

曹晓岗,王慧. 2016. “8·23—24”上海远距离台风大暴雨影响分析. 气象, 42(10):1184-1210.

“8·23—24”上海远距离台风大暴雨影响分析^{*}

曹晓岗 王 慧

上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 利用常规天气资料、物理量场资料、雷达资料、云图资料以及主要业务模式预报资料等,对 2015 年 8 月 23 和 24 日上海地区大暴雨进行了分析。分析表明这是一次远距离台风与北方扩散南下冷空气共同影响产生在上海及周边地区的大暴雨过程。1515 号台风天鹅北侧外围的偏东风急流为强降雨区提供了源源不断的水汽;北方扩散南下冷空气与台风北侧外围的东风急流汇合使得辐合抬升得到加强;各业务模式的检验表明,由于无法精确预报台风的位置、台风外围的偏东风气流影响的强度和地区以及冷空气强度等,大部分业务模式无论是降水落区、强度及最强降水时段预报均存在较大的误差。在模式预报有误差的情况下,要重视实时资料应用,及时做出短时暴雨预警。

关键词: 远距离台风,大暴雨,环流背景,水汽热力条件,模式预报分析,台风天鹅

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.003

Analysis on a Tropical Cyclone Remote Rain Event in Shanghai in 23—24 August 2015

CAO Xiaogang WANG Hui

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: Based on routine weather data, meteorological elements fields, wind profiler radar data, satellite cloud images and operational numerical forecast data, we have analyzed a heavy rain event that occurred in Shanghai in 23—24 August 2015. The results show that it was caused by combined action of a remote tropical cyclone Goni and cool air spreading southwards from north area; the circulation of Goni provided the plentiful supply of water vapor and energy required for the event; and the convergence of cool wind and strong easterly jet enhanced vertical motion of moisture air. Verification indicates that there are remarkable bias in rain hit areas, intensity and timing for most operational numerical forecast, which possibly come from the errors in calculation of TC position, strength and location of easterly jet around TC and strength of cool air, etc. Under such situation we should devote much attention to the application of real time observation with the aim of issuing available short term early warning of heavy rain.

Key words: remote typhoon, extremely heavy rain, circulation background, water vapor and thermal condition, numerical forecast analysis, tropical cyclone Goni

引 言

2015 年 8 月 23 和 24 日(下面简称:“8·23—

24”)受第 15 号台风天鹅远距离影响,上海出现大暴雨。“天鹅”对上海的影响主要分两个阶段:(1) 23 日早晨,上海东部受“天鹅”环流外围东南气流与低空切变北侧的东北气流交汇影响产生暴雨;(2) 23

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306010 和 GYHY201306030)共同资助

2015 年 11 月 1 日收稿; 2016 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者:曹晓岗,主要从事暴雨和热带气旋预报技术研究. Email:cxg@smb.gov.cn

日夜间至 24 日上午,受“天鹅”环流西北侧偏东气流与北方扩散南下冷空气共同影响,上海中西部出现大暴雨。由于“天鹅”8 月 23—24 日在台湾东部洋面缓慢北上转向东北方向移动,台风本体云系远离上海,台风本体对上海没有直接影响,台风远在台湾东部洋面,上海出现大暴雨这在历史上罕见,因此,预报难度较大。

陈联寿(2007)明确给出热带气旋远距离降水的定义,指出判定热带气旋远距离降水需符合两个条件,一是该降水发生在热带气旋范围之外;二是该降水与热带气旋存在内在物理联系。热带气旋远距离暴雨的研究也有了较大的发展,陈忠明等(2002)、李改琴等(2007)、杨晓霞等(2008)、孙兴池等(2009)、侯建忠等(2010)、丛春华等(2012)、张清华等(2013)、康岚等(2013)和许映龙等(2015)研究表明:热带气旋在有利的大气环流背景下,与中纬度系统(包括西风槽、低涡、弱冷空气等)相互作用可使中纬度地区暴雨增强且范围扩大,其日降水量和过程降水量往往不逊于热带气旋主体雨量,这是中纬度地区夏季暴雨的重要特征。在沿海活动和登陆的热带气旋,往往在低空形成一条宽广的偏东南风急流带,成为暴雨区的主要水汽通道和能量通道,这条急流带可在中纬度地区产生深厚的湿层和强水汽辐合,导致大气不稳定性增强及不稳定能量的积蓄和释放,产生暴雨。徐洪雄等(2014)指出:2012 年 7 月 21 日台风韦森特的远距离作用是造成北京“7·21”的重要原因之一,台风韦森特的存在及其产生的“转运”效应,其强水汽流亦为暴雨强水汽辐合结构提供持续支持,并为暴雨系统高空辐散、低空辐合以及涡度结构构建了有利动力、热力条件。钮学新等(2005)对华东地区台风降水及影响降水因素进行的分析发现:冷空气入侵、地形作用、水汽条件及影响时间的长短等都能影响台风的降水量。漆梁波等(2013)对双台风形势下上海地区一次暴雨过程作了预报对比分析,分析的暴雨过程均是由其中一个台风左后侧偏北气流与另一个台风倒槽东南气流相结合所致。曹晓岗等(2014)对 2013 年 10 月 8 日上海大暴雨的研究,发现北方扩散南下冷空气与台风菲特低压倒槽云系及台风丹娜丝北侧外围的强东风急流三者汇合的低空切变长时间维持,是上海大暴雨形成的主要原因。

本次暴雨过程预报难点在于台风天鹅北侧外围的偏东风气流与北方扩散南下冷空气结合位置、冷空气影响的强弱、暴雨过程的持续时间等。为此,本

文利用常规天气资料、物理量场资料、云图资料、雷达资料以及主要业务模式预报资料等,综合分析了大暴雨形成的天气形势、物理条件及其卫星云图和雷达回波特征等。针对其预报难点,对有关业务数值模式的预报结果进行了讨论,以期从中得到若干启示并为今后上海地区台风远距离大暴雨预报提供可供借鉴的参考依据。

1 降水实况与台风概况

1.1 台风概况

2015 年 8 月 15 日,第 15 号台风天鹅于 15 日凌晨在西北太平洋洋面上生成,向偏西方向移动,21 日到达台湾省东南方西北太平洋洋面上,21 日夜间转向偏北方向,然后转向北到东北方向移动,25 日经过日本九州西部,接着穿过日本海,27 日登陆海参崴,在黑龙江境内填塞(图 1)。“天鹅”曾三度达到超强台风的强度,第一段是 17 日 08 时至 18 日 02 时;第二段是 19 日 20 时至 20 日 14 时;第三段是 23 日 20 时至 25 日 02 时,与上海强降水的发生时间相对应。

在“天鹅”的东面、140°E 以东的洋面上,第 16 号台风艾莎尼于 15 日凌晨在美国关岛偏东方约 1810 km 的西北太平洋洋面上生成,沿抛物线方向移动,23 日后转向东北(图 1)。虽然两个台风之间相距较远,但由于对环境场的影响,“天鹅”在 21—23 日一度移速很慢,23 日后在“艾莎尼”转向后移速加快。



