

热带气旋进入江苏地区引发强降水过程与冷空气影响的研究*

沈澄¹ 姜有山¹ 戴竹君¹ 李菁¹ 缪颖绮²

¹ 南京市气象局, 南京 210019

² 南京市高淳区气象局, 南京 211300

提 要: 采用动态合成分析方法, 对比分析了有冷空气影响和无冷空气影响天气背景下, 进入江苏地区的热带气旋引发强降水过程的原因, 建立了江苏地区热带气旋本体强降水天气学模型。结果表明, 无论是否存在冷空气的影响, 进入江苏地区的热带气旋均会引发强降水过程, 主要原因在于热带气旋非对称结构的演变、低空急流对水汽的持续输送以及热带气旋附近强上升运动的维持。两者的差异主要体现在动力抬升的维持机制以及大气不稳定性度的增长方式上。有冷空气影响时, 热带气旋外围环流的斜压性及条件不稳定性度迅速增强, 斜压区的倾斜上升运动推动暖湿空气的持续抬升和对流的发展, 强降水区主要位于热带气旋北侧至东北侧; 无冷空气影响时, 低空及超低空急流的持续暖湿输送致使热带气旋中心及周边区域的条件不稳定性明显增强, 暖区的辐合抬升配合潜热加热维持的深厚垂直上升运动利于对流性降水的形成, 强降水区主要位于热带气旋东侧至东北侧。

关键词: 登陆热带气旋, 强降水, 冷空气

中图分类号: P447

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.083001

Study on Heavy Rainfall Induced by Tropical Cyclones Passing Through Jiangsu and the Influence of Cold Air

SHEN Cheng¹ JIANG Youshan¹ DAI ZhuJun¹ LI Jing¹ MIAO Yingqi²

¹ Nanjing Meteorological Office of Jiangsu Province, Nanjing 210019

² Nanjing Gaochun Meteorological Station of Jiangsu Province, Nanjing 211300

Abstract: Using dynamic synthesis and analysis methods, this paper comparatively analyzes the reasons for heavy rainfall induced by tropical cyclones having entered Jiangsu Province with and without the influence of cold air. A meteorological model of heavy rainfall associated with tropical cyclones in Jiangsu is established. The results are that, regardless of the influence of cold air, tropical cyclones having moved into Jiangsu can induce heavy rainfall. The key reasons include the evolution of tropical cyclone's asymmetric structure, the continuous water vapor transport by low-level jet streams, and the sustained strong upward motion near the tropical cyclone. The differences between the situations with and without the influence of cold air mainly lie in the maintenance mechanisms of dynamic uplift and the developing means of atmospheric instability. When cold air is present, baroclinicity and conditional instability within the peripheral circulation of tropical cyclone intensify rapidly. Slantwise ascending motion in the baroclinic zone promotes the sustained lifting of warm-moist air and enhances convective development, with heavy rainfall primarily located on the northern to northeastern side of tropical cyclone. When cold air is absent,

* 江苏省气象局面上项目 (KM202207) 资助

第一作者: 沈澄, 主要从事中短期天气预报技术研究. Email: sicij@126.com

通讯作者: 姜有山, 主要从事灾害性天气机理及预报技术研究. Email: jysnjsqxt@163.com

continuous transport of warm-moist air by low-level and ultra-low-level jets significantly enhances the conditional instability near and around the center of tropical cyclone. The deep vertical updraft, which is maintained by convergence within the warm sector and further enhanced by latent heat release, favors the development of convective precipitation, with heavy rainfall mainly existing the eastern to northeastern side of tropical cyclone.

Key words: tropical cyclone, heavy rainfall, cold air

引言

江苏位于我国东部沿海地区，是遭受台风灾害较多的省份之一，其中以台风暴雨的影响最为严重。台风暴雨具有复杂多变的特性，常诱发洪涝、滑坡和泥石流等次生灾害，是台风灾害的主要表现形式之一，影响范围广、损失巨大（潘佳文等，2018；朱红芳等，2019；胡艳等，2023）。

近年来，运用多种探测资料及高分辨率数值模式对登陆台风降水落区及强度的精细化研究，仍然是台风研究中的重点和难点（陈联寿等，2017；王新敏和栗晗，2020；Huang and Ge, 2022；Xu et al, 2022；饶晨泓等，2022；王俊等，2023）。由台风引起的强降水，主要可以分为台风自身环流内暴雨及台风外围暴雨两类。台风自身环流内的暴雨与台风强度及结构关系密切（Meng and Wang, 2016a；梁军等，2024），通常台风强度越强，产生的降水也越强（郑艳等，2014；谢惠敏等，2016）。无冷空气影响时，暴雨落区主要位于眼壁附近、台风东侧切变线附近或南风急流之中；有冷空气影响时，暴雨落区常位于倒槽附近，冷空气与已减弱的台风残留低涡相互作用所引发的强降水，有时甚至远超强台风直接登陆时所造成的降水（杜惠良等，2011；周福等，2014；陈宏等，2021；郑秀丽等，2025）。台风外围暴雨，通常受到周围环流的影响，特别是西风带系统，会加强台风北侧倒槽的辐合强度，形成强不稳定层结，从而导致暴雨落区向北扩展（吴海英等，2014；陈涛等，2021；张雪蓉等，2022；刘希等，2023）。在台风影响过程中，持续稳定的水汽输送（李英等，2005；程正泉等，2009；林小红等，2023）、中尺度系统的发展（朱洪岩等，2000；Meng and Wang, 2016b；王科等，2021）、高低空急流的耦合（张端禹等，2024）、对流层高层冷涡的增强（蔡芎宁等，2022）等均有利于台风降水的增幅。

由于影响登陆台风路径、强度和强降水落区的因素较多且复杂，台风移动过程中的异常路径、强度突变、台风暴雨的增幅及风雨分布等的预报仍然是较大的难题。因此，针对进入江苏地区引发强降水过程的热带气旋，在有冷空气影响和无冷空气影响的两类天气背景下，对比分析热带气旋本体降水落区、强度及强降水成因的异同，以期为今后进入江苏地区的台

66 风本体强降水预报提供更多思路。

67 1 数据与方法

68 1.1 资料

69 本文所用资料包括：（1）中国气象局热带气旋资料中心的 CMA 热带气旋最佳路径数据
70 集，包括逐 6 h 的经纬度、强度、中心最低气压以及近中心最大风速等信息，选取 1960—2021
71 年经过江苏地区的 44 个热带气旋（包括热带低压）样本作为研究对象；（2）环流形势及物
72 理量分析选用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的 ERA5 再分析资料，时间分辨率为
73 1 h，空间分辨率为 0.25° ；（3）美国气候预测中心（CPC）提供的 CMORPH 降水资料，时
74 间分辨率为 30 min，空间分辨率为 8 km。

75 文中所用时间均为世界时。

76 1.2 个例选取与方法

77 1960—2021 年，经过江苏地区的 44 个热带气旋在江苏共造成 25 次大范围暴雨过程（全
78 省有相邻 10 站或以上出现）、10 次区域性暴雨过程（全省有相邻 5 站或以上出现）以及 9
79 次局地性暴雨过程，均为热带气旋自身环流造成的降水。台风自身环流产生的降水分为有冷
80 空气影响和无冷空气影响两类。当热带气旋经过江苏地区时，若河套地区存在西风槽引导冷
81 空气向南渗透（冷气团中心假相当位温 θ_{se} ）一般小于 330 K），侵入热带气旋外围环流，
82 此为有冷空气影响的背景；若西风槽及其后部冷平流的影响区域距离热带气旋较远，则为无
83 冷空气影响的背景。

84 统计结果表明，经过江苏地区的 44 个热带气旋中，冷空气影响背景下的过程共 20 次，
85 造成大范围暴雨、区域性暴雨和局地性暴雨过程的概率分别为 70.0%、25.0%和 5.0%；一次
86 过程最多出现 3 个暴雨日，出现 2 个以上暴雨日的概率达到 80.0%；最大日降水量 75.1~334.7
87 mm，超过 100 mm 的概率达到 80.0%；过程最大累计降水量 75.1~471.6 mm，超过 200 mm
88 的概率为 45.0%。无冷空气影响背景下的过程共 24 次，造成大范围暴雨、区域性暴雨和局
89 地性暴雨过程的概率分别为 45.8%、20.8%和 33.3%；一次过程最多出现 5 个暴雨日，出现 2
90 个以上暴雨日的概率为 50.0%；最大日降水量 52.7~507.1 mm，超过 100 mm 的概率为 58.3%；
91 过程最大累计降水量 52.7~599.1 mm，超过 200 mm 的概率为 29.2%。

92 由此可知，经过江苏地区的热带气旋有 45.5%的概率与冷空气相遇，且冷空气对热带气

93 旋自身环流的降水存在较明显的增幅作用。但在冷空气影响下，热带气旋移速相对较快（平
 94 均移速 $9.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），在江苏地区的停留时间较短（平均停留时间 7.7 h ）；无冷空气影响下，
 95 暴雨的强度及范围主要取决于热带气旋的强度，由于经过江苏地区的热带气旋强度普遍以热
 96 带风暴或热带低压为主，故其造成的大范围及区域性暴雨过程略少，但因热带气旋移速缓慢
 97 （平均移速 $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），常稳定少动（平均停留时间 12.2 h ），导致暴雨过程持续时间及累
 98 计降水量会出现极端情况。

