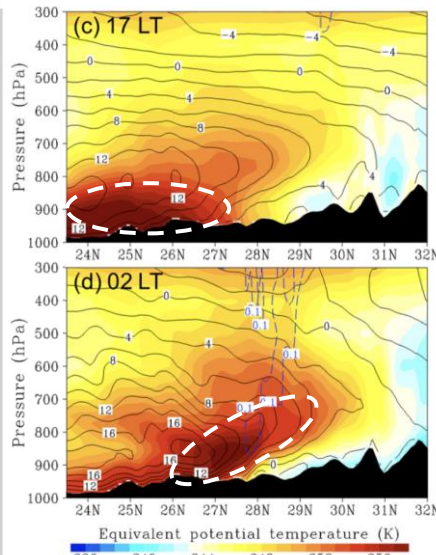


晴朗区域
累积暖湿能量



(Yamada et al. 2007)

由夜间低空急流输送

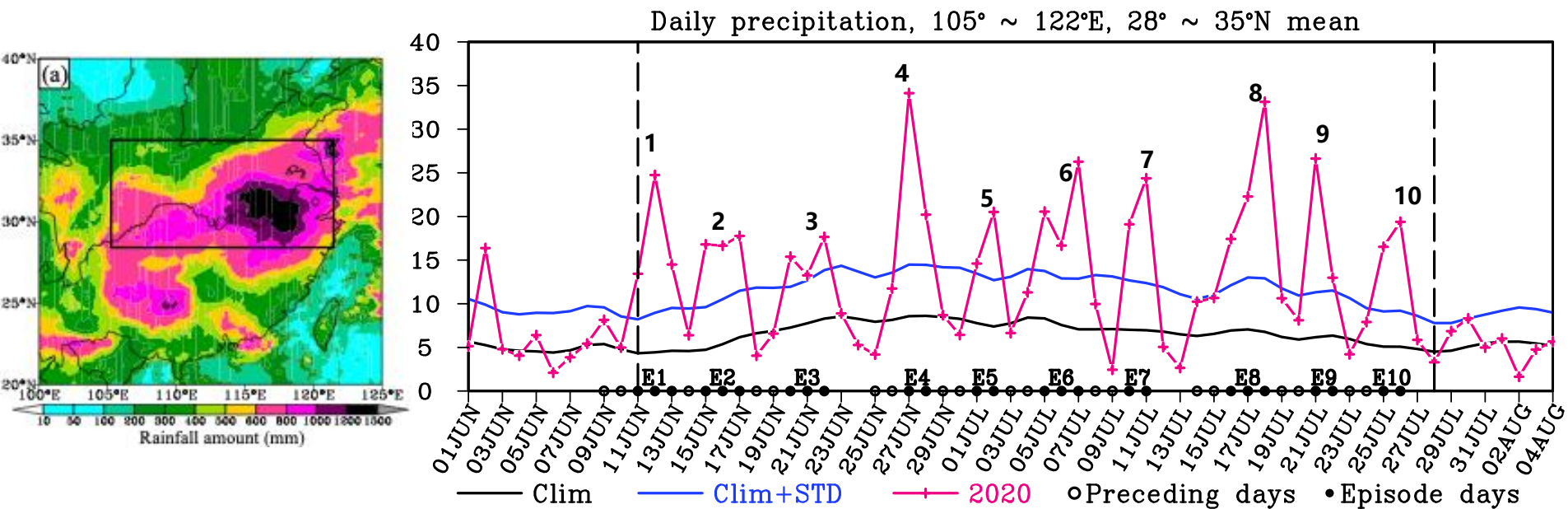


锋面附近
释放暖湿能量

(Chen et al. 2017)

