

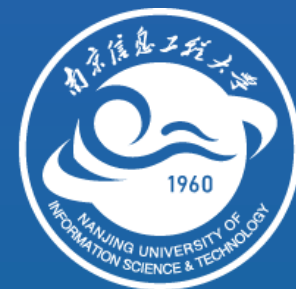
NUIST >>>

第五届全国中尺度气象学论坛（银川）

“21·7” 河南省致洪大暴雨期间的多尺度动力学分析

陶丽

合作者：刘嘉仪 杨洋



南京信息工程大学
Nanjing University of Information Science & Technology

明德格物 立己达人

2023.8.10-12



目录

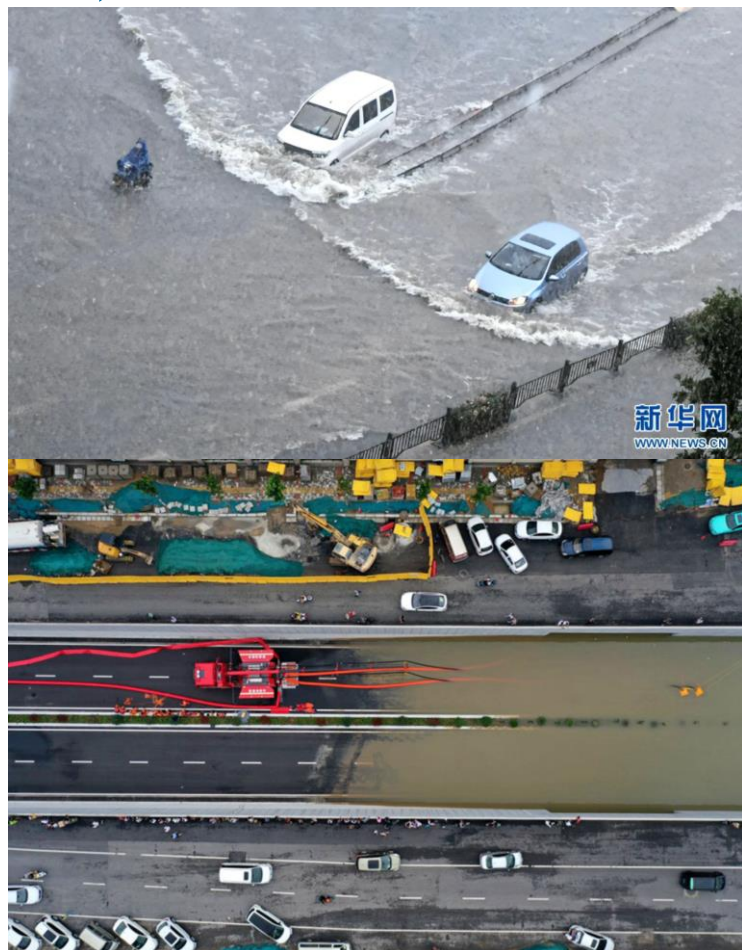
CONTENTS

1. 研究的背景与意义
2. 研究资料与方法
3. 基本研究内容与结论
4. 不足与展望

研究背景与意义

Research Background & Significance





根据郑州市气象台统计：郑州20日16时~17时，一个小时的降雨量达到了201.9mm；17日20时到20日20时，三天的过程降雨量617.1mm。

郑州三天降雨量

617.1mm

什么概念？

≈459490000000升水
317个西湖倒进了郑州

郑州1/3的年降雨量 1个小时下完了
郑州一年的降雨量几乎三天下完了
刷新了：
全球省会级城市小时最大降雨纪录
全国国家级气象站小时雨量纪录
全国省会城市24小时降雨纪录
郑州建站以来60年最强降雨



2021年7月19日至22日，河南省遭遇历史罕见特大暴雨。郑州5号地铁12人遇难，总计398人死亡

• 定性分析:

21·7 特大暴雨是由中低纬度地区的**多尺度天气系统共同作用**造成的，包括异常偏北的西太平洋副热带高压、西移的台风“烟花”、北移的台风“查帕卡”和对流层上部槽（冉令坤等，2021；梁旭东等，2022；张霞等，2021；Yu et al., 2022; Xu et al., 2022; Deng et al., 2022; Wei et al., 2023; Luo and Du, 2023; Zhang et al., 2023; Hu et al., 2023

• 数值模拟:

已有的研究通过数值模拟分析了双台风“烟花”和“查帕卡”对21·7 特大暴雨的远距离影响（Yu 等人，2022；Xu等人，2022；Zhang等人，2023），以及双台风与周围大尺度环流的相互作用对河南地区中尺度对流的可能影响（Deng，2022）。

暴雨的发生和强度预报进展缓慢，究其原因是我们对暴雨强度变化的理论认识有限：
暴雨是**多尺度系统相互作用**的产物，涉及到**非线性过程**，是一个包含**突变**的复杂过程（丁一汇，2014）→ **定量**分析不同尺度系统之间的相互作用仍然是一个具有挑战性的问题

Barnes滤波法 (Barnes, 1964)

Lanczos带通滤波器 (Duchon, 1979)

Butterworth滤波器 (Hamming, 1989)

.....

常用作分析多尺度动力过程

暴雨是空间上高度局地化、时间上瞬时变化的天气系统



传统的时空平均的能量诊断方法并不适用于暴雨事件的分析



Liang et al. (2007, 2016)新发展了瞬时局地的多尺度子空间变换 (Multiscale Window Transform, MWT) 以及基于MWT的局地多尺度能量和涡度分析 (localized Multiscale Energy and Vorticity Analysis, MS-EVA) 方法, 解决了这一难题。

- **提出问题**：已有的研究成果定性分析了本次持续性大暴雨的形成原因，但此次天气过程中多尺度环流及其相互作用的**定量**分析还有待研究。

解决方案：运用局地瞬时能量学诊断工具：**多尺度子空间转换 (MWT)** 和**基于MWT的能量和涡度分析 (MS-EVA)**，进一步研究此次河南省持续性暴雨的成因、能量来源与输送，由此**定量**研究不同尺度气象要素对这次持续性大暴雨演变的贡献。

