



第五届全国中尺度气象学论坛



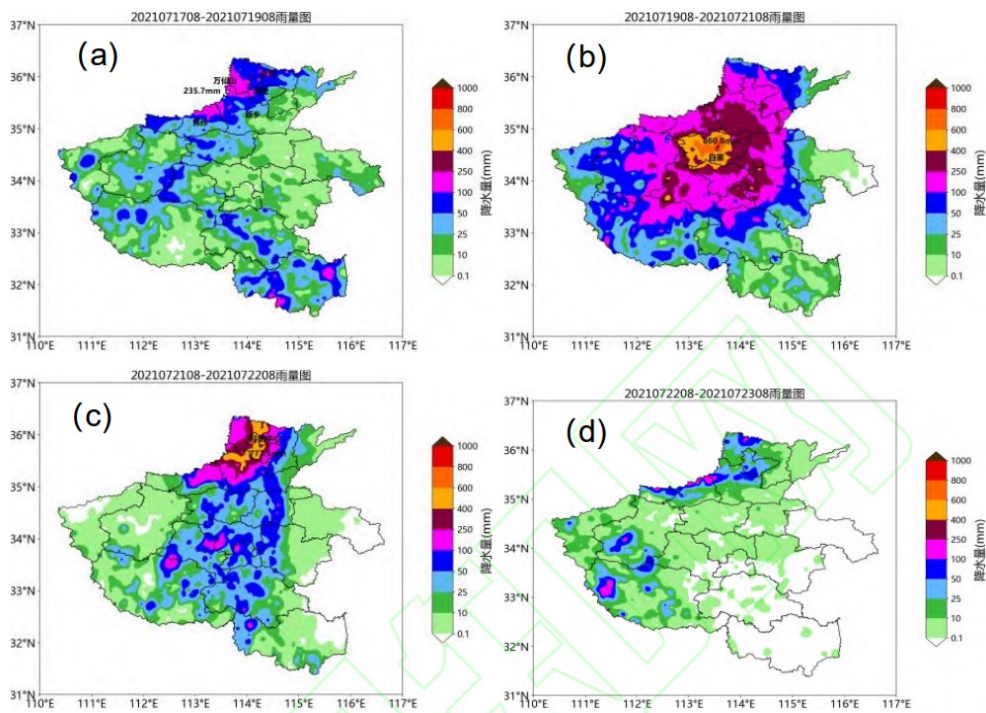
台风、副高和急流对“21·7”河南 极端降水的协同影响

陈光华 饶晨泓
中国科学院大气物理研究所

2023-08-10 银川



01.研究意义及背景



2021年7月17日-23日河南地区逐日降水

(张霞等, 2021)

特大暴雨
(250 mm/24h)
的2.5倍

➤ 7月20日郑州市日降雨量624.1 mm

➤ 7月20日16时~17时(北京时间),
郑州市小时降雨量201.9 mm

≈100个
西湖

突破60yr
历史记录

➤ 1478.6万人受灾

➤ 死亡失踪398人

➤ 直接经济损失1200.6亿元



01.研究背景

影响中国暴雨的重要天气系统 (Luo et al., 2020) :

- 台风：直接影响（台风自身的降水）和间接影响（台风远距离降水）

(Takahashi and Kawano, 1998; Lonfat et al., 2007)

(Bosart and Carr, 1978; Ross and Kurihara, 1995; Wang et al., 2009; 孙建华等, 2005)

- 副热带高压

(陶诗言, 1980; Schumacher et al., 2011; Schumacher and Galarneau, 2012)

- 高、低空急流

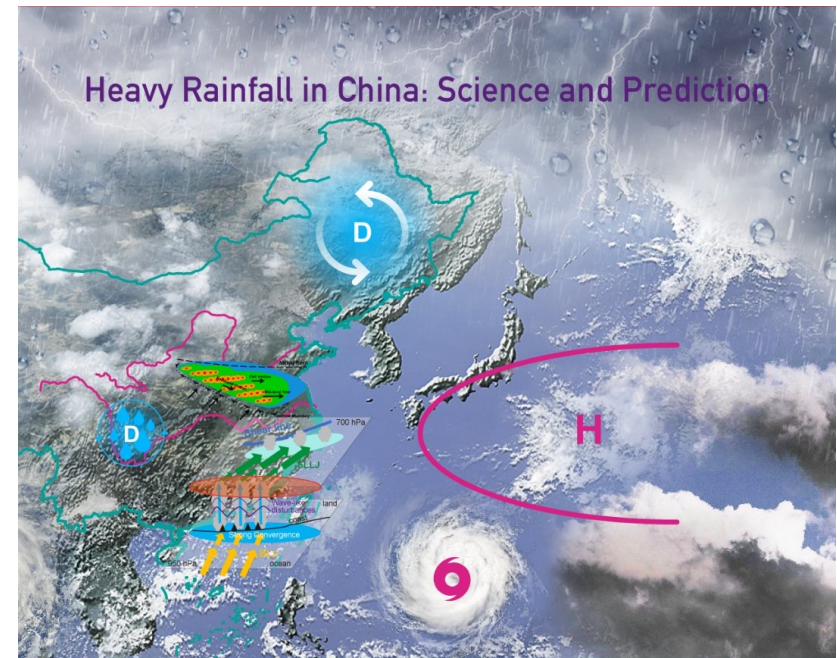
(Du and Chen, 2018, 2019 ; 孙淑清等, 1980 ; 翟国庆等, 1999)

- 锋面

- 东北冷涡

- 西南涡

• • •



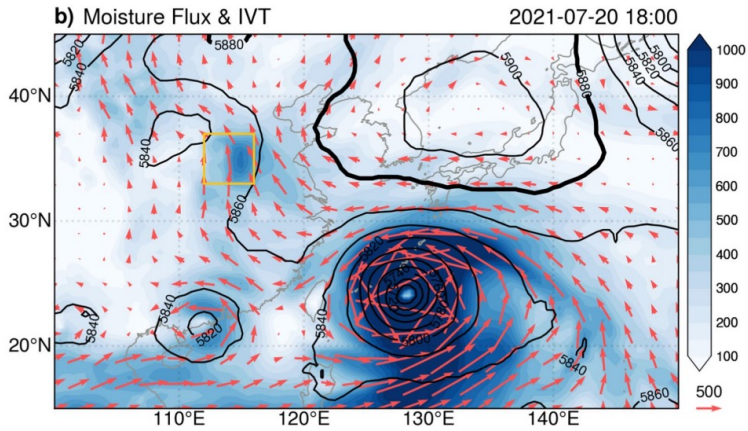
2020.7 (34):3 JMR封面



01.研究背景

暴雨形成的三个充分条件：

①充足的水汽

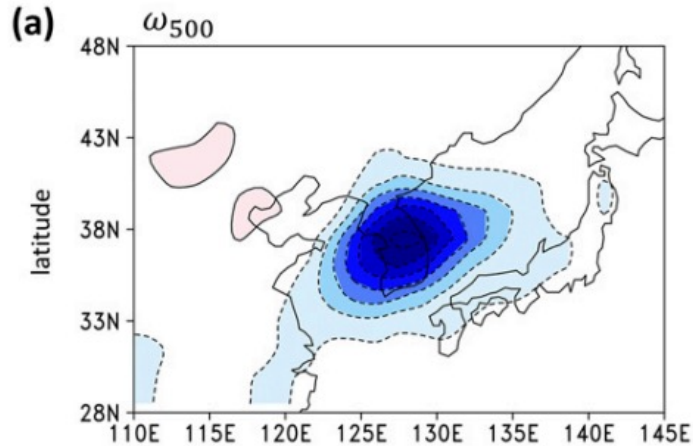


整层水汽通量（矢量）和水汽通量值（阴影）

(Nie and Sun, 2022)

- 水汽通量
- 水汽通量散度
- ...

②强盛而持久的上升运动

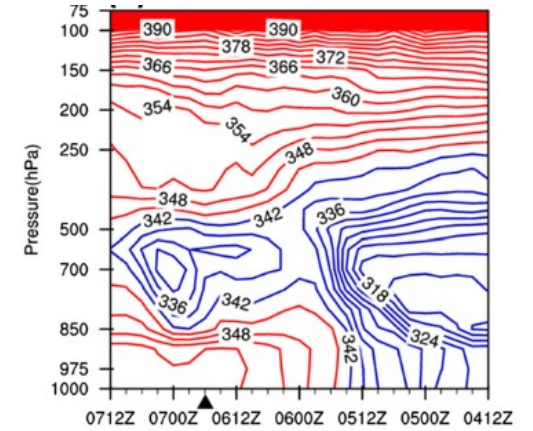


垂直速度 ω

(Park et al., 2021)

- ω 方程
- ...