2020年超级梅雨的降水逐天演变

6-7月发生10次持续性暴雨事件，呈现5-7天周期的天气系统扰动

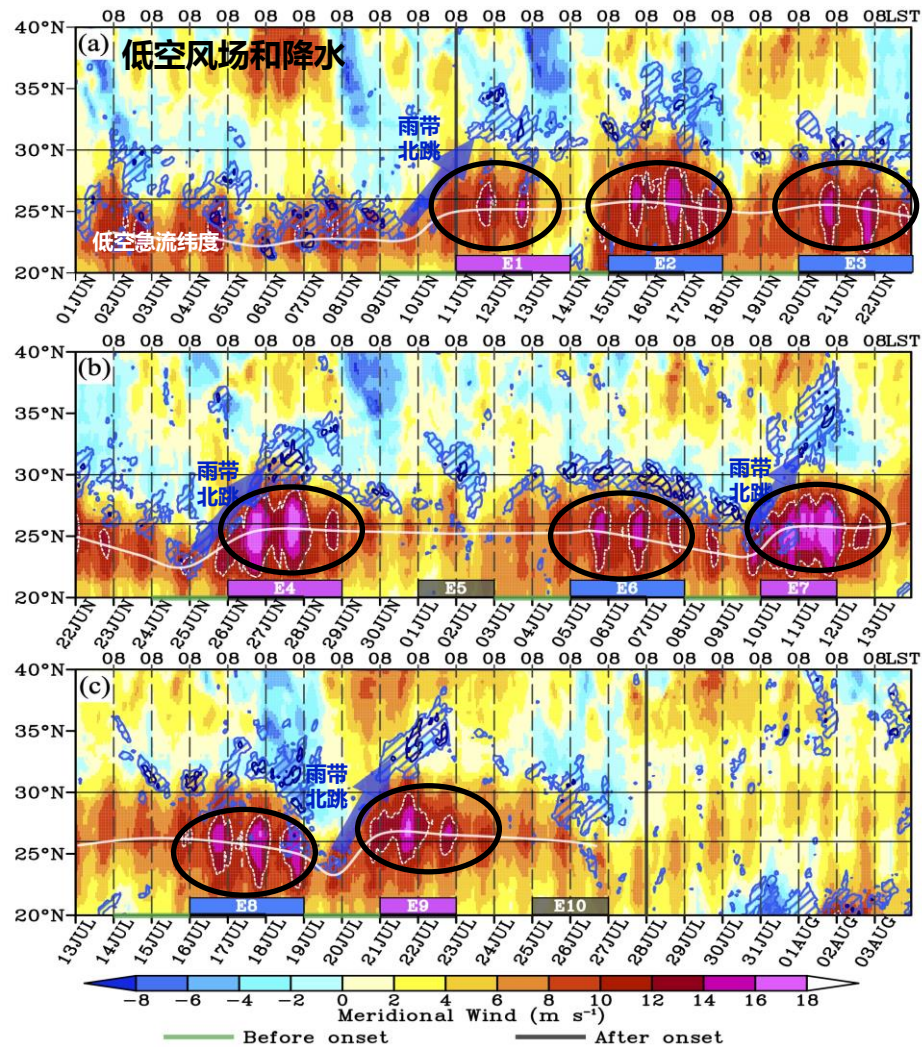


事件前2天：偏弱降水；事件中2-3天：强降水

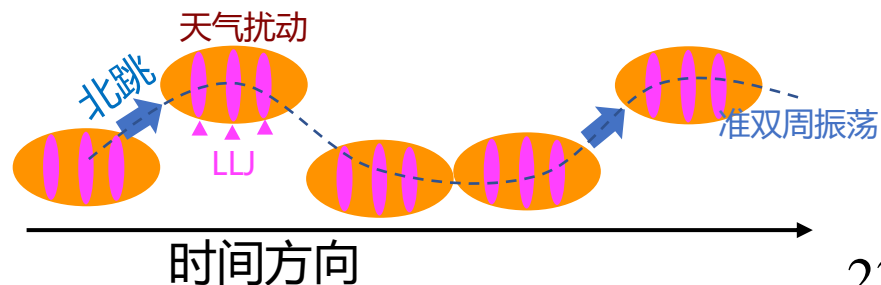
低空风场与梅雨雨带的对应关系



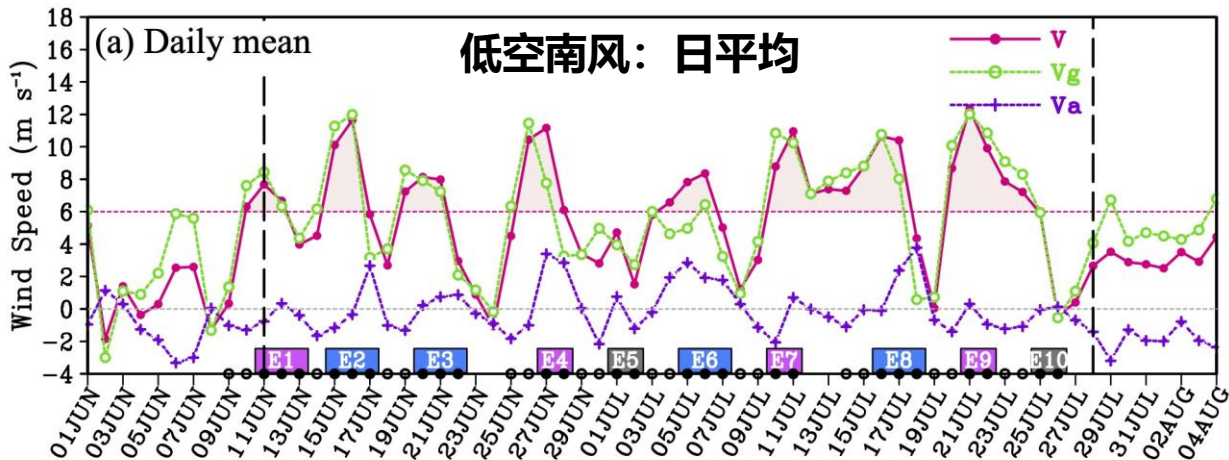
准双周振荡 → 8次天气扰动
 → 夜间低空急流 → 雨带变动



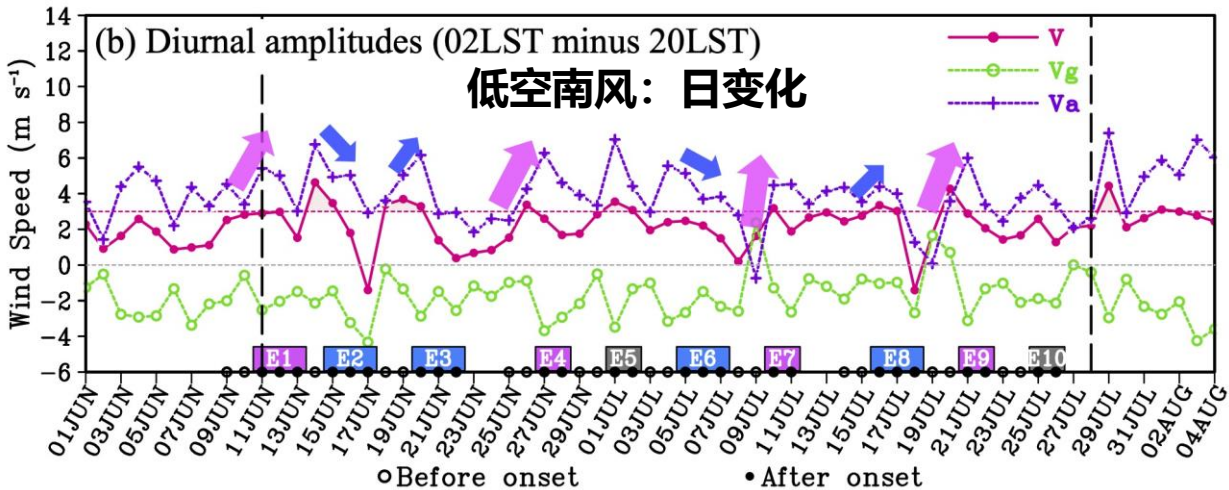
- 天气扰动内嵌日变化
- 夜间低空急流2-3天 强降水集中
- 风场和雨带出现南北摆动
- 雨带位置4次明显北移 (第一类), 呈现准双周振荡



低空风场的变动机制：日平均+日变化



- 风速日平均变化主要为地转风分量
- 天气尺度扰动→气压梯度力的变动。副热带高压和西风槽均可引起。

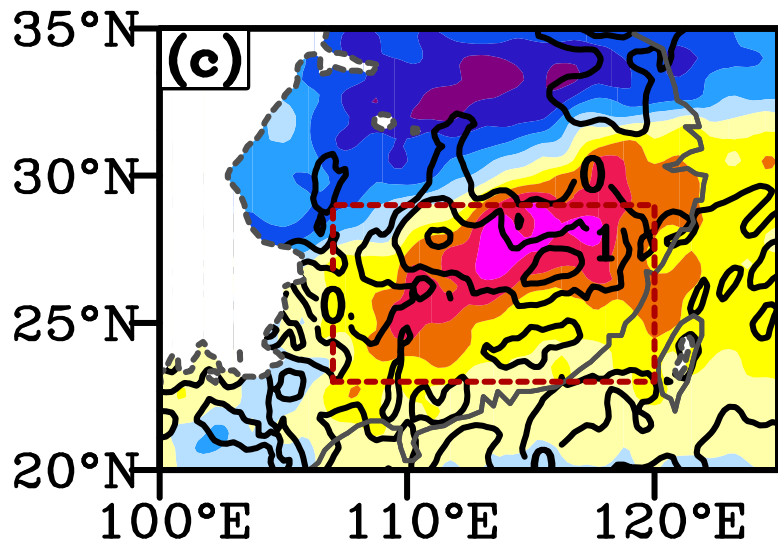


- 风速夜间加强主要为非地转风分量

副热带高压的两类不同情况→短波辐射差异

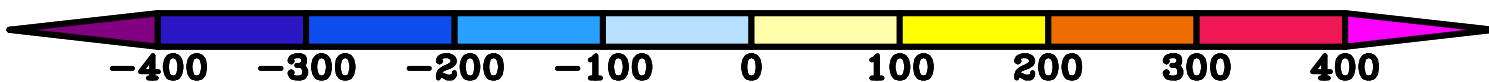
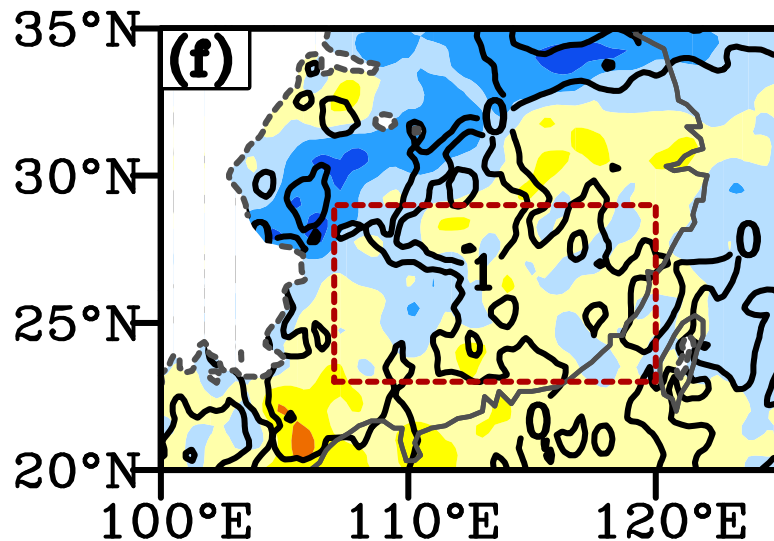
Type-1:

副热带高压北进 → 短波辐射增强



Type-2:

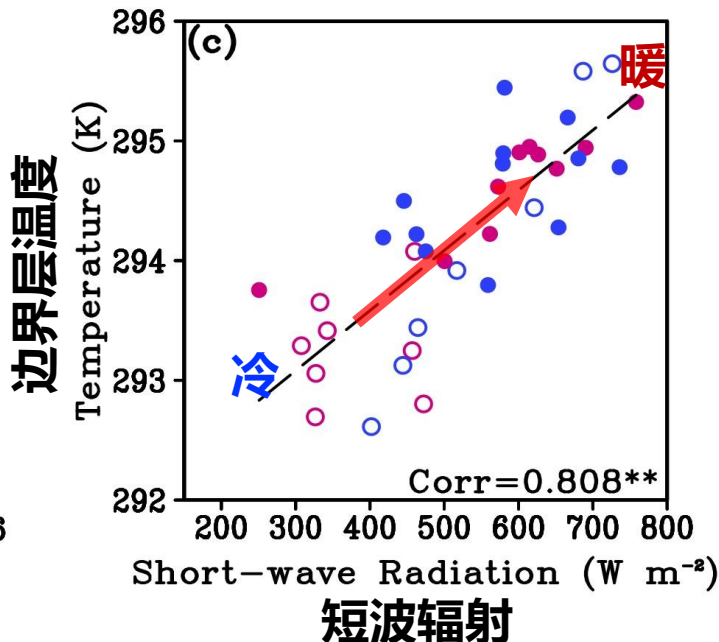
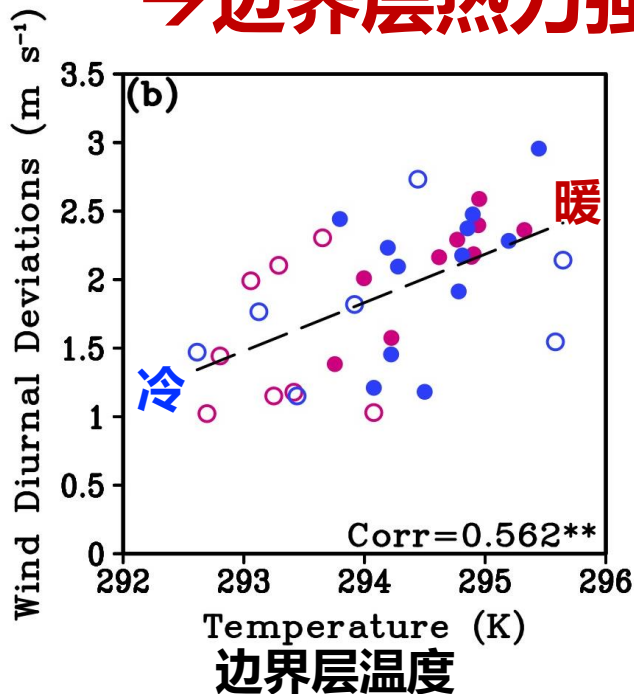
副热带高压变化不大, 短波辐射变化不大