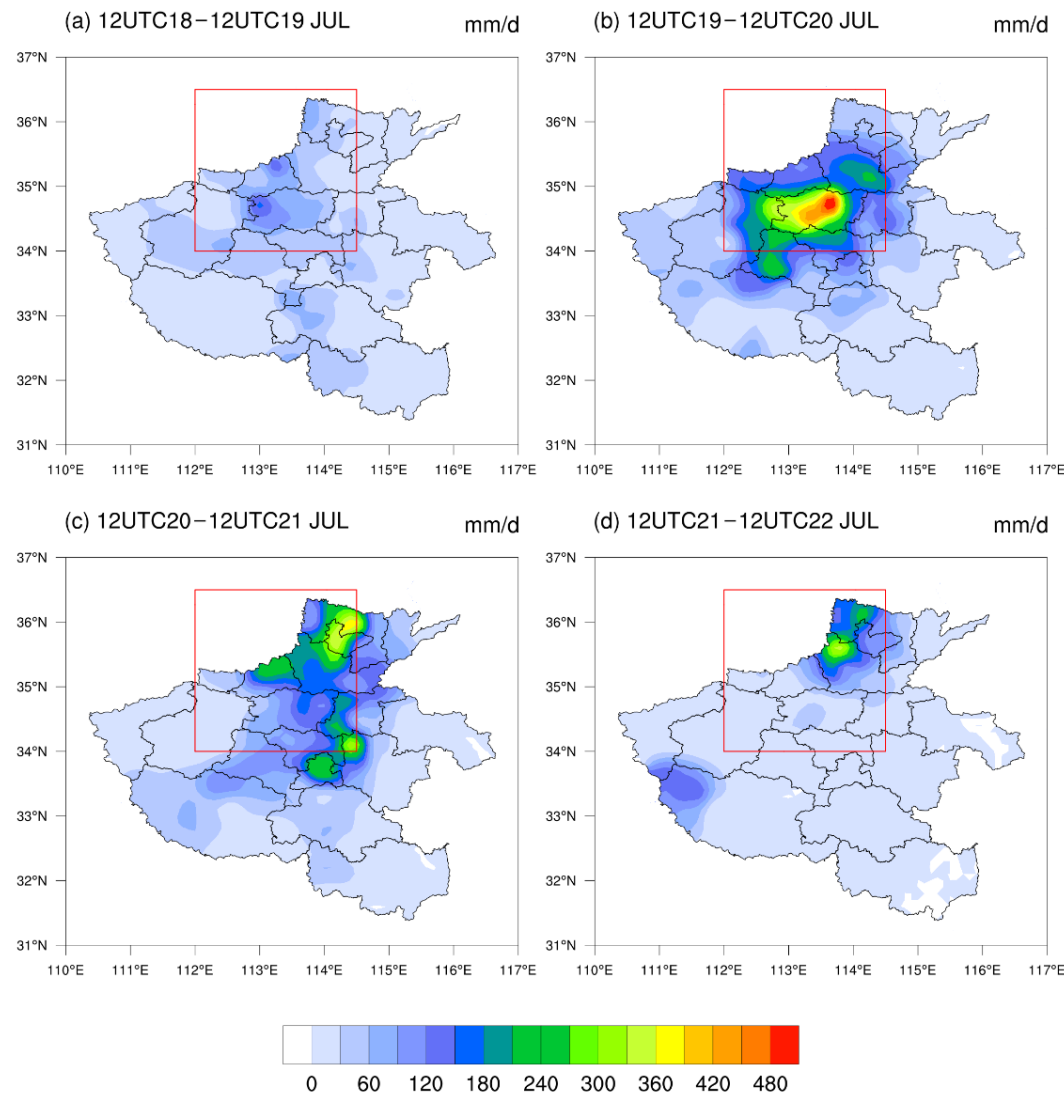
研究资料与方法

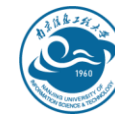
Research data and methods



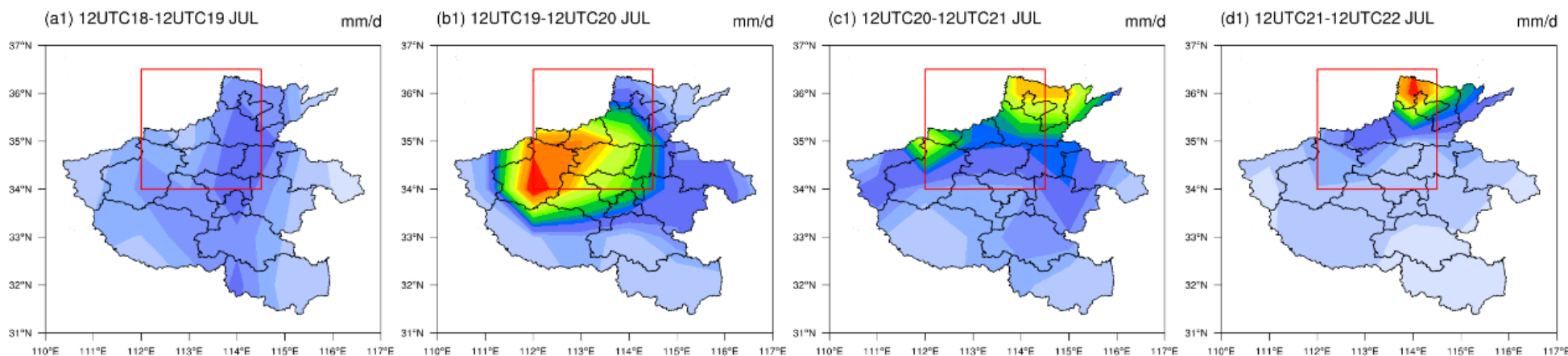
- 逐小时降水数据来自中国气象局国家气象信息中心提供的全国1893个观测站数据。
- 欧洲中期天气预报中心（ECMWF）制作的全球气候第五代再分析数据集（**ERA5**），时间分辨率为6小时，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直方向分为37层，**用于绘制天气形势距平图**。
- 使用美国气象环境预报中心（NCEP）的逐6小时**FNL**（Final Operational Global Analysis）数据进行**MWT**和**MS-EVA**分析，该数据水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ，垂直方向共21层，使用五个变量u、v、w、gp、t，选取范围（ -5.0° – 80.0° N, 50.0° – 160.0° E）。
- 时段：2021年3月23日00时至12月3日18:00时，总计1024 (2^{10}) 时次，用以进行MWT分析

- 19日20时到20日20时（北京时），郑州的**最大降水量**超过480毫米/天
- **红色框**代表区域（ 34.0° - 36.5° N, 112.0° - 114.5° E），用于基本天气形势与天气系统的分析

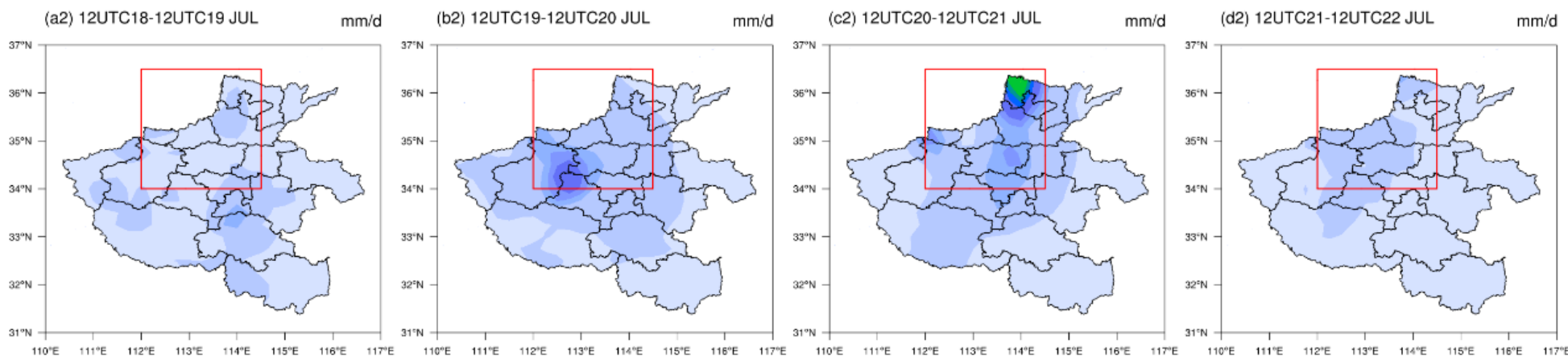




FNL



ERA5



多尺度子空间变换 (MWT)

(Liang & Anderson, 2007)



