

李靖怡,姚晨,丁从慧,等. 台风“烟花”进入安徽前后降水特征差异及成因分析[J]. 陕西气象,2024(5):9-17.

文章编号:1006-4354(2024)05-0009-09

台风“烟花”进入安徽前后降水特征差异及成因分析

李靖怡,姚晨,丁从慧,周胜男,周晓晔,赵森

(安徽省气象台,合肥 230031)

摘要:利用最佳台风路径数据、常规观测、FY-2E 卫星 TBB 和 ERA5 再分析资料,对比分析了 2106 号台风“烟花”在进入安徽前后的降水分布特征及成因。结果表明,“烟花”在进入安徽前 24 h 内,降水表现出南北对称分布,在移入安徽后,降水分布表现为非对称特点,小时雨强更强。TBB 小于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域与强降水落区均对应良好。强水汽输送通量、水汽辐合区、台风暖心结构、垂直速度和散度场在“烟花”进入安徽前基本呈对称分布。随着“烟花”向西移入安徽,东南急流在其东至东北侧的维持为台风北侧强降水的产生提供了充足的水汽条件。“烟花”北侧 θ_{se} 强度和范围明显强于南侧。强低层辐合偏北并叠加正涡度环流,配合高空辐散抽吸作用使得北侧的垂直上升运动明显大于南侧,同时也加强了对流层中层凝结潜热的释放,为安徽淮北地区的暴雨提供了有利的动力条件和重要能量来源。

关键词:台风烟花;降水;水汽输送;动热力结构

中图分类号:P458.124

文献标识码:A

中国受台风的影响较为严重^[1],经常遭遇台风带来的各种严重灾害,如大风、台风暴雨和风暴潮等,其中登陆台风暴雨给人民生命财产带来巨大损失^[2-3]。近年来,国内外许多气象学家对台风引发降水的机制进行了研究。结果表明,登陆台风引起的降水一般位于前进方向的右侧,往往表现为非对称特征,且散度场和垂直风切变与雨带的分布较为一致^[4-6]。台风降水中心强度主要受台风强度影响,当冷空气入侵热带气旋外围和倒槽时,降水量可大幅增加^[7-8]。台风“海棠”和 Soudelor 登陆后降水的非对称性分布特点,主要由动力因子引起,而热力条件是不重要的^[9-10]。周芯玉等^[11]指出低空急流增强和高空强的辐散抽吸相配合导致降水增幅显著。另外,水汽输送^[12-13]、中低纬系统的相互作用^[14-15]、螺旋雨带发展^[16]、地形^[17-18]、大陆前期热力条件^[19]等也会影响台风降水的分布特征和强度。前人研究多集

中在近海登陆的台风,而深入内陆的台风与中纬度系统相互作用更加复杂^[20],其引发的暴雨强度和落区研究仍需加强。

2021 年第 6 号台风“烟花”持续时间长、累计雨量大、影响范围广,造成安徽省 9 市 31 县(市、区)不同程度受灾。在其进入安徽前 24 h 内,降水表现出南北对称分布,在移入安徽后,表现出明显的非对称特点,6 h 降水量超过 50 mm 和 100 mm 的站数增多,最大 6 h 累积降水量和最大小时雨强均增强。本文主要采用天气学诊断分析的方法,围绕造成台风“烟花”进入安徽前后的降水分布和强度差异的原因进行探讨,旨在为以后进入内陆台风的降水预报提供一定的依据。

1 资料与方法

所用资料包括地面自动气象站逐时和 6 h 累计降水资料、中国国家卫星气象中心的风云 2 号地球同步静止卫星(FY-2E)观测的逐时云顶黑

收稿日期:2023-03-27

作者简介:李靖怡(1994—),女,汉族,安徽合肥人,硕士,工程师,主要从事天气预报及其灾害天气预警。

通信作者:姚晨(1982—),女,汉族,安徽歙县人,硕士,正研,主要从事短期天气预报工作。

基金项目:安徽省气象局创新发展专项(CXQ202201;CXQ202101)

体辐射亮温(TBB),其水平分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 、中国气象局热带气旋最佳路径数据集和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析资料,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。其中计算温度距平的经向垂直剖面方法如下:以台风中心所在的位置为坐标原点,在 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 的正方形网格内计算不同高度上温度的经向平均为背景场,再用每个高度上各点的温度值减掉同一高度上的背景场得到异常场^[10]。

2 台风“烟花”概况及降水特征

“烟花”于7月18日02时(北京时间,下同)

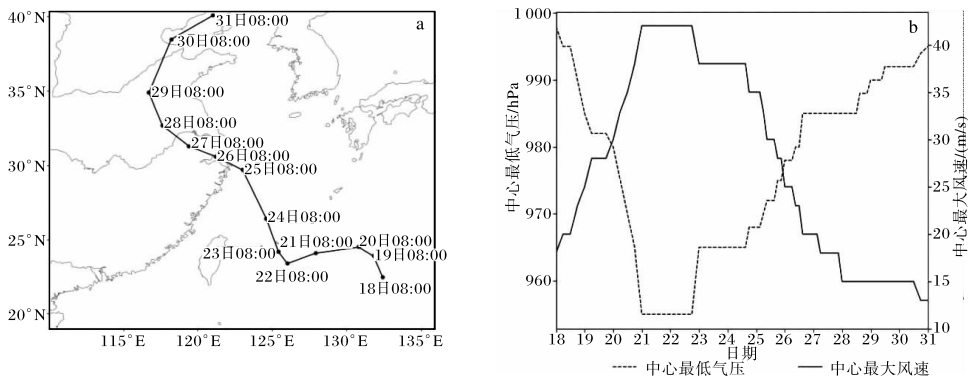


图1 2021年7月台风“烟花”的移动路径(a)和“烟花”的中心最低气压和中心最大风速逐日演变(b)