图 1 2015 年第 15 号台风天鹅与第 16 号台风艾莎尼路径实况
Fig. 1 Tracks of Typhoons Goni (1515) and Atsani (1516) in 2015

1.2 上海 8 月 23 和 24 日降水实况

上海的两个主要降水时段分别是 23 日 05—11 时和 24 日 06—09 时。强降水发生时“天鹅”距离上

海 900 km 以上。23 日凌晨起上海市东部地区对流发展,3 h 开始降水逐渐加强,浦东惠南镇 05—06 时小时雨量 63.9 mm,22 日 20 时至 23 日 20 时浦东惠南镇 24 h 雨量达 209.6 mm(图 2a)。上海 23 日 20 时到 24 日 20 时超过 200 mm 的区域包括中心城区、嘉定、青浦、闵行部分区域、崇明西部等(图 2b),最大

降水量为闵行爱博家园 271.0 mm。24 日 07—10 时这一阶段降水强度最大(最大小时雨强均大于 50 mm),最大雨强出现在青浦华新 $67.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此阶段降水强度大,在上海中西部地区有 100 多条马路积水,对城市安全运行造成极大的影响。

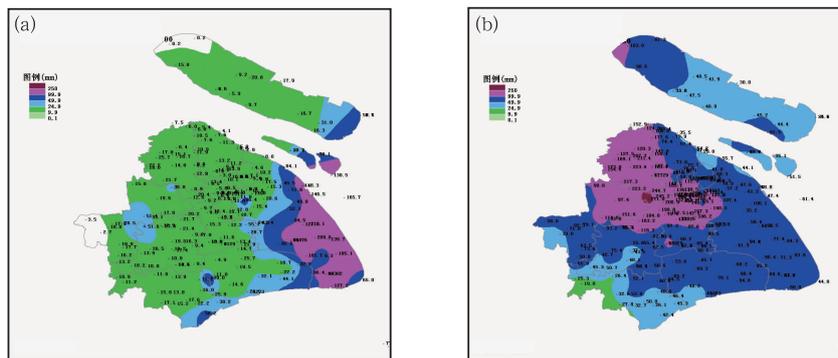


图 2 2015 年 8 月 22 日 20 时至 23 日 20 时(a)和 23 日 20 时至 24 日 20 时(b)上海降水分布(单位: mm)

Fig. 2 Rainfall from 20:00 BT 22 to 20:00 BT 23 (a) and from 20:00 BT 23 to 20:00 BT 24 (b) August 2015 (unit: mm)

2 环境条件分析

2.1 台风及冷空气的相互作用

早在 15 日“天鹅”生成时,西风带一个冷性低压在阿尔泰山脉附近切断出来,沿着 45°N 纬度线向东缓慢移动,一周之后 8 月 22 日到达我国东北地区。它携带了一个冷气团和向南伸展的伴随槽。由于西太平洋热带系统的活动,中低纬度系统东移速度较慢,该槽在东移过程中逐渐呈东北—西南向,槽底很宽,实际上从河套以东到江淮之间都处在正涡度区中,温度槽落后高度槽。22 日 20 时,槽区前沿位于 115°E 附近,后倾结构,850 hPa 上 20 日夜里宝山偏南风转偏北风,表明槽已经过测站,此后一直在沿海滞留。至 22 日 08 时宝山 850 hPa 气温 48 h 下降 5°C ,22 日 20 时 500 hPa 气温 48 h 下降 3°C 。22—23 日“天鹅”向东北移动,宝山 850 hPa 风向顺转,表明台风气团从中低层开始影响。

23 日早晨台风天鹅在台湾东部洋面上,距离上海 900 km 以上,“天鹅”北侧的东南气流伸向杭州湾与低空来自北方的东北气流汇合。23 日 08 时(图 3a),500 hPa 槽区前沿位于山东、安徽到湖北地

区,700 hPa 低槽由东北地区南伸到江苏南部,850 hPa 切变位于东海经上海到浙江北部。低层槽后的东北气流抵达江苏和浙江地区,与偏东急流在上海东部汇合。这两支气流中,东北气流很干,偏东急流特别湿,22 日 20 时南京 850、700 和 500 hPa 温度露点差分别为 10、27、 27°C ,而上海为 2、1、 2°C 。在气温分布上,由于锋区的后倾结构,中高层锋区偏北,700 hPa 以上江北气温明显低于江南,低层锋区偏南,位置在上海和浙江北部,850 hPa 以下,上海及浙江西北部的气温明显低于浙江沿海地区。因此 23 日强降水的发生是因为先有冷空气南下东移,经过上海后,台风暖湿气团向北移动,两者交汇形成的。强降水发生在上海东部,与锋区的结构和位置有关。23 日“天鹅”在台湾东北部洋面向东北方向加快移动,20 时加强为超强台风级,24 日凌晨移入东海东南部海域,“天鹅”外围的偏东风急流进一步加强,急流位置也有所北移,同时在河套和江淮的冷气团向东南移动(图 3b)。从阜阳站的要素可见,23 日 08 时至 24 日 08 时 24 h 内,500、700、850 hPa 上气温分布下降 4、1、 4°C 。上海测站则分别上升 3、1、 1°C 。23 日 20 时南京 500、700、850 hPa 温度露点差分别是 25、23、 10°C ,上海仍为 1~ 2°C 。冷暖干湿空气对峙加强引起锋生。因此,24 日强降水的发生

是在台风暖湿气团已经影响的情况下,北方又有冷空气补充南下,两者的差异和相互作用下形成的。

此次冷暖空气交汇在江苏的东南部到上海西部地区,因此大暴雨主要出现在这一地区。

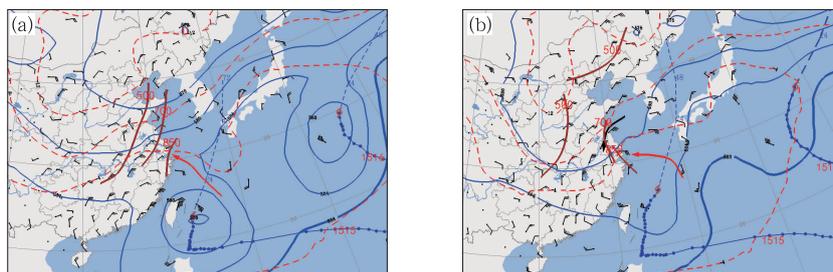


图 3 2015 年 8 月 23 日 08 时(a)和 24 日 08 时(b)500 hPa 位势高度场蓝色等值线,单位: dagpm)、温度(红色虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)与 850 hPa 风场(风向杆)(棕色线分别为 500、700 hPa 槽线及 850 hPa 切变线;红色实线箭头为偏东风急流;黑色实线箭头东北气流;起点为 1515 的蓝色圆点线为“天鹅”路径;起点为 1516 的蓝色圆点线为“艾莎尼”路径)