Short-wave Radiation ($W m^{-2}$)

副热带高压的两类不同情况 → 短波辐射差异 → 边界层热力强迫 → 风场日变化的强弱

风场日变化



- Type-1, 急流建立前
- Type-1, 急流建立后
- Type-2, 急流建立前
- Type-2, 急流建立后

夜间低空急流的动量方程估算，也可阐明上述关系。

Zeng et al. 2019 <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0131.1>

温度变化、辐射强迫与不同类型低空急流的关系

急流建立前后的累积短波辐射的差异

与低层风场日变化振幅增加有关的昼夜热力强迫

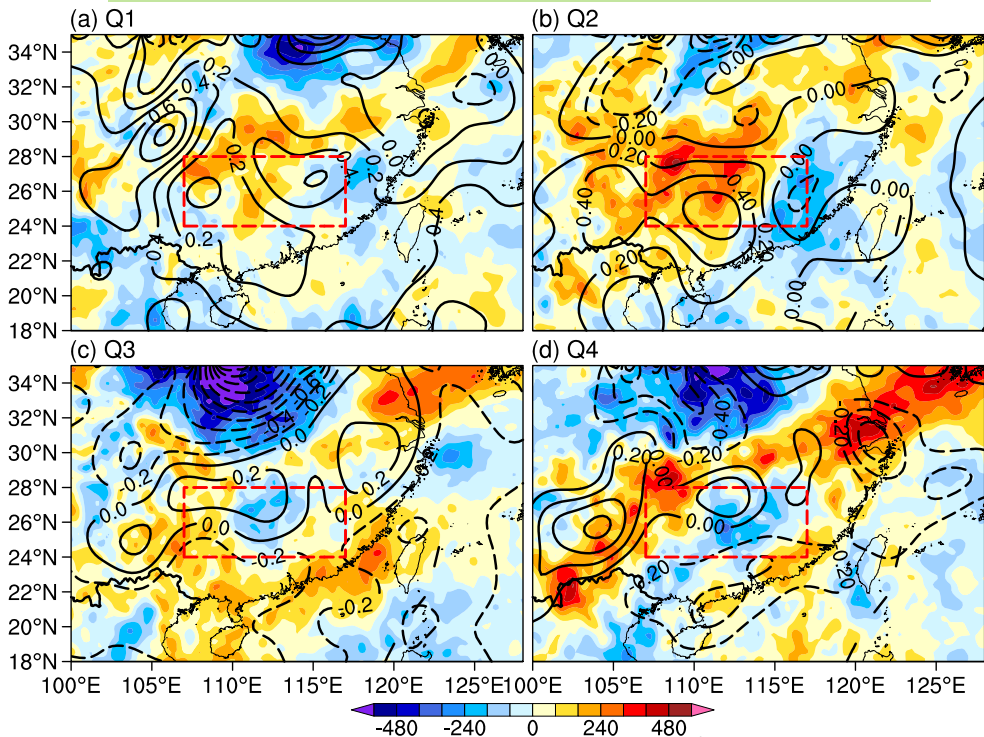
近地面层和边界层之间的热力交换 (温度日较差)

湍流混合日变化

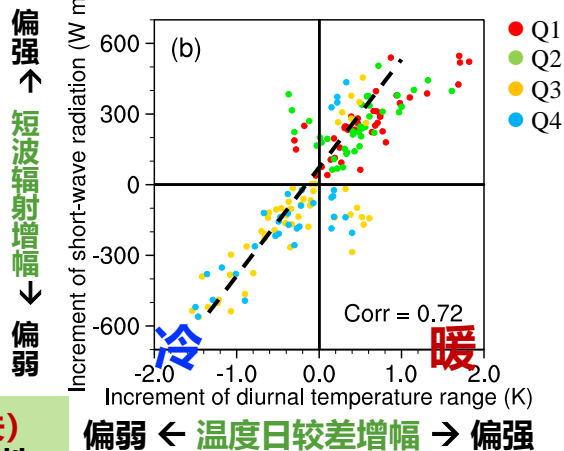
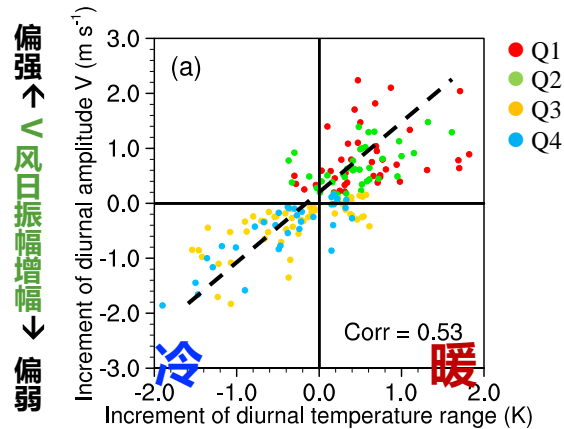
风场日变化