27日02时,“烟花”移至江苏太湖附近,超过20 mm的降水位于江苏南部和安徽江南南部(图2a)。随着“烟花”向西移动,安徽江南的降水开始明显增强(图2b)。27日14时,降水基本均匀分布在路径南北两侧,在安徽的江淮之间东部,江南大部分地区、江苏北部出现明显降水,降水极值在青阳陵阳黄石,6 h累积降水量达127.2 mm(图2c和表1)。28日02时,“烟花”已进入安徽,强降水主要分布在“烟花”移动路径的右侧,台风中心的偏南方向,降水增强,江苏西南部的降水普遍达到50 mm以上,最大值出现在南京为131.1 mm(图2e)。随着“烟花”折向西北方向移动,在安徽沿淮淮地区区和江苏的西部出现暴雨到大暴雨,降水极值在滁新上行K0站,6 h累积降水量达183.1 mm(图2f和表1)。28日14时,50 mm以上的强降水区从台风中心的东南侧逐渐转向东北侧,呈明显的南北非对称分布特征,主要降水中心

在西北太平洋洋面生成并向西北方向移动,21日11时加强为强台风,23日夜间减弱为台风。25日12时30分左右在浙江舟山普陀区沿海登陆(中心最大风速和最低气压分别为38 m/s,965 hPa,下同)。26日09时50分在浙江平湖市沿海二次登陆(28 m/s,975 hPa)。随后经过江苏在28日01时进入安徽滁州市,并由热带风暴减弱为热带低压,20时左右回旋在淮南市境内,直至23时继续向西北方向移动,29日05时移出安徽,对安徽影响基本结束(图1)。

位于江苏北部和安徽淮北地区北部,安徽萧县官桥站6 h累积降水量达119.5 mm(图2g)。由图2h可知,降水分布仍维持并向北扩,暴雨中心分别位于安徽淮北地区北部、江苏北部和山东南部。经过对比发现,7月26日20时—27日20时(“烟花”进入安徽前24 h),强降水区位于安徽江南大部和江淮之间东部,降水基本沿路径呈南北对称分布(图2a~图2d),最大小时雨强为东至官港许村站的45 mm/h(表1)。7月27日20时—28日20时,随着“烟花”移入安徽,安徽淮北大部分地区累积雨量达到100~250 mm,强降水区主要位于“烟花”路径的右侧,台风中心的偏北以及东北方向(图2e~图2h),最大小时雨强位于滁新上行K0站的69.1 mm/h(表1)。移入安徽后的6 h降水量超过50 mm和100 mm的站次、最大6 h累积降水量和最大小时雨强明显大于进入安徽前。

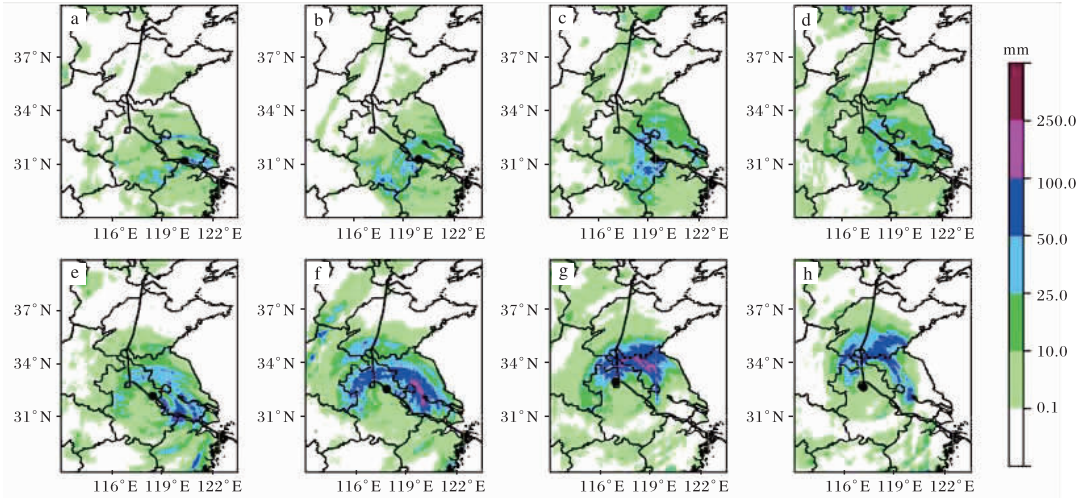


图2 2021年7月台风“烟花”造成的6 h累积降水分布(填色为降水量;黑线为台风路径;黑色点为台风中心;a 26日20时—27日02时,b 27日02—08时,c 27日08—14时,d 27日14—20时,e 27日20时—28日02时,f 28日02—08时,g 28日08—14时,h 28日14—20时)