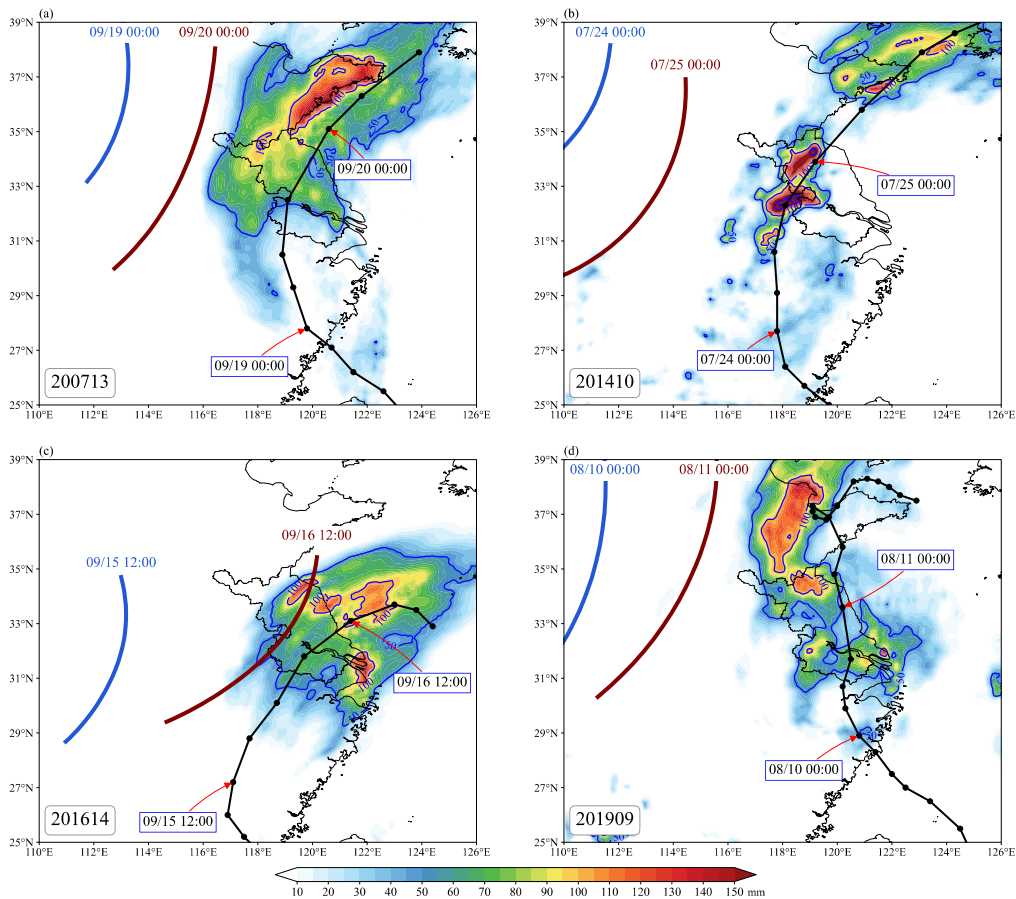
99 针对进入江苏地区引发强降水过程的热带气旋，分别选取有冷空气影响和无冷空气影响
 100 天气背景下的两组热带气旋样本各 4 个进行研究（表 1），4 个个例均在江苏地区造成持续性
 101 暴雨过程（持续日数 $\geq 2 \text{ d}$ 的大范围或区域性暴雨过程），热带气旋经过江苏地区时均以热带
 102 风暴强度为主，有冷空气影响的热带气旋相较于无冷空气影响的移动速度略快，停留时间略
 103 短。

104 表 1 选取的两组热带气旋经过江苏地区时的平均移动速度、移动距离及停留时间
 105 Table 1 The average speed, distance and residence time of selected tropical cyclones passing through Jiangsu

天气背 景	编号	移动速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	移动距离 (km)	近中心 最大风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	中心 最低气压 (hPa)	停留时 间 (h)	江苏持续性 暴雨 出现日期	过程最大降 水量 (mm)
有冷空 气影响	200713	13.2	345.0	18	998	7.2	2007 年 9 月 19—20 日	207.1
	201410	10.5	236.9	20	992	6.3	2014 年 7 月 24—25 日	236.7
	201614	9.9	224.3	15	1002	6.3	2016 年 9 月 15—16 日	239.5
	201909	8.0	433.4	23	980	15.0	2019 年 8 月 10—11 日	332.8
无冷空 气影响	200515	6.5	414.6	20	995	17.7	2005 年 9 月 11—12 日	131.7
	201513	6.2	257.2	18	998	11.5	2015 年 8 月 10—11 日	367.2
	201818	8.3	199.2	23	982	6.6	2018 年 8 月 17—19 日	350.9
	202106	3.0	374.1	23	980	35.0	2021 年 7 月 25—29 日	467.4

106 本文主要考虑经过江苏地区的热带气旋在江苏造成最强降水的时段。所选样本中，在冷
 107 空气影响的背景下（图 1），热带气旋进入江苏后，以东北移动为主，移速较快，路径稳定，
 108 最终由江苏东部入海后继续向东北方向移动；对热带气旋降水产生明显影响的冷空气集中在
 109 中层，一般受西风槽引导，由河套附近经华北地区扩散南下至热带气旋西北侧，或自河套地

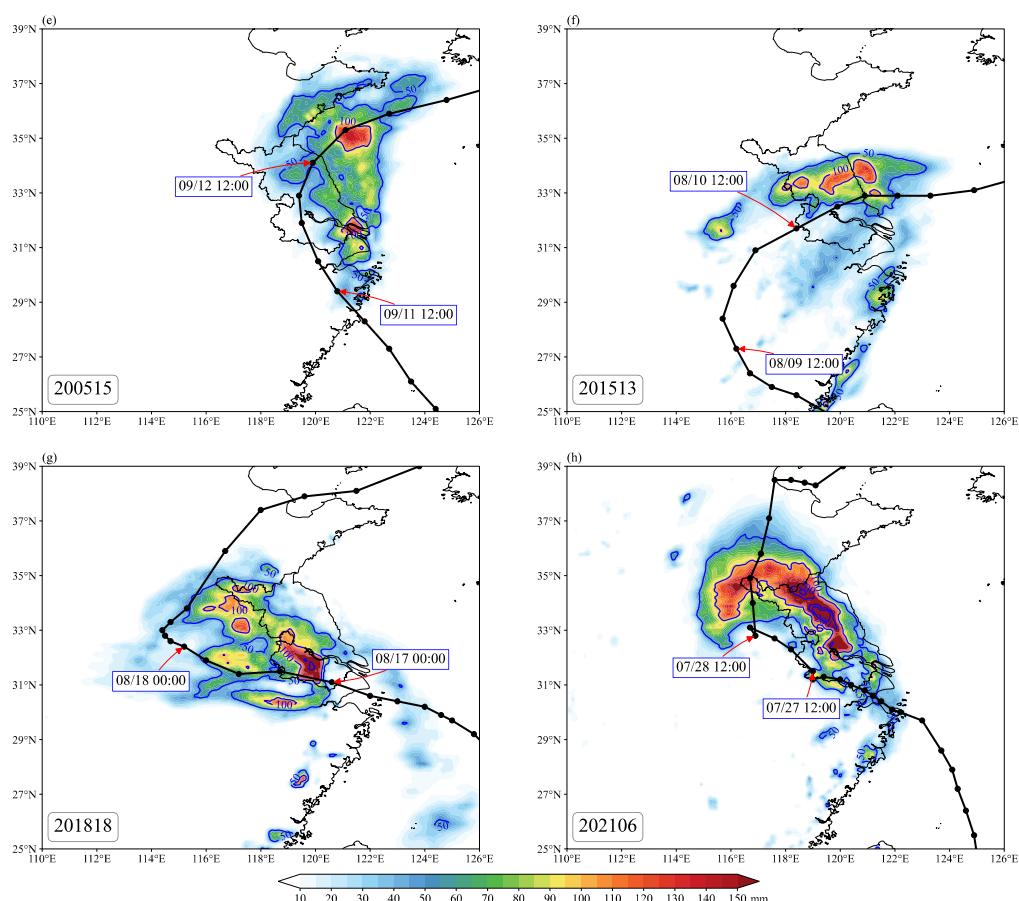
区先南下至华中地区后，再向东渗透进热带气旋西侧或西北侧；强降水区多呈东北—西南走向，位于热带气旋中心环流的北至东北侧、移动路径的左侧，即冷空气一侧；无冷空气影响的背景下（图 2），热带气旋进入江苏后，移动方向不定，或是继续西行，或是转向东北，路径复杂，移速较慢；强降水区以东南—西北走向为主，多位于热带气旋中心环流的东侧、移动路径的右侧，即暖湿急流一侧。



注：红色箭头指示时间段为降水累计时段；槽线蓝色表示开始，棕色表示结束。
图 1 冷空气影响背景下热带气旋移动路径（黑色点线）及其移经江苏期间的 24h 累计降水量（填色和等值线）分布和 500hPa 高空槽演变

Fig. 1 Tracks (black dot line) of tropical cyclones passing through Jiangsu under cold air influence , and corresponding 24 h accumulated precipitation distribution (colored and contour) and evolution of 500hPa troughs

