

何斌,楼茂园,李海军,等,2020.集合预报对台风天鹅(2015)远距离暴雨的不确定性研究[J].气象,46(1):15-28. He B, Lou M Y, Li H J, et al, 2020. Research on uncertainty of ensemble forecasts of the far distance torrential rainfall by Typhoon Goni (2015)[J]. Meteor Mon, 46(1):15-28(in Chinese).

集合预报对台风天鹅(2015)远距离暴雨的不确定性研究^{*}

何斌^{1,2} 楼茂园³ 李海军¹ 范晓红¹ 陆琛莉¹ 潘士雄¹

¹ 嘉兴市气象局,嘉兴 314050

² 上海台风研究所,上海 200030

³ 浙江省气象学会,杭州 310008

提 要: 2015 年 8 月 23—24 日期间台风天鹅引发华东中部沿海地区出现暴雨或大暴雨天气。基于欧洲中期天气预报中心的集合预报分析导致此次远距离暴雨预报不确定的关键原因,并利用集合敏感性分析方法研究影响此次暴雨过程的主要天气系统的敏感区域,此外对暴雨发生发展的热动力机制展开探讨,主要结论包括:集合预报对此次台风天鹅引起的远距离暴雨的可预报性明显偏低,仅在暴雨发生前 24 h 才做出较大调整。在不同起报时次下,当台风路径的系统性偏差最小时,台风降水集合预报也最接近实况,但是进一步的分析表明,台风路径误差与降水量级之间的对应关系并不确定。不同雨量成员组间中低层环流场的对比分析表明,高空槽的预报差异是集合预报不确定的主要原因,高空槽东移加深有利于增加暴雨区的斜压不稳定,也有利于增强对流层低层的水汽输送急流带。500 hPa 高度场的敏感性分析表明无论是初始场还是预报场,暴雨区平均降雨量均与高空槽的东移和加深显著相关,且随着预报时次的临近,显著相关区域向低槽下游明显扩大。此外还发现高空槽的东移有利于增强(减弱)暴雨区左(右)侧低层冷空气的强度,使得台风右侧更多暖湿气流向暴雨区输送。

关键词: 集合预报,台风远距离暴雨,预报不确定性,集合敏感性分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.002

Research on Uncertainty of Ensemble Forecasts of the Far Distance Torrential Rainfall by Typhoon Goni (2015)

HE Bin^{1,2} LOU Maoyuan³ LI Haijun¹ FAN Xiaohong¹ LU Chenli¹ PAN Shixiong¹

¹ Jiaying Meteorological Office of Zhejiang Province, Jiaying 314050

² Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

³ Zhejiang Meteorological Society, Hangzhou 310008

Abstract: A torrential rainfall caused by Typhoon Goni during 23—24 August 2015 influenced some coastal areas in East China. This paper utilizes the ECMWF ensemble forecasts to study the key reason for the forecast uncertainty of the far distance torrential rainfall and uses the ensemble sensitivity method to investigate the sensitivity areas of the primary weather system. Meanwhile, the thermodynamic formation mechanisms of the torrential rainfall are also discussed. It is indicated that the predictability of ensemble forecasts of the typhoon-induced far distance torrential rainfall was obviously low and the significant forecast adjustment occurred just 24 hours before the torrential rainfall. At initial time when the systematic track error was minimum, the ensemble precipitation forecast was mostly close to the observation. But

^{*} 浙江省自然科学基金项目(LY19D050001)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-030)共同资助

2018 年 8 月 22 日收稿; 2019 年 4 月 10 日收修定稿

第一作者:何斌,主要从事天气预报业务及研究. Email: zjuh@126.com

further analysis shows that the correlation between the deviation of typhoon track and the precipitation level is uncertainty. The contrastive analysis of the mid- and lower-circulations between two ensemble groups at different precipitation levels indicates that the forecast difference of the upper trough is the main cause for the forecast uncertainty. The eastward movement and intensification of the upper trough not only increased the baroclinic instability in the torrential rainfall area, but also enhanced the circulation magnitude in the side of the typhoon facing the area. The sensitivity analysis on 500 hPa geopotential height shows that, whether on the initial field or on the forecast fields, the mean precipitation in the torrential rainfall area has notable correlation with the movement and intensification of the upper trough. With the increasing forecast time, the areas with significant correlation expand downstream of the upper trough. In addition it is found that the movement of the upper trough can enhance (reduce) the intensification of the cold air on the left (right) side of the torrential rainfall area and make more moisture air on the right side of the typhoon transported to the torrential rainfall area.

Key words: ensemble forecast, typhoon-induced far distance torrential rainfall, forecast uncertainty, ensemble sensitivity analysis

引 言

台风降水是台风研究中的重要内容之一。Chen et al(2010)认为台风降水可分为核心区降水、螺旋雨带、台风内部中小尺度系统降水、不稳定降水、台前飚线降水和台风远距离降水共 6 类。在这 6 类中,台风远距离降水比较特殊,它发生在台风直接影响范围之外,但又与台风之间存在着内在的物理联系(陈联寿,2007)。台风远距离降水往往是中低纬度环流系统相互作用的结果,其降雨量并不逊于台风主体雨量。朱洪岩等(2000)利用数值模式研究了台风和西风槽对台风远距离降水的影响,指出台风强度影响台风东侧东南气流的输送,进而影响降雨强度,同时中纬度西风槽为暴雨的产生和发展提供了有利的大尺度动力条件。此外许多统计研究结果也表明(杨晓霞等,2008;丛春华等,2012),台风本体的暖湿气流能否输送到西风槽前对于暴雨的产生至关重要。孙兴池等(2009)在对一次台风远距离暴雨的形势场研究中指出,西风带系统的后倾使得低层影响系统受高空槽前正涡度平流影响,是降水发生的环流背景。

一般而言西风槽、副热带高压以及台风本体等中低纬度系统的相对位置和强度是引起台风远距离暴雨预报不确定性的主要原因。此前许多气象学者主要通过预报场和实况场的对比或是利用数值模拟试验来分析预报不确定性,而集合预报可以直接以离散度的形式提供预报不确定信息,基于这些信息,

可以了解某个天气系统发展与否的机理(杜均和李俊,2014;Li et al,2014)。集合预报不确定性分析的另一种途径是敏感性分析方法,该方法在可预报性研究中广泛应用,可用于确定初始场的变化对于之后预报的影响程度(Ancell and Hakim,2007)。其最初是由 Hakim and Torn(2008)提出的,主要应用于目标观测(Torn and Hakim,2008),即通过对预报量敏感的区域提供一定的观测信息从而提高预报质量。近年来许多气象学者利用集合敏感性方法从天气动力角度深入分析预报不确定性存在的原因。Qian et al(2013)利用集合敏感性方法研究台风 Megi 的异常路径指出初始 24 h 移动距离以及转向角度与 500 hPa 高度场之间存在较密切的联系。王毅等(2017)同样利用该方法揭示了降水预报对于天气系统的敏感性,并认为暴雨对高原涡比西南涡更加敏感。Zheng et al(2013)从集合敏感性的角度研究了美国东海岸的一次暴风雪过程,揭示了与风暴气旋强度和路径的不确定相关的早期敏感性区域和天气系统,这有助于预报员更好地理解预报中存在的 uncertainty。

本文选取 2015 年第 15 号台风天鹅作为研究对象,该台风在移动过程中不但出现异常转折,而且在随后的东北行过程中还给华东中部沿海地区带了严重的暴雨天气过程,而当时的业务预报也不太成功。目前国内利用集合预报开展台风远距离暴雨的预报不确定性研究工作仍较少,因此本研究将基于 EC-MWF 集合预报分析导致此次远距离暴雨预报不确定的关键原因,并利用集合敏感性方法确定影响此

次暴雨过程的主要天气系统的敏感性区域,最后在此基础上进一步分析有利于此次暴雨过程发生发展的热动力物理机制,希望通过本研究,为集合预报产品在台风暴雨预报中的更好应用提供有益的参考。

1 数据与方法

1.1 集合预报及实况数据

本次研究使用的台风实况路径为上海台风研究所编制的最佳路径(best track, BST)集,集合预报路径来自于中国气象局提供的 ECMWF 实时集合预报路径。集合预报的气象场数据则取自全球交互式大集合中(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, TIGGE)的 ECMWF 集合预报数据集*,其高空和地面场的分辨率均为 0.5° 。高空场包括位势高度、UV 分量、水汽及气温,地面场仅使用降水,起报时次均为 20 时(北京时,下文同)。集合成员数为 51 个,其中 1 个控制成员,50 个扰动成员。降水实况资料取自江苏、上海、浙江的中尺度自动站观测数据,使用客观分析方法将站点数据插值到网格点上,由于集合预报的分辨率为 0.5° ,而目前中尺度自动站的分辨率可达 10 km 左右,为了匹配集合预报降水场的格点尺度,对高分辨率的实况降水场进行滤波处理以过滤降水场中的小尺度扰动,滤波方法采用气象中常用的二次平滑滤波法。