表1 2021-07-26T20—28T20 台风“烟花”在安徽造成的降水情况

主要降水时段	最大小时雨强/(mm/h) (发生时间、发生地)	最大6 h累积降水量/mm (发生时间、发生地点)	6 h降雨量超过 50 mm 站数/站	6 h降雨量超过 100 mm 站数/站
2021-07- 26T20—27T20	45.0 (27日14—15时、 东至官港许村站)	127.2 (27日08—14时、 青阳陵阳黄石站)	230	4
2021-07- 27T20—28T20	69.1 (28日04—05时、 滁新上行K0站)	183.1 (28日02—08时、 滁新上行K0站)	458	14

3 天气环流背景分析

从大尺度环流背景来看,25日08时,在“烟花”进入内陆之前,内蒙古东部有一冷涡维持,中纬度新疆地区有大陆高压发展,副热带高压(下简称“副高”)则受台风“尼伯特”的影响位于40°N

附近的海面上,我国中东部大部分地区受“烟花”影响,位于两高之间的台风低压环流中,此时“烟花”为完整的正圆形闭合环流,覆盖江苏、安徽、浙江等地,受副高外围东南气流的影响,“烟花”缓慢向西北方向移动(图3a)。受台风“尼伯特”的影响

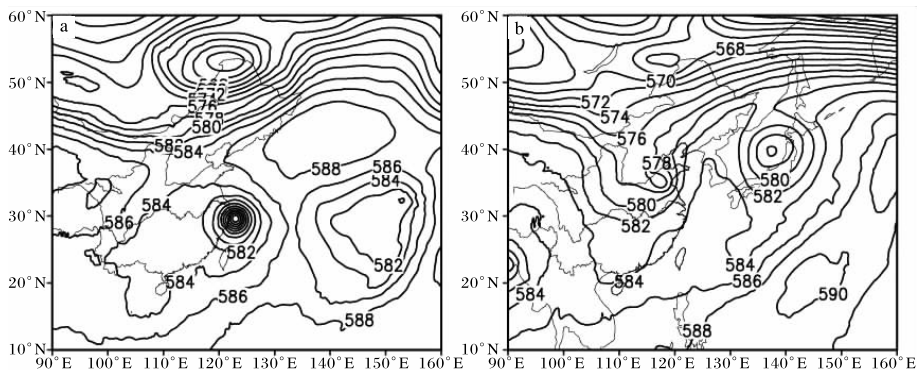


图3 500 hPa位势高度场(等值线,单位为 dagpm;a 2021-07-25T08,b 2021-07-29T08)

副高东退,随着中纬度西风槽逐渐向南加深,“烟花”强度减弱并移入西风槽中,在槽前西南气流的引导下,转向东北方向移动。29日08时,“烟花”移至山东,强度明显减弱,我国中东部大部分地区被中纬度西风槽所控制,安徽受槽后西北气流的影响,有冷空气的入侵(图3b)。700 hPa的位势高度场的环流形势与500 hPa基本一致(图略)。

分析“烟花”在进入安徽前后过程中台风结构、雨带结构和云带的变化特征(图4)可知,27日08时,台风主体云系基本呈圆形分布,TBB小于 -60°C 的强负值表示的对流云主要出现在台风周围的东南侧,“烟花”西侧的冷式切变线位于安徽沿江,在江苏的沿江和安徽的江南均出现了TBB小于 -50°C 的低值区。研究表明,在切变线影响下,TBB在 $(-60\sim-50)^{\circ}\text{C}$ 之间出现强降水的概率最大^[21](图4a),对应江苏的沿江和安徽江

南的强降水落区(图2b)。TBB值的降低与降水强度有比较好的一致性,这说明对流云团的强盛程度与强降水密切相关^[22]。27日14时,TBB场的低值区面积增大,覆盖安徽淮河以南南部、江苏北部,对称的分布在“烟花”南北两侧,同时伴随TBB梯度增强(图4b)。对应着这个时段在安徽的江淮之间东部,江南大部分地区和江苏北部的强降水落区(图2c)。随着“烟花”进入安徽,28日08时,“烟花”与西风槽云系逐渐合并,冷空气与台风北侧云系结合,强盛的东南气流将东海的水汽补充到台风东侧,江苏的北部850 hPa风速可达22 m/s。在两者的配合下,台风的东侧和北侧对流云团旺盛发展。在淮北地区西部和江苏西部出现了小于 -60°C 的TBB低值区(图4c),与这个时段的强降水位置相对应(图2f)。28日14时,位于“烟花”外围东侧的强降水云系逆时针旋