采用动态合成分析方法（Gray，1979；李英等，2004），对有冷空气影响和无冷空气影响情况下的热带气旋样本分别进行气象要素的合成分析及物理量诊断，合成时次分别选取热带气旋登陆的时刻及江苏地区降水集中的时刻。



注：红色箭头指示时间段为降水累计时段；槽线蓝色表示开始，棕色表示结束

图2 无冷空气影响背景下热带气旋移动路径（黑色点线）及其移经江苏期间的24h累计降水量（填色和等值线）分布

Fig. 2 Tracks (black dot line) of tropical cyclones passing through Jiangsu without cold air influence and corresponding 24 h accumulated precipitation distribution (colored and contour)

2 热带气旋进入江苏地区引发强降水过程的原因

2.1 环流背景

从动态合成的500 hPa位势高度场及温度平流场（图3）可见，在冷空气影响的背景下，热带气旋登陆时（图3a），其西北侧有西风槽携带冷空气东移，距离热带气旋中心5~10个经纬距；副高呈经向分布，位置偏东，其北侧高压脊西伸至热带气旋北侧，热带气旋沿副高西南侧移动，两者之间急流发展，有利于水汽输送通道的维持。在江苏地区降水集中阶段（图3b），副高向东收缩，热带气旋逐渐并入西风带环流，西风槽继续东移南下，槽后冷平流明显加强，并沿西北风场侵入热带气旋外围环流，有利于气旋北侧辐合抬升的加强及层结不稳定的发展。

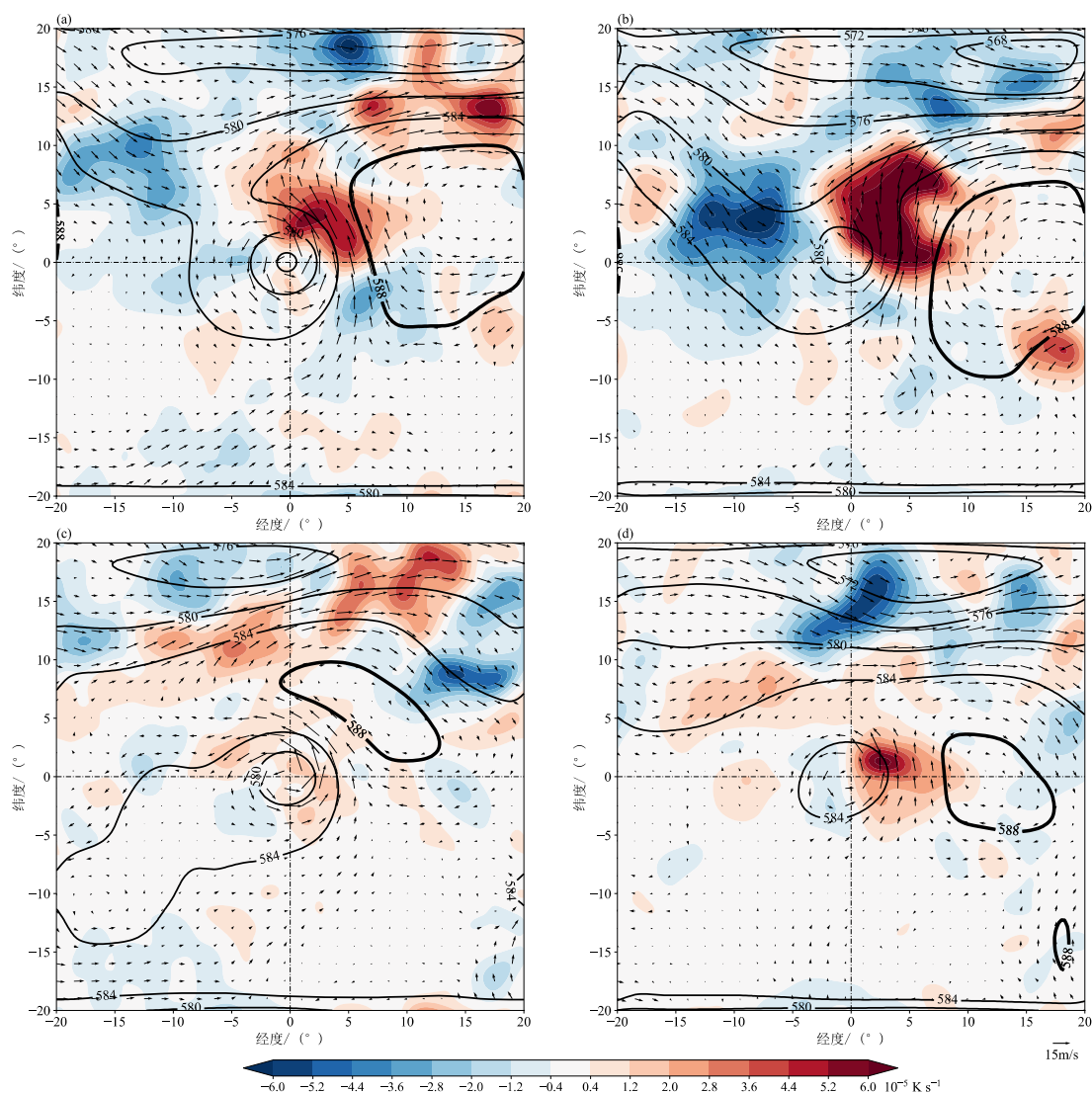


图3 (a、b) 有、(c、d) 无冷空气影响下合成的 500 hPa 温度平流 (填色)、风场 (风矢) 和位势高度 (等值线, 单位: dagpm)

Fig. 3 Composite charts of 500 hPa temperature advection (colored), wind field (vector) and geopotential height (contour, unit: dagpm) (a, b) with and (c, d) without the influence of cold air

无冷空气影响下, 热带气旋登陆时 (图 3c), 中心位于热带气旋东北侧的副高呈西北—东南向, 其反气旋环流向西伸展, 控制热带气旋北侧 5~10 个纬距的范围。西风带低槽偏西、偏北, 距离热带气旋较远, 且高压坝阻挡不利于其南下对热带气旋产生影响, 热带气旋所处环境场的冷暖平流不明显。在江苏地区降水集中阶段 (图 3d), 西风槽偏东北移, 副高减弱东退南落, 与热带气旋之间距离增大, 气压梯度减小, 引导气流减弱, 易导致热带气旋出现停滞。热带气旋东至东北侧的暖式切变线附近, 由于凝结潜热释放而存在明显增暖, 并形成强暖平流, 利于上升运动的发展及低空急流的维持。

动态合成的 200 hPa 位势高度场、风矢场及散度场（图 4）显示，在冷空气影响背景下，热带气旋登陆时（图 4a），南亚高压带断裂，中心位于热带气旋东部；西风带长波槽发展东移，槽前副热带西风急流强盛，中心超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，位于热带气旋中心北侧 10~20 个纬距，在热带气旋东北侧形成较强的高空辐散。随着热带气旋逐渐北移，在江苏地区降水集中阶段（图 4b），南亚高压再度增强合并，呈纬向带状分布于热带气旋南侧；长波槽加深，向东南方向移动，槽前副热带西风急流增强，中心超过 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，急流区南界距热带气旋中心仅 5~10 个纬距；高空急流入口区右侧的强辐散区与南亚高压北侧的辐散区叠加，有利于热带气旋西北侧至东北侧上升运动的发展及降水的增强。

在无冷空气影响背景下（图 4c），热带气旋登陆时，南亚高压范围广、呈纬向分布，热带气旋几乎在其中心控制之下；西风带以纬向环流为主，副热带西风急流偏弱，中心风速在 $30 \sim 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，距离台风中心 10~15 个纬距；环境场并未给热带气旋提供有利的辐散条件，热带气旋中心附近的高空辐散主要由其自身上升运动产生。在江苏地区降水集中阶段（图 4d），南亚高压强度维持，热带气旋仍在南亚高压的反气旋环流控制中，但由环流中心移至西北侧；西风带仍以纬向环流为主，西风急流风速减弱至 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右；南亚高压脊的反气旋环流为热带气旋提供了一条向北的流出通道，有利于其西北侧至东北侧的高空辐散及上升运动的发展及降水的增强。