1.2 台风路径误差分解方法

依据 Froude et al(2007)对于副热带气旋轨迹的阐述,总的路径误差(total-track error, TTE)可以分解为沿观测路径方向的误差(along-track error, ATE)以及垂直于观测路径方向的误差(cross-track error, CTE)。按此规定,正(负)ATE 表示台风的预报路径快(慢)于观测路径,类似的正(负)CTE 表示台风预报路径位于观测路径的右(左)侧。TTE 的分解示意图如图 1 所示。

1.3 集合敏感性分析方法

Hakim and Torn(2008)首先使用集合敏感技术计算了预报量对初始场的敏感性,Ansell and Hakim(2007)又对其展开了更深入的分析。对于一

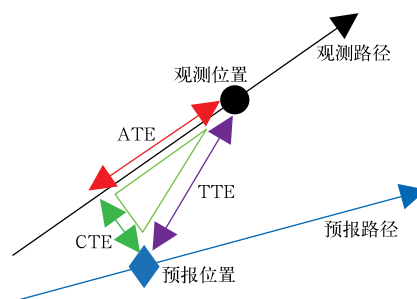


图 1 TTE 分解示意图

(引自 Leonardo and Colle, 2017;
圆形和菱形分别代表台风的观测
和预报位置,黑色和蓝色箭头表示
台风的观测和预报路径方向)

Fig. 1 Diagram of TTE decomposition
(cited from Leonardo and Colle, 2017;
Circle and diamond represent observed and
forecast typhoon positions respectively, and
the black and blue arrows represent observed
and forecast directions of typhoon track)

个集合成员数为 M 的集合预报,预报量 J 的集合平均值对于某个初始分析场变量 x 的敏感性由下式给出:

$$\frac{\partial J}{\partial x_i} = \frac{cov(\mathbf{J}_M, \mathbf{x}_{iM})}{var(\mathbf{x}_{iM})}$$

式中: \mathbf{x}_{iM} 和 \mathbf{J}_M 分别为第 i 个状态变量和预报量 J 的 $1 \times M$ 集合向量值; cov 为两个参数间的协方差, var 为方差。敏感性也可以被定义为:

$$sensitivity = \frac{cov(\mathbf{J}_M, \mathbf{x}_{iM})}{\sqrt{var(\mathbf{x}_{iM})}}$$

这样敏感度就具有和预报量相同的量纲,它表示与 1 个标准差的初始场扰动相对应的预报量的变化,如果将上式右边除以 \mathbf{J}_M 的标准差,则可以得到下式:

$$correlation = \frac{cov(\mathbf{J}_M, \mathbf{x}_{iM})}{\sqrt{var(\mathbf{x}_{iM})} \sqrt{var(\mathbf{J}_M)}}$$

上式为集合预报量 J 和 x_i 之间的相关系数,也可以看作对预报量进行标准化处理后的敏感度,下文中的集合敏感性分析将采用该定义。

2 台风天鹅远距离暴雨过程概述

2.1 降水实况

2015 年 8 月 23 日 20 时至 24 日 20 时江苏东南

* <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/tigge>

部、上海以及浙江东北部地区出现暴雨或大暴雨天气过程,可以看到 100 mm 以上的强降雨带主要位于江苏南通和上海北部地区,部分地区 24 h 累积雨量甚至达到了 200 mm 以上(图 2a)。从该时段内江苏南通和上海嘉定站的逐小时雨量变化可以看到(图 2b),23 日上半夜上海嘉定已出现小时雨量超过 10 mm 的对流性降雨。但 24 日 00 时以后降雨明显减弱,而南通站在该时刻后雨强明显增大,02—03 时的雨量超过 30 mm,此后雨强总体缓慢减弱。受江苏东南部雨带南压影响,上海嘉定 06 时起降雨迅速增强,08—09 时的雨量接近 60 mm,10 时以后雨强明显减弱。从上述分析可见,23 日夜间至 24 日

白天,江苏东南部到上海地区出现的强降雨过程具有持续时间长、影响范围较大等较明显的系统性特征。

2.2 暴雨发生的大尺度背景场

21 日前西太平洋副热带高压(以下简称副高)和大陆高压连为一体,呈东西向分布(图略),台风天鹅受副高南侧偏东气流影响,以西行为主。22 日副高明显东退,偏东引导气流消失,台风受其东南侧高压影响,逐渐向北移动,此时,在东北地区存在一闭合低压环流,而黄淮和江淮地区则有低槽活动(图 3a)。23 日后期随着台风东侧副高的不断增强,

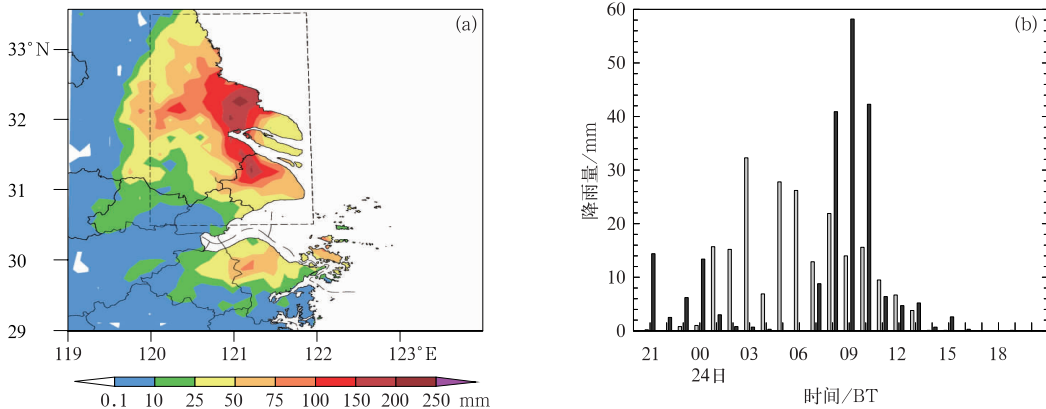


图 2 2015 年 8 月 24 日 20 时前 24 h (a) 累积实况雨量分布(分辨率 0.125°, 虚线框用于计算暴雨区平均降雨量), (b) 南通(灰色)和嘉定(黑色)逐小时降雨量

Fig. 2 (a) Distribution of 24 h accumulated precipitation valid at 20:00 BT 24 August 2015 (resolution: 0.125°; dashed box area is used for calculating mean precipitation), (b) hourly precipitation at Nantong (gray) and Jiading (black)

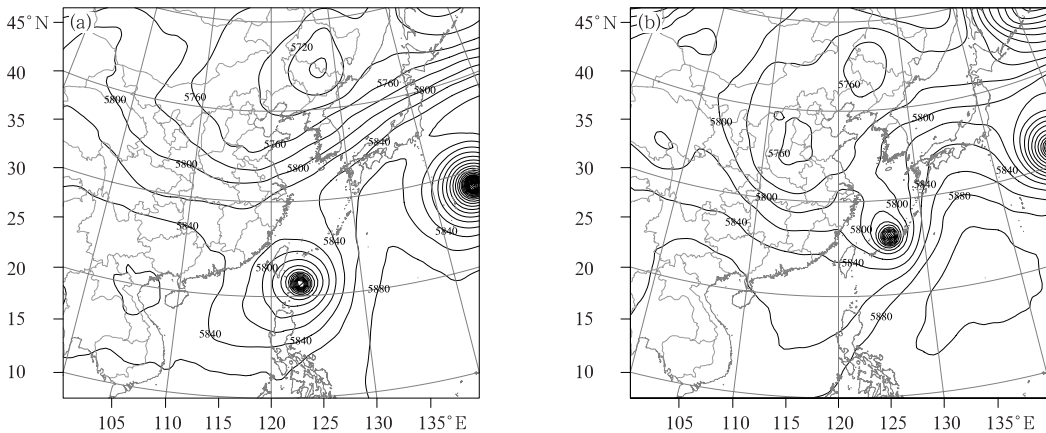


图 3 2015 年 8 月 22 日 20 时(a), 24 日 08 时(b) 500 hPa 位势高度场(单位: gpm)
(数据来自 TIGGE ECMWF 确定性预报的初始场)