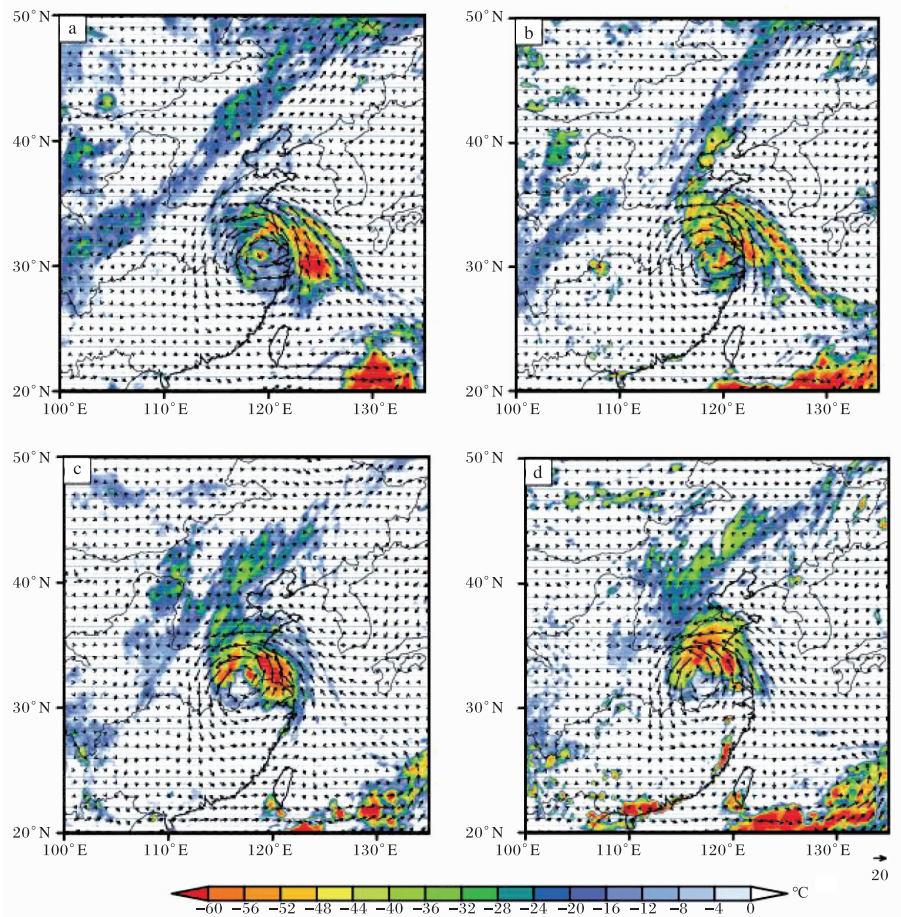


图4 2021-07-27—28 850 hPa 风场(单位为 m/s)和 TBB(填色)分布场
(a 27 日 08 时;b 27 日 14 时;c 28 日 08 时;d 28 日 14 时)

转至其北部,“烟花”中心以南的云系也逐渐消散,出现“空心”结构^[23-24],大风和降水区主要集中在环流北侧(图 4d)。TBB 场的低值区及梯度下降区也随之北移,伴随强降雨中心移至江苏北部和安徽淮北地区北部^[25](图 2g)。

除了有利的环境场外,台风暴雨形成还与水汽输送有关^[26]。低空急流是水汽的重要载体之一,急流越强、与台风维持的时间越长、导致的降水则越强^[27]。27 日 14 时,“烟花”移至江苏南京市,水汽通量大于 $20 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$ 已覆盖安徽至江苏大部分地区,基本呈对称分布,其中在“烟花”东北侧水汽通量达到 $35 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$ 且风速大于 $20 \text{ m}/\text{s}$ 。从水汽通量散度可知,安徽江南南部为水汽通量辐合区(图 5a)。在 700 hPa,水汽通量大于 $20 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$ 覆盖安徽

至江苏部分地区,且也基本呈对称分布(图略)。同时安徽江南南部 200 hPa 存在强辐散区,强度超过 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 6a),当高空表现为辐散时,次级环流产生的抽吸作用有利于低空的上升运动和辐合作用的加强,从而对此阶段安徽青阳强降雨的维持产生正贡献^[28-29](图 2c)。随着“烟花”移入安徽,28 日 08 时,无论是 700 还是 850 hPa,“烟花”东到东北侧的东南急流依旧维持,水汽通量场转为非对称分布,强水汽输送带和强水汽辐合区均位于“烟花”北侧(700 hPa 图略)。安徽淮北地区水汽通量超过 $45 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$ 且维持着水汽通量辐合(图 5b)。高空辐散场也移至台风中心的东到东北侧,在安徽淮北地区辐散中心强度超过 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 6b),与此阶段“烟花”北侧安徽淮北地区的强降雨相对应(图 2f)。

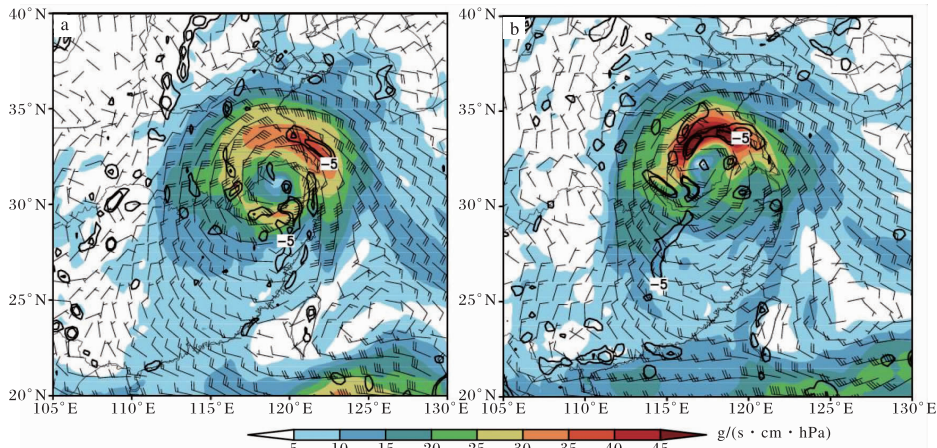


图 5 2021-07-27—28 850 hPa 风场(风杆;单位为 m/s)、水汽通量(填色)和水汽通量散度(等值线;单位为 $10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$)(a 27 日 14 时;b 28 日 08 时)