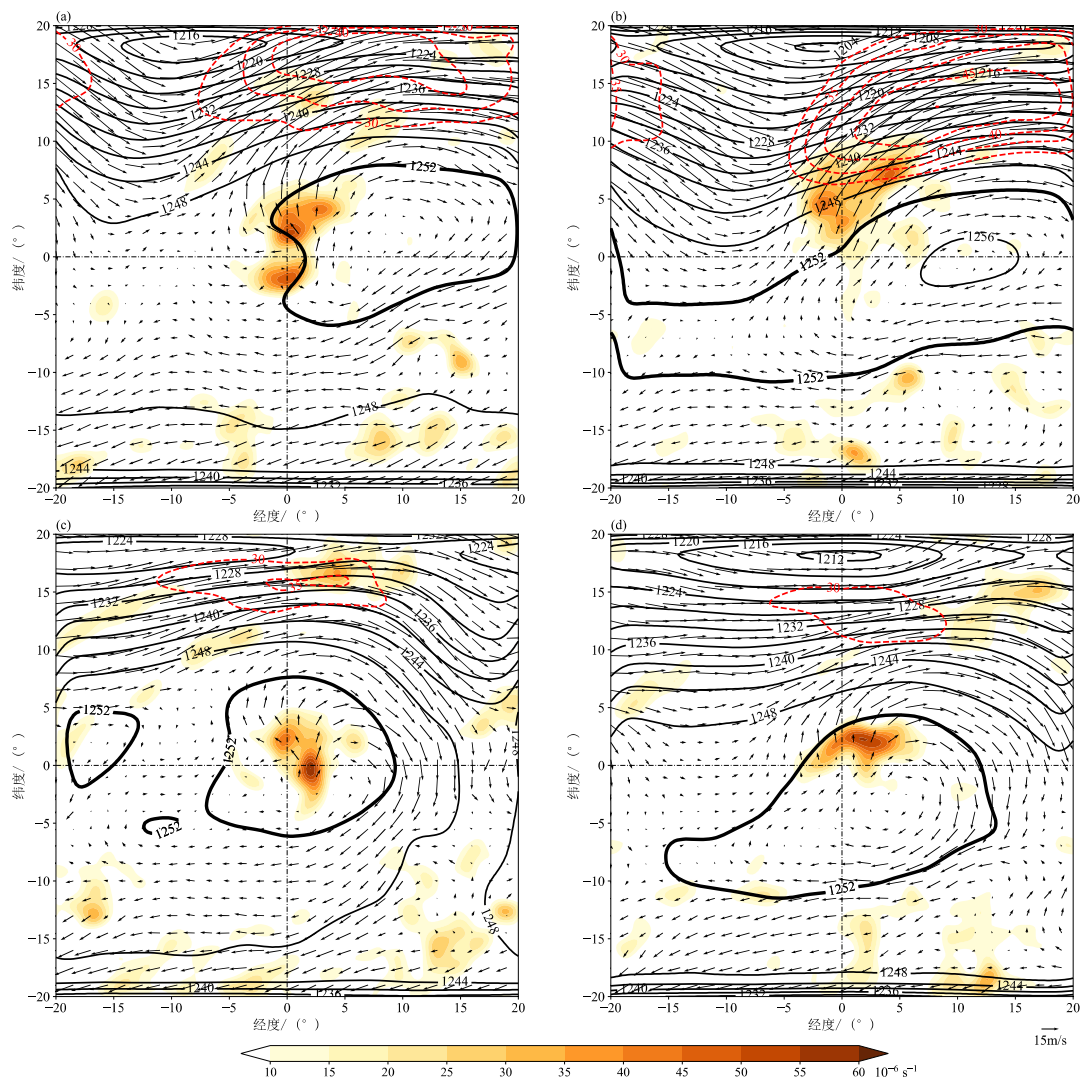


图 4 (a、b) 有、(c、d) 无冷空气影响下合成的 200 hPa 散度 (填色)、风场 (风矢和红线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 及位势高度 (黑线, 单位: dagpm)

Fig. 4 Composite charts of 200 hPa divergence (colored), wind field (vector and red line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and geopotential height (black line, unit: dagpm) (a, b) withand (c, d) without the influence of cold air

2.2 水汽条件

充沛的水汽是造成台风强降水的重要条件之一, 而低空急流作为输送水汽的重要通道, 其与台风相伴随的时间越长、强度越强, 所引发的降水强度也更加显著 (吴天贻等, 2021; 马梁臣等, 2023)。从动态合成的 850 hPa 水汽通量及水汽通量散度场 (图 5) 可以看出, 两种背景下, 热带气旋登陆时, 均存在两支充沛的水汽输送带, 分别来自于西南季风及副高外围的偏东至东南气流。

在冷空气影响背景下, 热带气旋登陆时 (图 5a), 其中心附近的水汽通量呈现由东北向

西南递减的分布，但水汽辐合区则围绕气旋中心基本呈对称分布。在江苏地区降水集中阶段（图 5b），两支水汽输送带维持，热带气旋东北象限的水汽输送稳定，但西北至东南象限的水汽输送明显减弱，致使热带气旋非对称结构加剧。强水汽辐合区主要位于热带气旋东北侧南风急流的顶端及北侧倒槽附近，有利于热带气旋北侧，特别是东北侧降水的发展，但强水汽辐合区与强水汽输送区并不重叠，以致强降水难以长时间维持。由于水汽大幅输送至热带气旋北侧，且在北侧产生强辐合，使得南侧的水汽通量及辐合均明显减弱，东南侧甚至出现弱的水汽辐散，不利于南侧降水的发展。

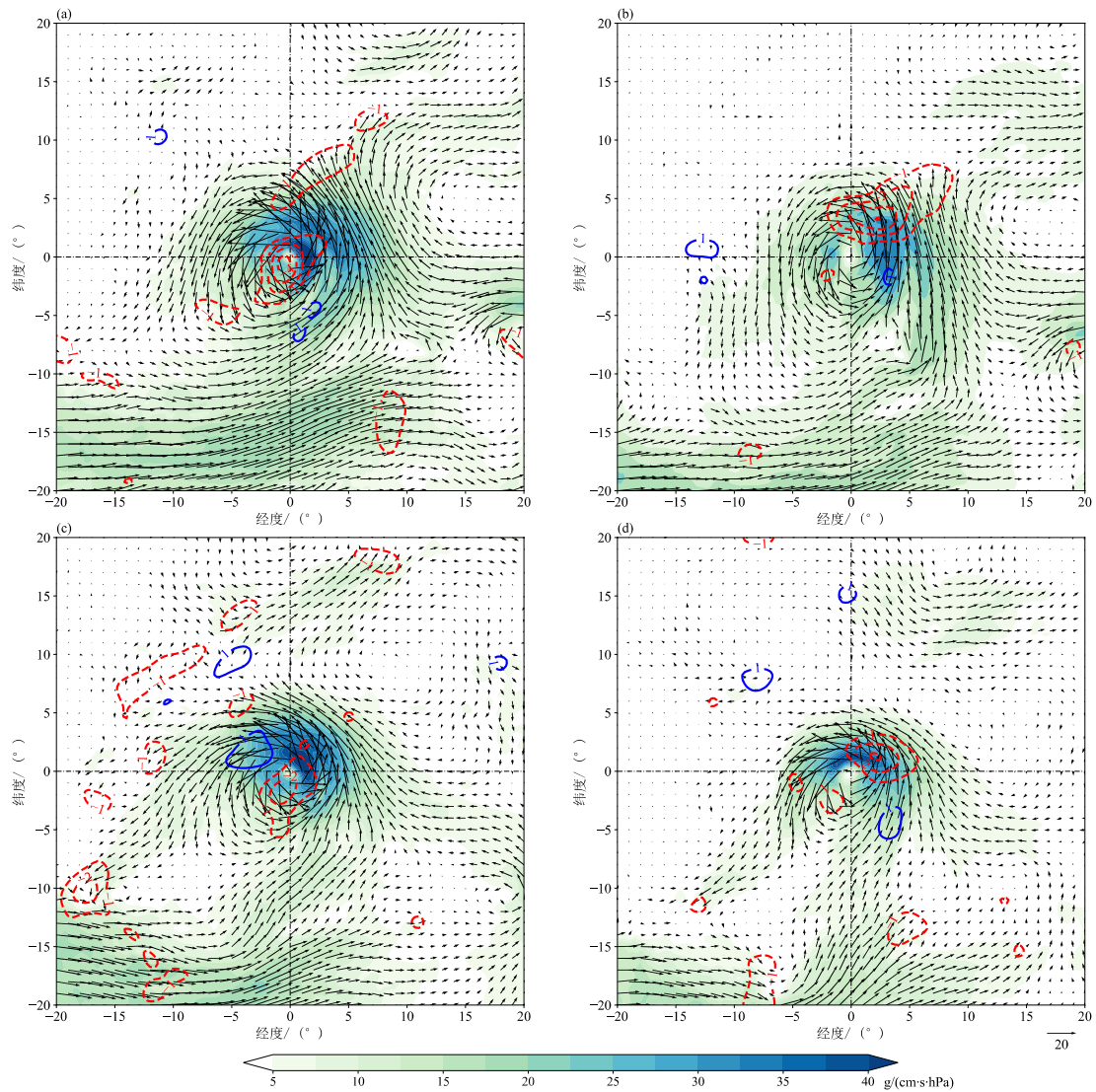


图 5 (a、b) 有、(c、d) 无冷空气影响下合成的 850 hPa 水汽通量 (填色及箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) 和水汽通量散度 (等值线, 单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 5 Composite charts of 850 hPa vapor flux (colored and vector, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and vapor flux divergence (contour, unit: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) (a, b) with and (c, d) without the influence of cold air

无冷空气影响背景下（图 5c），热带气旋登陆时，水汽通量场及水汽辐合区基本呈对称分布，但水汽输送中心仍然偏向于热带气旋东北侧，水汽辐合强度明显小于有冷空气的情况，热带气旋西北侧存在弱水汽辐散。在江苏地区降水集中阶段（图 5d），两支水汽输送带均明显减弱，特别是副高外围东南气流水汽输送带几乎断裂。随着热带气旋的北移，其北侧偏东气流与副高南侧的偏东气流汇合加强，致使水汽通量逐渐集中于热带气旋东北及西北象限。强水汽辐合区主要位于热带气旋东至东北侧、西南风与东南风形成的切变线附近，与强水汽输送区重叠，易导致降水增幅及持续。