Fig. 3 Geopotential height (blue solid line, unit: dagpm) at 500 hPa and wind barb at 850 hPa at 08:00 BT 23 (a) and 08:00 BT 24(b) August 2015

[Symbols used in this figure are troughs at 500 hPa and 700 hPa and shear line at 850 hPa (brown line), east and southeast jets (red arrow),

cold northeast flow (black arrow), tracks of Typhoons Goni and Atsani

(blue dot lines marked 1515 and 1516; long dashed line is the forecast track from NMC)]

从分析可见,干冷与暖湿空气交汇,中低纬度不同气团相互作用,使大气层结变得不稳定、上升运动加强,台风北侧气流的持续水汽输送是 8 月 23 和 24 日上海大暴雨形成的重要原因。

在这次强降水过程中,冷空气的活动应该关注的是,(1)北方冷空气移动非常缓慢,到达河套以东后停滞 5 d;(2)冷空气分股南移:第一股冷空气 20 日经过上海宝山,在浙北滞留,后遭遇台风暖湿气团北移发生了 23 日上海东部第一段强降水;第二股补充冷空气 23 日夜里从河套以东向东南移动(23 日 20 时至 24 日 02 时苏北地面偏东风一致转为东北风),与进一步北移的台风暖湿气团遭遇,发生了 24 日上海及江苏东南部强降水,冷空气影响对 2 天的强降水起了重要作用。

与 2013 年 10 月 6—8 日的强降水过程不同的是,后者 6 日夜里至 7 日白天的降水是 1323 号台风菲特登陆福建前后其倒槽登陆长江口形成的,更多考虑台风气团自身作用;8 日大暴雨则是“菲特”和 1324 号台风丹娜丝共同影响的暖湿气流与北方西风槽引导的冷空气的相互作用下发生的(曹晓岗等, 2014),北方西风槽移动较快,冷空气影响时间要短一些。

2.2 高空急流

高空急流在“8.23—24”上海大暴雨同样起重要作用。从 23 日 08 时 200 hPa 流线上可见(图 4),高空急流由江苏北部经黄海伸向日本海,上海处高空急流入口区南侧的高空辐散区中。24 日高空急流加强,急流核位于黄海到朝鲜半岛附近,江苏南部和上海地区处在高空急流入口区南侧的强高空辐散区中,高空抽吸作用维持,加强了低空辐合抬升,使强降水得以维持,江苏东南部和上海中西部下了大暴雨。这与 2012 年 1215 号超强台风布拉万北上深入黑龙江中部引发大暴雨的情况(任丽等, 2013),及高空急流入口区右侧的强辐散区的抽吸作用是“菲特”北侧强风雨发生的主要动力机制是一致的(许映龙等, 2015)。

2.3 物理量诊断分析

大暴雨过程是中尺度对流系统活动的结果,中尺度对流系统是在有利的天气尺度背景下产生的。为此,使用实况探测计算的物理量资料、EC 细网格模式输出的物理量(经纬度格距 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)以及 T639 细网格模式输出的物理量(经纬度格距 $0.281250^{\circ} \times 0.281250^{\circ}$),对本次上海大暴雨过程的物理条件进行了诊断分析。

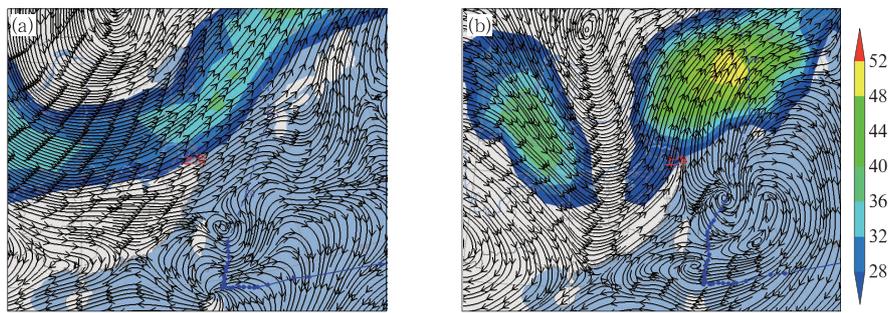


图 4 2015 年 8 月 23 日 08 时(a)和 24 日 08 时(b)200 hPa 流场
(彩色阴影区为大于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 蓝色圆点线为“天鹅”路径)

Fig. 4 Stream lines at 200 hPa at 08:00 BT 23 (a) and 08:00 BT 24 (b) August, 2015
(Shaded area indicates wind speed $>25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; blue dot line is the track of Typhoon Goni)

2.3.1 热力条件

由 8 月 23 日 08 和 20 时、24 日 08 时 850 hPa 假相当位温(θ_{se})场(图 5a、5b、5c)可知,由于台风天鹅在台湾东部洋面缓慢由偏北转向东北方向移动过程中,台风北侧的偏东气流将来自洋面的暖湿空气向华东中南部沿海地区输送,在台风附近的 θ_{se} 大值区北侧,有一暖湿舌其顶部位于江苏南部和上海地区,上海 $\theta_{se} \geq 68^\circ\text{C}$; 上海西部的太湖及其以西地区是相对干冷

区,江苏东南部 θ_{se} 梯度最大,呈东北—西南向,为海洋上暖湿气团与北方大陆干冷气团间的过渡区,即锋区所在。这种分布特征一直持续到 24 日白天,对上海产生大暴雨非常有利。同期的 K 指数分布与 850 hPa 假相当位温有类似分布特征(图 5d、5e、5f),上海 K 指数一直 $>32^\circ\text{C}$ 。用实际探空资料计算得到 23 日 08、20 时、24 日 08 时上海宝山的 K 指数分别为 37、38、35 $^\circ\text{C}$ 。可见,从 23 日 08 时至 24