Fig. 3 Geopotential height at 500 hPa at (a) 20:00 BT 22 and (b) 08:00 BT 24 August 2015 (unit: gpm)
(data from TIGGE ECMWF deterministic forecast at initial time)

高压脊向北发展明显,台风右侧气压梯度增大,导致其移速加快,同时东北地区低压环流有所减弱,但黄淮和江淮地区的低槽却出现进一步加深的趋势(图 3b)。

3 降水集合预报及其与台风路径的关系

3.1 降水集合预报的不确定性

为了检验不同起报时次上 ECMWF 集合预报对于此次暴雨过程的预报效果,本文计算集合预报各成员和实况在图 2a 中虚线框区域内的平均降雨量,并以箱线图的形式予以比较(图 4),其中平均降雨量通过求取虚线框内所有网格点(0.5° 间隔)上降雨量的平均值得到。可以看到 19—21 日 20 时起报的降水集合预报中的绝大多数成员较实况(横向虚线)明显偏低,控制成员的雨量值均在 10 mm 以下,而 22 日起集合成员的雨量值出现明显增加,控制成

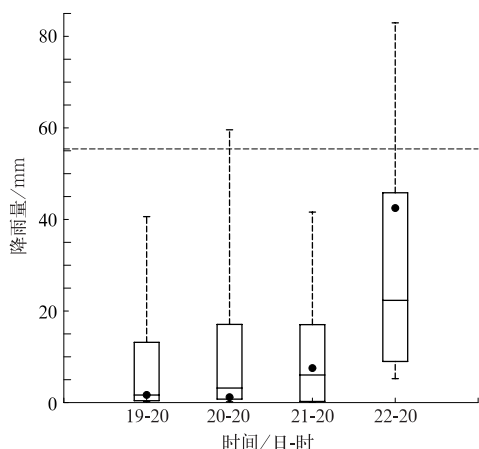


图 4 2015 年 8 月 19—22 日起报的区域平均降雨量的集合预报概率分布箱线图(横向虚线为实况,圆点为控制成员,方框下端、中间、上端分别表示 10%、50%、90% 的分位线,纵向虚线的下端和上端分别代表最小值和最大值)

Fig. 4 Probabilistic distribution of ensemble forecasts for mean area precipitation in 19–22 August 2015
(Horizontal dashed line is the observed value; dot represents ensemble control member; the bottom, middle and top lines of box represent 10%, 50% and 90% respectively; the bottom and top ends of vertical dashed line represent minimum and maximum)

员的雨量值已接近实况。这说明 19—21 日的降水集合预报存在较明显的系统性偏差,22 日尽管系统性偏差明显减小,但雨量值的离散度较大,表明降水预报仍存在着较大的不确定性。

3.2 台风移动路径与远距离降水的关系

在台风远距离暴雨中,台风水汽输送对于暴雨的形成至关重要,通常认为台风相对于暴雨区所处的位置或移动路径对水汽输送通道的建立有较明显影响。曹晓岗和王慧(2016)认为造成 ECMWF 确定性预报降水比实况偏东且量级偏小的主要原因是模式预报台风位置偏东 50 km 以上,从而导致台风天鹅右侧东南风急流无法将水汽输送到暴雨区。下面本文从不同起报时次的预报来分析台风移动路径及其与降水的关系。由于本次暴雨过程出现在 23 日 20 时至 24 日 20 时,因此下面将分析与该时段相对应的集合预报路径(图 5 中蓝线)。从图 5a, 5b, 5c 中可以看到 19—21 日集合平均路径均偏向于实际路径(图 5 中红线)的左侧(控制成员亦如此),其中 19 日的移速偏慢,20 日向左侧的偏离度最大,21 日偏离度相对最小,而 22 日预报的集合平均路径误差明显减小,尤其是前 12 h 的路径几乎与实况重合,这表明集合路径的系统性偏差在减小。但对比集合降水分布可以看到,尽管 19—21 日集合预报路径更偏向于暴雨区,但是集合降雨量值却普遍较小,而 22 日随着集合预报路径的系统性偏差进一步减小,区域平均雨量值出现明显上升趋势,这是否说明集合预报路径的系统性偏差与雨量值存在着对应关系? 如果这样的关系成立,那么 19—21 日的集合预报中与实况路径接近的预报成员的雨量值是否也与实况降水更加接近?

为了更清楚地了解集合预报路径与降水的关系,下面将以集合成员路径偏差与降水量级散点图的形式予以说明。从图 6a, 6b 可以看到 19—20 日路径偏差坐标系中点的分布较为零散,且多位于 CTE 零线下方,这说明集合预报路径的发散度较大同时多偏向于观测路径的左侧。在 CTE 的零线附近,即预报路径没有明显横向偏离的情况下,多数成员的平均降雨量仅在 10 mm 以下,少数成员在 10~30 mm,这与实况降雨量仍有较大差异。而与实况降雨量较接近的 30~50 或 50~70 mm 降水成员

的预报路径则明显偏向于观测路径左侧,最大左偏离可达400 km左右,且上述路径在移速上多呈现偏慢的倾向。21日集合路径的发散度明显减小,但CTE零线附近的雨量值仍然偏小(图6c),22日集合路径的系统性偏差进一步减小,且CTE零线附近出现与实况接近的雨量值(图6d)。从上述分析可以看到19—21日的集合预报路径中与观测路径偏离度较小的路径其对应的降雨量值与实况值之间的差异仍较大,22日预报中偏离度较小的路径中既有雨量接近实况的,也存在雨量明显偏小的,这说明台风路径偏差并不是影响此次暴雨过程的主要原因。

4 基于集合预报的形势场的不确定性

4.1 不同集合成员组间的中层环流场差异

为了深入分析引起此次暴雨过程的主要原因,针对22日的集合预报,将各成员的区域平均降雨量进行排序,并按雨量值大小分别选出两组成员,其中一组为雨量值最大的5个成员(简称为MAXP),另一组为雨量值最小的5个成员(简称为MINP),对两组成员的500 hPa位势高度场分别进行集合平均,而后比较两组成员的差异。为了更好地对台风外围的大气环流进行对比分析,有必要将环流系统从原有地理坐标系转换到以台风中心为原点的坐标系,从而避免地理坐标系下可能出现多个位势高度低值中心的情况。具体处理方法如下:首先通过500 hPa上的位势高度确定台风中心,并在经纬度方向上各延伸 $\pm 20^\circ$,得到一个经纬度网格下的位势高度矩阵,再计算组内成员矩阵的平均值。可以看到初始时次在台风东西两侧均存在反气旋高压环流,而距台风中心10个纬距左右的西北方有高空槽活动,两组成员的位势高度场基本一致,仅存在微小的差异(图7a)。12 h以后台风东南侧的副高西伸加强,但两组成员的差异不大,而该时次上的环流差异主要位于台风的西北侧,MAXP成员组中高空槽的5820 gpm高度线和台风本体环流的5820 gpm高度线连接在一起,而MINP成员组中该高空槽高度线仍和台风本体分离,这说明前者的高空槽东移加深较后者明显,因此台风西北侧的高度场出现下降的趋势,而MINP成员组在该地区则存在高空弱脊

(图7b)。24 h以后MAXP成员组内高空槽东移加深的趋势更加明显,已逐渐逼近暴雨区域,而MINP成员组中槽的移动偏慢且强度偏弱(图7c)。36 h后MAXP成员组内高空槽已经完全影响暴雨区域,而MINP成员组在暴雨区域南侧附近出现明显的高压脊(图7d)。此外还可以看到24~36 h内两组成员对于台风东南侧副高的位置和强度的预报差异仍然相对较小,这应是该预报时次集合路径离散度较小的原因,但同时也说明其对此次降水过程的影响并不明显,而高空槽的东移和加强对于暴雨的形成应有重要影响。

4.2 不同起报时次间的中层环流差异

从上文分析可知,尽管19—21日的降水集合预报存在着系统性的偏低,但是部分成员的雨量值也能达到30~50 mm,那么这些成员的大气环流形势和22日的大雨量值成员组是否相似还是存在着较大的差异,为此分别将19—21日的预报和22日的预报中的大雨量值成员组(前5个最大成员构成)的500 hPa平均位势高度场进行对比分析,分析时间均为2015年8月24日08时。可以看到19—21日的预报中台风西北侧的低槽基本呈西南—东北向,并没有东移影响暴雨区域,该地区为弱高压控制,暴雨区域的降水主要由台风东南侧的水汽输送引起,同时台风与副高之间的气压梯度较22日要小,因此台风靠近副高一侧的引导气流偏弱,从而导致台风移速减慢,这有利于延长该地区降雨的持续时间(图8)。从上述分析可以看到,19—21日MAXP成员组的环流形势和22日存在较明显差异,在前者中副高及台风东侧的反气旋环流使得台风路径偏西、移速偏慢(图6a,6b,6c),是造成暴雨区域出现强降雨的主要因素,而后者中低槽的东移加强对暴雨的形成有重要作用。