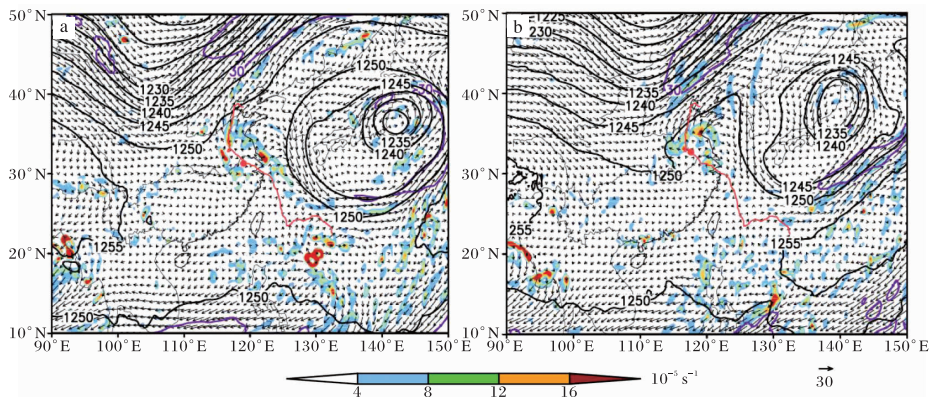


图 6 2021-07-27—28 200 hPa 的高度场(黑色等值线;单位为 dagpm)、风场(单位为 m/s ;紫色等值线为 $\geq 30 \text{ m}/\text{s}$ 的急流区)以及散度场(填色)(红色圆点为台风中心位置;红色实线为台风路径;a 27 日 14 时,b 28 日 08 时)

4 台风“烟花”进入安徽前后热动力结构对比

台风热动力结构是影响降水强度和落区的重要因素之一^[10,30]。从“烟花”在垂直方向上的暖心结构变化过程可以看出,26日20时(图7a),受槽后西北气流影响,冷空气从低层逐渐入侵台风环流,800 hPa以下的暖心结构被破坏,暖心位于250 hPa附近,温度距平最大值为4.1℃,暖心南北两侧等温线密集,温度梯度大,结构对称。随着台风继续北上,27日14时暖心形状已不均匀,暖心结构强度减弱,中心分裂为2个,次暖心在700 hPa附近,只比周围大气高1℃。温度距平最大值位于300 hPa附近,强度为2.6℃,暖心南北两侧温度梯度减弱,台风结构趋于松散,但垂直结构基本对称(图7b)。假相当位温(θ_{se})是一个结合湿度、气压和温度来表征大气中能量的保守物理量,也是反映大气不稳定能量的一个温湿特征量,当 θ_{se} 随高度减小时,表示对流性不稳定,有利于强降水的发生,是暴雨诊断和预报的有力工

具^[11,31]。 θ_{se} 等值线密集区为能量锋区,中小尺度对流系统通常在能量锋区产生,导致此处发生强降水的可能^[32]。此时,“烟花”南北两侧400 hPa以下均为对流不稳定,低值中心分别在25°N和36°N,分别为339 K和345 K,800 hPa以下 θ_{se} 等值线密集(图7b),对应此时段“烟花”南北两侧的降水(图2c)。当“烟花”进入安徽后(28日08、20时)与27日14时相比,300 hPa和700 hPa的暖心结构均明显加强,水平范围分布变广,暖心外侧的温度梯度变大,低层暖中心位于“烟花”南侧,并没有与台风北侧的安徽淮北地区的强降水落区对应起来(图7c、7d)。但“烟花”北侧 θ_{se} 低值区的范围和强度明显强于南侧,低值中心值减小到330 K,高度降低到700 hPa附近,大气中低层变得更加对流不稳定。当“烟花”进入安徽后,台风暖心结构加强且维持,陈联寿和丁一汇^[1]指出正是由于台风内部暖湿空气大量上升,并因此不断地释放凝结潜热的缘故而造成了台风的暖心结构,同时