填色: 累积短波辐射增幅

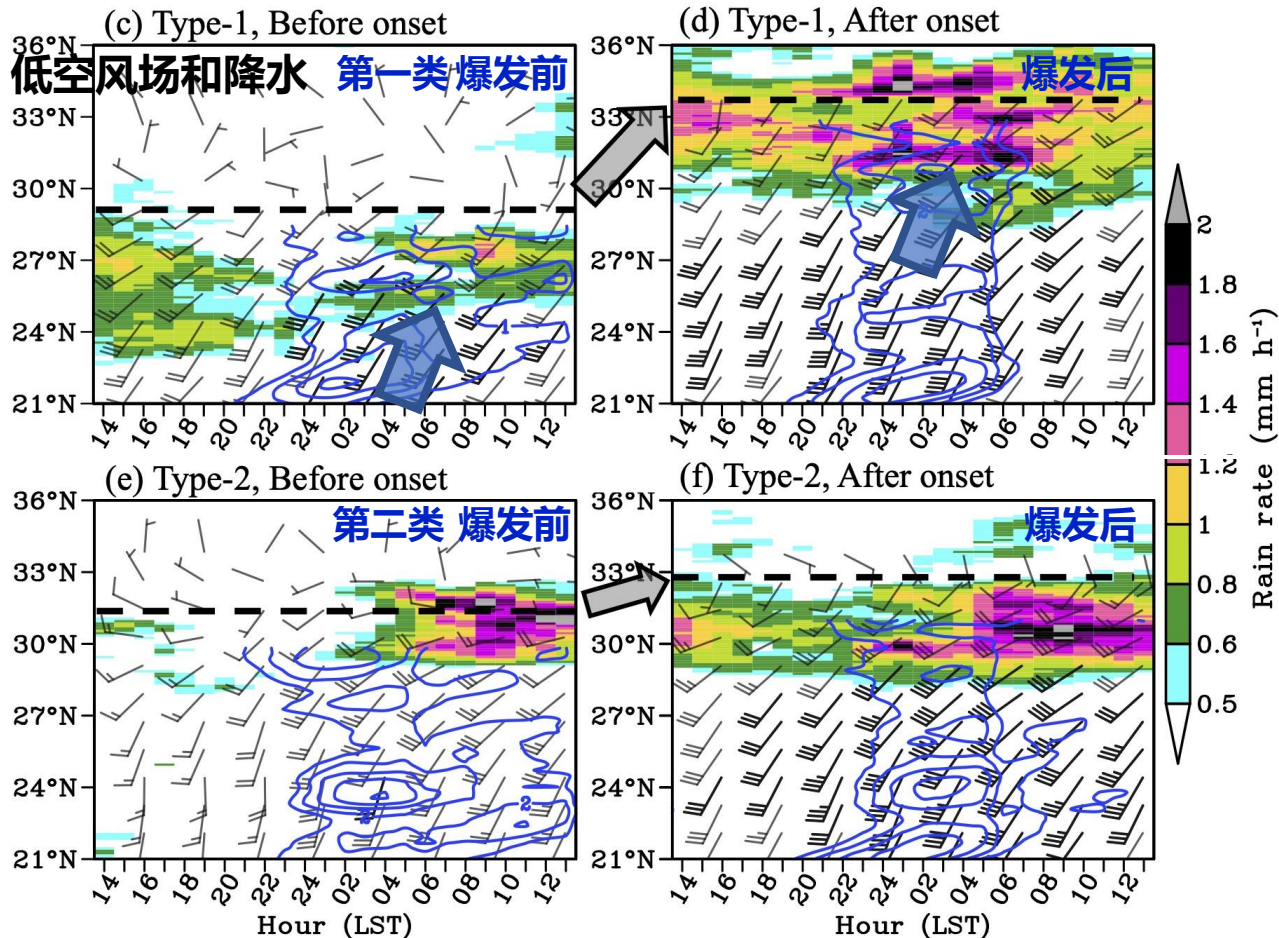
等值线: 925 hPa 温度日较差增幅



- 累积短波辐射增幅 → 温度日较差增幅 → 日变化振幅增幅 (→ 表示正相关)
- 不同强度的昼夜热力强迫解释低空急流形成过程中风场日变化振幅的多样性



8次暴雨事件爆发前后的风场和降水日变化



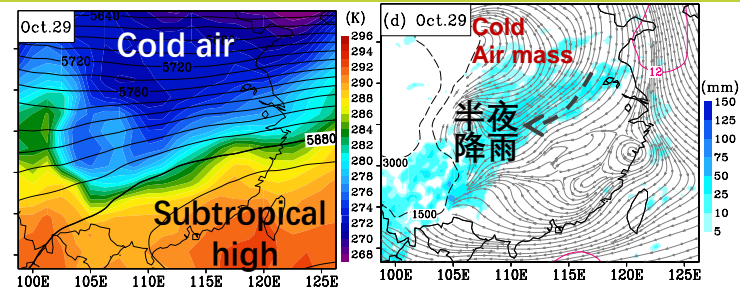
NLLJs 和 雨带:

Type-1:
北推 $+5^\circ\text{N}$
降水峰值午后 \rightarrow 夜间
日均风速 加强
夜间加速 增强

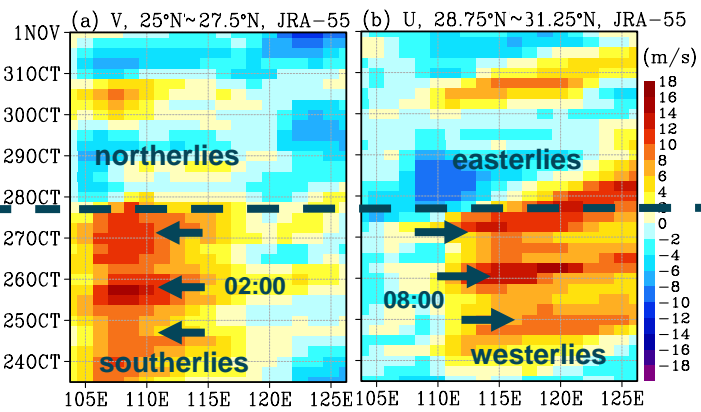
Type-2:
北推 $<2^\circ\text{N}$
降水峰值保持清晨
日均风速 加强
夜间加速 变化不大

Case 2: 2016年10月底，一次罕见秋季暴雨过程中，风场和降水日变化对不同环流条件的响应

Cold days

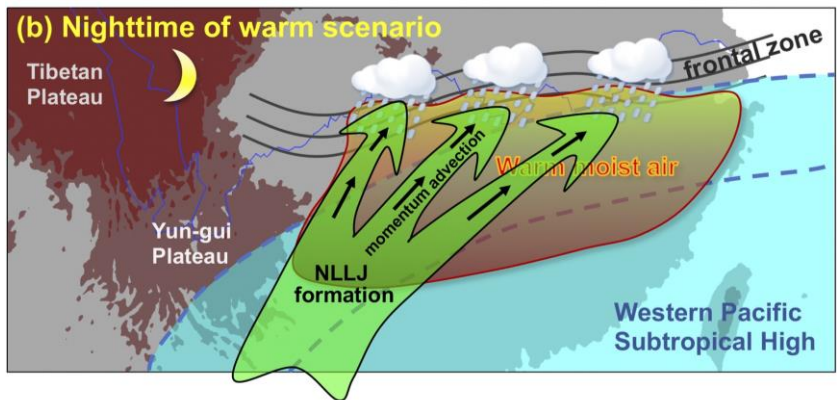
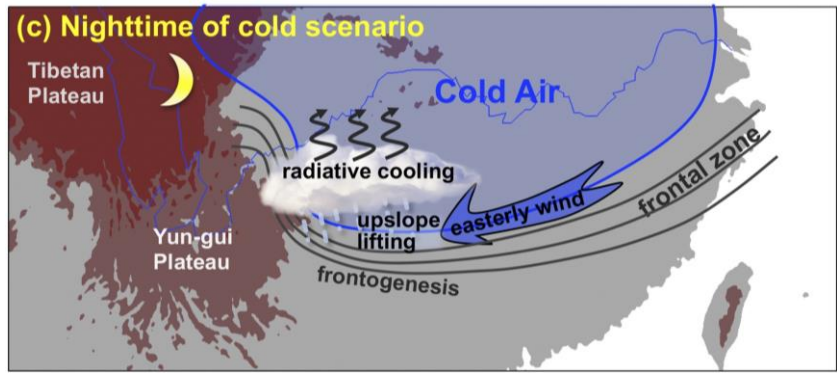
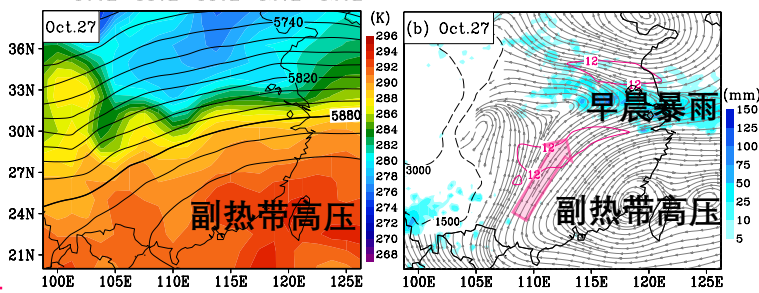


低空风场
日变化较小



日变化显著

Warm days



Zeng et al. 2019 MWR <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0131.1>
Luo et al. 2023 JGR <https://doi.org/10.1029/2023JD038640>

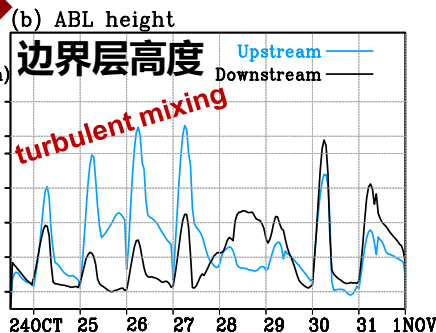
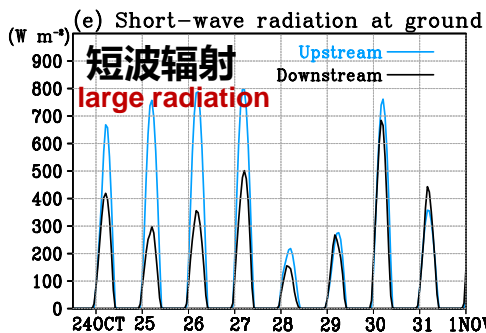
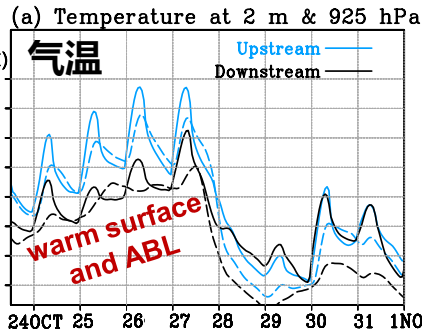
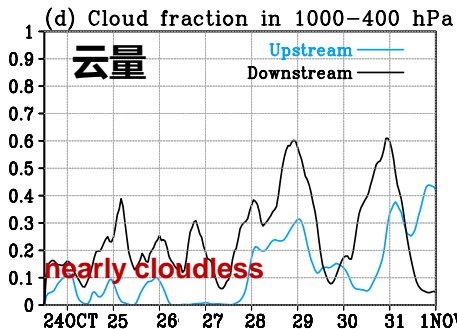
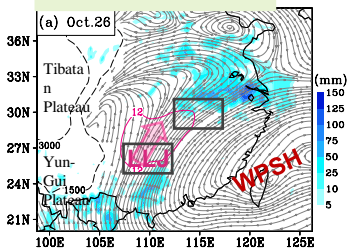
Case 2: 2016年10月底，一次罕见秋季暴雨过程中，风场和降水日变化对不同环流条件的响应