两种天气背景下，热带气旋自登陆至进入江苏地区的过程中，均逐渐呈现出较明显的非对称结构。有冷空气影响时，水汽辐合区由热带气旋中心区域向北侧集中；无冷空气影响时，水汽输送及水汽辐合向热带气旋东侧集中。

2.3 动力条件

热带气旋中心附近散度与垂直速度的分布通常决定了降水的强度及落区。在冷空气影响背景下，热带气旋登陆阶段（图 6a，6e），散度场和垂直速度场呈现非对称分布，850 hPa 至近地面层热带气旋中心环流附近的辐合中心位于其东北象限，强度超过 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，与之对应的强上升运动区由近地面向上垂直扩展至 300 hPa 附近，中心位于 850~700 hPa，强度达到 $1.2 \sim 1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在江苏地区降水集中阶段（图 6b，6f），冷空气由西北侧自高层向低层侵入热带气旋，致使低层辐合区及上升运动区均由中心向西北象限倾斜，虽然热带气旋强度已由登陆时的台风或强热带风暴减弱至热带风暴或热带低压，但上升运动的减弱却并不明显，强度仍可达到 $1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见，热带气旋在冷空气的助力下，垂直上升运动逐渐演变成倾斜上升运动，斜压性增强，有利于其北侧附近降水的增强。

无冷空气影响背景下，热带气旋登陆阶段（图 6c，6g），散度场和垂直速度场相对于其中心均呈现对称分布，且结构较为密实，上升运动区集中在距离气旋中心 2 个经纬距范围内，伸展高度超过 200 hPa，中心位于 800~600 hPa，强度 $1.2 \sim 1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。江苏地区降水集中阶段（图 6d，6h），散度场仍然维持对称分布，但热带气旋南侧、特别是西南象限的上升运动明显减小，而东北象限的上升运动强度却稳定维持，不仅强度及伸展高度与登陆阶段相差无几，结构也依然保持近乎垂直的状态。可见，热带气旋登陆后，东北象限的凝结潜热释放使得该区域的垂直上升运动得以维持，有利于强降水的持续。

两种天气背景下，上升运动的强度均与登陆阶段相差不大。不同之处在于，有冷空气影响时，热带气旋中心附近非对称分布的垂直上升运动逐渐演变成向西北象限倾斜的上升运动；

无冷空气影响的背景下，热带气旋中心附近的上升运动仍保持垂直状态，但由对称分布逐渐演变成向东北象限集中的非对称分布。

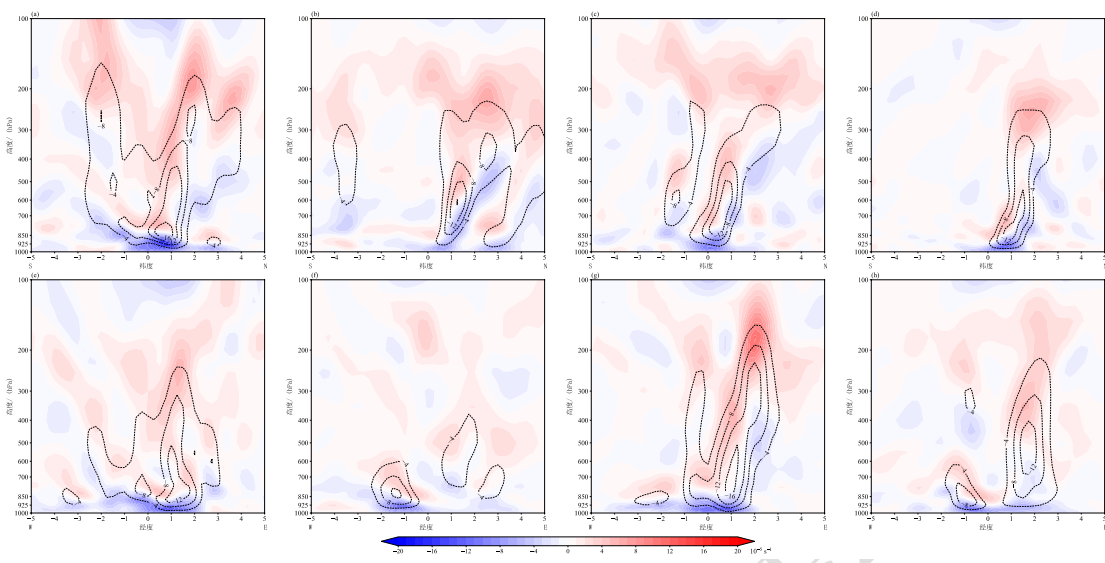


图 6 (a, b, e, f) 有、(c, g, d, h) 无冷空气影响下合成的散度场（填色）和垂直速度场（等值线，单位： $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）沿热带气旋中心的 (a~d) 经向剖面 and (e~h) 纬向剖面

(a, e, c, g) 热带气旋登陆时刻, (b, f, d, h) 江苏降水集中时刻

Fig. 6 (a— d) Meridional and (e—h) zonal cross-sections of composite divergence (colored) and vertical velocity (contour, unit: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along the tropical cyclone centers at the time of (a, e, c, g) tropical cyclone landfall and (b, f, d, h) concentrated rainfall in Jiangsu(a, b, e, f) with and (c, d, g, h) without the influence of cold air

2.4 大气稳定度

不稳定的大气层结是引发深厚湿对流及强降水过程的重要热力条件。饱和相当位温 (θ_{se}^*) 是描述空气在饱和状态下潜在温度的热力学参数，其随高度的变化能够揭示大气层结的条件不稳定特征。相关研究 (俞小鼎等, 2020; 王秀明等, 2014; 孙继松和陶祖钰, 2012) 指出， θ_{se}^* 随高度减小表明大气处于条件不稳定状态，有利于对流性降水的发展。从大气不稳定性 ($\partial\theta_{se}^*/\partial p$) 的垂直分布 (图 7) 可以看出，无论是否存在冷空气影响，热带气旋中心附近的中低层大气基本处于条件不稳定的状态，为对流性降水的发生发展提供了有利的热力条件。

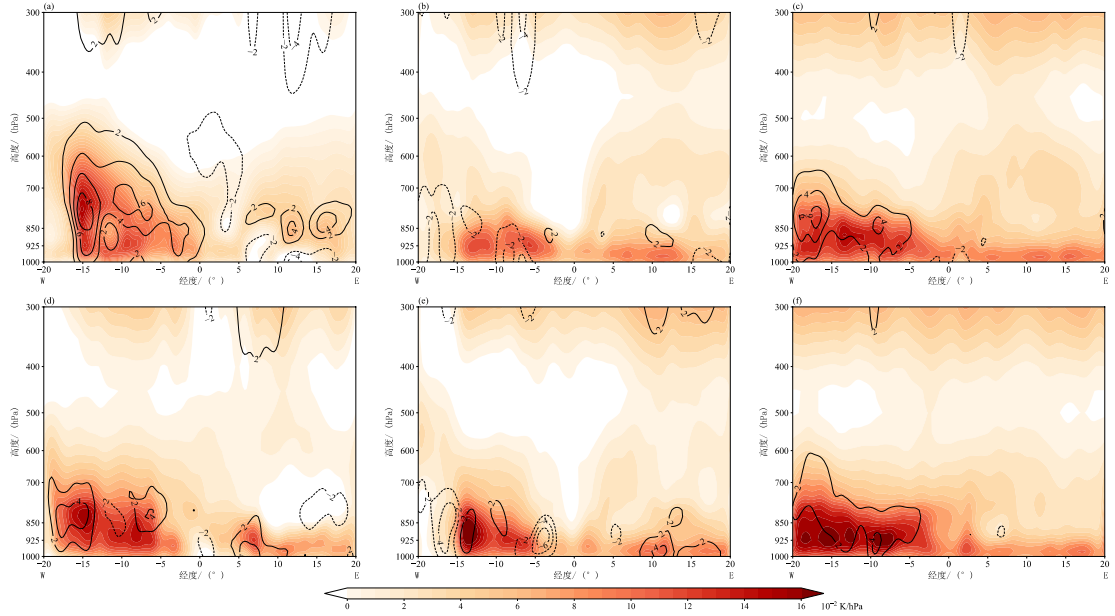


图 7 (a~c) 有、(d~f) 无冷空气影响下合成的江苏强降水开始时刻大气不稳定性（填色）及其与强降水开始时刻前 12h 的差值（等值线，单位： $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ）沿热带气旋 (a, d) 北侧 10 个纬距、(b, e) 中心和 (c, f) 南侧 10 个纬距的纬向剖面

Fig. 7 Zonal cross-sections of composite atmospheric instability (colored) at the start time of heavy rainfall in Jiangsu and the difference (contour, unit: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$) compared to the atmospheric instability 12 h before the start of heavy rainfall along t (a, d) 10 latitudinal intervals on the north side, (b, e) the center and (c, f) 10 latitudinal intervals on the south side of the tropical cyclones (a~c) with and (d~f) without the influence of cold air