③大气层结构的不稳定



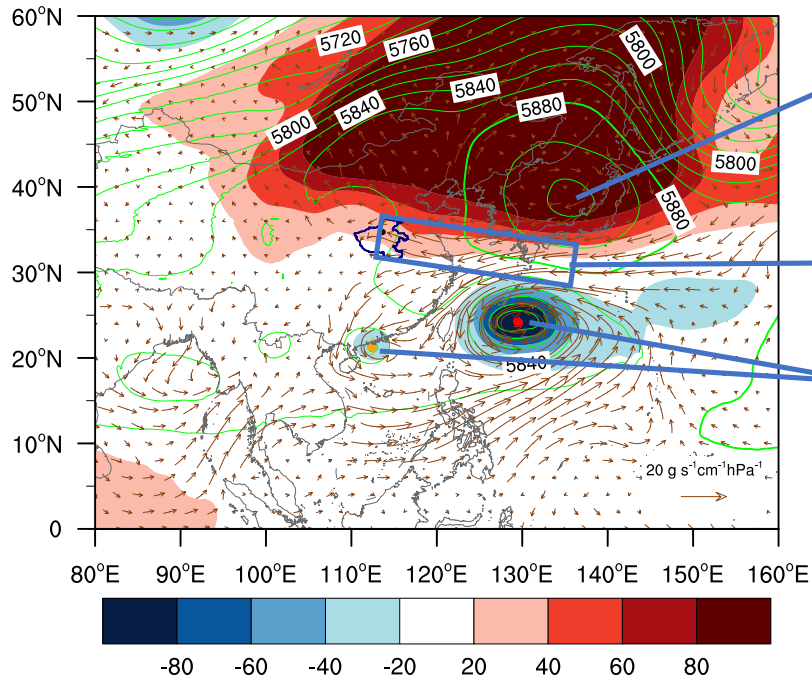
相当位温

(Bao et al., 2015)

- 相当位温随高度的变化
- 湿位涡
- ...



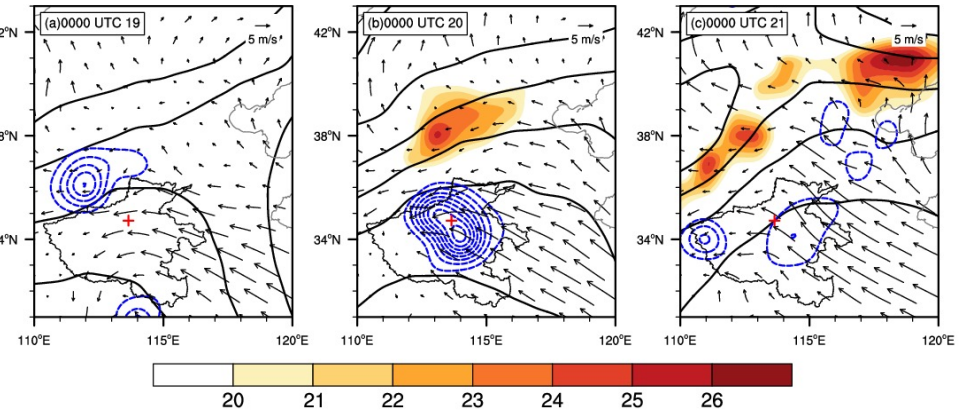
01.研究背景：天气形势



西太平洋副热带
高压北北位强

持续

台



250-hPa 风速值 (阴影), 位势高度 (黑色等值线);
500-hPa ω (蓝色等值线); 950-hPa 风场 (箭头)

7月19日00时~21日12时 (世界时) 平均的500-hPa位势高度场 (等值线) 和距平场 (阴影), 925-hPa水汽通量距平场 (矢量), 参考气候态为1981~2010年7月的平均值



02.科学问题

已有研究

- 大气环流形势稳定、水汽和能量供给充足是强降水发生的重要原因 (苏爱芳等, 2021; 冉令坤等, 2021; 史文茹等, 2021; 张霞等, 2021) ;
- 讨论台风“烟花”和“查帕卡”在河南暴雨中的作用 (Xu et al., 2022a, b; Liu et al., 2023) ;
- 台风“烟花”和副高之间的水汽输送对降水具有重要贡献 (Nie and Sun, 2022; Deng et al., 2022) ; 低层东南急流水汽输送也具有重要作用 (Liu et al., 2023; Luo and Du, 2022) ;
- 局地强对流 (Fu et al., 2022; Qin et al., 2022; Wei et al., 2022; Yin et al., 2022a, b) 和微物理过程 (Chen et al., 2022) 对强降水具有重要作用。



局限性

- 关于台风“烟花”和副高的协同作用, 及其对本次暴雨相对贡献的研究较少;
- 关于高空急流对河南暴雨影响的定量研究较少。



02.研究内容：①台风“烟花”和西太平洋副热带高压对河南暴雨的影响

■ 模式和试验设计：

模式：WRF3.6.1

资料：FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

模拟时段：19日0000 UTC~21日1200 UTC

分辨率：27-km, 9-km, 3-km 垂直方向45层

参数化方案：WSM 6 物理方案，Kain-Fritsch 积云参数化方案（最外层），Monin-Obukhov 近地面层方案，YSU边界层方案，RRTM 长短波辐射方案，Dudhia 短波辐射方案

● 试验设计：

CTL：控制试验

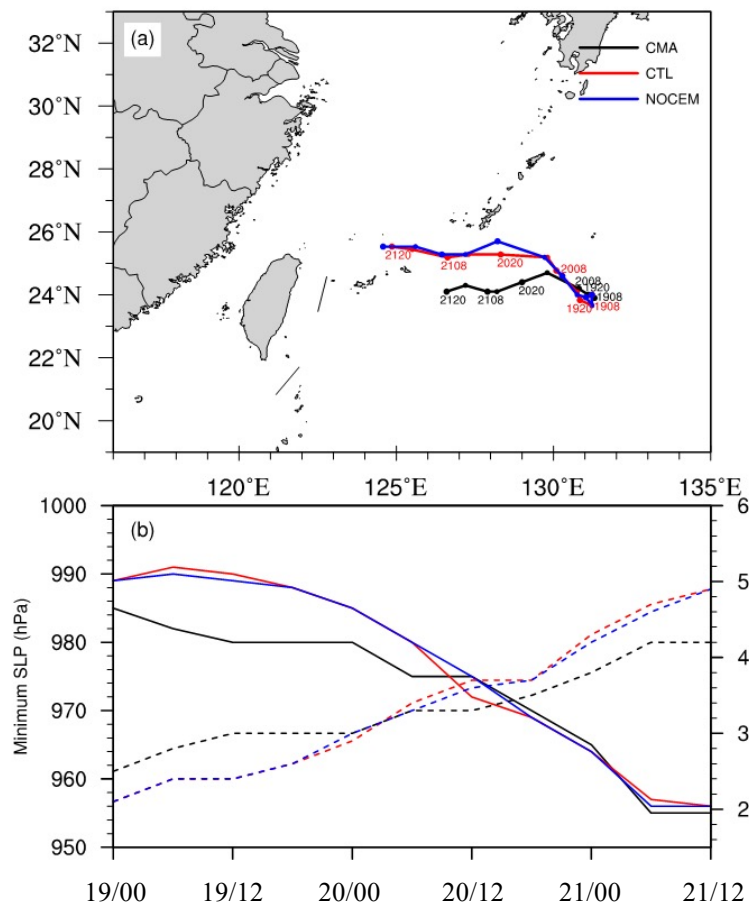
SH150：与CTL同，但模拟初始时刻与西太平洋副热带高压（WPSH）相关的位涡距平值增强50%