时间序列 $T(t)$ 尺度子空间 ω 时间步长 n

重构场 (滤波场)

$$T(t) = T^{\sim 0}(t) + T^{\sim 1}(t) + T^{\sim 2}(t) + \dots$$



变换系数



$$\hat{T}_n^{\sim 0}$$



$$\hat{T}_n^{\sim 1}$$



$$\hat{T}_n^{\sim 2} \dots$$

尺度子空间 ω 上时间步长 n 的能量 $\propto [\hat{T}_n^{\sim \omega}]^2$

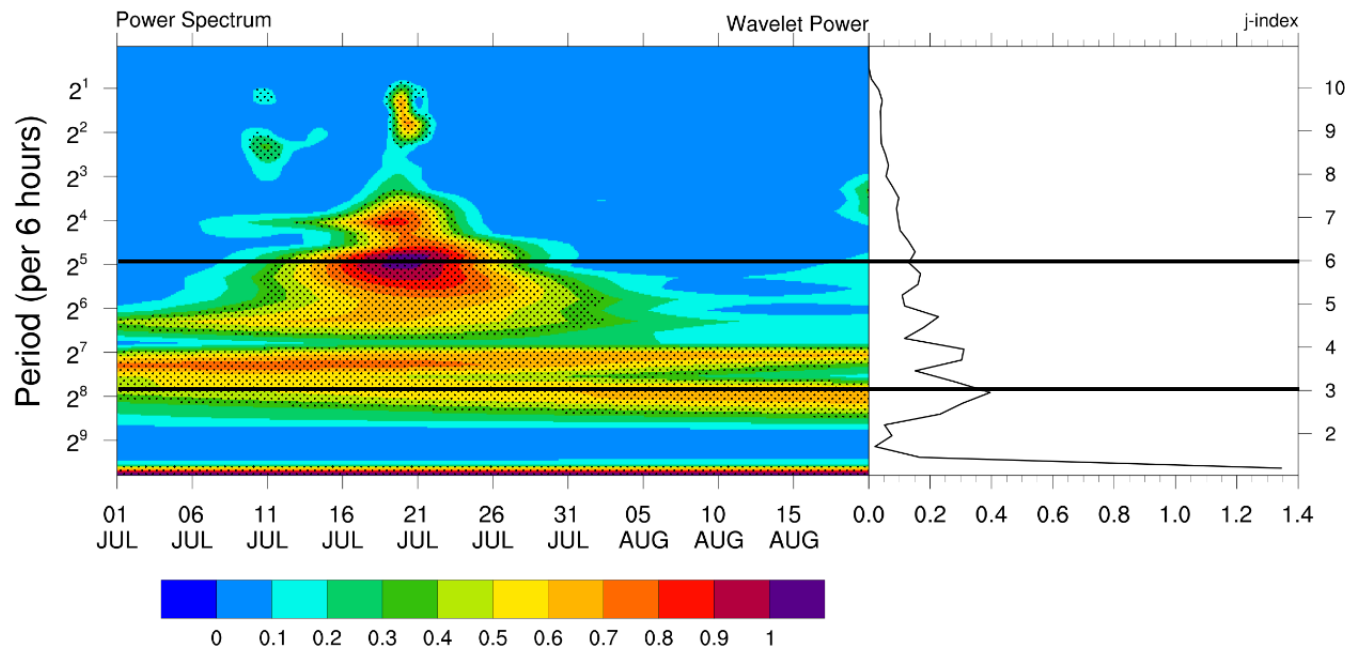
正则传输

(Liang, 2016)



$$\sum_{n, \omega} \Gamma_n^{\omega} = 0$$

能量在不同尺度
之间传输守恒



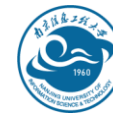
(34.0-36.5°N, 112.0°-114.5° E)700 hPa 垂直速度的小波分析

将时间尺度划分为三个子空间：
天气尺度子空间 (0-8天)
季节内振荡子空间 (8-64天)
基本气流子空间 (64天及以上)

研究内容与结论

Research content and results





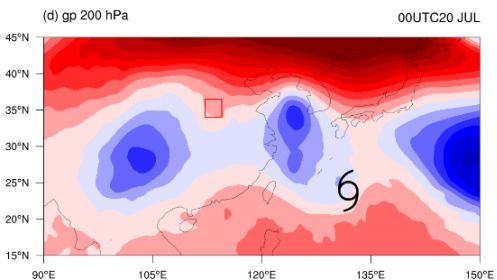
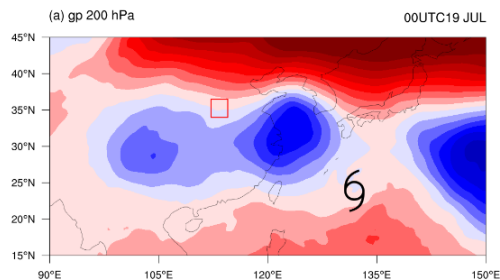
1

基本天气形势场的判断

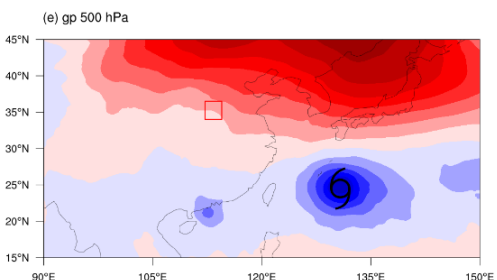
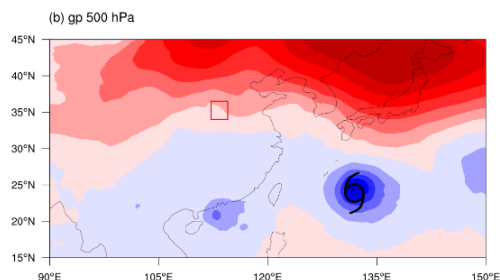


3.1.2 850 hPa距平风场、500 hPa和200 hPa位势高度距平场

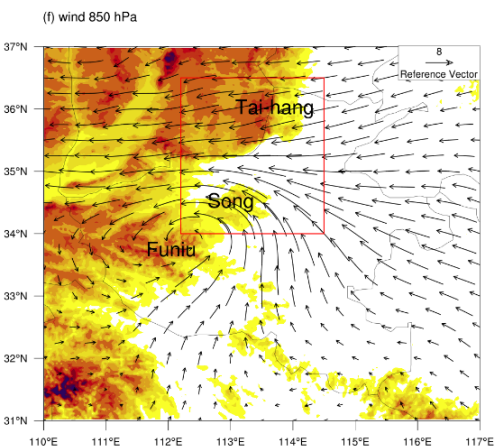
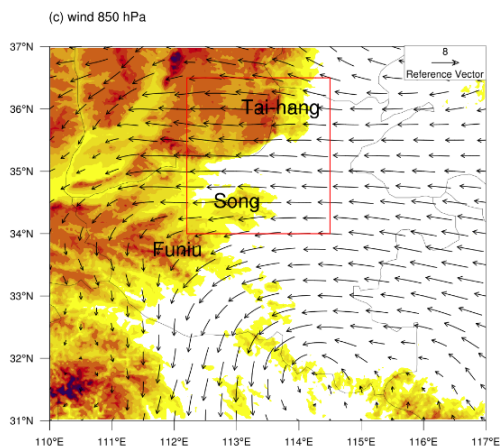
200 hPa