4.3 不同集合成员组间的水汽差异及环流影响范围

台风本体及外围对流层低层的水汽分布对暴雨的发生有重要影响,为此比较暴雨发生前(图9a)和发生时(图9b)MAXP和MINP两组集合成员在925 hPa上的平均水汽混合比之差。可以看到23日20时(图9a),在台风右侧存在一条水汽增量带,

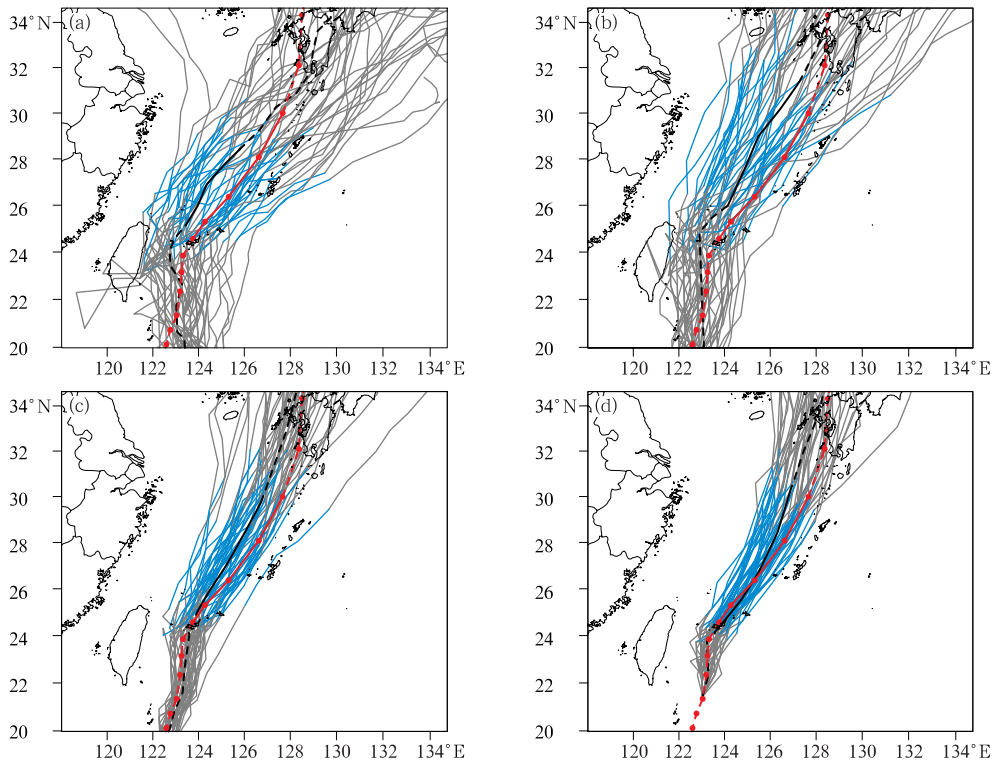


图 5 2015 年 8 月 (a)19 日, (b)20 日, (c)21 日, (d)22 日不同起报时次的集合预报路径(蓝线表示 23 日 20 时至 24 日 20 时的路径, 灰线表示上述时段以外的路径), 集合平均(黑色实线表示 23 日 20 时至 24 日 20 时的路径, 黑色虚线表示上述时段以外的路径)以及实况路径(红色实线表示 23 日 20 时至 24 日 20 时的路径, 红色虚线表示上述时段以外的路径)

Fig. 5 Ensemble forecast tracks (blue lines: tracks from 20:00 BT 23 to 20:00 BT 24, gray lines: tracks during other time periods), ensemble mean tracks (black solid lines: during 20:00 BT 23 to 20:00 BT 24, and black dashed lines: during other time periods) at different initial times, and observed tracks (red solid line: during 20:00 BT 23 to 20:00 BT 24, red dashed line: during other time periods)

(a) 19, (b) 20, (c) 21, (d) 22 August 2015

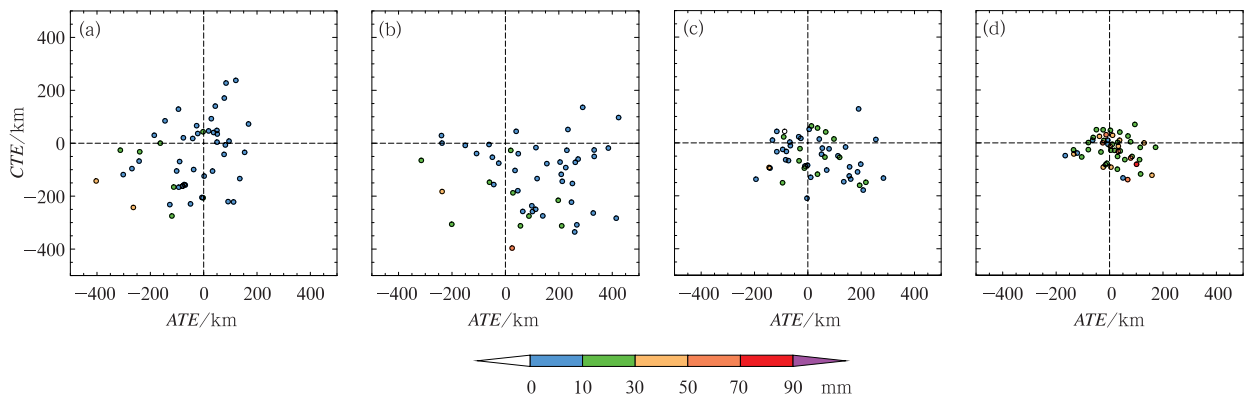


图 6 2015 年 8 月 (a)19 日, (b)20 日, (c)21 日, (d)22 日台风路径偏差与降水量级散点图

Fig. 6 Scatter plot of typhoon track errors and precipitation levels on (a) 19, (b) 20, (c) 21 and (d) 22 August 2015

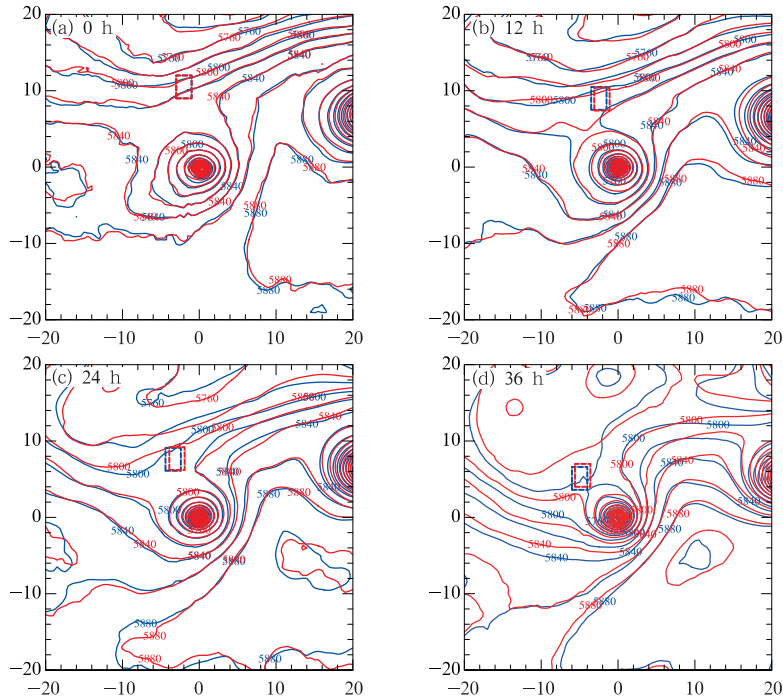


图 7 2015 年 8 月 22 日起报的集合预报中两类集成员组的 500 hPa 平均位势高度场

(a)0 h,(b)12 h,(c)24 h,(d)36 h

(单位:gpm,蓝线为 MAXP 成员组,红线为 MINP 成员组,虚线框代表暴雨区域)

Fig. 7 500 hPa mean geopotential height of two ensemble forecast groups starting from 20:00 BT 22 August 2015