SH050：与CTL同，但模拟初始时刻与WPSH相关的位涡距平值减弱50%

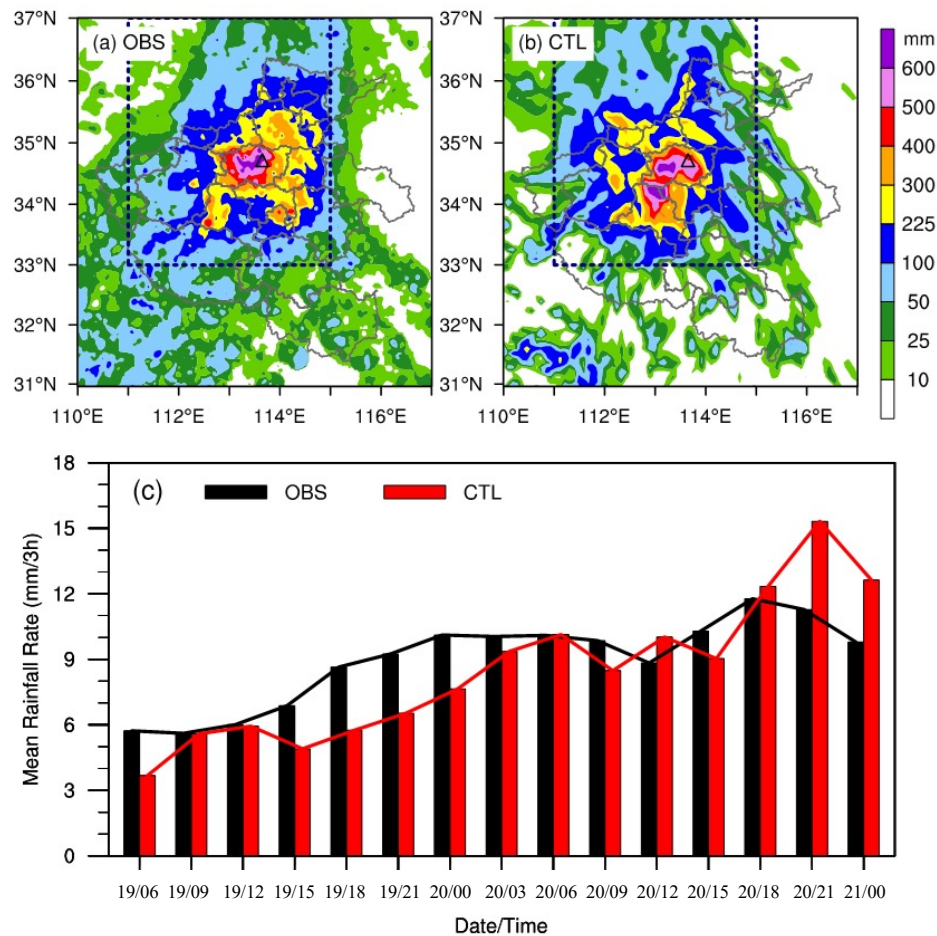
TC150：与CTL同，但模拟初始时刻与台风“烟花”相关的位涡距平值增强50%

TC050：与CTL同，但模拟初始时刻与台风“烟花”相关的位涡距平值减弱50%

■ 试验结果：路径、强度和降水



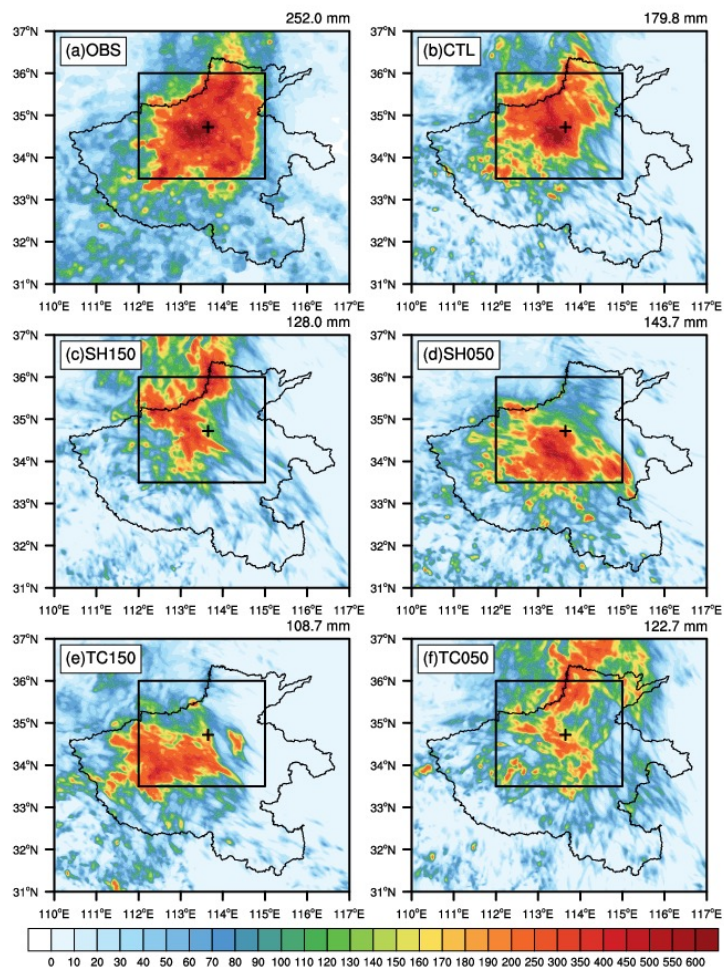
台风“烟花”的 (a) 模拟路径,
(b) 最低中心气压和最大风速



19日06时~21日12时 (a) 累计观测降水, (b) 累计模拟降水, 虚线矩形代表目标区域 (c) 逐三小时降水

模拟的“烟花”
路径和强度；降
水落区、量级和
演变趋势与观测
基本吻合。

■ 试验结果：控制试验和敏感性试验的降水



19日0600 UTC~21日1200 UTC累计降水分布，矩形表示目标区域，右上角数值代表目标区域平均降水

与CTL相比，

- 各敏感性试验的降水都减少；

→本次强降水是在极有利的WPSH和TC及其配合下发生的

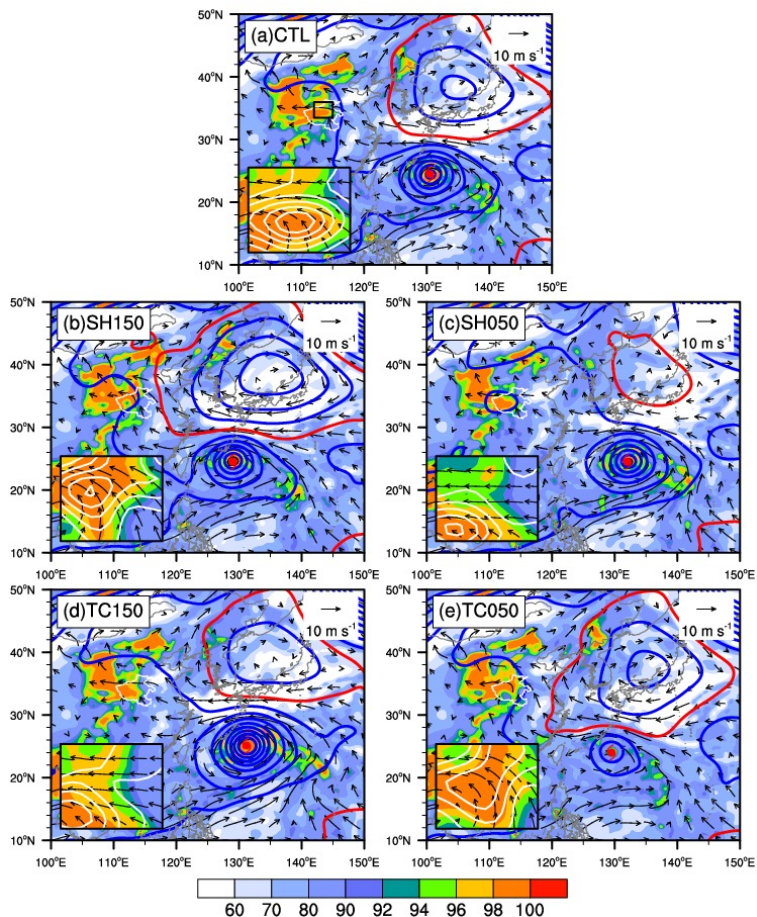
- TC150和TC050的54-h累计降水量减少了39.5%和31.8%，超过了SH150和SH050的28.8%和20.1%；