500 hPa



850 hPa



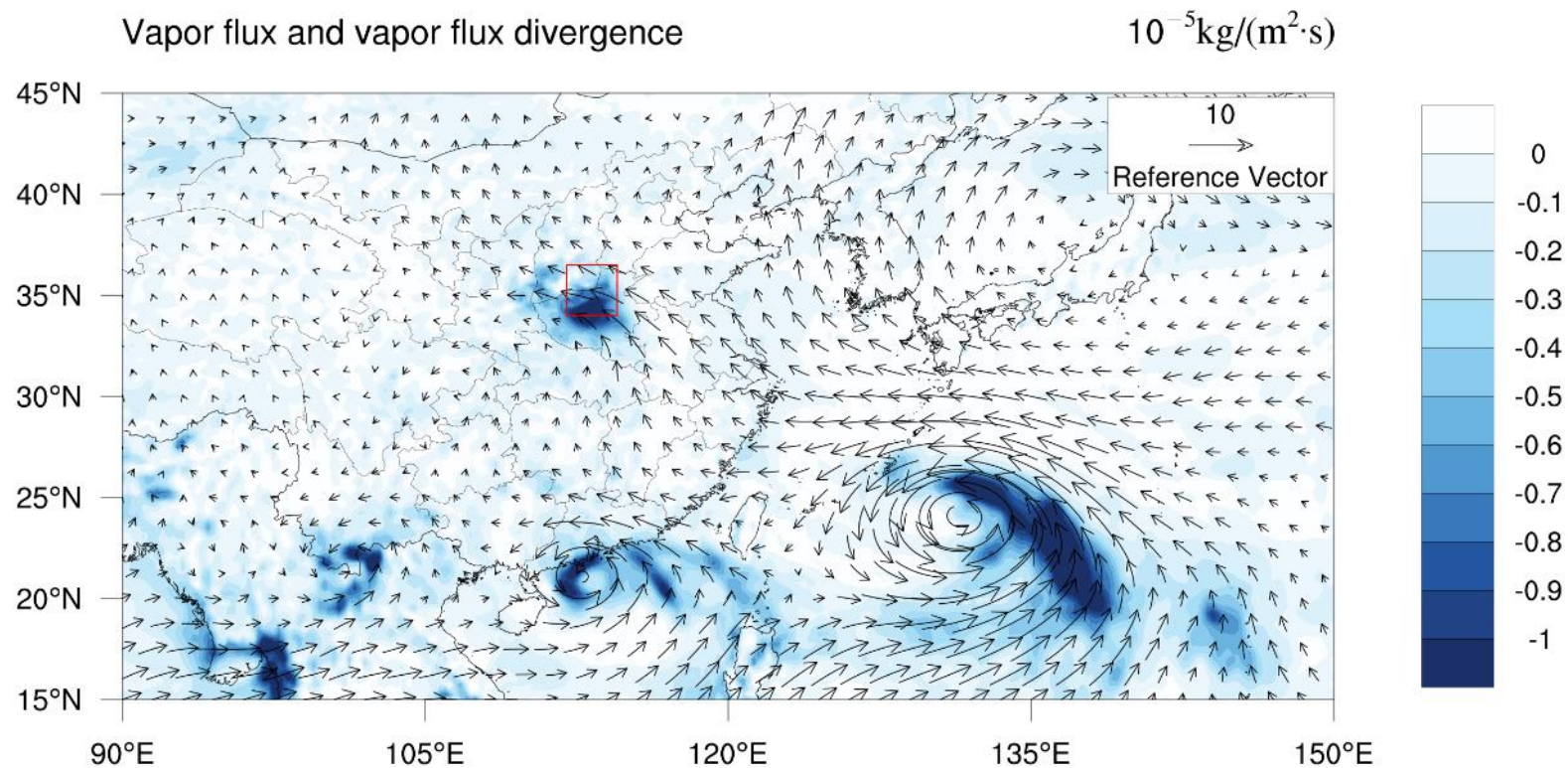
7月19日

7月20日

3.1.3 水汽输送条件



- 台风烟花和查帕卡的外围气流、副热带高压的东风和东南气流稳定输送水汽
- 嵩山和伏牛山附近的辐合中心显著





2

基于MWT的多尺度重构场

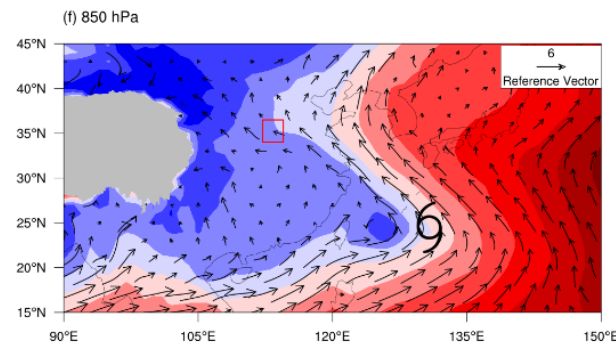
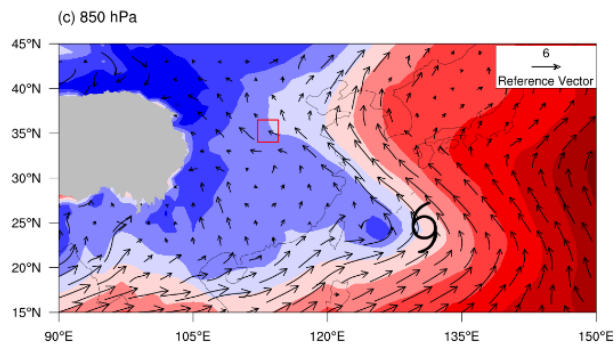
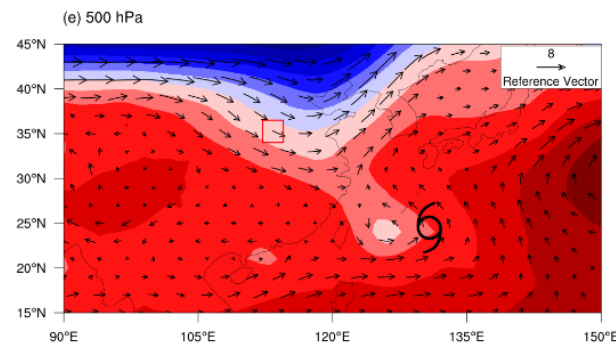
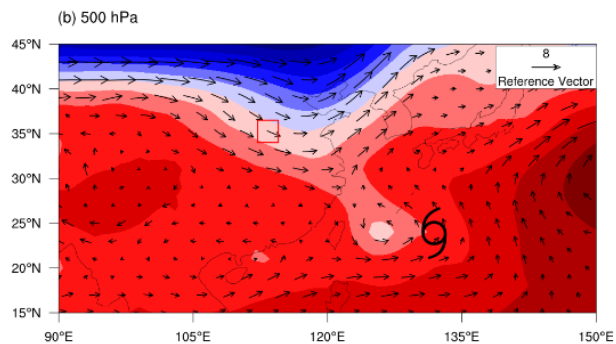
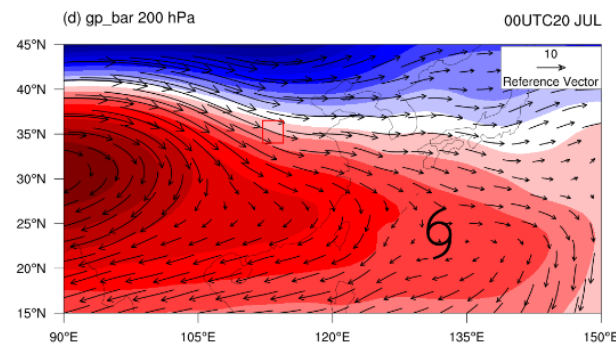
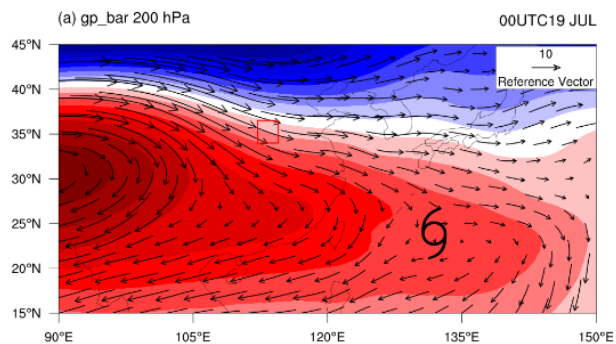