冷空气影响背景下，在江苏强降水开始时刻，热带气旋西北至东北侧、600~925 hPa 的假相当位温 (θ_{se}) 较强降水开始前 12h 减小 5~9 K，热带气旋西侧同层的 θ_{se} 降幅为 5~7 K (图 8)，表明冷空气 ($\theta_{se} < 330 \text{ K}$) 自西向东、自高层向低层侵入热带气旋外围环流，导致热带气旋北侧及西侧中低层 θ_{se} 的水平梯度显著增大，并向西倾斜，呈现出斜压性增强的特征，进而推动中低层暖湿空气倾斜抬升，为不稳定能量的释放提供了有利条件。同时，热带气旋北侧至西北侧 600~1000 hPa、东北侧 800~925 hPa 的 $\partial\theta_{se}^*/\partial p$ 较强降水开始前 12h 分别增长了 $8 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 和 $4 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (图 7a)，显示条件不稳定明显增强，但热带气旋东北侧近地面大气的 $\partial\theta_{se}^*/\partial p$ 为负值，呈现条件稳定的状态，在一定程度上抑制了对流的发展。相比之下，热带气旋北至西北侧 CAPE 的增幅 (图 9a) 也更为显著，达到 100~400 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，且 CIN 较小，更易引起对流的发展。

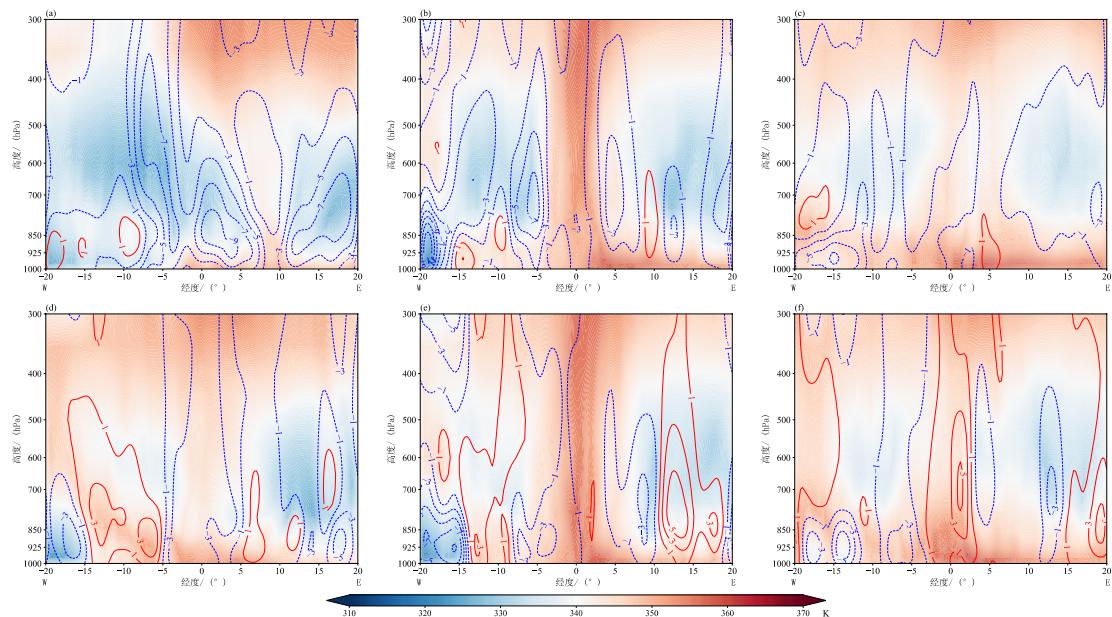


图 8 (a~c) 有、(d~f) 无冷空气影响下合成的江苏强降水开始时刻 θ_{se} (填色) 及其与强降水开始时刻前 12h 的差值 (等值线, 单位: K) 沿热带气旋 (a, d) 北侧 10 个纬距、(b, e) 中心和 (c, f) 南侧 10 个纬距的纬向剖面

Fig. 8 Zonal cross-sections of composite θ_{se} (colored) at the start time of heavy rainfall in Jiangsu and the difference (contour, unit: K) compared to θ_{se} 12 h before the start of heavy rainfall along (a, d) 10 latitudinal intervals on the north side, (b, e) the center and (c, f) 10 latitudinal intervals on the south side of the tropical cyclone centers (a—c) with and (d—f) without the influence of cold air

无冷空气影响下, 江苏强降水开始时, 热带气旋垂直气流的非对称分布导致西侧边界层大气具有较高的饱和相当位温, 进而引起热带气旋西北侧、西侧及西南侧中低层大气的 $\partial\theta_{se}^*/\partial p$ 明显大于东侧, 表现出较强的条件不稳定。然而, 西至西北侧的中低层大气因下沉气流的影响难以达到饱和状态, 导致 CAPE 增幅较小; 西南侧大气受限于较大的 CIN, 均不利于对流性降水的持续发展。相比之下, 热带气旋东侧低层大气在低空及超低空急流的持续暖湿输送下一直处于条件不稳定状态, 尤其是东侧和东北侧 $\partial\theta_{se}^*/\partial p$ 较强降水开始前 12 小时增长了 $2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (图 7d, 7e), CAPE 值增长了 $100 \sim 300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且 CIN 较小 (图 9b), 具备引发对流性降水的不稳定条件。

综上所述, 两种天气背景下, 热带气旋中心及周边区域上空均存在明显的条件不稳定层结, 有利于对流性降水的发生发展。差异在于: 有冷空气影响时, 热带气旋北至西北侧中低层大气的条件不稳定会因冷空气的渗透而迅速发展; 无冷空气影响时, 热带气旋东至东北侧中低层大气的条件不稳定则主要通过低空及超低空急流的暖湿输送而明显增强。

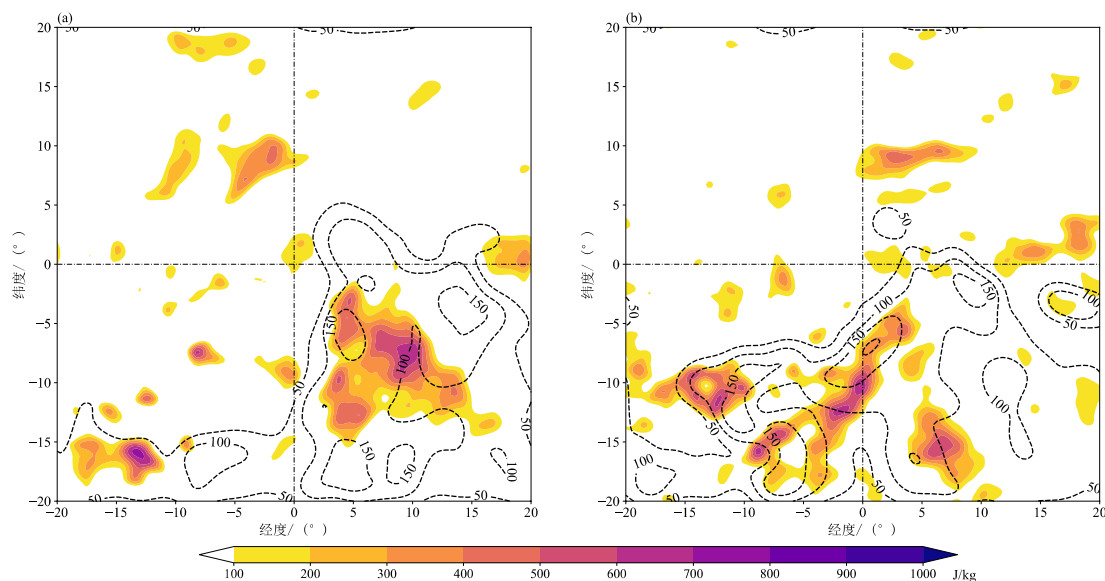


图 9 (a、b) 有、(c、d) 无冷空气影响下合成的江苏强降水开始时刻与强降水开始时刻前 12h 的 CAPE 差值 (填色) 及强降水开始时刻 CIN (等值线, 单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 9 Composite CAPE difference (colored) between the start time of heavy rainfall and 12 h before the heavy rainfall, and CIN (contour, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) at the start time of heavy rainfall in Jiangsu (a) with and (b) without the influence of cold air