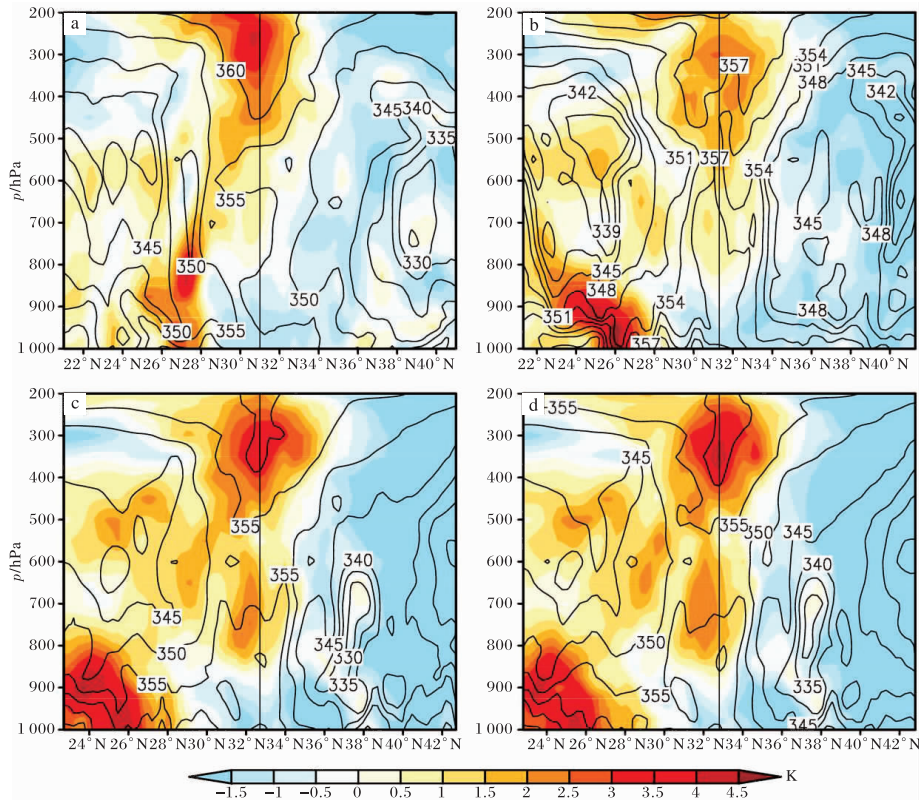


图7 2021-07-26—28 温度距平场(填色)和假相当位温(θ_{se})(等值线;单位为K)沿台风中心的径向垂直剖面(黑线表示穿过台风“烟花”中心的中轴线;a 26日20时, b 27日14时,c 28日08时,d 28日20时)

潜热释放较强表征降水较强。根据第二类条件不稳定理论(CISK 机制),如果台风登陆后暖中心不被破坏,持续维持,将有利于高空辐散的维持,为台风产生暴雨提供一个良好的背景条件。再配合上冷下暖的对流不稳定状态,导致安徽淮北地区北部更加强烈的降水(图 2f~图 2h)。

图 8 是涡度、垂直速度和散度场沿台风中心的经向剖面图。“烟花”在进入安徽前(图 8a),散度场基本对称分布在台风中心,正涡度中心与上升运动叠加在“烟花”中心的两侧,“烟花”云系在云图上基本也呈对称(图 4a)分布。此时在“烟花”南侧有一强度超过 $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合中心,位于 950 hPa 附近,400~500 hPa 为辐散区,低层辐合、高层辐散使得“烟花”南侧的垂直上升运动强于北侧,上升运动发展到 400 hPa。垂直上升运动越强越有利于南侧强降水的产生。热带气旋不仅低层表现为辐合,同时也具有深厚的涡旋特征^[33]，“烟花”200 hPa 以下均维持着正涡度。

对应此阶段降水基本均匀分布在路径南北两侧,但位于“烟花”南侧的安徽江南部分地区的降水偏强(图 2b)。27 日 14 时(图 8b),“烟花”南侧的低层辐合加强,强度超过 $-20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,此时位于 29°N 和 34°N 附近出现明显的下沉区,分别与“烟花”南北两侧的上升区形成垂直环流圈,且上升运动明显强于下沉运动。根据 Braun 等^[34]的研究结果表明,该结构在增强水汽垂直向上输送的同时,也加强了凝结潜热释放,对“烟花”暖心结构的维持有正贡献,从而减缓了其衰亡速度,有利于降水的维持。对应此阶段在安徽江淮之间东部,江南大部分地区的强降水,黄山、滁州和来安 6 h 累积降水超过 50 mm(图 2c)。“烟花”进入安徽后(图 8c),垂直速度场呈现明显的非对称性,“烟花”北侧 200 hPa 以下均为上升运动,且表现出随高度向北倾斜的特点。同时,北侧的辐合中心强度加强,与正涡度大值中心基本重合,表明在“烟花”北侧上空低层有很强的气旋性辐合,这种垂直