→在本研究中，台风“烟花”对强降水的影响大于WPSH

- 强降水落区移动

→WPSH和台风“烟花”对目标区域降水分布具有不同的贡献

■ 试验结果分析：①水汽输送



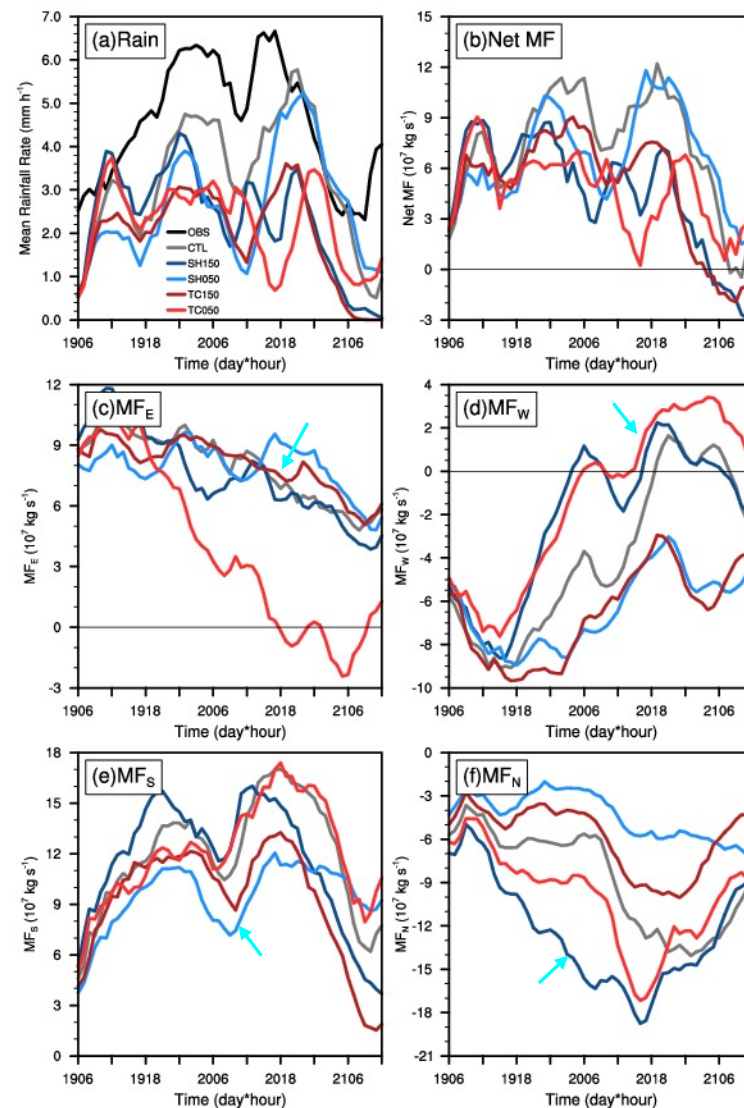
与CTL相比，

- SH150 (SH050)：目标区域北(南)面的出(入)流增加64.1% (减少26.2%)；
- TC150 (TC050)：西(东)面的出流(入流)增加48.7% (减少46.5%)。

示区域。

WPSH和台风“烟花”分别主导经向和纬向的水汽输送

7月20日0000UTC 850-hPa相对湿度(阴影)和水平风场(矢量)，500-hPa位势高度(蓝色等值线，红色等值线代表西太副高)，左下角的子图为目标区域的放大图，白色等值线代表垂直速度



(a) 目标区域逐小时平均降水，(b) 净水汽通量，(c-f) 四面水汽通量

■ 试验结果分析：②垂直运动

非地转湿大气 ω 方程 (Yao et al., 2004) :

$$\left(\sigma_0 \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = -2 \nabla \cdot (\mathbf{Q}_{Dia}^* + \mathbf{Q}_{Dyn}^*)$$

$$\omega_{MAG} = L^{-1} [-2 \nabla \cdot (\mathbf{Q}_{Dia}^* + \mathbf{Q}_{Dyn}^*)]$$

$$\omega_{Dia} = L^{-1} [-2 \nabla \cdot (\mathbf{Q}_{Dia}^*)]$$

热力

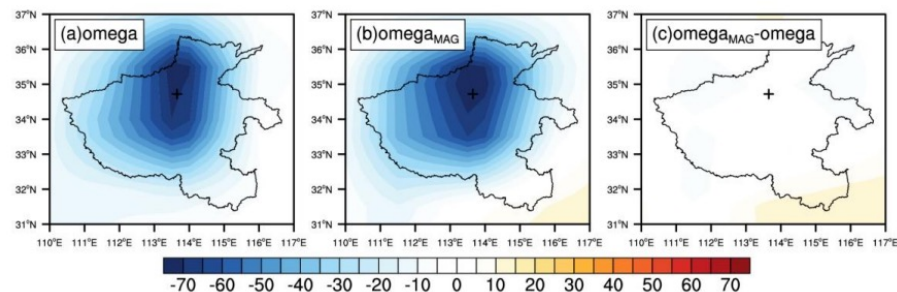
$$\omega_{Dyn} = L^{-1} [-2 \nabla \cdot (\mathbf{Q}_{Dyn}^*)]$$

动力

$$L = \sigma_0 \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}$$

$$\omega_{MAG} = \omega_{Dia} + \omega_{Dyn}$$

ω 方程反演结果检验



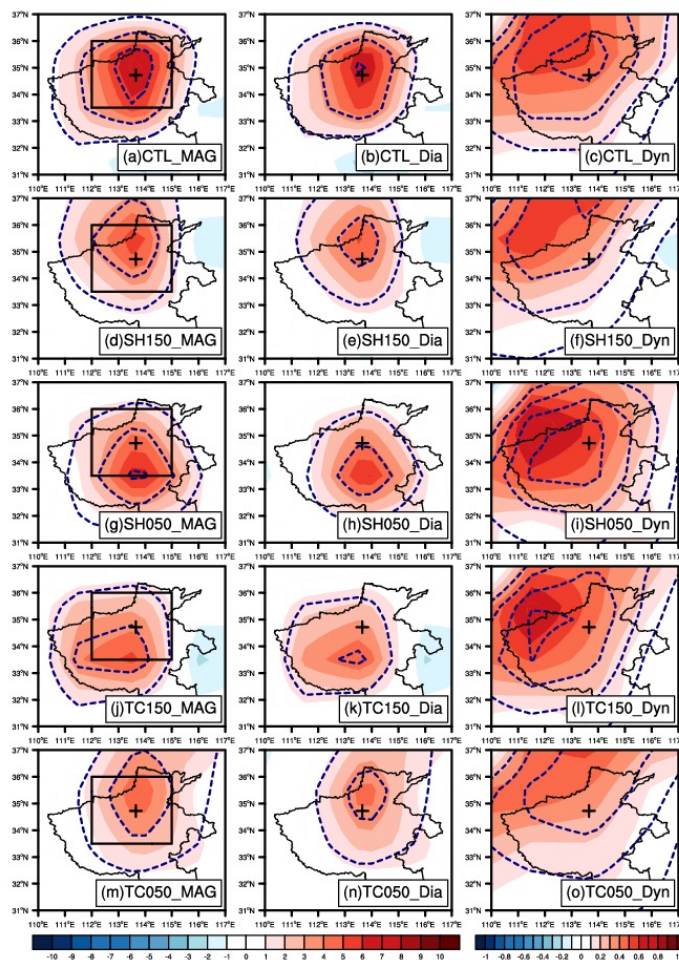
500-hPa (a) WRF输出的 ω 值 , (b) ω 方程反演的 ω 值 ,
(c) 二者差值 , 19日0600 UTC~21日1200 UTC平均

■ 试验结果分析：②垂直运动

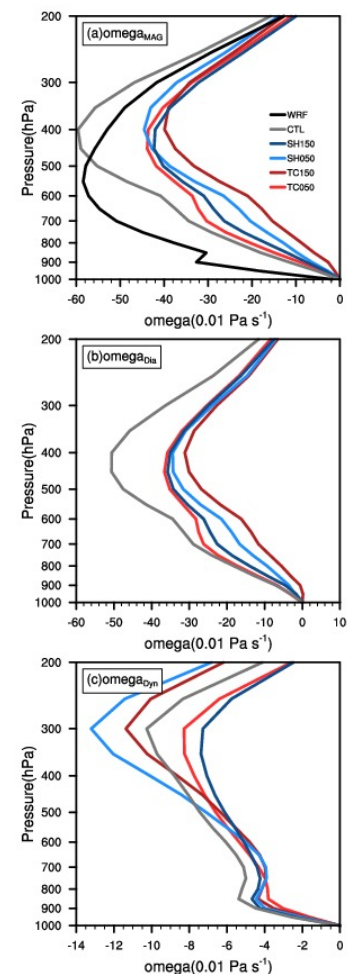
- 热力项的作用远大于动力项；
- 垂直运动对降水的落区和大小都具有指示意义；
- 热力强迫主要集中在对流层中层，动力强迫主要集中在对流层高层。