Large-scale

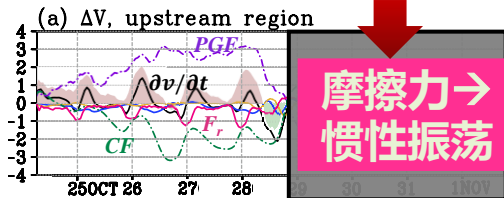
Diurnal cycle

Rainfall details

Strong WPSH in Oct. 24-27



Strong southwesterly flow along the WPSH
--> Momentum advection
风场动量向下游输送



两类不同季风涌日变化的大尺度环流、机制和影响

**第一类：副热带高压西伸，
陆面加热，日变化明显**

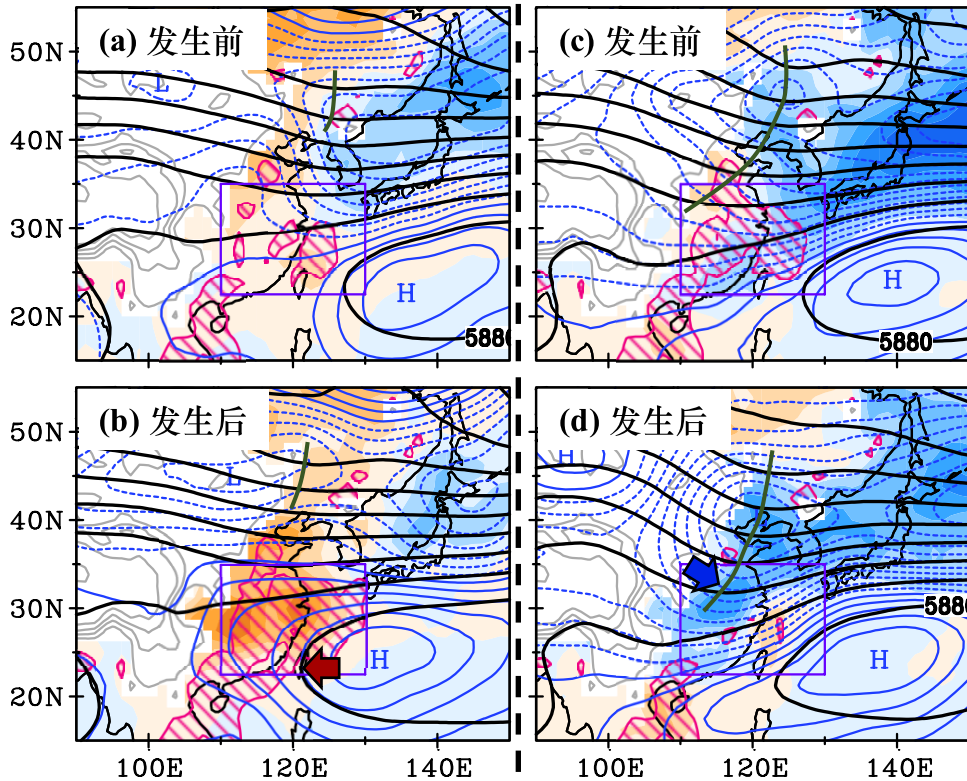
M(+)
D(+)

**第二类：东亚西风槽加深，
陆面冷却，日变化不明显**

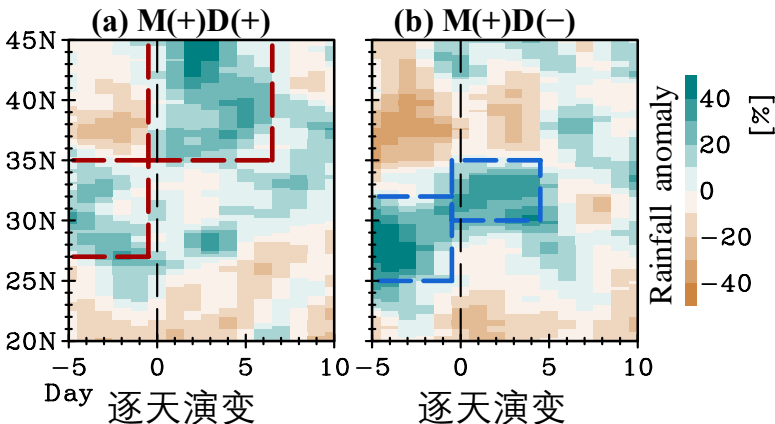
M(+)
D(-)

**第一类：雨带北移
早晨峰值明显**

**第二类：雨带偏南
午后峰值明显**



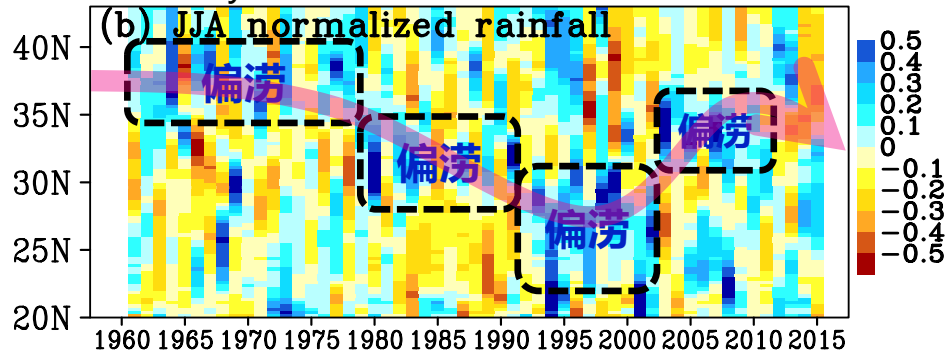
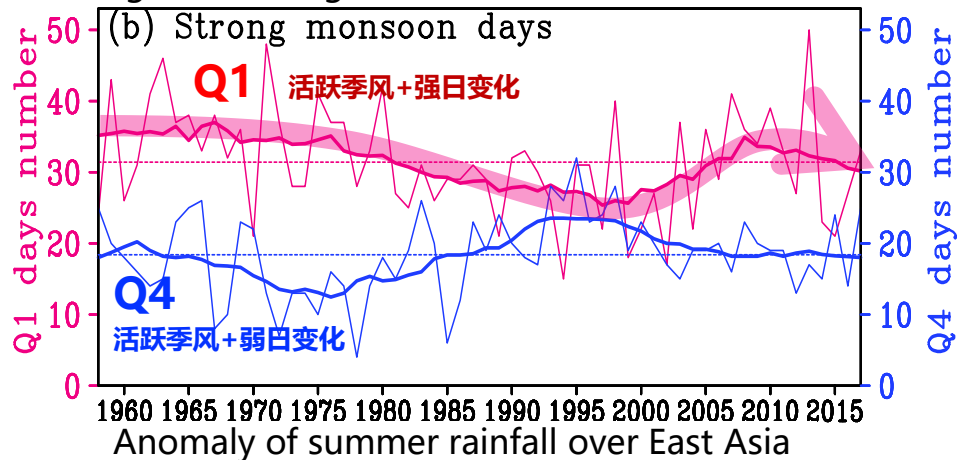
925-hPa temperature anomaly [K]



Liu et al. 2022 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0372.1>

东亚夏季风日变化与长期气候变化的联系

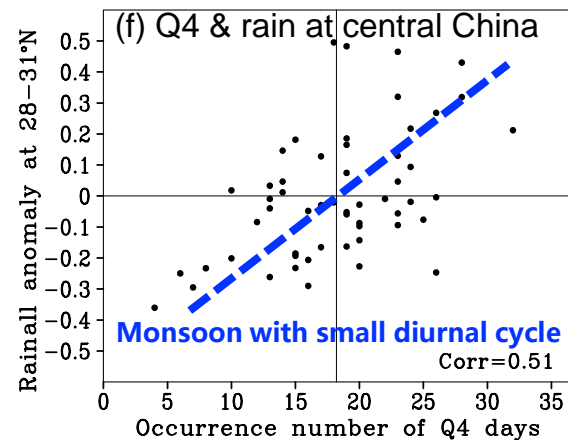
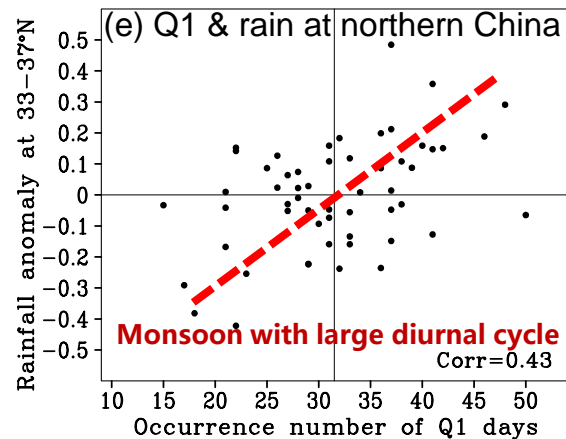
Long-term change of DMV and East Asian rainband