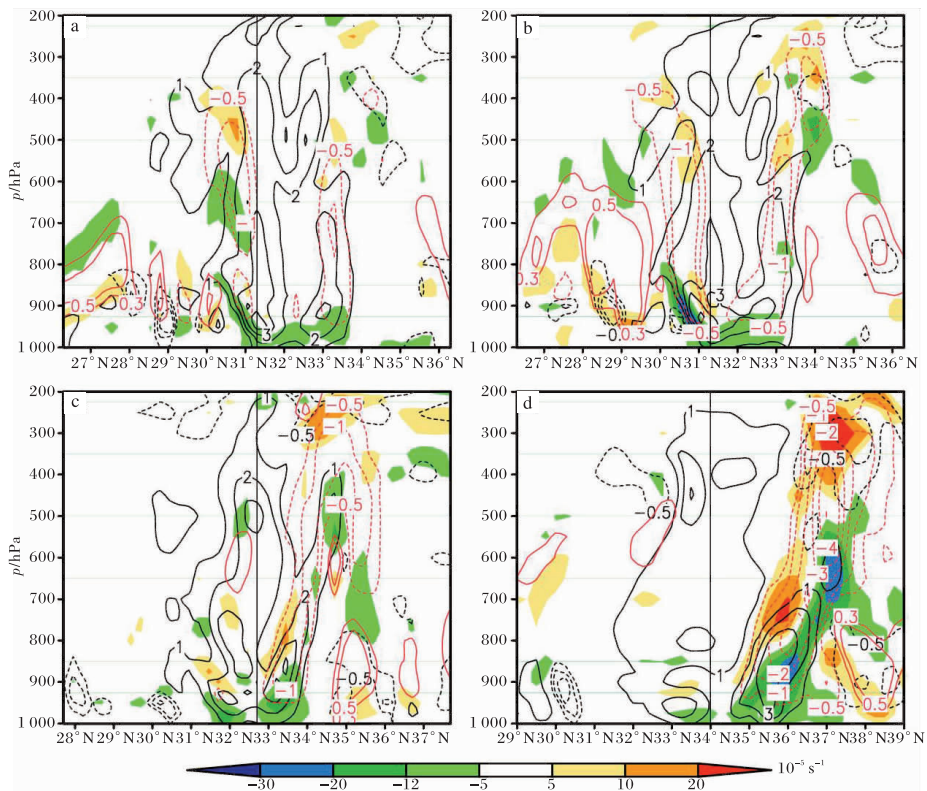


图 8 2021-07-27—28 垂直速度(红色等值线;单位为 Pa/s)、涡度(黑色等值线;单位为 10^{-4} s^{-1})以及散度(填色)沿台风中心的经向垂直剖面(黑线表示穿过台风“烟花”中心的中轴线;a 27 日 08 时,b 27 日 14 时,c 28 日 08 时,d 29 日 08 时)

结构不仅加强垂直上升运动,对流层中层由于凝结潜热的释放而产生的温度扰动又加强了低层辐合^[31],为安徽淮北地区的暴雨提供了有利的动力条件和重要能量来源,也有利于“烟花”登陆后的维持(图 2f)。29 日 08 时(图 8d)，“烟花”北侧辐合区高度上升到 500 hPa,辐合强度明显增强,在 600 hPa 和 900 hPa 附近有两个强辐合中心,强度超过 $-20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,且辐合区和辐散区均随着高度的增高向“烟花”北侧倾斜。辐合、辐散场的配置使得北侧 200 hPa 高度以下的垂直上升运动明显增大,强度达到 -5 Pa/s ,同时在 38°N 有弱的下沉区与之配合,而其南侧无明显的辐合上升运动。“烟花”北侧在 600 hPa 和 900 hPa 附近有两个正涡度中心,与强辐合中心基本重合。“烟花”中心北侧持久深厚的上升运动和次级环流有利于北侧强降水的出现,对应着“烟花”中心北侧山东北部的强降水。山东禹城 6 h 累计降水量达到 77.3 mm。

5 结论与讨论

(1)“烟花”在 26 日 20 时—27 日 20 时在安徽地区造成的降水基本沿台风路径呈南北对称分布,强降水主要位于安徽江南。在 27 日 20 时—28 日 20 时,强降水主要位于路径右侧,台风中心的偏北以及东北方向,影响安徽淮北地区,表现出明显的非对称性,6 h 降水量超过 50 mm 和 100 mm 的站次、最大 6 h 累积降水量和最大小时雨强明显大于 26 日 20 时—27 日 20 时。强降水区均主要位于 TBB 低值区小于 -50°C 的区域内,并随 TBB 低值带的变化而摆动。

(2)“烟花”进入安徽前水汽辐合和强水汽输送通量区基本沿台风呈对称分布,随着其西移北上,东南急流在“烟花”东至东北侧的维持使得其北侧水汽辐合和水汽通量强度明显强于南侧,为台风北侧强降水的产生提供了充足的水汽条件。高空辐散产生的抽吸作用加强了“烟花”低空辐合上升运动,对暴雨维持有正贡献。

(3)“烟花”暖心结构的持续维持为强降水的产生提供了较好的热力条件。在进入安徽后,尽管低层南侧的暖中心并没有与台风北侧强降水落区相对应,但“烟花”暖心结构明显加强,北侧 θ_{se}

低值中心值减小到 330 K,高度降低到 700 hPa 附近,强度和范围明显强于南侧,再配合上冷下暖的对流不稳定状态,导致安徽淮北地区北部更加强烈的降水。

(4)垂直速度场和散度场在“烟花”进入安徽前基本呈对称分布,且台风上空一直维持着强大的气旋性环流。“烟花”进入安徽后动力结构发生明显变化,“烟花”北侧辐合区高度上升至 200 hPa,强度增强至 -5 Pa/s ,且随高度升高向台风北侧倾斜,配合高空辐散抽吸作用使得北侧的垂直上升运动明显大于南侧,同时正涡度环流与强辐合中心基本重合,加强了对流层中层凝结潜热的释放,为安徽淮北地区的暴雨提供了有利的动力条件和重要能量来源。