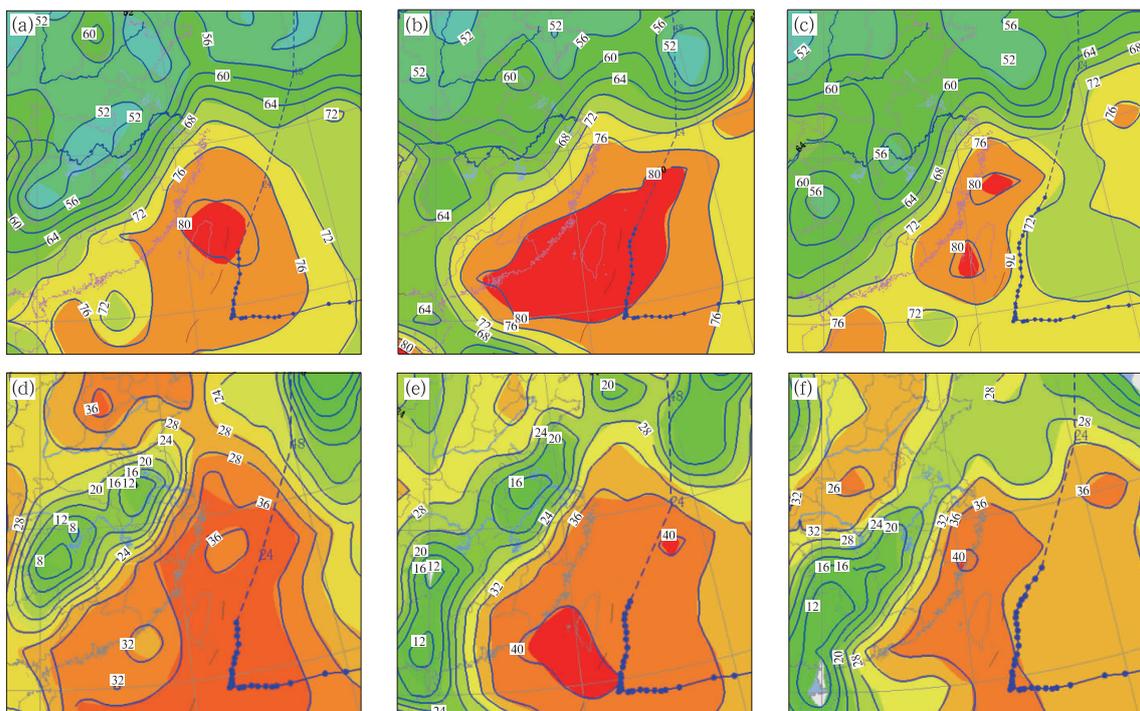


图 5 2015 年 8 月 23 日 08 时(a,d)、20 时(b,e)和 24 日 08 时(c,f)850 hPa 假相当位温(θ_{se})场
(a,b,c;单位: $^\circ\text{C}$)和 K 指数(d,e,f;单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 5 Pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}) at 850 hPa (a,b,c,unit: $^\circ\text{C}$) and K-index (d,e,f, unit: $^\circ\text{C}$) at 08:00 BT 23 (a,d), 20:00 BT 23 (b,e) and 08:00 BT 24 (c,f) August 2015

日 08 时大气层结处在持续强不稳定中,并达到出现成片雷雨及强对流天气的条件。

从 23 日 08、20 时宝山站探空曲线来看(图略),整层湿度很大,特别是 500 hPa 以下气层已经饱和,抬升凝结高度(~ 990 hPa)和自由对流高度(~ 942 hPa)都很低。但因整个气层暖湿,CAPE 不大。

2.3.2 水汽条件

8 月 23 日凌晨台风天鹅外围的东南气流输送水汽到达上海,强降水开始前的 03 和 04 时 GPS 探测的大气可降水量(GPS-PWV,下同)上海东部地区

已经增加到 6.2 cm(图 6a,6b)。24 日上海中西部强降水开始前,GPS-PWV 在江苏南部和上海地区普遍在 6 cm 左右(图 6c,6d)。其中上海地区 GPS-PWV 最大达 7.2 cm。多年统计可知,当大气可降水量达到 5.5 cm 时上海将产生强对流天气(叶其欣等,2008),大气可降水量在 6.0 cm 时会产生 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水,这次过程大气可降水量同样在 6.0 cm 以上,在 23 日 05—07 时降水集中时段和 24 日 06—10 时,各时段最大小时雨量均 $> 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

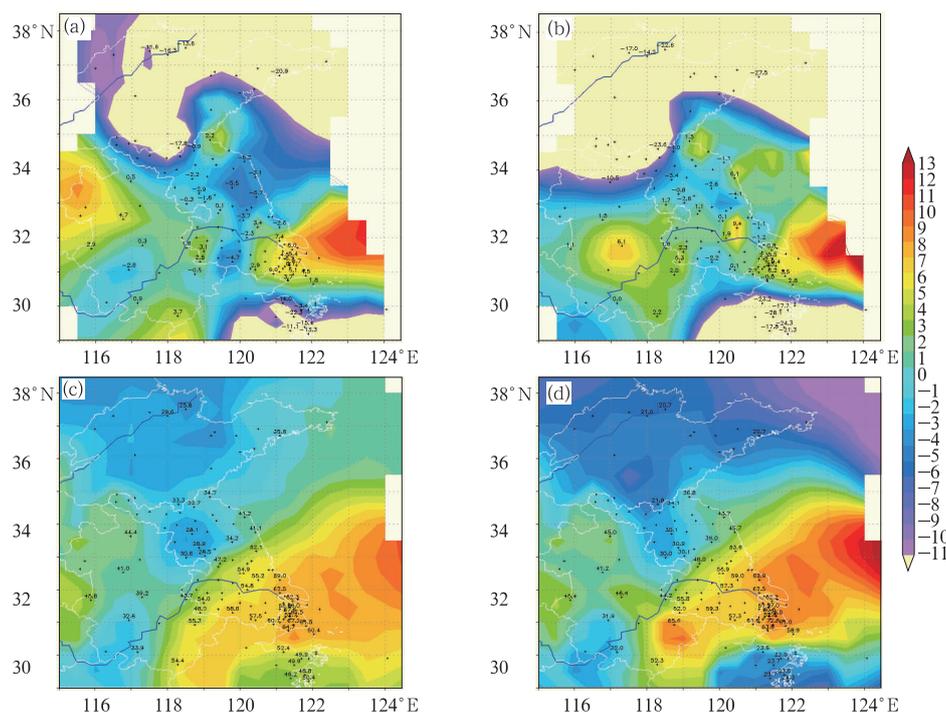


图 6 GPS 探测的 2015 年 8 月 23 日 03 时(a)、04 时(b)、

24 日 05 时(c)、06 时(d)大气可降水量(单位:cm)

Fig. 6 Atmospheric column precipitable water (unit: cm) detected by GPS at

(a) 03:00 BT 23, (b) 04:00 BT 23, (c) 05:00 BT 24, (d) 06:00 BT 24 August 2015

产生大暴雨需要大量的水汽辐合。分析 23 日 08 时 925 hPa 水汽通量、1000 hPa 水汽通量散度可见低空水汽通量大值区由台风天鹅环流区经浙江东部海面伸向长江口,在长江口地区形成了水汽通量辐合(图 7a、7b),23 日的强降水区范围非常小,水汽输送条件相对低一些。24 日大暴雨区位于江苏东南部和上海中西部地区,24 日 08 时 850 hPa 水汽通量大值中心($22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)在江苏东南部沿海,其大值中心线由东部洋面指向了长江下

游,低空急流与中心线配合,形成源源不断的水汽输送。分析 24 日 08 时 850 hPa 水汽通量散度图看到辐合中心在长江下游地区,辐合中心值达 $-24 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,低空上海中西部位于大的水汽辐合区中(图 7c、7d),江苏东南部和上海降水最强时段就出现在 8 日早晨到上午。良好的水汽输送和辐合及本地上空大的大气可降水量,为大暴雨发生提供了足够的水汽条件。