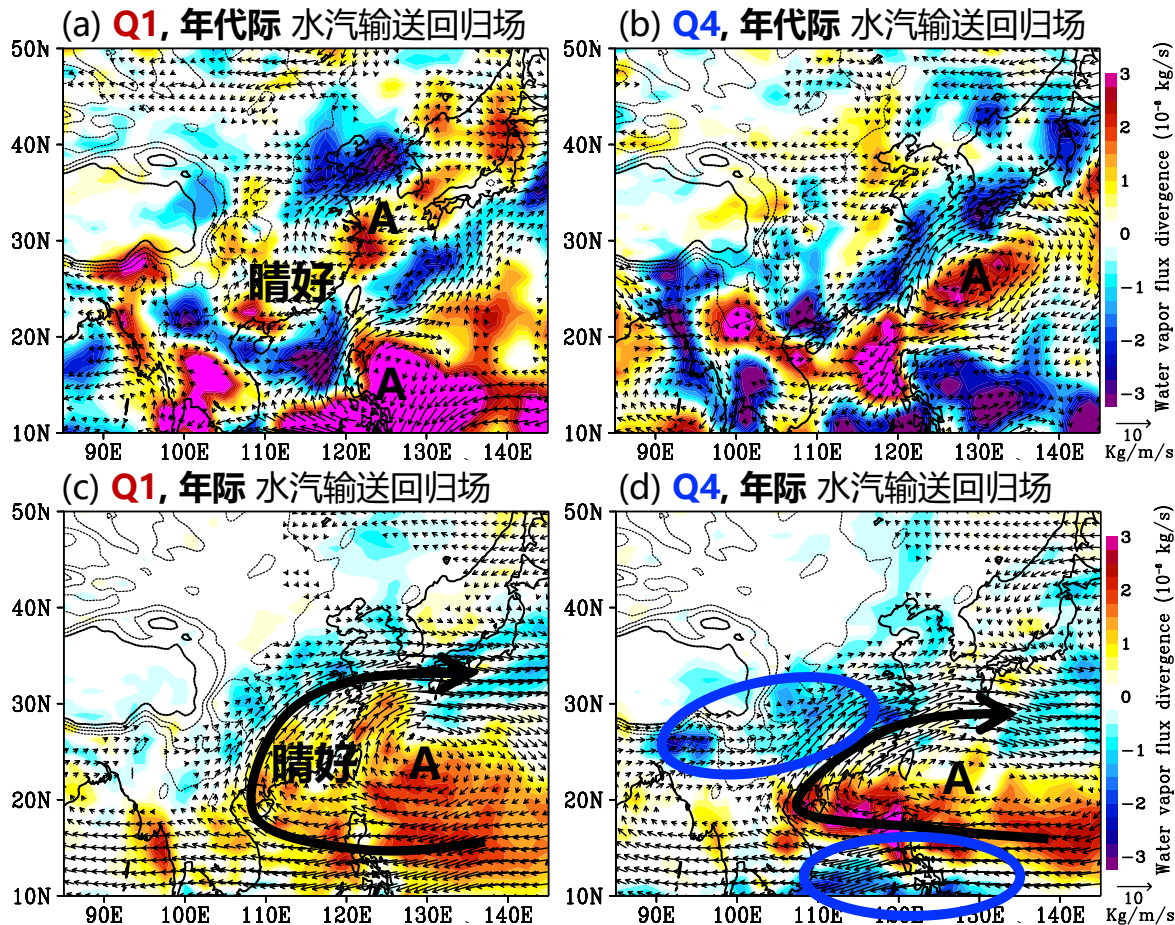
季风气流日变化的年际/年代际变化对应于我国旱涝

Chen et al. 2021 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0882.1>

Interannual variations



季风日变化不同分组的水汽输送和辐合的长期变化



主要结果

- 活跃夏季风配合**强日变化 (Q1)** 是北方水汽辐合的主导者
- 活跃夏季风配合**弱日变化 (Q4)** 是南方水汽辐合的主导者
- 两者与**副热带高压的北进和西伸**形态差异有关。与**菲律宾和云贵高压**附近大气对流有关？

Chen et al. 2021 JCLI
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0882.1>

南方大陆不仅是季风气流向北的“中转站”，也是其获得新能量补充的“加油站”，成为驱动东亚天气气候变化的关键脉搏之一。细看脉络，里面有很多故事：

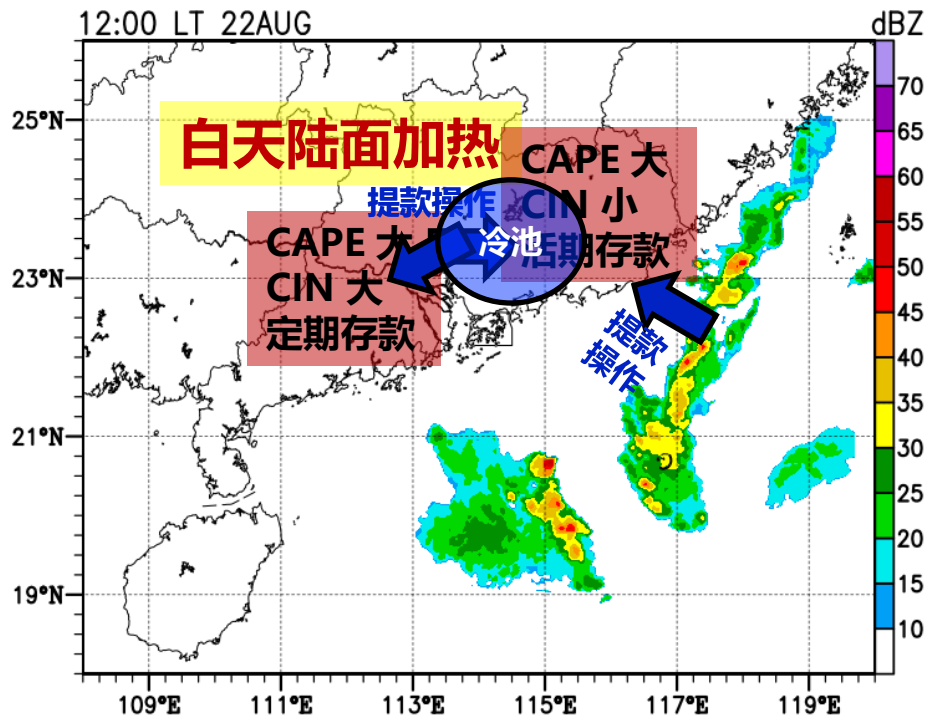
- 云-辐射-风-降水之间的相互作用 (Wu et al. 2021, 2023)
- 日变化与更长时间尺度之间的交叉连接 (Chen 2020; Chen et al. 2021; Liu et al. 2022)
- 大尺度大气环流-区域尺度日变化-中尺度对流系统之间的跨尺度变化和暴雨成因 (Zeng et al. 2019, 2022; [Liu et al. 2023](#))。

主要内容

1. 不同**天气状态**下的风场日变化的响应规律
2. 极端**暴雨**事件的风场日变化对不同大气环流的响应
3. 外雨带对**台风**环流和陆面强迫日变化的响应

**要点：陆面辐射加热&台风环流→区域热力动力的
日变化→中尺度对流系统→外雨带的新生**

陆面强迫日变化→台风外雨带在陆面新生→暴风雨提前到

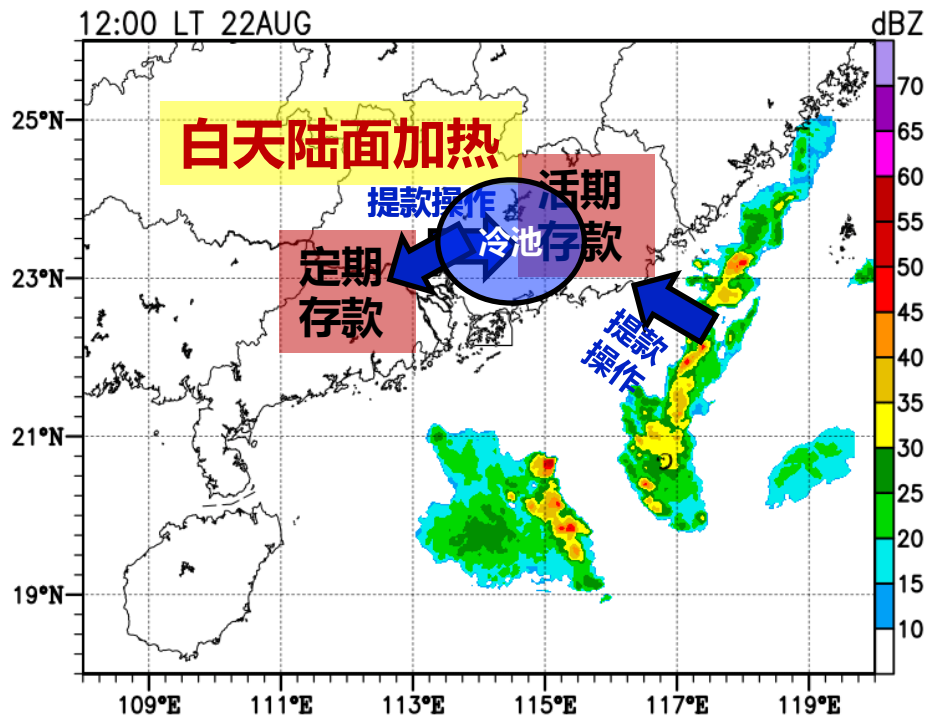


台风雨带形成的三部曲：

- 前期条件：白天辐射强迫→热力水平和垂直差异→对流不稳定（存款）和区域风场（提取）→东西部的差异
- 对流触发（兑现）：对流不稳定和低空辐合抬升→对流触发在粤东爆发
- 对流组织化（增长）：对流不稳定+中高层干燥→冷池反馈→对流组织成飚线快速西移→外雨带在粤西发展成熟