3.2.1 基本气流子空间 (>64天)

200 hPa

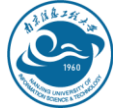
500 hPa

850 hPa



7月19日

7月20日

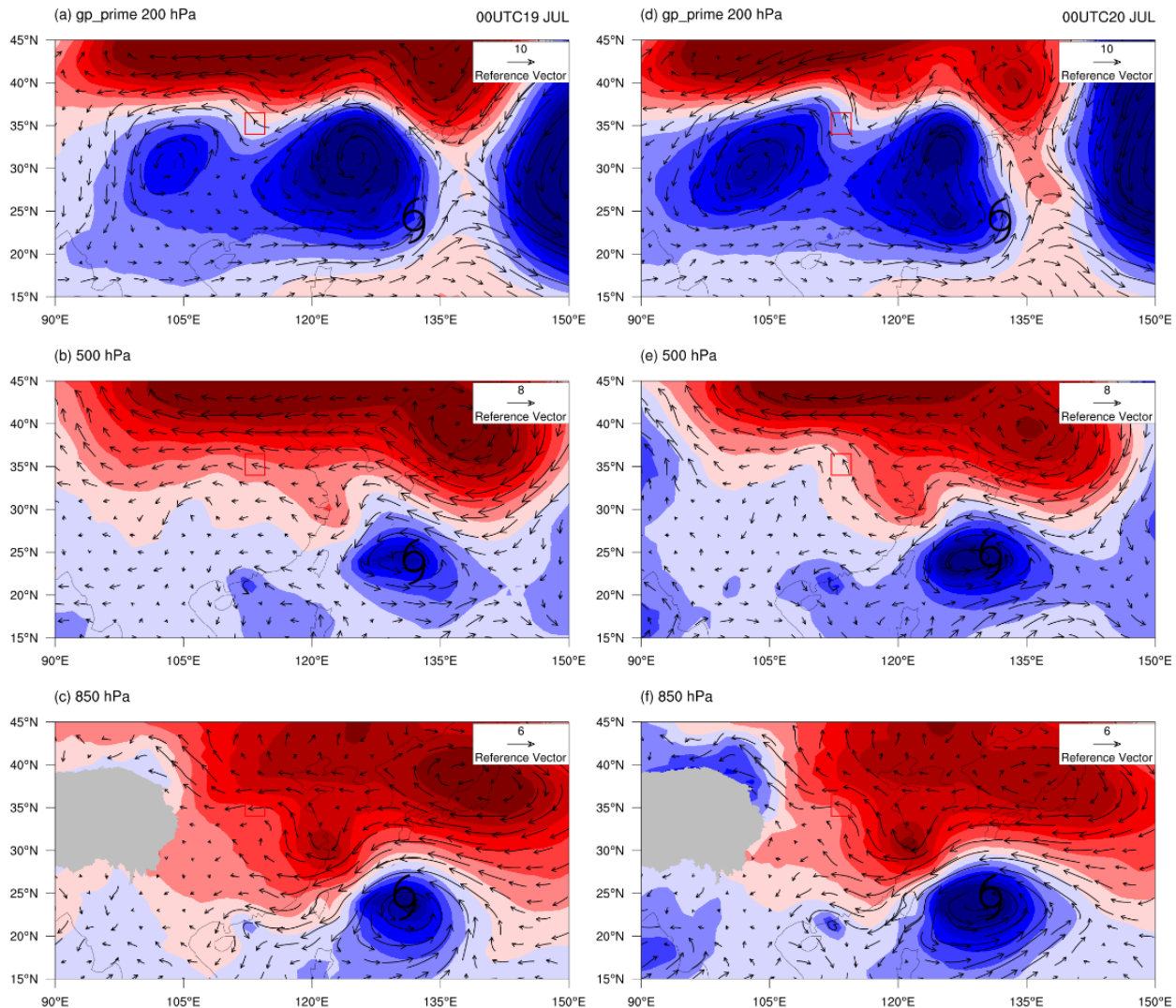


3.2.2 季节内振荡子空间 (8-64天)

200 hPa

500 hPa

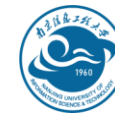
850 hPa



7月19日

7月20日

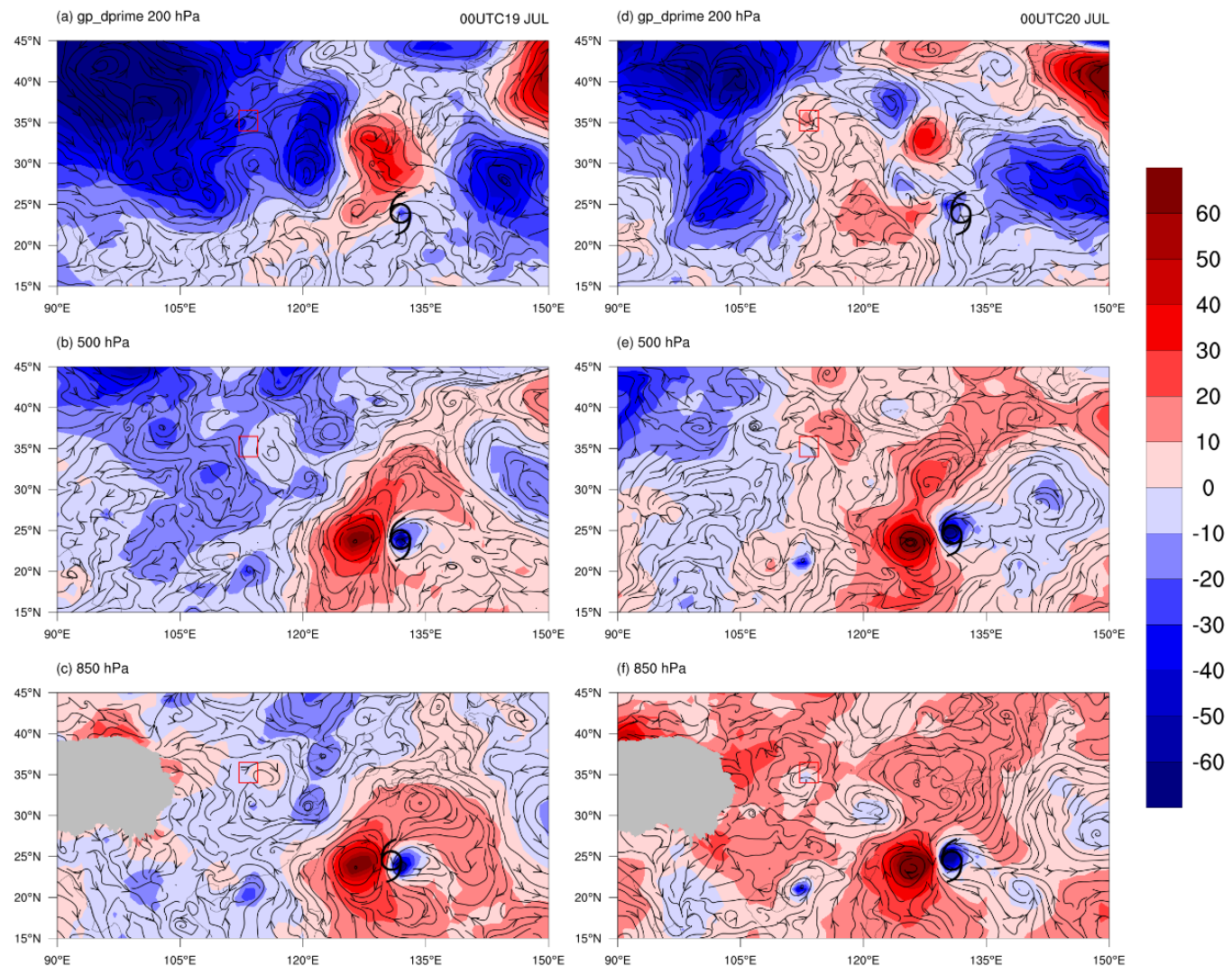
3.2.3 天气涡旋子空间 (<8天)