(a) 0 h, (b) 12 h, (c) 24 h, (d) 36 h

(unit: gpm, blue line: group MAXP, red line: group MINP, dashed boxes: the area of torrential rainfall)

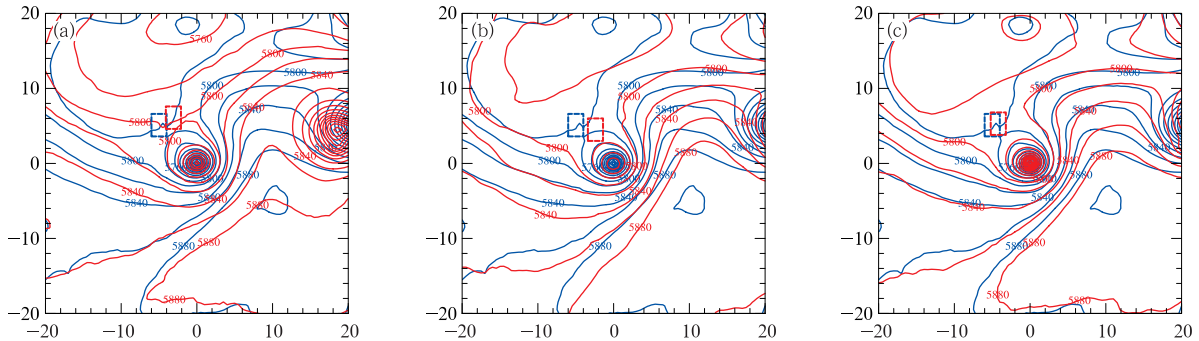


图 8 不同起报时次下 2015 年 8 月 24 日 08 时 MAXP 成员组的 500 hPa 平均位势高度场

(单位:gpm,蓝线均为 22 日起报,图 8a、8b、8c 中红线分别为 19 日、20 日和 21 日起报,虚线框代表暴雨区域)

Fig. 8 500 hPa mean geopotential height of ensemble group MAXP

at 08:00 BT 24 2015 with different initial times

(unit: gpm. Blue line represents starttime from 20:00 BT 22 August 2015; red lines in Figs. 8a, 8b, 8c represent starting from 19, 20, and 21 August, respectively; dashed boxes represent the area of torrential rainfall)

其中包含多个中心值超过 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的小区域,这可能是由于 MAXP 成员组中台风螺旋雨带内的对流活动较 MINP 更加活跃,从而导致其水汽含量

高于后者。从 24 日 08 时可以看到(图 9b)在台风的西北侧出现明显的水汽增量,中心区域就位于暴雨区内,超过了 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,该地区的水汽增量除了

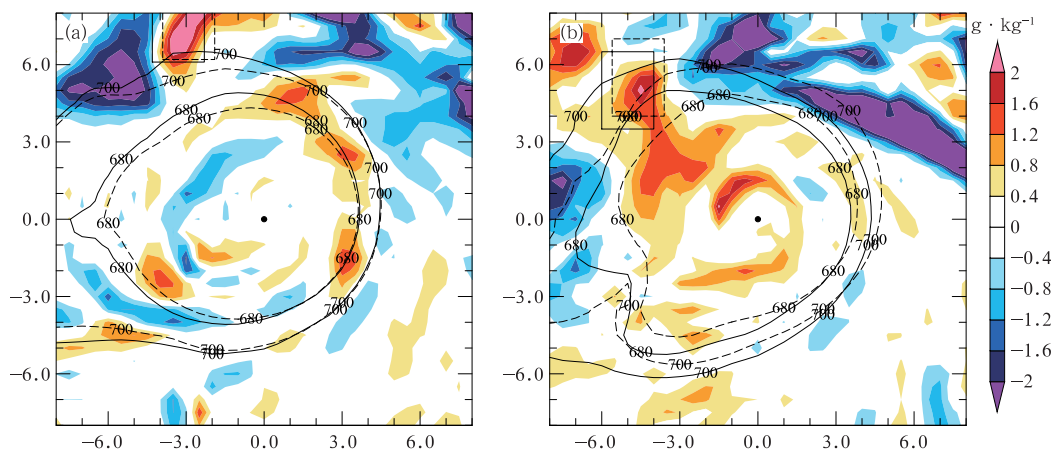


图 9 2015 年 8 月 22 日起报的 8 月 (a)23 日 20 时, (b)24 日 08 时两类集成员组间的 925 hPa 平均水汽混合比之差(填色)、台风外围的位势高度场(等值线, 单位: gpm) (实线为 MAXP 成员组, 虚线为 MINP 成员组, 圆点代表台风中心)

Fig. 9 Difference of 925 hPa mean mixing ratio (color shaded) and 925 hPa geopotential height (contour line, unit: gpm) in the typhoon periphery of two ensemble groups starting from 20:00 BT 22 for (a) 20:00 BT 23, (b) 08:00 BT 24 August 2015 (solid line: group MAXP, dashed line: group MINP, dot: the typhoon center)

与台风右侧东南风的水汽输送有关以外, 还与前述的高空低槽的移入有关, 它使得该地区的大气斜压性增强, 进而从动力上加强了中低层的水汽辐合效应。此外从 925 hPa 台风外围环流场可以看到, 台风左侧的等高线较右侧稀疏, 且结构并不对称, 特别是 24 日 08 时, 台风外围等高线明显向暴雨区伸展, 这有利于扩大水汽输送的范围。MAXP 成员组中 680 gpm 等高线已影响暴雨区, 而 MINP 成员组中仅 700 gpm 等高线影响, 这说明前者的环流范围较后者更大。

5 集合敏感区域及水汽输送的相关性分析

5.1 500 hPa 形势场的集合敏感性分析

根据 1.3 节中对集合敏感度的定义, 本次研究中预报量 J 取集合预报的 23 日 20 时至 24 日 20 时的区域平均降雨量, x_i 取为 500 hPa 位势高度场。需要注意的是预报量敏感度的计算未必仅相对初始扰动, 可以取预报时段前的任何时次或是当前的预报时次。

图 10 为 500 hPa 位势高度和区域平均降雨量间的相关系数场, 下面根据相关系数显著区域(通过 0.05 显著性水平检验, 红色实线或虚线)的分布特

征来分析有利于降雨量增加的环流形势场特征。可以看到 22 日 20 时 115°E 以西, 30°N 附近存在多个相关系数负值区域, 其中心值低于 -0.4, 这表明该地区位势高度降低有利于区域降水量的增加, 与之对应的是 30°N 以北低槽的东移加深。此外还可以看到在台风东北方向的反气旋环流中也存在着相关系数的显著负值区, 此处位势高度的降低有利于低槽向东移动, 同时也使得台风有向东北方向移动的趋势(图 10a)。23 日 08 时相关系数的显著负相关区向低槽下游移动, 表明低槽将继续东移加深, 而台风东北侧高压脊附近也存在着显著负相关区, 表明该地区高压环流的减弱有利于低槽的东移(图 10b)。23 日 20 时和 24 日 08 时在我国中部和华东沿海地区均出现较大范围的显著负相关区, 表明东移低槽对这些地区将有较明显的影响, 尤其是 24 日 08 时在降雨区域的北侧出现中心值为 -0.5 ~ -0.4 的负相关区, 这表明沿海地区的强降雨与该地区受低槽影响相关性较大(图 10c, 10d)。此外还可以看到 24 日 08 时台风东北侧的高压脊以北地区出现大范围的显著正相关区, 表明该时刻高压脊的向北发展有利于台风北侧偏东气流向暴雨区输送更多的水汽。从上述分析可以看到, 无论是初始时次还是预报时次, 基于集合预报的敏感性分析均表明高空槽的加深和东移对区域平均降雨量都有显著的影响, 台风右侧反气旋环流的减弱有利于高空槽