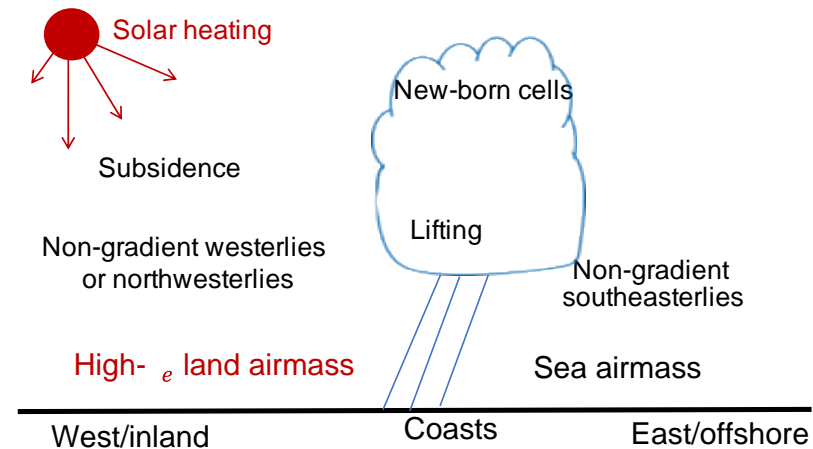
Ruan, T., L. Bai, and G. Chen, 2023: Outer rainband formation on land ahead of Typhoon Hato (2017), JGR-Atmosphere, 128, e2022JD038051. <https://doi.org/10.1029/2022JD038051>

台风环流&陆面强迫→热力差异→ 动力响应→对流发展→新生雨带

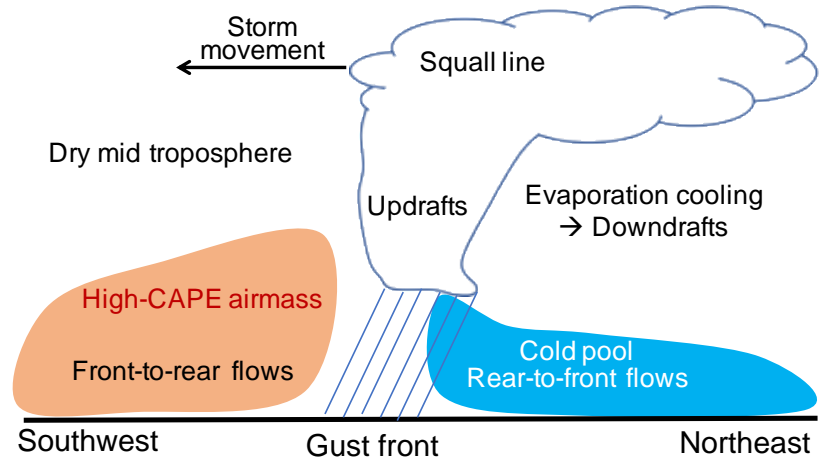


Ruan, T., L. Bai, and G. Chen, 2023: Outer rainband formation on land ahead of Typhoon Hato (2017), *JGR-Atmosphere*, 128, e2022JD038051. <https://doi.org/10.1029/2022JD038051>

(a) Convection initiation of rainband



(b) Convection organization of rainband



- **打通时空隧道：基于区域日变化的桥梁作用和新生能量，揭示大尺度环流与中尺度对流的连接，阐明暴雨的多尺度机制**

区域日变化

(跨尺度承接、新能量输入：热力→动力)



大尺度大气环流影响区域尺度日变化能量输入，形成**区域风场日变化**，高效调节暖湿能量的重新分配和集中释放，控制**中尺度对流系统**的发生发展，决定暴雨等**重大灾害**事件的时间和地点。

谢谢!

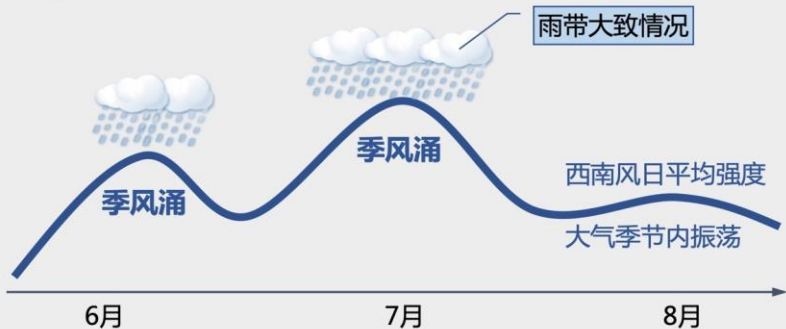
PPT文件下载 <https://atmos.sysu.edu.cn/teacher/362> 请多指教

- Ruan, T., L. Bai, and G. Chen, 2023: **Outer rainband formation on land ahead of Typhoon Hato (2017)**. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 128, e2022JD038051. <https://doi.org/10.1029/2022JD038051>
- Wu, R., G. Chen, and Z. J. Luo, 2023: **Strong coupling in diurnal variations of clouds, radiation, winds, and precipitation during the East Asian summer monsoon**. *J. Climate*, 36 (5), 1347–1368. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0330.1>
- Liu, X., G. Chen, S. Zhang, and Y. Du, 2023: **Formation of low-level jets over southern China in the meiyu season**. *Adv. Atmos. Sci.*, in press. <http://www.iapjournals.ac.cn/aas/en/article/doi/10.1007/s00376-023-2358-5>
- Liu, B., G. Chen, W. Zeng, L. Bai, and H. Qin, 2022: **Diurnal variations of southerly monsoon surge and their impacts on East Asian summer rainfall**. *J. Climate*, 35 (1), 159–177. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0372.1>
- Zeng, W., G. Chen, L. Bai, Q. Liu, and Z. Wen, 2022: **Multiscale processes of heavy rainfall over East Asia in summer 2020: Diurnal cycle in response to synoptic disturbances**. *Mon. Wea. Rev.*, 150 (6), 1355–1376. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0308.1>
- Chen, G., Y. Du, and Z. Wen, 2021: **Seasonal, interannual, and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon: A diurnal-cycle perspective**. *J. Climate*, 34 (11), 4403–4421. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0882.1>
- Chen, G., 2020: **Diurnal cycle of the Asian summer monsoon: Air pump of the second kind**. *J. Climate*, 33 (5), 1747–1775. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0210.1>
- Zeng, W., G. Chen, Y. Du, and Z. Wen, 2019: **Diurnal variations of low-level winds and precipitation response to large-scale circulations during a heavy rainfall event**. *Mon. Wea. Rev.*, 147 (11), 3981–4004. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0131.1>