200 hPa

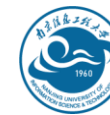
500 hPa

850 hPa



7月19日

7月20日



3

天气尺度子空间的能量演变过程

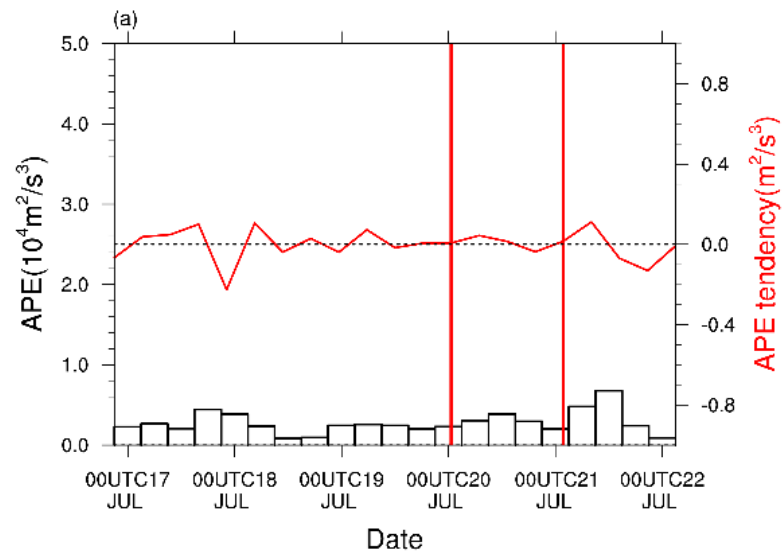


3.3.1 动能及有效位能

演变方程

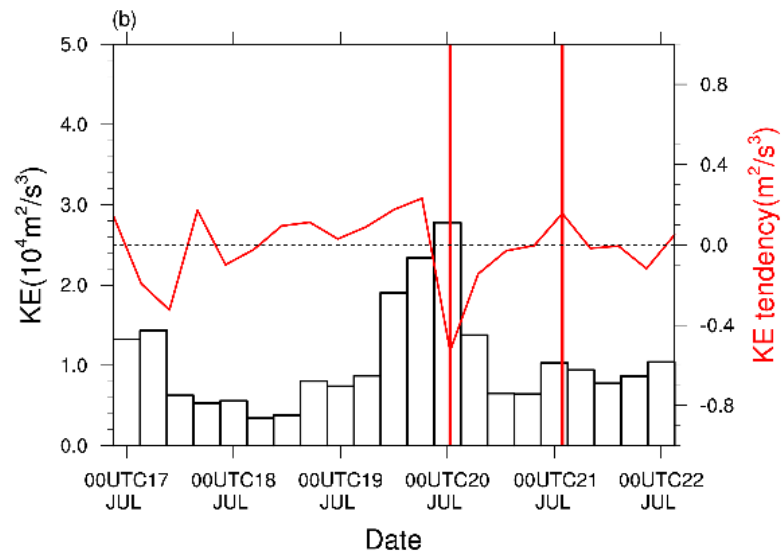
$A^{\overline{\omega}}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A^{\overline{\omega}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} c \widehat{(vT)}^{\sim\overline{\omega}} \widehat{T}^{\sim\overline{\omega}} \right] &= \underbrace{\frac{c}{2} \left[\widehat{(vT)}^{\sim\overline{\omega}} \cdot \nabla \widehat{T}^{\sim\overline{\omega}} - \widehat{T}^{\sim\overline{\omega}} \nabla \cdot \widehat{(vT)}^{\sim\overline{\omega}} \right]}_{\Gamma_A^{\overline{\omega}}} + \underbrace{\widehat{\omega}^{\sim\overline{\omega}} \widehat{\alpha}^{\sim\overline{\omega}}}_{b^{\overline{\omega}}} + F_A^{\overline{\omega}} \\ &= \underbrace{\frac{1}{2} c \widehat{(vT)}^{\sim\overline{\omega}} \widehat{T}^{\sim\overline{\omega}}}_{\nabla \cdot Q_A^{\overline{\omega}}} \end{aligned}$$

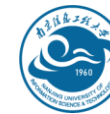


$K^{\overline{\omega}}$

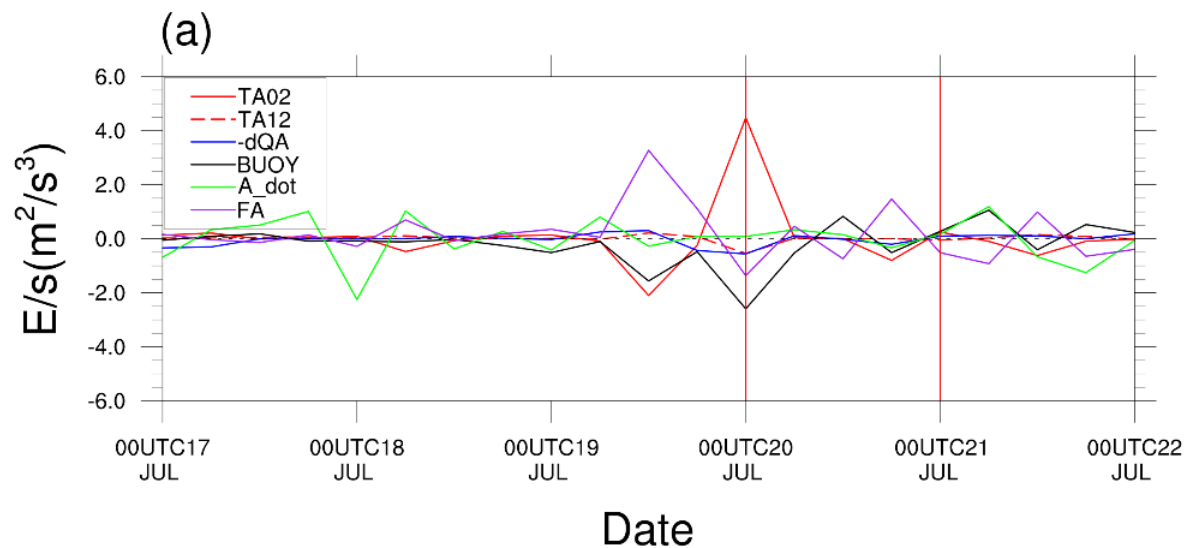
$$\begin{aligned} \frac{\partial K^{\overline{\omega}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} \widehat{(vv_h)}^{\sim\overline{\omega}} \cdot \widehat{v}_h^{\sim\overline{\omega}} \right] &= \underbrace{\frac{1}{2} \left\{ \widehat{(vv_h)}^{\sim\overline{\omega}} : \nabla \widehat{v}_h^{\sim\overline{\omega}} - [\nabla \cdot \widehat{(vv_h)}^{\sim\overline{\omega}}] \cdot \widehat{v}_h^{\sim\overline{\omega}} \right\}}_{\Gamma_K^{\overline{\omega}}} - \underbrace{\nabla \cdot (\widehat{v}^{\sim\overline{\omega}} \widehat{\Phi}^{\sim\overline{\omega}})}_{\nabla \cdot Q_P^{\overline{\omega}}} \\ &\quad - \underbrace{\widehat{\omega}^{\sim\overline{\omega}} \widehat{\alpha}^{\sim\overline{\omega}}}_{b^{\overline{\omega}}} + F_K^{\overline{\omega}} \end{aligned}$$