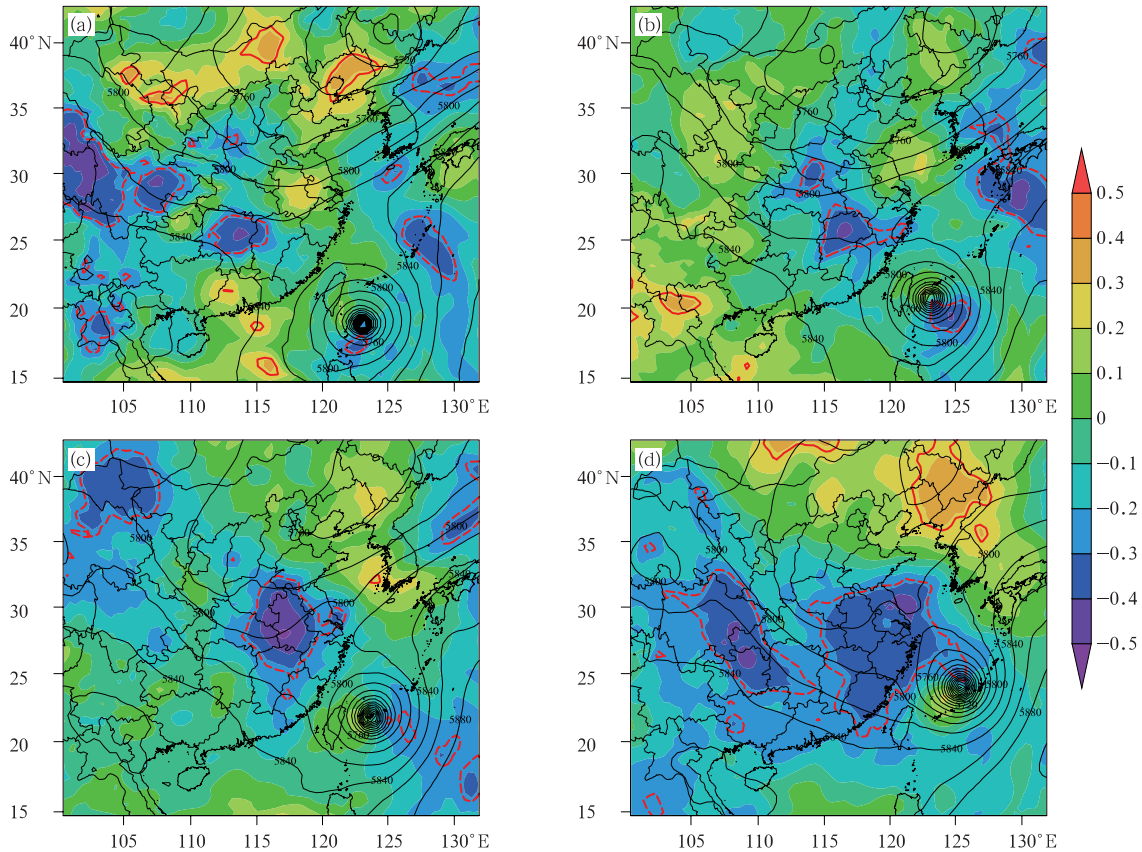


图 10 2015 年 8 月(a)22 日 20 时,(b)23 日 08 时,(c)23 日 20 时,(d)24 日 08 时集合区域平均降雨量与 500 hPa 位势高度之间的相关系数场(填色,红色实线和虚线代表通过 0.05 显著性水平检验)和控制成员的 500 hPa 高度场(黑色实线,单位:gpm)

Fig. 10 Correlation field (color shaded, red solid/dashed line; having passed the 0.05 significance level test) between mean area precipitation and 500 hPa geopotential height of ensemble forecast (black line; the ensemble control member, unit: gpm)

at (a) 20:00 BT 22, (b) 08:00 BT 23, (c) 20:00 BT 23, and (d) 08:00 BT 24 August 2015

的东移,而降水时段内台风东北方向下游高压脊向北发展,有利于台风北侧的水汽输送。

5.2 对流层低层冷空气的敏感性分析

除了高空槽的动力作用以外,低层冷空气扩散也是触发暴雨的重要原因之一,以下利用集合预报数据深入分析不同预报时次上冷空气影响的敏感性区域。本文中使用相当位温(θ_{se})场来表征大气的热力特性,预报量 J 取值同前, x_i 取为 925 hPa θ_{se} 场。可以看到在初始场上(图 11a),华东中部地区出现不连续的负的显著相关区域,这表明这些地区 θ_{se} 值的降低(冷空气加强)有利于降雨量的增加,而该时刻的冷空气与 115°E 附近的低槽有关(图 10a),这表明前次高空槽东移引起的冷空气影响对此次暴雨过程也有作用。23 日 08 时(图 11b),负的显著相关

区域向西移动,且范围有所增大,这与前述 115°E 以西新的西风槽东移加深有关。同时还可以看到华东中部沿海地区出现弱的正相关区域,结合形势场可以认为随着台风向东北移动,东南暖湿气流的影响在加大,因此该地区的不显著正相关是有一定意义的。23 日 20 时(图 11c)华东中部地区的负显著相关区域进一步扩大,这表明随着高空低槽的东移加深,低层冷空气的强度在加大,而在华东中部沿海地区可以看到原来较弱的正相关区域已加强为显著正相关区域,表明暖湿气流作用在加强,此时由于冷暖气流交汇,在华东中部沿海一带形成锋面。由 24 日 08 时(图 11d)可以看到华东中部沿海的正相关区域维持,且向海上延伸,而原来负的显著相关区明显南移,位于江西福建境内,这表明该时刻对暴雨区影响更明显的是台风右侧的暖湿气流。综上所述,低层

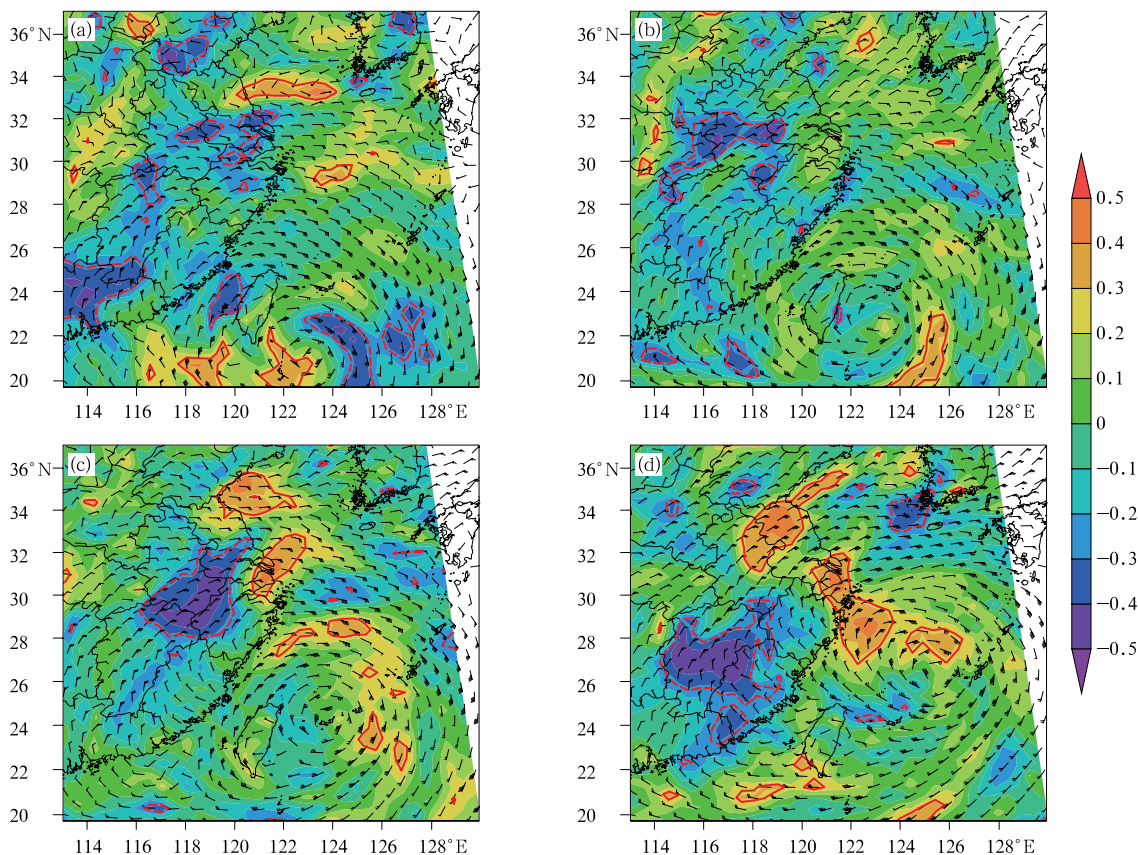


图 11 2015 年 8 月(a)22 日 20 时,(b)23 日 08 时,(c)23 日 20 时,(d)8 月 24 日 08 时集合区域平均降雨量与 925 hPa θ_{se} 之间的相关系数场
(填色,红色实线和虚线代表通过 0.05 显著性水平检验的区域)