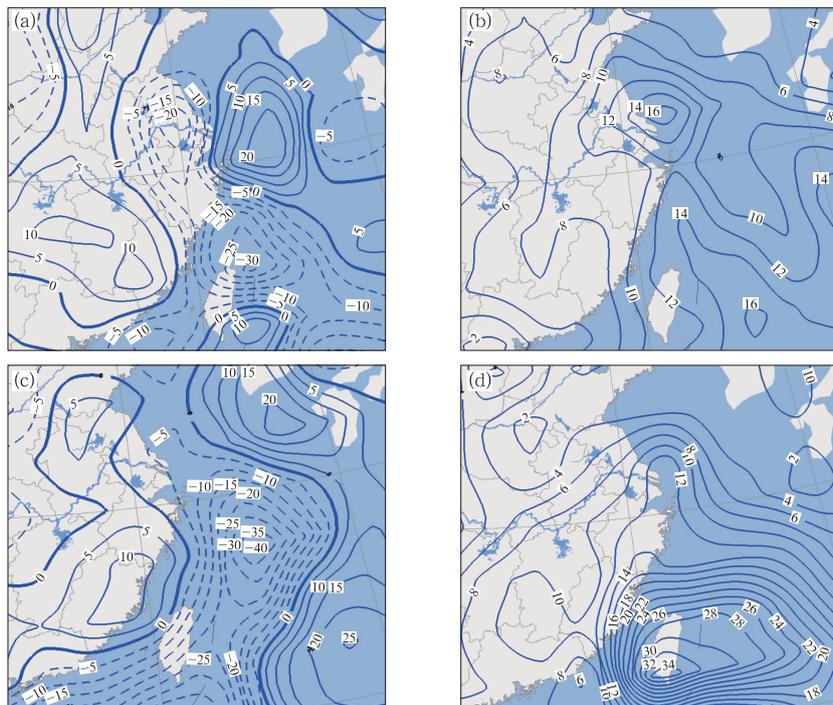


图 7 2015 年 8 月 23 日 08 时(a)1000 hPa 水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、
 (b)925 hPa 水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),24 日 08 时 850 hPa (c)水汽通量散度
 (单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 Fig. 7 The divergence of water vapor flux (unit; $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa (a)
 and water vapor flux (unit; $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa (b) at 08:00 BT 23 August 2015;
 the divergence of water vapor flux (c, unit; $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 and water vapor flux (d, unit; $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BT 24 August 2015

2.3.3 动力条件

8 月 23 日 08 时高空辐散中心值达 $25 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略)。低空长江下游到福建北部受台风减弱的低压倒槽影响,为小于 $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐合区(图略),这种低层辐合、高层强辐散非常有利于上升运动。8 月 24 日 08 时高空的抽吸作用更为明显,上海的东北部沿海海面上高空辐散中心值达 $40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,加强了低空的辐合,24 日 08 时低空辐合中心位于南通附近,850 hPa 中心值达 $-20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,上海西北部地区处小于 $-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐合区中(图略),此时正是上海西部上升运动最强的时段。从 24 日 08 时过上海的垂直上升经向剖面图(图 8)可以看到,上海处最大上升中心附近,最大上升中心在 500 hPa 高空,达 $-45 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,24 日 07—10 时上海最大小时降强均在 50 mm 以上。

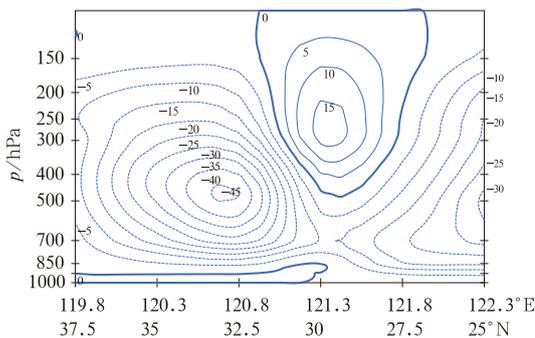


图 8 2015 年 8 月 24 日 08 时垂直速度
 过上海的经向剖面图
 (单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Meridional cross section of vertical
 velocity passing through Shanghai at 08:00 BT
 24 Aug 2015 (unit: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

3 卫星云图与雷达回波特征

由云图上可以看到“8. 23—24”上海大暴雨过程,台风本体云系远离上海,对上海没有直接影响

(图略)。

3.1 23 日大暴雨卫星云图与雷达回波特征

跟踪 23 日早晨出现大暴雨时段的红外云图

(图略),可以发现最初在上海东部海面上有对流云团发展加强,在其后侧的上海东部沿海地区 05 时有新的对流云生成,06—07 时对流云向西侧的陆地伸展,发展为一个中尺度强对流云团,该对流云团持续了 2 个多小时,是降水最强时段,07 时之后减弱并东移入海。

从 2015 年 8 月 23 日降水开始加强到降水最强时段的雷达回看,凌晨 04:30(图略)还是絮状降水回波,04—05 时南汇降水为 13.5 mm,05 时(图略)南汇北侧有中尺度对流云团开始发展,05:29 图

(图 9a 和 9b)上可以看到对流进一步加强,强度达到 55 dBz 以上,南汇附近反射率因子出现了钩状回波。平均径向速度图上可以看到低空出现大于 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北—西南向的低空急流,该急流为暴雨区输送了海上大量的水汽;06—07 时,中尺度对流云团与低空急流稳定维持在南汇上空(图 9c, 9e, 9d, 9f),06—07 时也是南汇降水最强的时段,南汇达小时雨量为 63.6 mm。07 时(图 9g 和 9h)之后该对流云团逐渐减弱,08 时(图略)东移入海。