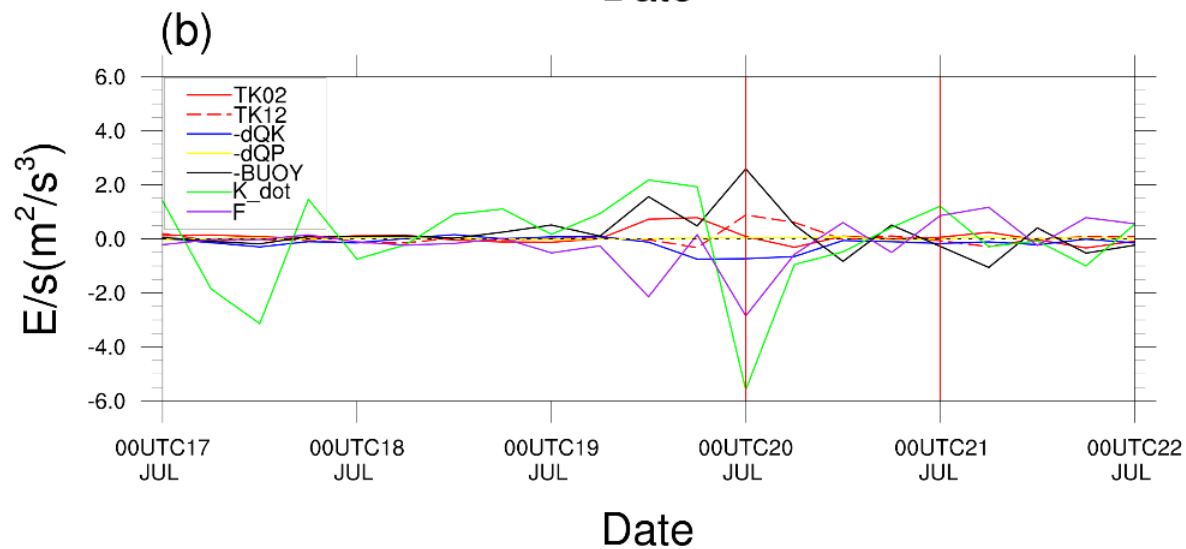
3.3.2 能量收支方程各项随时间的演变



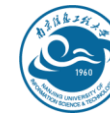
A^{ω} 收支方程各项



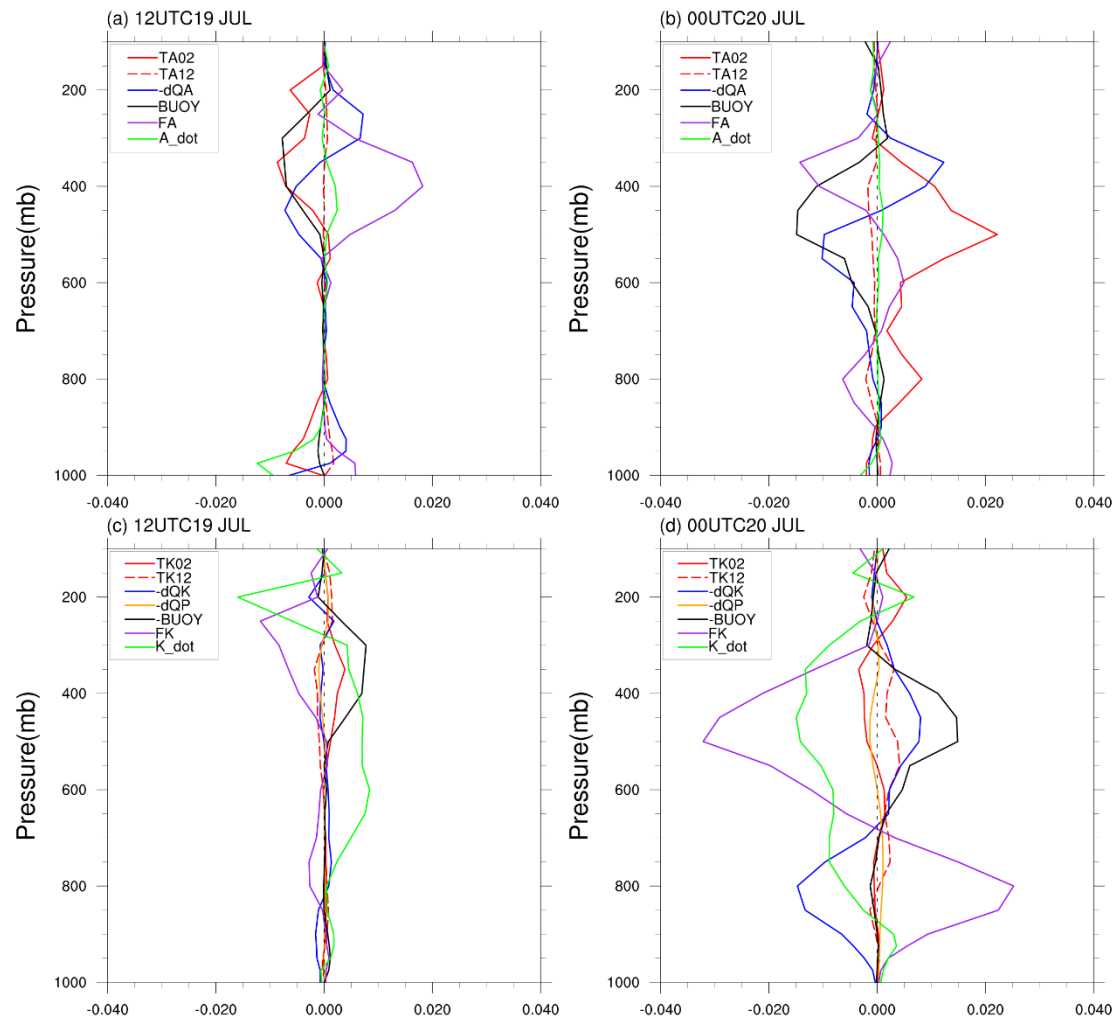
K^{ω} 收支方程各项



3.3.3 暴雨发生前12h与暴雨发生时能量收支方程各项的垂直廓线分布



A^{ω} 收支方程各项

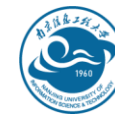


K^{ω} 收支方程各项

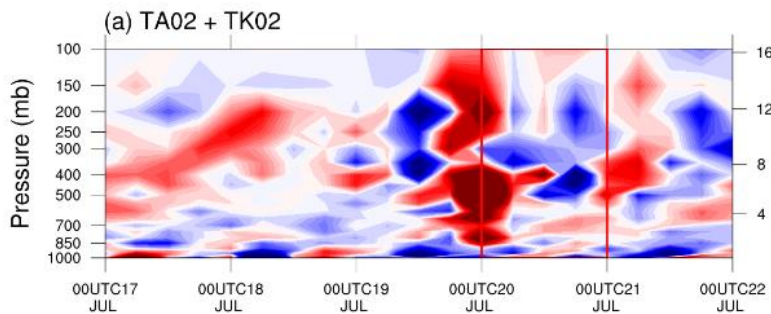
暴雨发生前12h

暴雨发生时

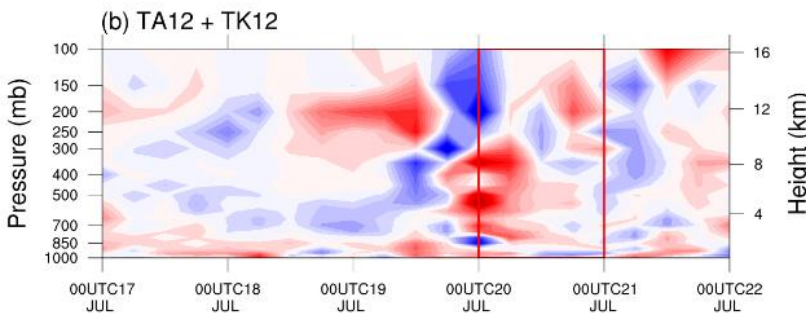
3.3.4 各尺度间的能量传输过程



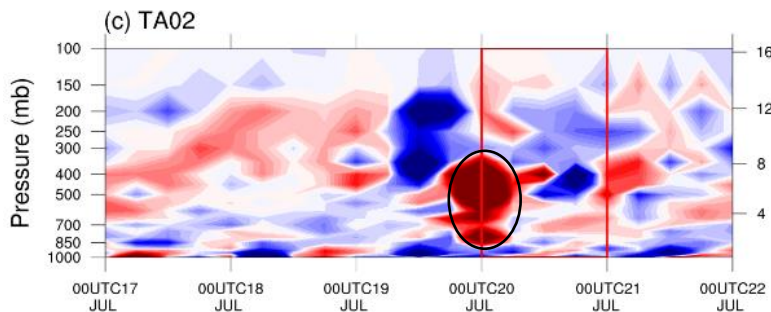
$$\Gamma_A^{0 \rightarrow 2} + \Gamma_K^{0 \rightarrow 2}$$



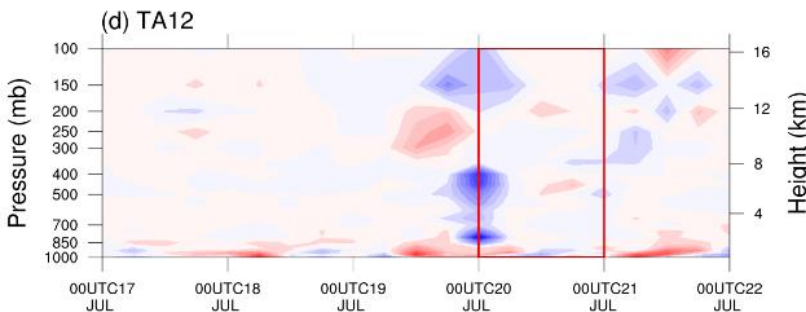
$$\Gamma_A^{1 \rightarrow 2} + \Gamma_K^{1 \rightarrow 2}$$



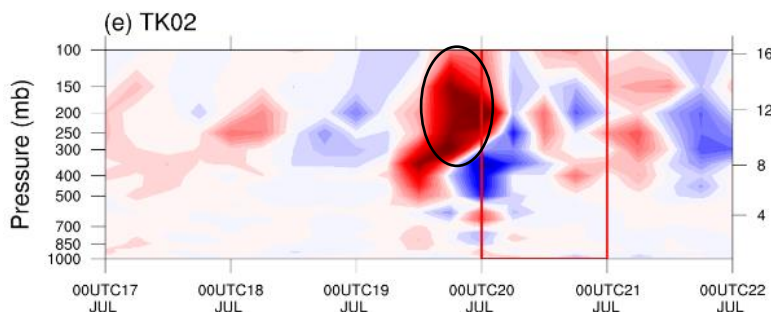
$$\Gamma_A^{0 \rightarrow 2}$$



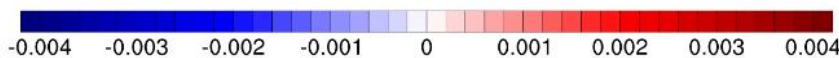
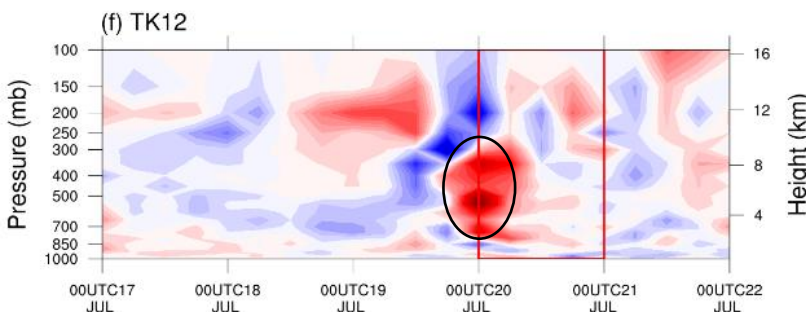