Fig. 11 Correlation field between mean area precipitation and 925 hPa equivalent potential temperature θ_{se} of ensemble forecast at (a) 20:00 BT 22, (b) 08:00 BT 23, (c) 20:00 BT 23, and (d) 08:00 BT 24 August 2015
(color shaded, red solid/dashed lines: having passed the 0.05 significance level test)

冷空气对此次暴雨显著相关,冷空气的来源有两个,一个是前次低槽缓慢东移后滞留引起,另一个为后次低槽东移加深的影响,其中后者是主要影响系统。此外还可以看到台风右侧暖湿气流输送也对暴雨有重要贡献,低层冷暖气流交汇形成锋面,特别是在降水发生时,暖湿气流的水汽贡献更加明显。

5.3 850 hPa 水汽通量的相关性分析

对于台风远距离降水而言,水汽通道的建立是暴雨形成的必要条件。通常台风右侧和副高相邻区域是水汽输送的主要来源地,因此水汽能否输送到暴雨区与台风的路径和环境气流都有一定的关系。下面根据起报时次为 2015 年 8 月 22 日 20 时的集合预报结果计算 24 日 08 时暴雨区域内平均水汽通量与台风 CTE 和暴雨区内平均位势高度的相关性,

从而分析此次暴雨过程中水汽通量的主要影响因素。可以看到平均水汽通量与 CTE 的相关系数为 -0.253 (图 12a),表明当台风向左偏时有利于降水增强,但该负相关性未通过 0.05 的显著性水平检验;而平均水汽通量与平均位势高度的相关系数达到了 -0.487 (图 12b),通过了 0.05 的显著性水平检验,表明暴雨区内位势高度的降低是有利于台风本体的水汽输送的,这与前述的高空槽的东移加深关系密切。

6 不同集合成员组间的热动力诊断分析

从上文分析可知,高空槽的东移和加深是预报此次暴雨过程的关键,集合预报降雨量的差异与高

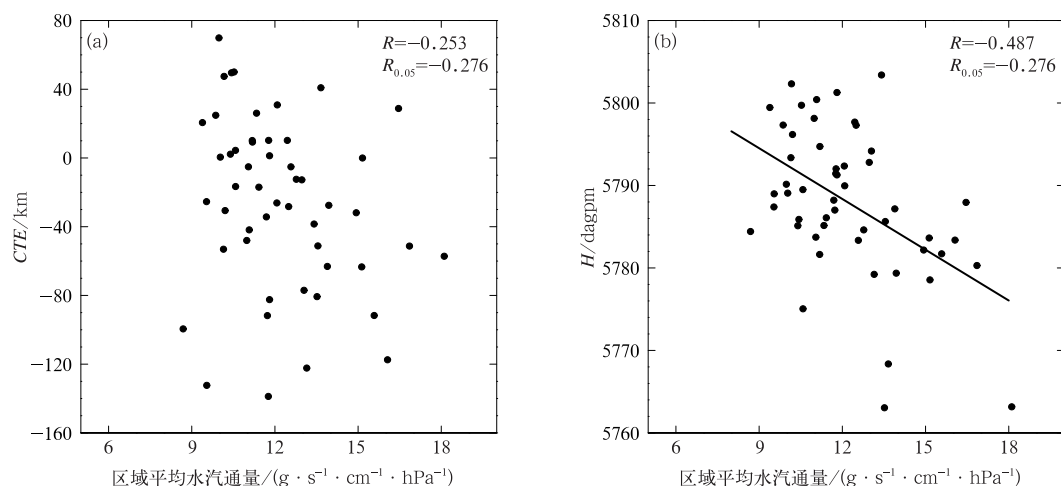


图 12 2015 年 8 月 22 日 20 时起报的 24 日 08 时暴雨区域内平均水汽通量与(a)CTE, (b)平均位势高度之间的相关性

Fig. 12 Correlation between mean area water vapor flux and (a) CTE, (b) mean area geopotential height with in the torrential rainfall areas at 08:00 BT 24 forecasted by 20:00 BT 22 August 2015

空槽的位置和强度有密切关系,下面通过比较集合成员组 MAXP 和 MINP 的高低空动力和水汽输送的平均特征量进一步揭示此次暴雨过程发生发展的物理机制。预报起始时次为 2015 年 8 月 22 日 20 时,对比分析时次为 24 日 08 时。从 500 hPa 风场和涡度场上可以看到(图 13a, 13b),对于 MAXP 成员组高空低槽已经影响暴雨区域,该区域内主要为正涡度区,对应较明显的辐合上升运动,有利于低层水汽向高层输送,而其东侧和北侧存在小范围的负涡度区。而在 MINP 成员组中暴雨区域及其周边地区均为负涡度区,不利于强降雨的产生。从 850 hPa 低层可以看到(图 13c, 13d),两个成员组在暴雨区域内均存在较明显的相当位温梯度,表明该地区存在锋区,但 MAXP 成员组中的 θ_{se} 明显高于 MINP 成员组。与之对应的风场上也有较明显的表现,前者台风外围暖湿气流的影响更加明显,而后者冷空气的强度更大,究其原因这与 500 hPa 高空槽的位置有关,即高空槽位置偏西,则该地区 500 hPa 上将为高压控制,从而导致低层冷空气势力偏强,不利于台风向该地区输送水汽。从图 13e, 13f 中也可以看到 MAXP 成员组中暴雨区域内的水汽通量明显高于 MINP 成员组,同时前者的低层辐合强度也要明显大于后者,这有利于辐合上升运动的加强,而水汽凝结潜热的释放对上升运动也有正反馈作用,因而更有利于产生强降雨。从 200 hPa 上可以看到(图 13g, 13h),两组成员在台风北侧均存在明显的

高空急流带,急流轴呈西南—东北走向,但是 MAXP 成员组中急流轴的左端位置较 MINP 成员组纬度更高,导致暴雨区正好位于高空急流入口区的右侧,对应较明显的高空辐散,有利于上升运动的发展,而 MINP 成员组中暴雨区几乎位于高空急流轴线上,因而对应的高空辐散并不明显。

7 结论和讨论

(1) ECMWF 集合预报对此次台风天鹅引起的远距离暴雨的可预报性明显偏低,仅在暴雨发生前 24 h 才做出较大调整,说明集合预报存在较大的不确定性。在不同起报时次下,当台风路径的系统性偏差最小时,台风降水集合预报也最接近实况,但是进一步的分析表明,台风路径误差与降水量级之间的对应关系并不确定,当台风 CTE 接近 0 km 时,仍然会对应小量级降水,这在前几个预报时次尤其明显,这说明台风路径误差不是影响此次暴雨过程的主要原因。

(2) 从中层环流场的角度分析集合预报不确定性的原因主要在于模式成员对于高空槽的东移和加深过程的预报存在明显差异,小雨量(MINP)成员组预报的高空槽的强度和移速明显弱于和慢于大雨量(MAXP)成员组,这种情况在不同起报时次的大雨量成员组间也存在。925 hPa 上 MAXP 和 MINP 成员组的水汽分布和环流影响范围的对比分析表