(5)文中主要对“烟花”进入安徽前后水汽输送和动、热力结构与降水分布的关系进行了分析,所做的讨论还比较初步。并没有充分考虑中小尺度系统发展、地形作用等因素。影响台风降水落区和强度的原因相当复杂,未来还需要高分辨数值模拟和大量个例的总结等更加深入的工作。

参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社,1979:1-3.
- [2] 李江南,王安宇,杨兆礼,等. 台风暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报,2003,19(增刊):152-159.
- [3] 梁必骥,梁经萍,温之平. 中国台风灾害及其影响的研究[J]. 自然灾害学报,1995,4(1):84-91.
- [4] 张胜军,陈联寿,徐祥德. Helen 台风(9505)异常路径的诊断分析与数值影响的分析[J]. 大气科学,2005,29(6):937-946.
- [5] CORBOSIERO K L, MOLINARI J. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(2): 366-376.
- [6] 史得道,易笑园,刘彬贤,等. 台风“达维”不对称结构特征分析[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(3): 10-17.
- [7] 钮学新,杜惠良,滕代高,等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 76-80.

- [8] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 106-115.
- [9] 岳彩军, 寿绍文, 曾刚, 等. “海棠”(Haitang)台风降水非对称分布成因初步研究[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1333-1342.
- [10] 颜玲, 周玉淑, 王咏青. 相似路径台风 Soudelor (1513)与 Matmo(1410)登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 297-310.
- [11] 周芯玉, 程正泉, 涂静, 等. 台风艾云尼非对称降水及动热力结构演变特征分析[J]. 气象学报, 2020, 78(6): 899-913.
- [12] 徐红, 程攀, 王瑞丽. 台风“海燕”过境海南岛数值模拟及暴雨成因诊断[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 506-510.
- [13] 林小红, 蔡义勇, 韩美, 等. 双台风“纳沙”和“海棠”登陆后强度变化成因及对对比分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(2): 1-11.
- [14] 郭荣芬, 肖子牛, 鲁亚斌. 登陆热带气旋引发云南强降水的环境场特征[J]. 气象, 2013, 39(4): 418-426.
- [15] 黄昌兴, 江敦双, 李欣, 等. 影响山东半岛的两次台风暴雨对比分析[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(3): 70-77.
- [16] 李慧琳, 高松影, 徐璐璐, 等. 影响辽东半岛两次相似路径的台风对比分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(1): 6-13.
- [17] 梁军, 张胜军, 李婷婷, 等. 台风布拉万(1215)北上引发辽东半岛强降水的诊断分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 990-996.
- [18] 陈俊, 平凡, 王秀春, 等. 台湾岛地形对“麦德姆”台风的影响[J]. 大气科学, 2017, 41(5): 1037-1058.
- [19] 刘武, 李耀东, 史小康. FY-2G 地表温度反演产品改变模式初值对一次台风暴雨模拟的影响[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 26-34.
- [20] 李英, 陈联寿, 雷小途. 变性台风 Winnie(9711)环流中的锋生现象[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 629-639.
- [21] 陈晓红, 胡雯, 周扬帆, 等. 2007年汛期淮河流域连续性大暴雨 TBB 场分析[J]. 气象, 2009, 32(2): 58-63.
- [22] 王芬, 王文勇, 刘相, 等. FY-2 卫星黑体亮 TBB 与黔西南短时强降水的关系[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(1): 1-8.
- [23] 林小红, 吴建成, 刘通易, 等. 三个典型登闽空心结构台风强降水分布差异分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(1): 10-17.
- [24] 郭达烽, 周芳, 陈翔翔, 等. 登陆台风“麦德姆”的空心结构及其特征[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 10-20.
- [25] 黄增俊, 黄芳, 黎惠金, 等. 广西一次强降雨 TBB 场特征分析[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 906-914.
- [26] 邓国, 周玉淑, 于占江. 台风 Dan(9914)的水汽输送特征[J]. 热带气象学报, 2005, 21(5): 533-541.
- [27] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 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, 2005, 29(1): 91-98.
- [28] 刘硕, 李得勤, 赛瀚, 等. 台风“狮子山”并入温带气旋过程及引发东北强降水的分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 804-816.
- [29] 颜玲, 周玉淑, 刘宣飞. 1410号台风 Matmo 登陆前后的动热力结构演变和水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 2017, 41(2): 289-301.
- [30] 孙密娜, 韩婷婷, 王艳春. 北上台风“安比”强降水落区变化特征及其成因[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 569-580.
- [31] 曹宗元, 刘飞, 阙成蛟, 等. 相似路径台风“麦德姆”(1410)与“韦帕”(0713)对比分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(6): 77-83.
- [32] 曹宗元, 陈淑琴, 刘飞, 等. 相似路径台风“天鹅”(1515)和“珊珊”(0613)降水差异分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 48-56.
- [33] 吴海英, 曾明剑, 王卫芳, 等. 1211号“海葵”台风登陆后引发两段大暴雨过程的对比分析[J]. 大气科学学报, 2015, 38(5): 670-677.
- [34] BRAUN S A. High-resolution simulation of hurricane Bonnie (1998): Part II: water budget[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63(1): 43-64.