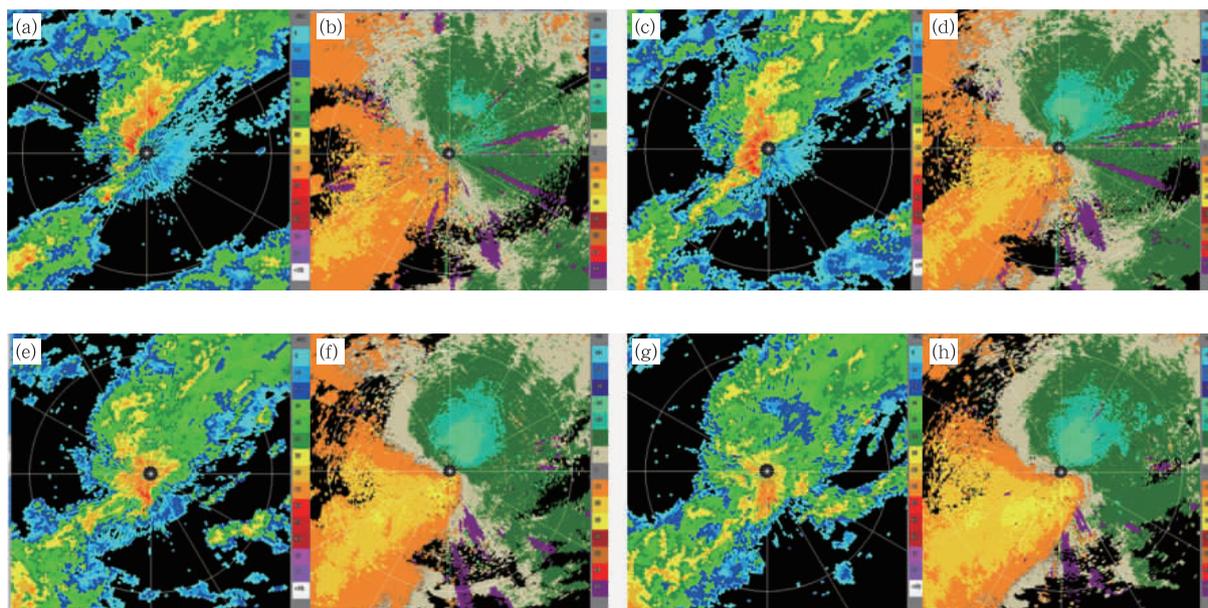


图 9 2015 年 8 月 23 日早晨雷达回波(上海南汇雷达,仰角 0.5°) (a, c, e, g) 反射率因子图, (b, d, f, h) 平均径向速度图; (a, b) 05:29, (c, d) 06:03, (e, f) 06:31, (g, h) 07:00

Fig. 9 Reflectivity (unit: dBz) (a, c, e, g) and radial velocity (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(b, d, f, h) detected by the Nanhui Radar with elevation angle of 0.5° at

05:29 BT (a, b), 06:03 BT (c, d), 06:31 BT (e, f), and 07:00 BT (g, h) 23 August 2015

3.2 24 日大暴雨卫星云图与雷达回波特征

8 月 24 日上海的强降水主要出现在 07—10 时,图 10 是 06:30—09:00 的红外云图。分析可以看到,06:30 在上海上空有 2 个中尺度云团 A 和 B,07 时云团 A 发展加强,云顶温度最低温度为 -50°C ,上海中北部降水开始加强,小时雨量最大在 50 mm 以上。07:30 两个对流云团强度维持,08 时 B 云团有所加强,云顶达 -45°C ,到 08:30 对流云团 A 和 B 在中北部合并,强度加强,低于 -50°C 的范

围扩大,09:00 达最强,云顶温度为 -65°C ,也是小时雨量最大时候(青浦华新 67.5 mm)。该对流云团在上海上空维持到 10:00 后才开始明显减弱,11 时移到东部海面,上海强降水结束。

对流云团合并加强在雷达拼图也可以看到,图 11 是 8 月 24 日早晨上海最西部的青浦和最东部南汇两部雷达拼图。对流云团在 24 日 05 时左右开始产生,并逐渐加强。到 06:27 较强的对流单体分别位于上海西北部(A)和上海中部(B),其强度达 50 dBz。到 07:01 两个对流单体合并为南北向的带

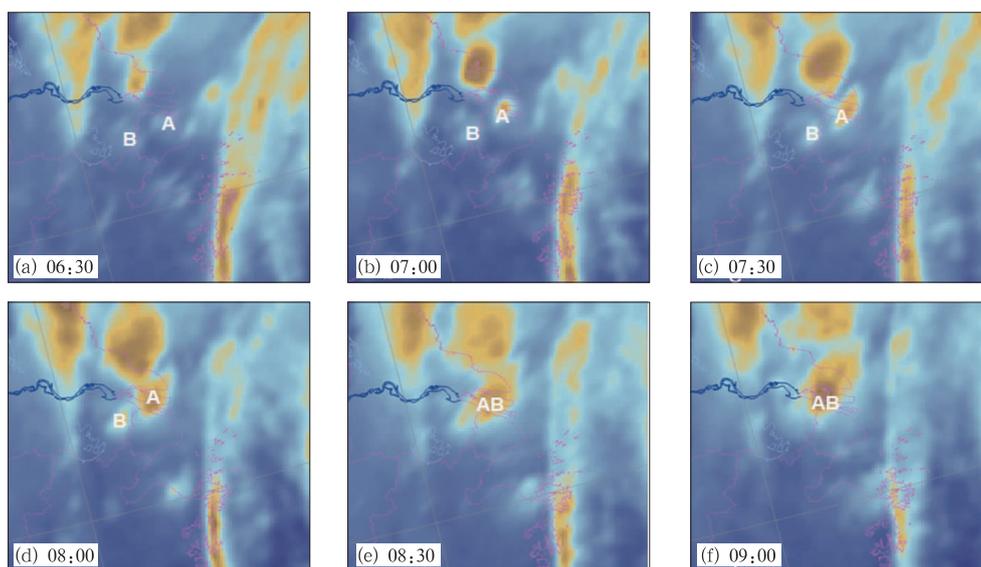


图 10 2015 年 8 月 24 日早晨红外云图

Fig. 10 Infrared satellite images from FY-2E at

(a) 06:30 BT, (b) 07:00 BT, (c) 07:30 BT, (d) 08:00 BT, (e) 08:30 BT and (f) 09:00 BT 24 August 2015

(Convective cloud clusters are marked by A and B)

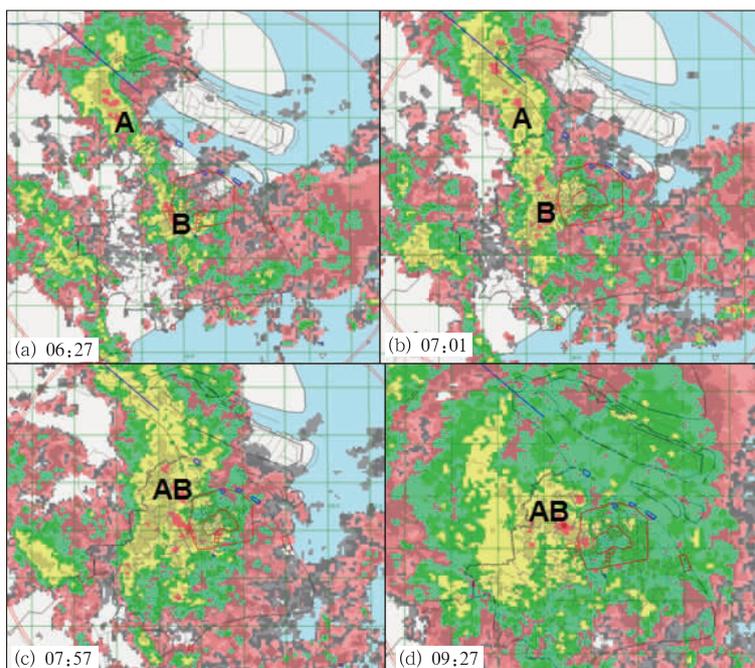


图 11 2015 年 8 月 24 日上午上海青浦和南汇雷达拼图(仰角 1.5°)