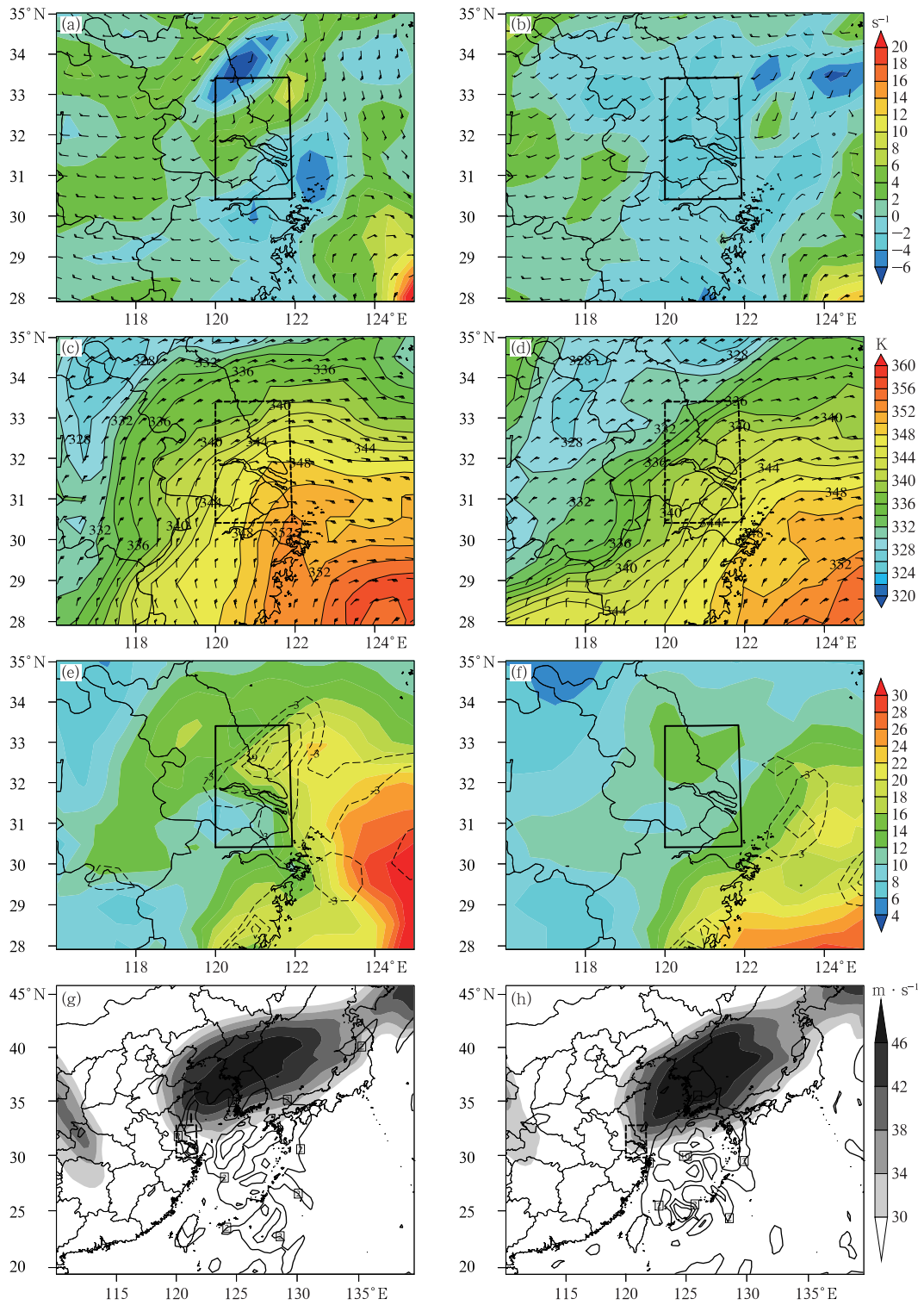


图 13 2015 年 8 月 22 日 20 时起报的 24 日 08 时不同集合员组的物理量场:(a,b)500 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)和涡度场(填色);(c,d)850 hPa 风场(单位: $4 m \cdot s^{-1}$)和相当位温(填色);(e,f)850 hPa 水汽通量(填色,单位: $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$)和散度场(等值线,单位: s^{-1});(g,h)200 hPa 高空急流(填色)和散度场(等值线,单位: s^{-1})
(a,c,e,g)MAXP 成员组,(b,d,f,h)MINP 成员组

Fig. 13 The physical fields of two ensemble forecast groups at 08:00 BT 24 August forecasted by 20:00 BT 22 August 2015
(a, b) 500 hPa wind (unit: $m \cdot s^{-1}$) and vortex (color shaded), (c, d) 850 hPa wind (unit: $4 m \cdot s^{-1}$) and equivalent potential temperature (color shaded), (e, f) 850 hPa water vapor flux (color shaded, unit: $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$) and divergence (contour line, unit: s^{-1}), (g, h) 200 hPa upper-level jet (shaded) and divergence (contour line, unit: s^{-1})
(a, c, e, g) group MAXP, (b, d, f, h) group MINP

明,台风右侧对流运动及暴雨区内斜压性的增强都有利于水汽的增加,而更大的台风环流范围则有利于水汽的输送。

(3) 500 hPa 位势高度场的敏感性分析表明,无论是初始场还是预报场,区域平均降雨量均与高空槽的东移和加深显著相关,且随着预报时次的增加,显著相关区域明显扩大。此外降雨量还与暴雨发生前台风右侧的高压环流呈显著负相关,而与暴雨时段内台风东北方向下游高压脊呈显著正相关,这将有利于高空槽的东移及台风北侧的水汽输送。台风右侧水汽通量的输送与高空槽的东移加深有较高的相关性,而与台风 CTE 并不显著相关。

(4) MAXP 和 MINP 集成员组的热动力场和水汽通量场的对比分析表明,当暴雨区处于高空槽前,对流层低层辐合加强,有利于台风暖湿气流向暴雨区输送,从而导致锋区附近 θ_{sc} 增大,反之低层冷空气强度将增大,不利于台风水汽输送。高空 200 hPa 急流轴的位置对暴雨区内的辐合上升运动也有明显影响,当急流轴左端位置略偏北时,暴雨区处于急流入口区右侧,高空辐散更加明显。

本文利用集合敏感性分析方法研究了引起此次台风远距离暴雨的关键原因即西风槽的东移和加深,它不但使得暴雨区左侧低层冷空气加强,同时也增强了暴雨区右侧台风水汽输送急流带的强度,从而使得暴雨区内的大气斜压性增大,形成有利于暴雨发生的热动力条件。ECMWF 集合预报的不确定性也主要表现在对该西风槽的预报上,由于多个起报时次没有反映出该西风槽的东移加深,致使暴雨区内的大气斜压性明显偏弱,系统地低估了此次暴雨过程。

参考文献

曹晓岗,王慧,2016.“8·23—24”上海远距离台风大暴雨影响分析[J].气象,42(10):1184-1196. Cao X G, Wang H, 2016. Analysis on a tropical cyclone remote rain event in Shanghai in 23—24 August 2015[J]. Meteor Mon, 42(10):1184-1196(in Chinese).

陈联寿,2007. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C]//第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集. 上海:中国气象学会年会:3-7. Chen L S, 2007. Research and prediction on the landfalling tropical cyclone heavy rainfall[C]//National Tropical Cyclone Science Symposium 14th Abstract. Shanghai: Chinese Meteorological Society:3-7(in Chinese).

丛春华,陈联寿,雷小途,等,2012. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报,70(4):717-727. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2012. A study on the mechanism of the tropical cyclone remote precipitation[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):717-727(in Chinese).

杜均,李俊,2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J]. 气象科技进展,4(5):6-20. Du J, Li J, 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(5):6-20(in Chinese).

孙兴池,陈金敏,刁秀广,等,2009. 一次远距离台风暴雨过程分析[J]. 气象,35(5):34-41. Sun X C, Chen J M, Diao X G, et al, 2009. Analysis of one far distance typhoon and heavy rain process[J]. Meteor Mon, 35(5):34-41(in Chinese).

王毅,何立富,代刊,等,2017. 集合敏感性方法在高原涡和西南涡引发暴雨过程中的应用[J]. 高原气象,36(5):1245-1256. Wang Y, He L F, Dai K, et al, 2017. An ensemble sensitivity analysis of a heavy rainfall over Sichuan Basin under interaction between plateau vortex and southwest vortex[J]. Plateau Meteor, 36(5):1245-1256(in Chinese).

杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等,2008. 山东省远距离热带气旋暴雨研究[J]. 气象学报,66(2):236-250. Yang X X, Chen L S, Liu S J, et al, 2008. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 66(2):236-250(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 characteristics[J]. Chin J Atmos Sci, 24(5):669-675(in Chinese).

Ancell B, Hakim G J, 2007. Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting[J]. Mon Wea Rev, 135(12):4117-4134.

Chen L S, Li Y, Cheng Z Q, 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci, 127(5):967-976.

Froude L S R, Bengtsson L, Hodges K I, 2007. The predictability of extratropical storm tracks and the sensitivity of their prediction to the observing system[J]. Mon Wea Rev, 135(2):315-333.

Hakim G J, Torn R D, 2008. Ensemble synoptic analysis[C]//Bosart L F, Bluestein H B. Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting: A Tribute to Fred Sanders. Boston: American Meteorological Society.

Leonardo N M, Colle B A, 2017. Verification of multimodel ensemble forecasts of north Atlantic tropical cyclones[J]. Wea Forecasting, 32(6):2083-2101.

Li J, Du J, Zhang D L, et al, 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 140(680):766-782.

Qian C H, Zhang F Q, Green B W, et al, 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010)[J]. Wea Forecasting, 28(6):1562-1577.

Torn R D, Hakim G J, 2008. Ensemble-based sensitivity analysis[J]. Mon Wea Rev, 136(2):663-677.

Zheng M H, Chang E K M, Colle B A, 2013. Ensemble sensitivity tools for assessing extratropical cyclone intensity and track predictability[J]. Wea Forecasting, 28(5):1133-1156.