3 江苏地区热带气旋本体强降水天气学概念模型

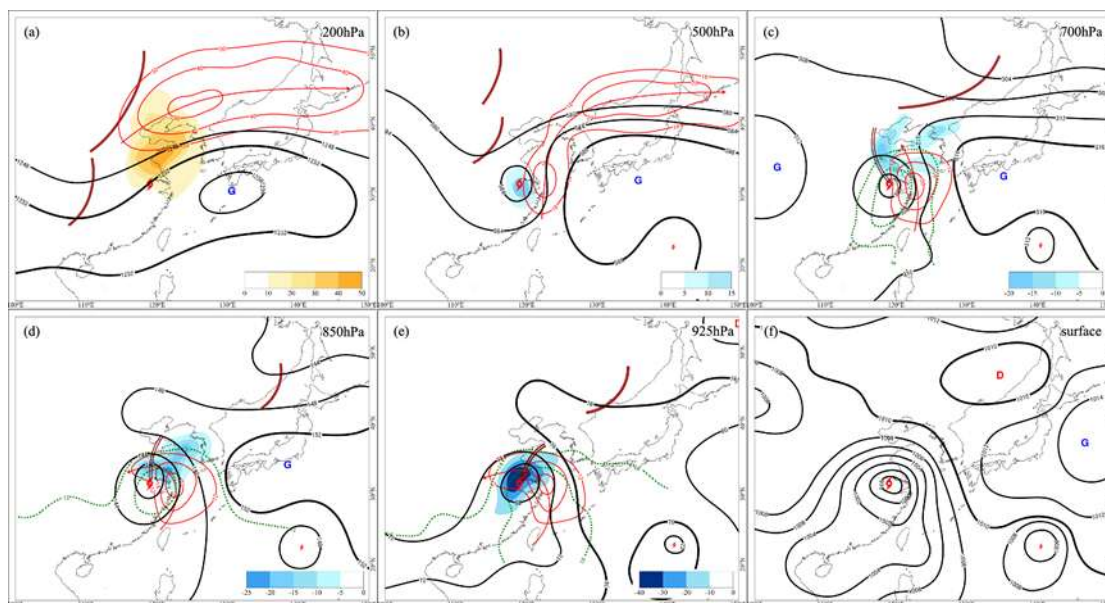
综合以上分析, 归纳出有冷空气影响和无冷空气影响背景下, 江苏地区热带气旋本体强降水的天气学概念模型。

在冷空气影响的背景下 (图 10a), 200 hPa 南亚高压呈纬向带状分布, 位于热带气旋南侧; 西风带长波槽加深东移, 槽前副热带西风急流强烈发展。500 hPa 副高呈经向分布, 脊线位于 30°N 左右; 西风槽东移南下, 引导冷空气沿西北风场侵入热带气旋外围环流。700~925 hPa 副高北侧脊西伸至热带气旋北侧至东北侧, 热带气旋东北侧的东南急流明显发展, 水汽输送充沛。强降水区主要位于热带气旋北侧至东北侧、200 hPa 高空西风急流入口区右侧、700 hPa 东南低空急流左前方、850 hPa 东南低空急流顶端、700~925 hPa 切变线之间及比湿大值中心的边缘。

无冷空气影响的背景下 (图 10b), 200 hPa 南亚高压东部脊伸至长江中下游及其以南地区, 西风带以纬向环流为主, 副热带西风急流范围小、强度弱。500 hPa 副高断裂成块状, 强度弱, 主体位置偏东, 易导致热带气旋出现停滞; 西风带低槽偏西、偏北, 距离热带气旋较远。700~925 hPa 副高沿热带气旋的东北侧向西伸展, 形成明显的高压坝, 热带气旋外围形成较强的低空急流, 水汽得以自热带气旋东南侧输送至西北侧。强降水区主要位于热带气

306 旋东侧至东北侧、700~925 hPa 切变线附近及南侧、低空东南急流的顶端及比湿大值中心的
 307 边 缘。

308



309

注：棕色实线表示高空槽，棕色双线表示切变线，长箭头表示气流方向，下同。

310

图 10 (a) 有、(b) 无冷空气影响下江苏地区热带气旋本体强降水过程的环流形势示意

311

312

313

(a₁, b₁) 200hPa 位势高度 (黑线, 单位: dagpm)、散度 (填色) 和风速 (红线, 单位: $m \cdot s^{-1}$), (a₂, b₂) 500hPa 位势高度 (黑线, 单位: dagpm)、涡度 (填色) 和风速 (红线, 单位: $m \cdot s^{-1}$), (a₃, b₃) 700、(a₄, b₄) 850、(a₅, b₅) 925hPa 位势高度 (黑线, 单位: dagpm)、散度 (填色)、风速 (红线, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 和比湿 (绿线, 单位: $g \cdot kg^{-1}$), (a₆, b₆) 海平面气压 (黑线, 单位: hPa)

316

317

318

Fig 10 Circulation schematic diagrams of heavy rainfall associated with tropical cyclones in Jiangsu with (a) and without (b) the influence of cold air

319

320

(a₁, b₁) geopotential height (black line, unit: dagpm), divergence (colored) and wind speed (red line, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 200hPa, (a₂,

b_2) geopotential height (black line, unit: dagpm), vorticity (colored) and wind speed (red line, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 500hPa, (a_3 — a_5 , b_3 — b_5) geopotential height (black line, unit: dagpm), divergence (colored), wind speed (red line, unit: $m \cdot s^{-1}$) and specific humidity (green line, unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a_3 , b_3) 700 hPa, (a_4 , b_4) 850 hPa, and (a_5 , b_5) 925hPa, (a_6 , b_6) sea level pressure (black line, unit: hPa)

4 结论与讨论

针对进入江苏地区引发强降水过程的热带气旋,采用动态合成分析方法,对比分析有冷空气影响和无冷空气影响的两类天气背景下,热带气旋本体强降水成因及落区的异同,得到以下结论:

(1)1960—2021 年,经过江苏地区的 44 个热带气旋有 45.5%的概率与冷空气相遇,冷空气影响下大范围暴雨发生的概率显著高于无冷空气影响的情况。冷空气影响背景下,热带气旋虽然移速相对较快,停留时间较短,但大范围暴雨发生的概率显著高于无冷空气影响的背景。

(2)无论是否存在冷空气的影响,进入江苏地区的热带气旋均会引发强降水过程,主要原因在于热带气旋的非对称结构演变、低空急流对水汽的持续输送以及热带气旋附近强上升运动的维持。两者的差异主要体现在动力抬升的维持机制以及大气不稳定的增长方式上。

(3)冷空气影响背景下,冷平流自热带气旋西北侧侵入导致其外围环流的斜压性及条件不稳定迅速增强,斜压区的倾斜上升运动叠加高空急流的辐散抽吸作用,推动中低层暖湿空气持续抬升,利于不稳定能量的释放及对流的发展;强降水区主要位于热带气旋北侧至东北侧。

(4)无冷空气影响背景下,低空及超低空急流的持续暖湿输送致使热带气旋中心及周边区域的条件不稳定明显增强,暖区的辐合抬升作用配合潜热加热过程使得垂直上升运动的强度和结构得以维持,有利于对流性降水的形成;强降水区主要位于热带气旋东侧至东北侧。

本文采用动态合成分析方法,揭示了两类热带气旋强降水过程的共性特征,相较于单一过程的分析,该方法针对多个具有相似天气背景的热带气旋过程,通过保持热带气旋结构的相对完整及其与周边系统相对位置的稳定,更清晰地呈现了大尺度环流系统间的相互作用及热带气旋非对称结构的演变,有效减少了热带气旋强度、移速及路径的差异对分析结果的影响。但是,该方法难以反映样本中个例的诸多特性,因此后续还将把研究范围从江苏地区扩展至华东地区,筛选更多引发强降水过程的登陆热带气旋个例,并借助多源探测资料和敏感性试验进行深入分析,归纳总结影响热带气旋降水强度及落区的其他影响因子。