Fig. 11 Radar composite images from observations by radars

located in Qingpu and Nanhui with same elevation angle of 1.5° at

(a) 06:27 BT, (b) 07:01 BT, (c) 07:57 BT, (d) 09:27 BT August 2015

状回波。此后在上海的西北部加强,在上午 09:27 达最强(55 dBz),是上海降水最强时段。分析当天的降水出现较强时段的雷达云顶高度,其最高在 9

~10 km(图略),与其他出现对流天气(冰雹、雷雨大风等)高度明显要低。雷达回波的小时雨强与热带型强降水一致。

4 业务预报分析

4.1 业务预报情况

上海中心气象台 22 日 17 时发布：夜里到明天白天局部地区累积雨量可达大雨到暴雨，局部地区 24 h 累积雨量可达 40~60 mm，1 h 最大雨强 20~30 mm。实况是 23 日早晨前后上海东部的南汇出现大暴雨，02—08 时 6 h 南汇雨量达 153.8 mm；23 日 11 时发布下午到明天白天大部地区将出现较强降水，累积雨量普遍可达 60~90 mm，1 h 最大雨强 30~50 mm；实况是 23 日夜里到 24 日白天上海普遍出现了暴雨部分地区出现大暴雨，个别雨量站出现大于 250 mm 的特大暴雨。强降雨的量级预报明显偏小。23 日凌晨南汇已经出现 30 mm 以上的降水，浦东气象局 05:35 才发了暴雨黄色预警信号，降水大于 50 mm 后，06:29 更新为暴雨橙色预警。24 日暴雨预警信号均是在强降水开始后发布的，暴雨预警信号由黄色升级为橙色，橙色升级为红色暴雨预警信号，也是雨量已经达到发布相应的预警信号标准再发布的。概而言之，对北方扩散南下冷空气与“天鹅”外围东风急流共同影响出现的大暴雨，其短期预报误差较大，短时预警滞后。

通过梳理业务预报情况可知，“8.23—24”上海大暴雨的预报难点首先是如何确定北方扩散南下冷空气强度及与“天鹅”北侧外围东风急流结合位置，该位置决定强降水主要落区。其次是强降水维持多长时间？23 日随“天鹅”缓慢向北偏东移动，台风强度再度快速加强，其外围强东风急流也得到加强，阻挡了冷空气继续东移南下，冷暖空气在上海及附近地区交汇时间长，同时东风急流为强降水区提供了源源不断的水汽补充。第三，各数值模式预报上海 23 和 24 日降水明显偏小，落区误差大等，给预报员提供准确预报强降水落区和强度的信息较少。

4.2 业务数值模式预报结果分析

随着数值预报模式分辨率和准确率不断提高，现代天气预报越来越依赖数值预报模式输出结果。由于 8 月 23—24 日西太平洋有两个台风活动，同时北方有冷空气南下，副热带高压退到低纬度，引导气

流非常弱，在这种异常复杂的天气形势下，各业务数值模式未能提前报出上海地区大暴雨，对主观综合预报支持不足。为此，本文分析了欧洲中期天气预报中心（简称 ECMWF）全球模式、上海新一代区域中尺度数值模式及其他预报中心的模式等的表现，以更多地了解多台风形势对模式要素预报的影响。

4.2.1 ECMWF 全球高分辨数值模式

从多年使用经验看，ECMWF 的预报性能好于其他全球模式。图 12 可以看到 ECMWF 8 月 22 日 08 时 24 h 预报台风天鹅位置比实况偏东约 70 km，预报的急流位置指向杭州湾以南，杭州湾以北的上海为偏南气流（不是台风外围环流的气流）。而实况是台风外围的东南气流将水汽输送到上海。预报的 850 切变位置与实况一致，但是辐合强度有差别，实况是来自台风外围的暖湿气流与北方扩散南下的东北气流形成的切变辐合，在上海对流层中层以下形成条件不稳定层结，有利对流发展。模式预报的切变辐合为弱的偏南风 and 东北风形成，最大辐合区位于吕泗到太湖之间，因此预报较强降水区主要在江苏南部的南通到太湖地区，预报最大降水中心

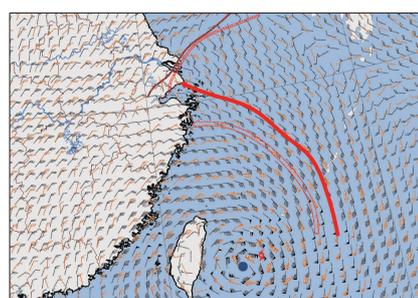


图 12 2015 年 8 月 23 日 ECMWF 模式 850 hPa 风场
(棕色风场为 2015 年 8 月 22 日 08 时 24 h 预报，黑色为
风场实况；红色单线箭头、棕色切变线及蓝色圆点为
实况分析；红色双线箭头、红色双线切变线
及红色台风位置均为 24 h 预报位置)

Fig. 12 Wind fields at 850 hPa at
08:00 BT 23 August 2015

(Black barbs indicate observation, brown
barbs indicate 24 h forecast by ECMWF at
initial time of 08:00 BT 22 August 2015;
red single line indicates reanalysis easterly
jet and brown single line indicates shearline;
blue dot is real position of Typhoon Goni;
red double-line with arrow indicates forecast
easterly jet and red double-line with arrow
indicates forecast shear line; red
typhoon sign indicates forecast position)

(100 mm)位于南通到太湖东北部地区(图略);而实况最大降水中心位于上海东部地区(上海南汇 162 mm),预报的强降水区比实况降水区位置明显偏西、偏北。

同样,图 13 可以看到 ECMWF8 月 23 日 08 时 24 h 预报台风天鹅位置比实况仍偏东约 55 km,预报的外围急流位置在东海海面上,上海及浙江沿海海面都已经转了北到东北风。而实况是由于台风的加强移动缓慢,台风外围的偏东急流加强,长江口及上海均为偏东气流控制,此时偏东急流与北方南下的偏北气流在太湖东部形成南北向的切变线,台风外围的急流将来自海洋上的水汽源源不断地输送到长江口及上海附近地区。由于流场预报与实况的差别,导致实况降水量与预报有较大误差(图略),实况暴雨区出现在南通地区、太湖东部到上海及浙江宁波地区,最大中心在南通地区的如东县(202 mm)。模式预报的大降水中心在东海海面上,如东市附近仅预报了 50 mm,预报上海地区降水在 25 mm 以下,实况是上海普遍出现了暴雨,上海中西部出现了大暴雨。

为什么预报降水比实况位置明显偏东且量级偏小?究其原因,主要是模式预报台风位置偏东 50 km 以上,预报偏东急流到达的位置误差大;冷空气预报偏强,上海已经转为偏北风,从而造成水汽输送及辐合位置偏差大,导致降水落区和降水强度预报不准确。

4.2.2 上海区域中尺度数值模式(WRF9)