各试验 ω_{Dia} 和 ω_{Dyn} 的占比

	CTL	SH150	SH050	TC150	TC050
ω_{Dia}	82.9%	83.2%	77.7%	75.6%	83.4%
ω_{Dyn}	17.1%	16.8%	22.3%	24.4%	16.6%



300-600-hPa 19日0600 UTC-21日1200 UTC平均的Q矢量散度(阴影), ω 值(等值线), 矩形代表目标区域



目标区域平均 ω

■ 试验结果分析：③降水落区移动

高、低层辐合、辐散中心移动



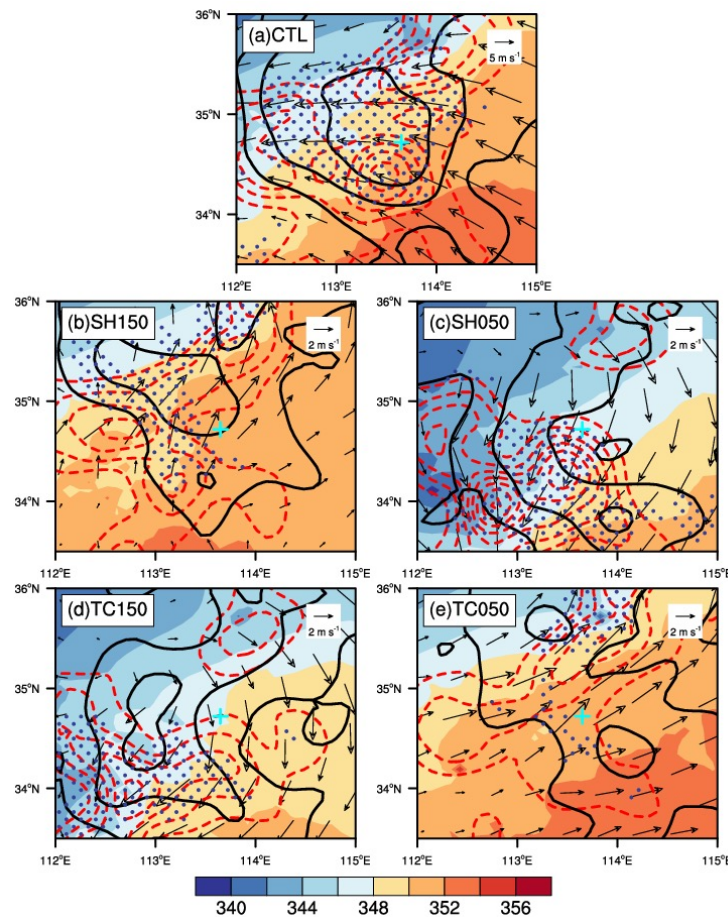
冷暖气团的相对位置移动

1.降水区低层辐合、高层辐散的垂直耦合结构有利于强降水的增强

2.强降水大多发生在冷暖气团交汇的地方
→类似锋面的强迫抬升和对流不稳定有助于强降水的发生



降水落区移动

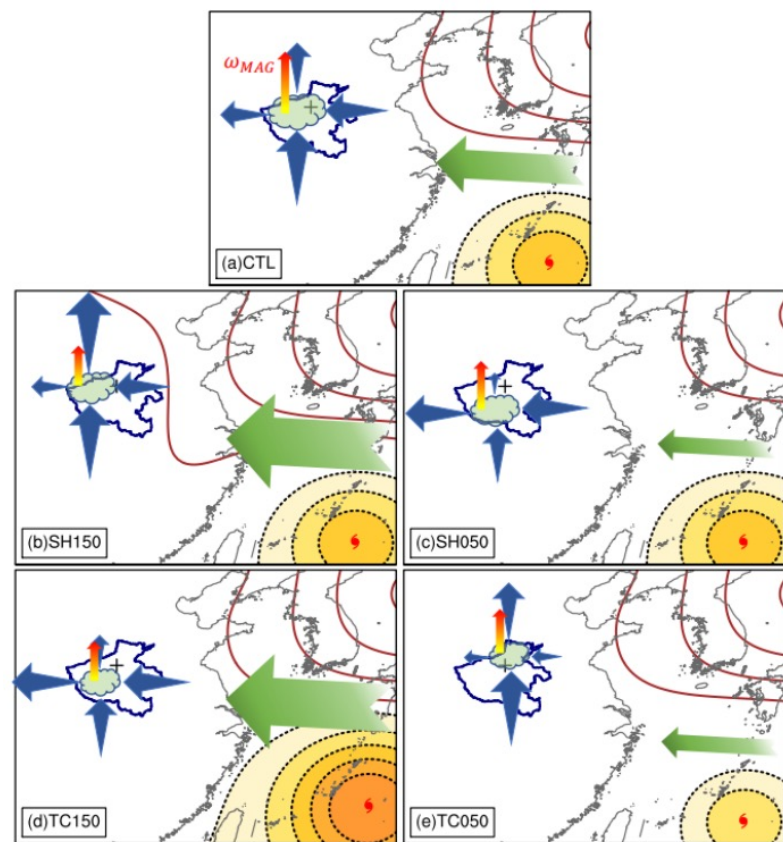


950-hPa 相当位温 (阴影), 辐合 (红色等值线), 250-hPa辐散 (黑色等值线), 蓝色打点区域代表54-h累计降水 >200 mm。

(a) 中的箭头表示950-hPa风场, (b-c) 中的箭头分别表示四个敏感性试验与控制试验950-hPa风场的差值

■ 小结

概念图



绿色箭头：西太副高和台风“烟花”之间的水汽输送通道；蓝色箭头：目标区域四面水汽输送通量；红色上升箭头： ω_{MAG} ；绿色云朵：降水区域。

Rao, C., Chen, G., & Ran, L. 2023. Effects of Typhoon In-Fa (2021) and the Western Pacific Subtropical High on An Extreme Heavy Rainfall Event in Central China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi: 10.1029/2022JD037924

结论：



(1) 与CTL相比，TC150和TC050的54-h累计降水量减少了39.5%和31.8%，超过了SH150和SH050的28.8%和20.1%，说明台风“烟花”对强降水的影响大于副高。还证实了，本次强降水是在极有利的WPSH和台风“烟花”及其配合下发生的。