$$\Gamma_A^{1 \rightarrow 2}$$



$$\Gamma_K^{0 \rightarrow 2}$$



$$\Gamma_K^{1 \rightarrow 2}$$



- 通过应用MS-EVA诊断，我们发现在郑州特大暴雨发生之前和期间，都存在由浮力项表示的APE到KE的持续能量转换，而压力梯度力所做的功可以忽略不计。
- 暴雨前，潜热是APE的重要来源，500hPa以上的KE向下能量串级过程（正压不稳定）是除浮力项外的KE的重要来源。
- 暴雨发生期间，由于辐散和耗散，KE显著降低，而中层APE的向下能量串级过程（斜压不稳定）是APE的来源。低层8-64天的正压不稳定是此次暴雨过程的另一个主要能量来源。表明多尺度相互作用可能是导致暴雨极端化的主要原因。

不足与展望

Research prospect



- 不足：FNL数据集的 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 的分辨率相当粗糙。
- 展望：运用数值模式对本次天气过程进行模拟，得到更加接近观测值、更高时空分辨率的资料进行分析。

NUIST >>>



南京信息工程大学

Nanjing University of Information Science & Technology

敬请批评指正!

- Liu, Jiayi, **Li Tao***, Yang Yang. 2023, Dynamical analysis of multi-scale interaction during the “21·7” persistent rainstorm in Henan. Atmospheric Research. 292, 2023,106857

明德格物 立己达人