351 参考文献

- 352 蔡梦宁, 陈涛, 谌芸, 等, 2022. 对流层高层冷涡对“21·7”河南持续性极端暴雨影响分析[J]. 气象, 48(5): 545-555. Cai X N, Chen T,
353 Chen Y, et al, 2022. Dynamic impact of upper tropospheric cold low on persistent extreme rainstorm of Henan during 17-22 July
354 2021[J]. Meteor Mon, 48(5): 545-555 (in Chinese).
- 355 陈宏, 杨晓君, 易笑园, 等, 2021. 北上台风“安比”后期两个阶段暴雨落区分布的差异性分析[J]. 高原气象, 40(5): 1087-1100. Chen
356 H, Yang X J, Yi X Y, et al, 2021. Analysis of difference in distribution of rainstorms in the later two stages of Northward-Moving
357 Typhoon Ampil[J]. Plateau Meteor, 40(5): 1087-1100 (in Chinese).
- 358 陈联寿, 孟智勇, 丛春华, 2017. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报, 37(4): 1-7. Chen L S, Meng Z Y, Cong C H, 2017. An
359 overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. J Marine Meteor, 37(4): 1-7 (in Chinese).
- 360 陈涛, 董林, 罗玲, 等, 2021. 台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J]. 气象, 47(12): 1433-1443. Chen T, Dong L,
361 Luo L, et al, 2021. Convection structure and impact on severe precipitation during landing of typhoon Lekima[J]. Meteor Mon,
362 47(12): 1433-1443 (in Chinese).
- 363 程正泉, 陈联寿, 李英, 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J]. 气象学报, 67(5): 840-850. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2009.
364 Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J].
365 Acta Meteor Sin, 67(5): 840-850 (in Chinese).
- 366 杜惠良, 黄新晴, 冯晓伟, 等, 2011. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J]. 气象, 37(7): 847-856. Du H L,
367 Huang X Q, Feng X W, et al, 2011. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm[J].
368 Meteor Mon, 37(7): 847-856 (in Chinese).
- 369 胡艳, 岳彩军, 顾问, 等, 2023. 台风“利奇马”(1909)影响期间上海强降水成因诊断分析[J]. 热带气象学报, 39(6): 883-897. Hu Y,
370 Yue C J, Gu W, et al, 2023. Diagnosis of severe precipitation in Shanghai under influence of Typhoon Lekima (2019)[J]. J Trop
371 Meteor, 39(6): 883-897 (in Chinese).
- 372 李英, 陈联寿, 王继志, 2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报, 62(2): 167-179. Li Y, Chen L S,
373 Wang J Z, 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying
374 of tropical cyclone after it's landfall[J]. Acta Meteor Sin, 62(2): 167-179 (in Chinese).
- 375 李英, 陈联寿, 徐祥德, 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 29(1): 91-98. Li Y, Chen L S, Xu X
376 D, 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and
377 precipitation[J]. Chin J Atmos Sci, 29(1): 91-98 (in Chinese).
- 378 梁军, 张胜军, 贾旭轩, 等, 2024. 登陆北上台风结构变化及其引发的辽东半岛强降水分析[J]. 气象, 50(11): 1306-1316. Liang J,
379 Zhang S J, Jia X X, et al, 2024. Analysis on structure changes of landfall northbound typhoons and the heavy precipitation in
380 Liaodong peninsula induced by them[J]. Meteor Mon, 50(11): 1306-1316 (in Chinese).
- 381 林小红, 杨舒楠, 王健治, 等, 2023. 过台湾岛的台风所引发的东南沿海地区的暴雨特征分析[J]. 气象, 49(9): 1097-1107. Lin X H,
382 Yang S N, Wang J Z, et al, 2023. Characteristics of rainstorm in Southeast Coastal Area caused by typhoon passing through Taiwan
383 Island[J]. Meteor Mon, 49(9): 1097-1107 (in Chinese).
- 384 刘希, 曾明剑, 王亚强, 等, 2023. 台风“利奇马”远距离暴雨的关键动力因子和水汽来源[J]. 大气科学学报, 46(5): 776-789. Liu X,
385 Zeng M J, Wang Y Q, et al, 2023. Analysis of key dynamical factors and water vapor sources influencing remote heavy rainfall
386 produced by Typhoon Lekima[J]. Trans Atmos Sci, 46(5): 776-789 (in Chinese).
- 387 马梁臣, 刘海峰, 沈柏竹, 等, 2023. 2019 年台风“利奇马”和“罗莎”引发东北地区暴雨的水汽特征分析[J]. 气象与环境学报, 39(2):
388 1-10. Ma L C, Liu H F, Shen B Z, et al, 2023. Characteristics of water vapor triggered by Typhoons Lekima and Krosa in Northeast
389 China in 2019[J]. J Meteor Environ, 39(2): 1-10 (in Chinese).
- 390 潘佳文, 杨奇志, 魏鸣, 等, 2018. 台风“苏迪罗”螺旋雨带造成福州特大暴雨成因分析[J]. 热带气象学报, 34(6): 774-782. Pan J W,
391 Yang Q Z, Wei M, et al, 2018. The analysis of an unusually heavy rain induced by the outer rainband of Typhoon Soudelor in
392 Fuzhou[J]. J Trop Meteor, 34(6): 774-782 (in Chinese).
- 393 饶晨泓, 毕鑫鑫, 陈光华, 等, 2022. 近海台风对“21·7”河南极端暴雨过程水汽通量和动、热力条件影响的模拟[J]. 大气科学, 46(6):

1577-1594. Rao C H, Bi X X, Chen G H, et al, 2022. A numerical simulation on the impacts of the offshore typhoons on water vapor flux, dynamic and thermal conditions of the extreme rainstorm event in Henan Province in July 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(6): 1577-1594 (in Chinese).

孙继松, 陶祖钰, 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. *气象*, 38(2): 164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. *Meteor Mon*, 38(2): 164-173 (in Chinese).

王俊, 郑丽娜, 王洪, 等, 2023. 山东 6 次台风暴雨雨滴谱统计特征及区域差异[J]. *应用气象学报*, 34(4): 475-488. Wang J, Zheng L N, Wang H, et al, 2023. Statistical characteristics and regional differences of raindrop size distribution during 6 typhoon rainstorms in Shandong[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(4): 475-488 (in Chinese).

王科, 陈光华, 吕欣宇, 等, 2021. 1521 号台风“杜鹃”生成阶段中尺度对流系统和降水演变特征[J]. *大气科学*, 45(1): 73-87. Wang K, Chen G H, Lü X Y, et al, 2021. Evolution characteristics of mesoscale convective system during the formation of tropical cyclone Dujuan (1521)[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(1): 73-87 (in Chinese).

王新敏, 栗晗, 2020. 多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J]. *气象*, 46(6): 753-764. Wang X M, Li H, 2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models[J]. *Meteor Mon*, 46(6): 753-764 (in Chinese).

王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. *气象*, 40(4): 389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. *Meteor Mon*, 40(4): 389-399 (in Chinese).

吴海英, 陈海山, 曾明剑, 等, 2014. 冷空气对台风“海葵”(1211)倒槽特大暴雨作用分析[J]. *热带气象学报*, 30(5): 871-880. Wu H Y, Chen H S, Zeng M J, et al, 2014. Analysis on the functions of cold air in a super heavy rainfall caused by a reverse trough of Typhoon Haikui (1211)[J]. *J Trop Meteor*, 30(5): 871-880 (in Chinese).

吴天贻, 周玉淑, 王咏青, 等, 2021. 两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析[J]. *大气科学*, 45(6): 1173-1186. Wu T Y, Zhou Y S, Wang Y Q, et al, 2021. Comparative analysis of precipitation characteristics of the westward Typhoon cases “Bilis” and “Sepat” during landfall under different monsoon intensities[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1173-1186 (in Chinese).

谢惠敏, 任福民, 李国平, 等, 2016. 超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用[J]. *气象*, 42(2): 156-165. Xie H M, Ren F M, Li G P, et al, 2016. Role of supper typhoon Danas in the extreme precipitation caused by severe typhoon fitow[J]. *Meteor Mon*, 42(2): 156-165 (in Chinese).

俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

张端禹, 王俊超, 王晓芳, 等, 2024. 高、低空急流耦合对山东“利奇马”台风暴雨增幅影响的诊断研究[J]. *大气科学*, 48(2): 445-462. Zhang D Y, Wang J C, Wang X F, et al, 2024. Diagnostic research on heavy rain growth in Shandong Province influenced by landing Typhoon Lekima due to the coupling of Upper- and Low-level jet streams[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(2): 445-462 (in Chinese).

张雪蓉, 王丽芳, 王博妮, 等, 2022. 台风远距离影响下江苏两次梅雨期暴雨过程对比分析[J]. *气象*, 48(12): 1550-1564. Zhang X R, Wang L F, Wang B N, et al, 2022. Comparison of two rainstorms related to distant typhoons affecting Jiangsu Province during Meiyu Period[J]. *Meteor Mon*, 48(12): 1550-1564 (in Chinese).

郑秀丽, 林小红, 关辉, 等, 2025. 三次不同冷空气过程对登闽台风极端降水影响的对比分析[J]. *气象*, 51(6): 660-674. Zheng X L, Lin X H, Guan H, et al, 2025. Comparative analysis of the effect of three different cold air events on extreme rainfall brought by landfall typhoons in Fujian[J]. *Meteor Mon*, 51(6): 660-674 (in Chinese).

郑艳, 蔡亲波, 赵付竹, 等, 2014. 强台风“纳沙”暴雨中尺度特征分析[J]. *自然灾害学报*, 23(4): 134-141. Zheng Y, Cai Q B, Zhao F Z, et al, 2014. Mesoscale characteristic analysis of rainstorm of violent Typhoon “Neast”[J]. *J Nat Dis*, 23(4): 134-141 (in Chinese).

周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等, 2014. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. *气象*, 40(8): 930-939. Zhou F, Qian Y Z, Zhu X C, et al, 2014. Cause analysis on the severe rainfall in Zhejiang during the weakening of Fitow[J]. *Meteor Mon*, 40(8): 930-939 (in Chinese).

朱红芳, 杨祖祥, 王东勇, 等, 2019. 进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J]. *气象学报*, 77(2): 268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2): 268-281 (in Chinese).

朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德, 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究[J]. *大气科学*, 24(5): 669-675. Zhu H Y, Chen L S, Xu X D, 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and Mid-Latitude circulation and its rainfall

438 characteristics[J]. Chin J Atmos Sci, 24(5): 669-675 (in Chinese).
 439 Gray W M. 1979. Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis[R]. WMO Programme on Research
 440 in Tropical Meteorology. Colorado: Fort Collins, 407.
 441 Huang Q, GE X Y, Peng M, et al. 2022. Sensitivity analysis of the super heavy rainfall event in Henan on 20 July (2021) using ECMWF
 442 ensemble forecasts[J]. J Trop Meteor, 28(3): 308-325.
 443 Meng W G, Wang Y Q. 2016a. A diagnostic study on heavy rainfall induced by Typhoon Utor (2013) in South China: 1. Rainfall
 444 asymmetry at landfall[J]. J Geophys Res, 121 (21): 12781-12802.
 445 Meng W G, Wang Y Q. 2016b. A diagnostic study on heavy rainfall induced by landfalling Typhoon Utor (2013) in South China: 2.
 446 Postlandfall rainfall[J]. J Geophys Res, 121 (21): 12803-12819.
 447 Xu H, Duan Y H, Xu X D. 2022. Indirect effects of binary typhoons on an extreme rainfall event in Henan province, China from 19 to 21
 448 July 2021: 1. ensemble-based analysis[J]. J Geophys Res Atmos, 127, e2021JD036265.