(2) 水汽主要从东、南面流入目标区域，西、北面流出目标区域。WPSH和台风“烟花”分别主导目标区域经向和纬向的水汽输送。

(3) 强降水区的分布与相当位温和散度的分布密切相关。

(4) 垂直运动主要由非绝热加热项决定。



02.研究内容：②高空急流引起的次级环流对河南暴雨的影响

■ 模式和试验设计：

- 模式设置同工作②
- **方法**：分块位涡反演 (PPVI) 法
- 试验设计：

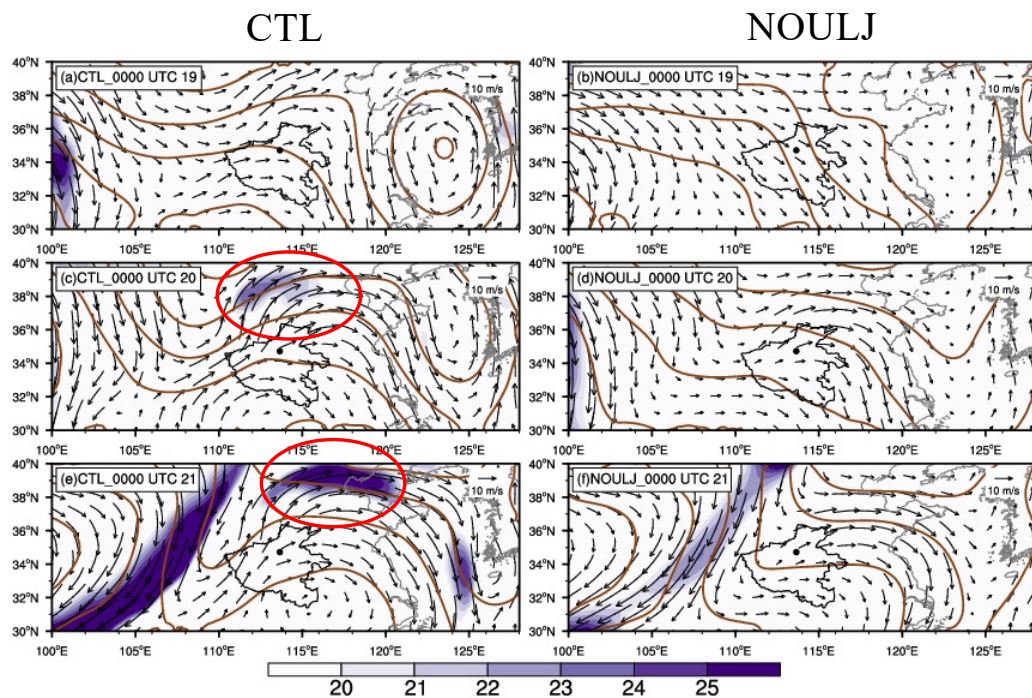
CTL：控制试验，同工作②

NOULJ：与CTL同，但**模拟初始时刻移除与高空急流 (ULJ) 发展相关的槽、脊**，抑制ULJ发展。

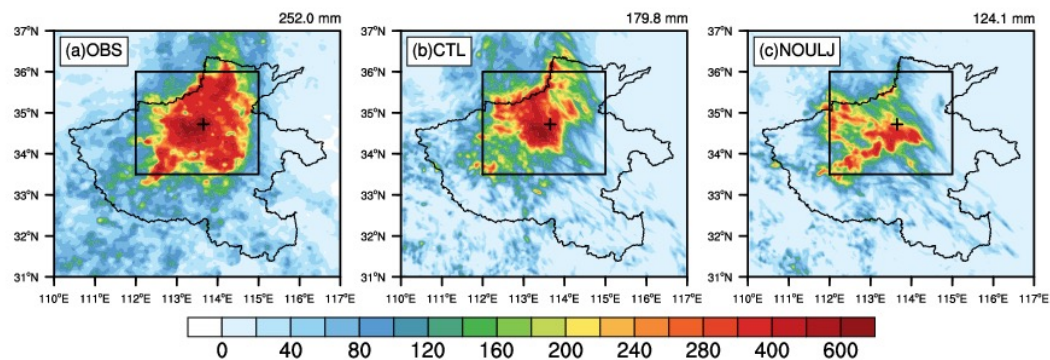


02.研究内容：③高空急流引起的次级环流对河南暴雨的影响

PPVI移除ULJ的结果



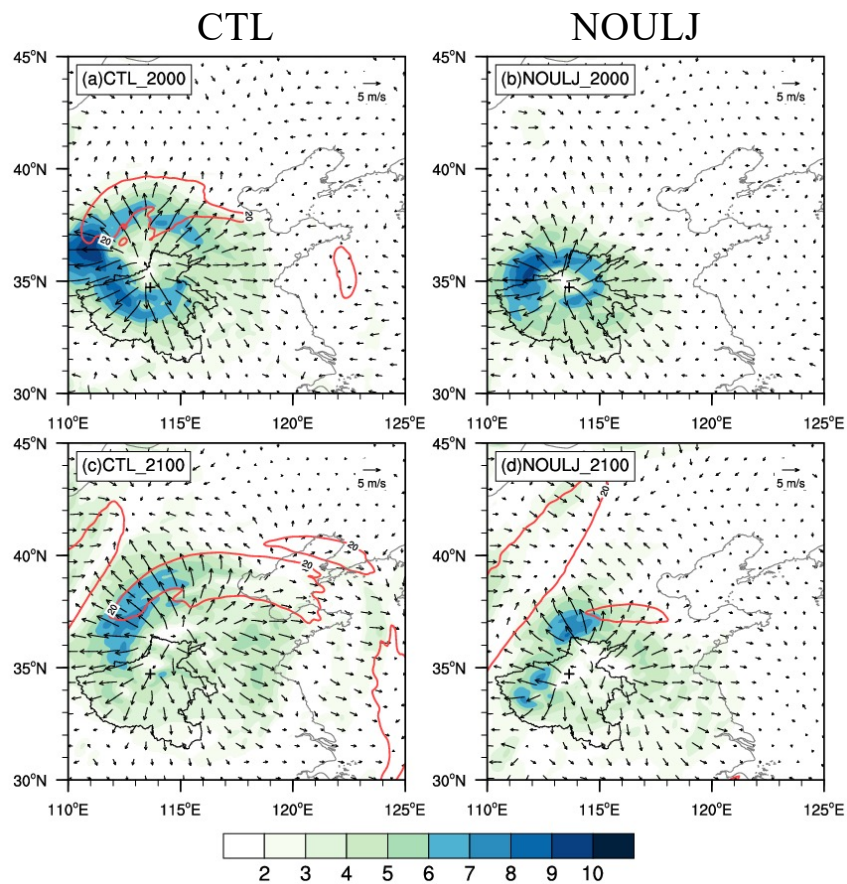
250-hPa风速（阴影），风矢量（箭头），位势高度
 （等值线从10900 gpm间隔20 gpm递增）
 （左列）CTL，（右列）NOULJ