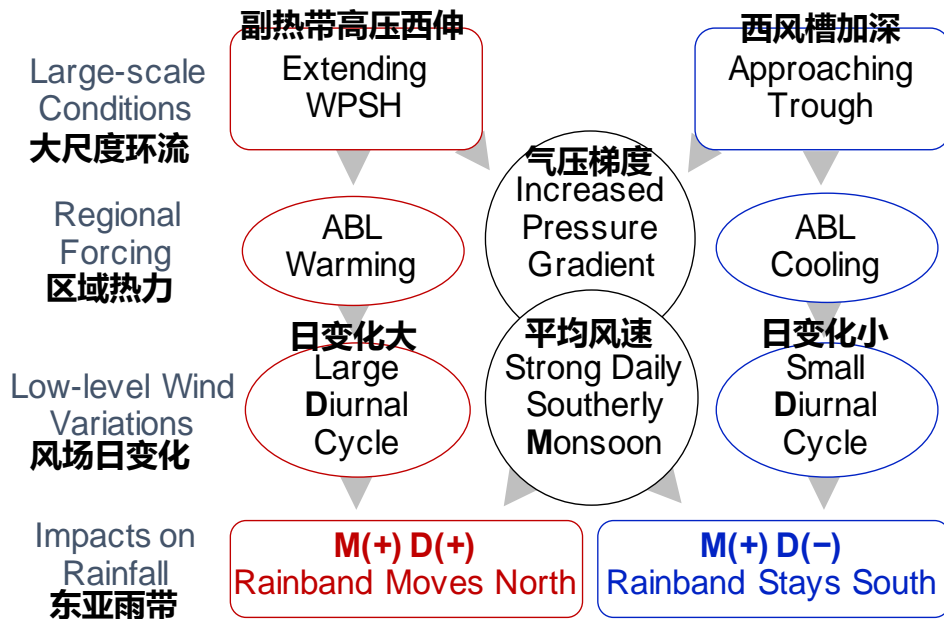
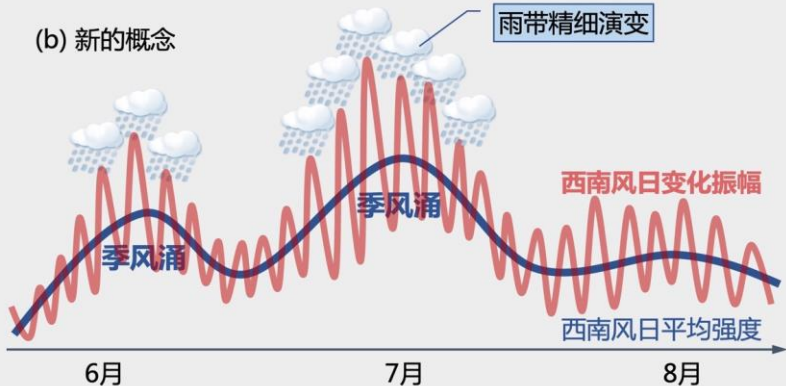
两类不同季风涌日变化的大尺度环流、机制和影响

东亚夏季风与雨带的变动

(a) 原来想象



(b) 新的概念



不同类型的降尺度机制是形成不同类型季风涌事件的原因

夏季风系统对太阳辐射季节变化和地形强迫的响应

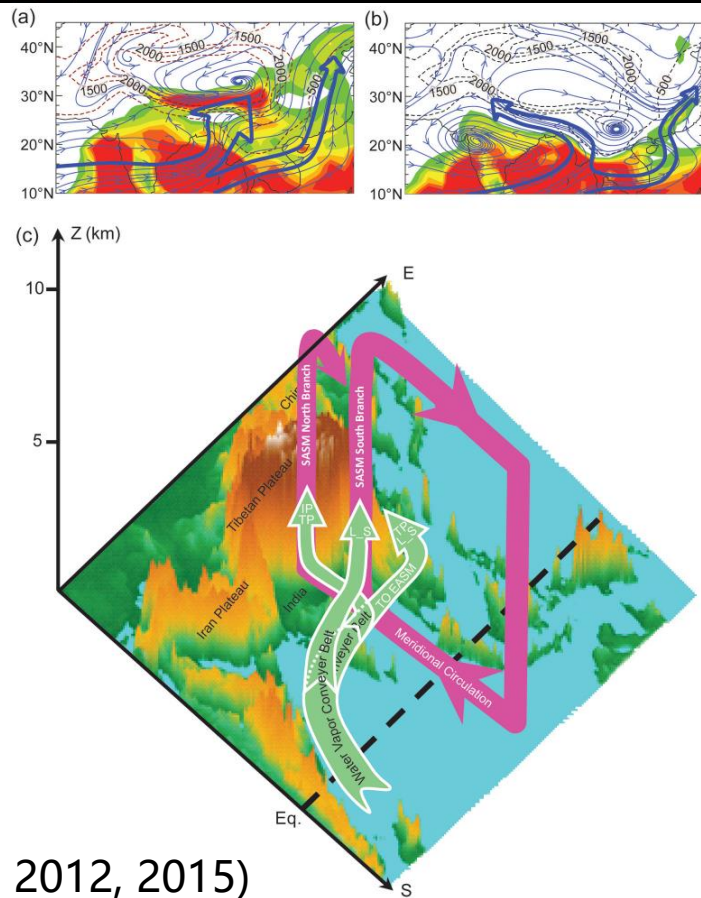
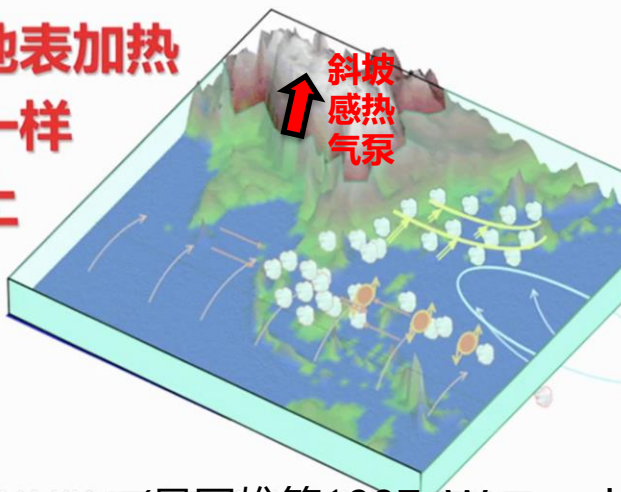


高原感热气泵 —水汽抬升—亚洲季



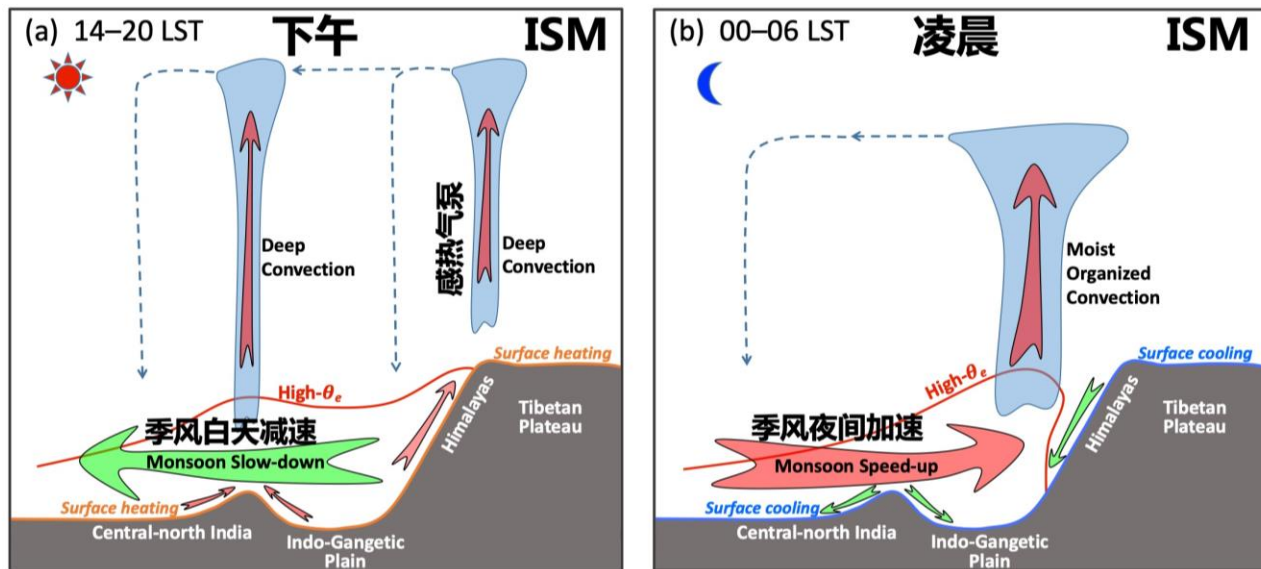
- A. 大气中的水汽85%分布在3公里以下的近地面；
- B. 云形成并分布在高空；
- C. 要形成高空中的云和降水，需要把近地面水汽输送到空中。

青藏高原斜坡上的地表加热
就像一部巨大气泵一样
把近地面的水汽向上
输送到高空，形成
云和降水！



大气科学和地球流体力学数值实验 (吴国雄等1997; Wu et al. 2012, 2015)

1.1 季风气流夜间加速起到第二类“气泵效应”，是东亚天气与气候连接的关键过程



季风气流日变化体现：

- (1) 太阳辐射强迫驱动的大气热力动力过程（海陆气相互作用）
- (2) 大尺度大气环流与区域强迫的共同作用
- (3) 天气现象与气候系统的跨时间尺度连接
- (4) 夜间气泵的形成机制和下游降水影响，不同于直接热力强迫的白天气泵

- **白天气泵**：午后峰值，由地形感热直接驱动，加热区的热力不稳定和局地环流形成对流和短时降水
- **夜间气泵**：凌晨峰值，由热力作用间接驱动（边界层惯性振荡），加热区以北的水汽辐合形成有组织对流和持续降水。→季风气流夜间加速，向北输送大量暖湿空气，驱动经向环流，可被称为第二类“气泵效应”。
- 白天气泵和夜间气泵构成**季节气泵**

Wu et al. 1997, 2015 <https://doi.org/10.1093/nsr/nwu045>
Chen 2020 JCLI <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0210.1>