19日0600 UTC~21日1200 UTC累计降水分布，矩形表示目标区域，右上角数值代表目标区域平均降水

➤ NOULJ的54-h累计降水量比CTL减少了31%

■ 试验结果：CTL和NOULJ高、低层结构的对比

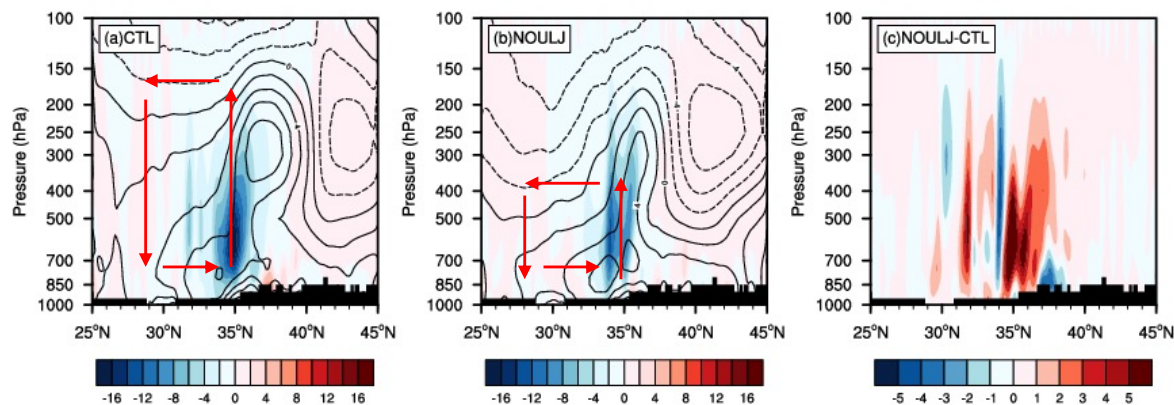


高层

- CTL高空急流入口区右侧存在明显的辐散；
- NOULJ相对于CTL而言，高层辐散强度减弱，位置南移，与降水强度和位置相对应。

250-hPa散度风速值（阴影）和风矢量（箭头），20 m/s全风速等值线（左列）CTL，（右列）NOULJ

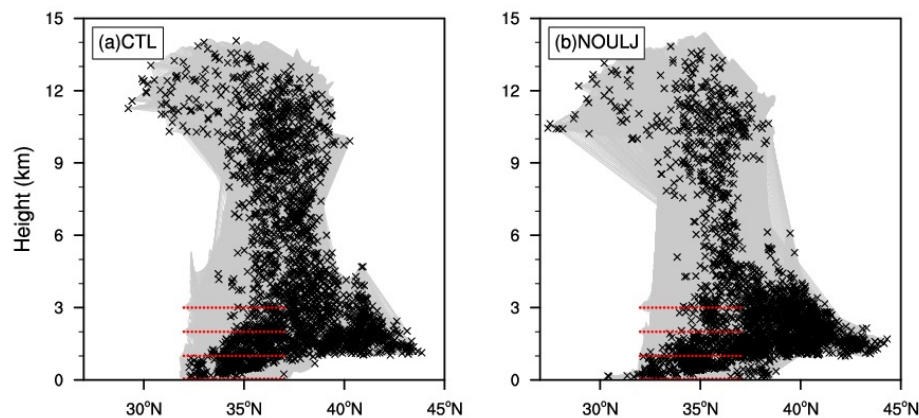
■ 试验结果：CTL和NOUL高、低层结构的对比



沿 $113^{\circ}E$ ω (阴影) 和 v 风速 (等值线) 的纬度-高度剖面

垂直剖面

- NOULJ的上升速度弱于CTL
- NOULJ强上升区的位置相比于CTL偏南
- NOULJ的次级环流弱于CTL

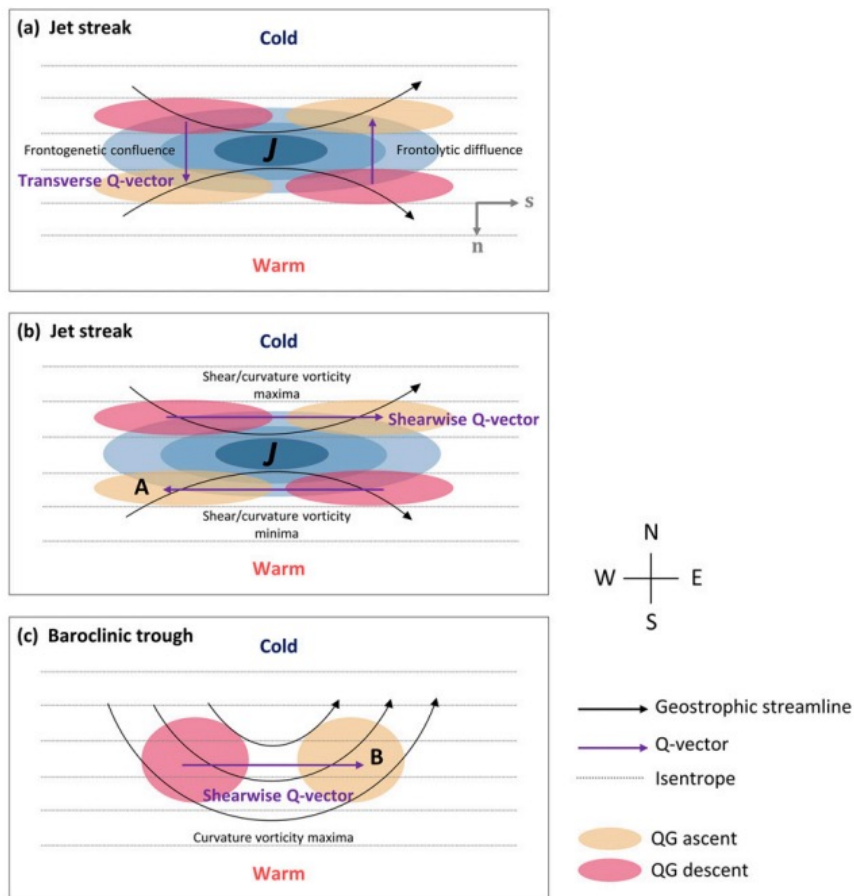


轨迹追踪的纬向-高度剖面，红点表示起始点，灰色实线表示轨迹，黑色十字表示终点

数据：WRF domain 2, 9 km, 1 h

- 时间：从0000到0600，粒子终点的平均高度为3.23 km，至0000为4.33 km；
- July, 1h所有轨迹的平均 θ_e 为340.6 K，比CTL低0.2 K；
- 种子：共2704个
- 1高层抽吸作用和暖湿空气的减弱不利于每隔1h中对流的爱震方向间隔1 km。

■ 试验结果：②垂直运动



Park et al. (2021)

非地转湿大气 ω 方程：

$$\left(\sigma_0 \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}^*$$

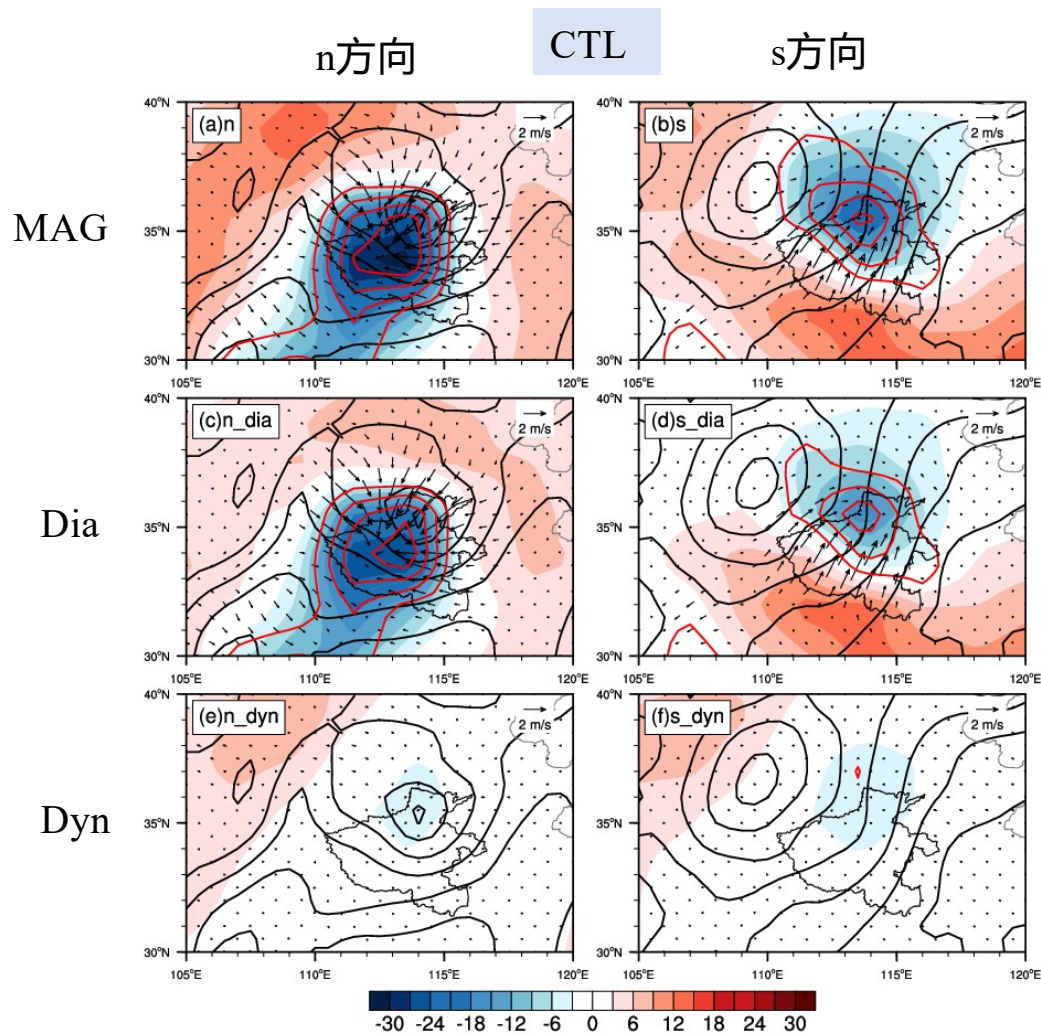
$$\begin{cases} \mathbf{Q}_n^* = \left(\frac{\mathbf{Q}^* \cdot \nabla \theta}{|\nabla \theta|} \right) \frac{\nabla \theta}{|\nabla \theta|} \\ \mathbf{Q}_s^* = \frac{\mathbf{Q}^* \cdot (\mathbf{k} \times \nabla \theta)}{|\nabla \theta|} \left(\frac{\mathbf{k} \times \nabla \theta}{|\nabla \theta|} \right) \end{cases}$$

垂直于 θ ，与ULJ的次级环流有关

平行于 θ ，与斜压槽相关

$$\begin{cases} \omega_n = L^{-1} (-2 \nabla \cdot \mathbf{Q}_n^*) \\ \omega_s = L^{-1} (-2 \nabla \cdot \mathbf{Q}_s^*) \\ L = \sigma_0 \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \end{cases}$$

比较 Q_n 和 Q_s 的大小，判断ULJ和高空槽哪一个系统对垂直运动的影响更大

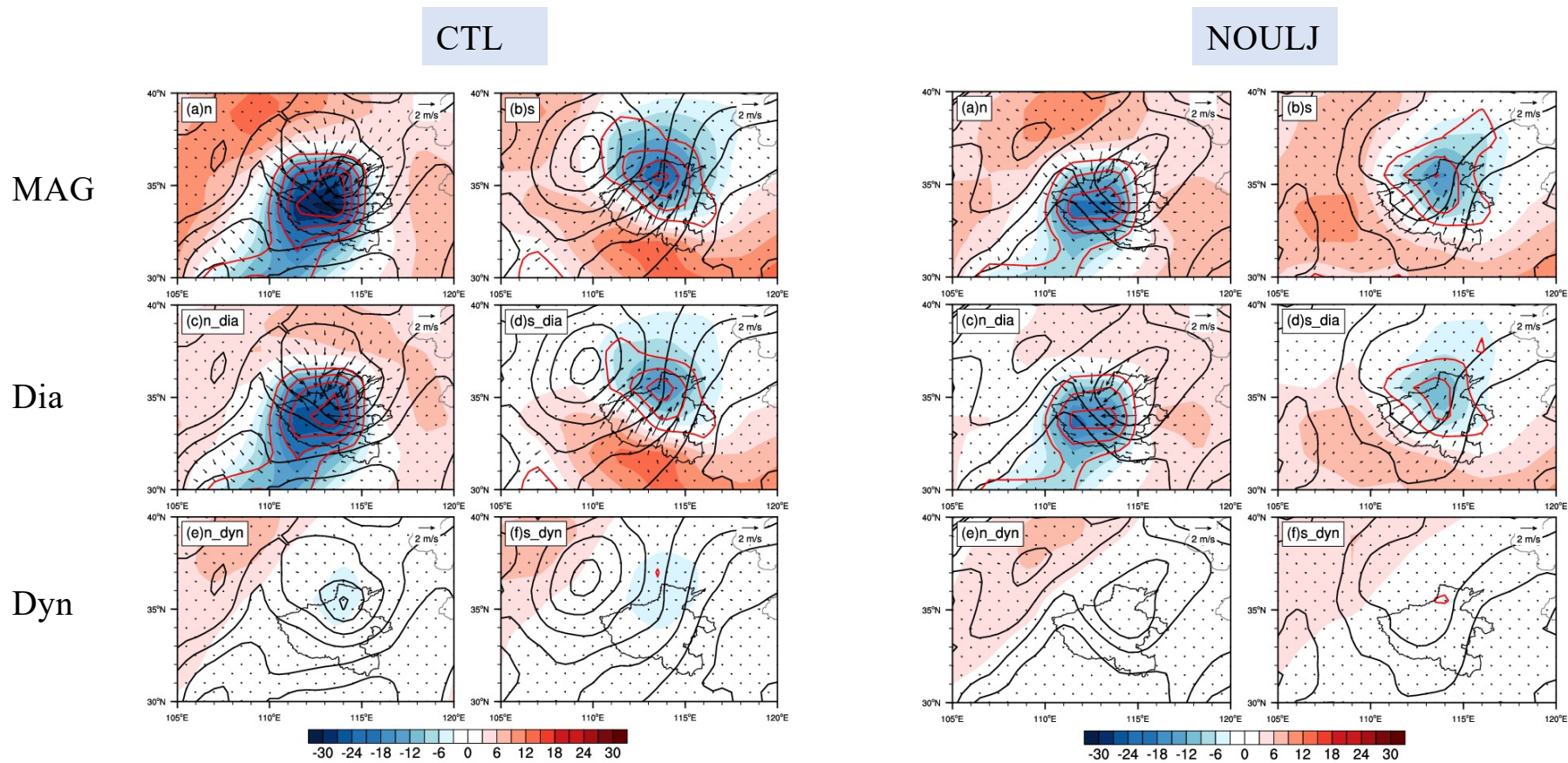


➤ Q_n 大于 Q_s , 且 Q_n 的大值区位于风速大值区南侧, 与 Park et al. (2021) 的理想模型吻合

➤ ULJ-induced secondary circulation 对垂直运动最重要, 斜压槽次之

300-600 hPa, 0600 UTC 19-1200 UTC 21 平均
 垂直速度 (红色等值线, 从 -0.03 Pa s^{-1} 起始, 间隔 -0.03 Pa s^{-1}), Q 矢量 (箭头, units: $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$), Q 矢量辐合 (阴影, units: $10^{-18} \text{ m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

左列的黑色等值线表示风速值 (从 2 m/s 起始, 间隔 1 m/s), 右列的表示位势高度 (从 6846 gpm 起始, 间隔 4 gpm)



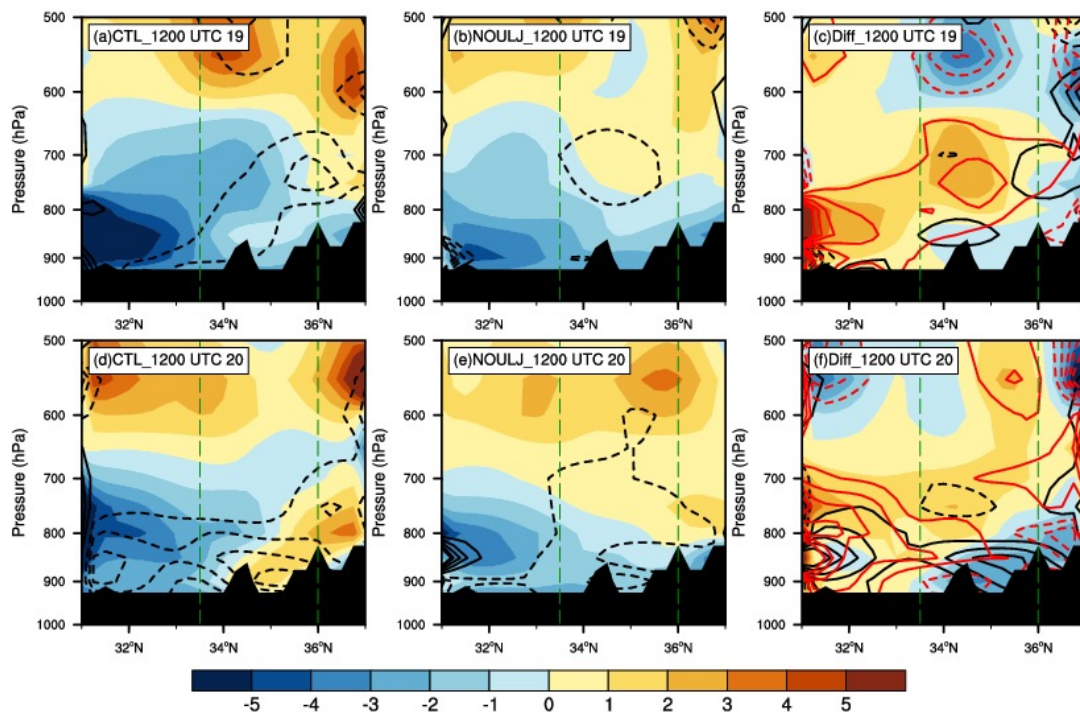
300-600 hPa, 0600 UTC 19-1200 UTC 21平均
 垂直速度 (红色等值线), Q矢量, Q矢量辐合 (阴影)
 左列的黑色等值线表示风速值 (从2 m/s起始, 间隔1 m/s),
 右列的表示位势高度 (从6846 gpm起始, 间隔4 gpm)

NOULJ与CTL相比

n方向和s方向的Q和 ω 明显减弱 \propto ULJ-induced secondary circulation抑制

■ 试验结果：③大气稳定度

湿位涡 (MPV) :



113°E处MPV1 (阴影)和MPV2 (等值线)的纬向-高度剖面
 (左) CTL, (中) NOULJ, (右) 差值 (NOULJ-CTL)
 (c, f) 中红色等值线表示总MPV (MPV1+MPV2) 的差值
 绿色虚线之间表示目标区域

$$MPV1 = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \quad \text{对流不稳定}$$

$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad \text{条件性对称不稳定}$$

→ 对流不稳定减弱

→ 条件性对称不稳定减弱

■ 小结

与CTL相比，NOULJ中目标区域的**高层辐散、垂直运动和LLJ**的强度明显**减弱**。向前轨迹追踪进一步表明，由于高层抽吸作用减弱，NOULJ**次级环流的发展受到抑制**。NOULJ的累计降雨量比CTL**低31%**，说明ULJ-induced secondary circulation对HnHRE具有重要作用。

主要表现在：

- LLJ的发展与ULJ密切相关，移除ULJ->低层风场减弱->局地水汽辐合减弱->抑制水汽量的累积；
- 垂直运动的发展与ULJ入口区右侧热力直接次级环流密切相关，斜压槽的贡献次之；
- NOULJ对流不稳定性减弱。



中国科学院大气物理研究所
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences

云降水物理与强风暴重点实验室
Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS)

请各位专家批评指正！