图 14 是 WRF9 模式 2015 年 8 月 23 日 08 时、

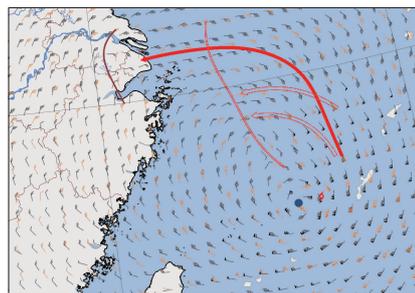


图 13 同图 12,但为 2015 年 8 月 24 日
Fig. 13 Same as Fig. 12,
but for 08:00 BT 24 August 2015

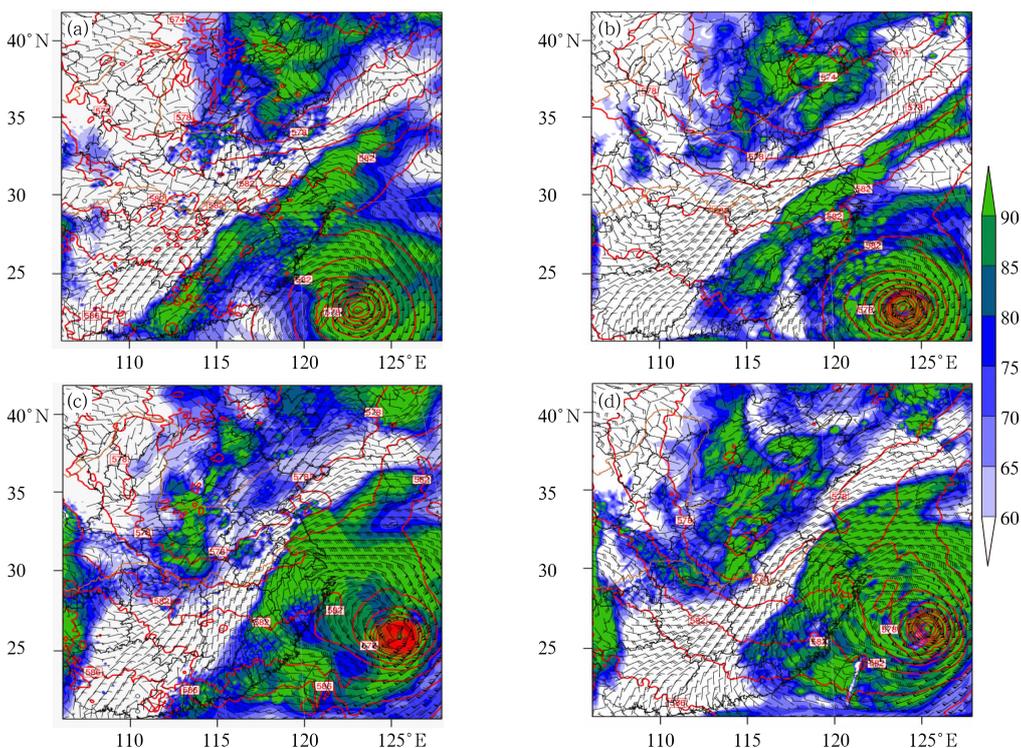


图 14 WRF9 2015 年 8 月 23 日 08 时分析场(a)和 24 h 预报场(b)、
24 日 08 时分析场(c)和 24 h 预报场(d)(模式起报时间 8 月 22 日 08 时和 23 日 08 时;
红色线 500 hPa 高度,单位:dagpm; 850 hPa 风,
单位: $m \cdot s^{-1}$;阴影 700 hPa 相对湿度,单位:%)

Fig. 14 Reanalysis (a,c) and 24 h forecast (b,d) geopotential height
(red solid line, unit: dagpm) at 500 hPa and wind barb at 850 hPa,
at 08:00 BT 23 (a,b) and 08:00 BT 24 (c,d) August 2015 by WRF9 at
initial time of 08:00 BT 23 (b) and 08:00 BT 24 (d) August 2015

24 日 08 时的分析场和 24 h 预报场。比较 23 日 08 时的分析场和预报场可以看到(图 14a 和 14b), 预报的台风位置比实况略偏东, 纬度一致, 但预报的强度明显要强。预报的江苏中南部的东北风比实况分析的要强, 预报达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (实况 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 预报上海东南部沿海东南风有 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实况分析为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其预报切变位置在上海西部, 该模式预报了东北—西南向雨带, 降水强度在 100 mm 以上中心分别在吕泗附近和太湖南部, 上海仅崇明东部预报有暴雨(图略), 实况上海东南部的南汇出现了大暴雨。其降水预报较 ECMWF 全球模式有所改善, 但强降水区仍比实况偏北 50 km, 对上海地区强降水过程未能很好反映。

24 日 08 时的分析场和预报场可以看到(图 14c 和 14d), 预报的台风位置与实况基本一致, 但 23—24 日“天鹅”再度快速加强, 而模式预报的“天鹅”强度明显比实况弱很多; 预报的冷空气较强, 使得上海东部沿海海面转为东北气流(图 14d)。由于台风加强, 850 hPa 风场可看到台风外围的偏东气流加强范围扩大, 江苏南部沿海地区到上海以及以东的东海上均为大于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东风急流控制, 东北风和偏东风的最强切变辐合位于江苏南部的南通到上海西部地区(图 14c), 大暴雨也出现在这一地区(图略)。WRF9 模式预报的大暴雨区在杭州湾及浙江沿海, 上海西部也预报了局部大暴雨(图略), 但从逐 6 h 模式雨量预报看, 其雨量预报主要是在 23 日 14—20 时, 23 日夜里降水预报的量极明显减小(图略)。实况是 23 日下午降水较小, 24 日凌晨到上午降水最强(图略), 预报的强降水出现的时段误差大。

4.2.3 其他模式

对“8.23—24”上海大暴雨过程, 其他业务模式如 T639 全球模式、美国 GFS 全球模式、上海台风模式等预报的降水明显偏小(图略), 降水中心也离上海较远。无论是降水落区、强度及最强降水时段, 上述模式预报均存在较大误差。本次降水过程日本气象厅全球模式(JMA)预报的降水落区较接近实况(图略), 但是其预报降水强度弱。JMA 22 日 08 时 24 h 降水预报上海东部大雨(中心值: 26 mm), 实况 22 日 08 时至 23 日 08 时是上海东部南汇 162 mm, JMA 23 日 08 时 24 h 降水预报上海暴雨(中心值: 70 mm), 实况 23 日 08 时至 24 日 08 时上海出现大暴雨, 上海老港 167.6 mm, 降水强度是明

显偏弱的, 对预报指示意义不大。分析其预报的形势与实况较一致, 但台风外围的偏东风预报偏小, 向暴雨区输送的水汽不如实况那么大。

通过上述分析可知, 模式只有对台风的位置、强度、冷空气影响强弱等都作出精确预报, 才有可能对暴雨落区进行成功预报。不同模式预报差异及模式本身预报的误差导致模式无法给预报员提供足够支持。因此在做此类暴雨预报时, 要根据最新实况资料对各个模式预报的台风路径、位置、冷空气影响强弱进行综合订正, 以确定暴雨强度和落区。

5 结论与讨论

(1) “8·23—24”上海大暴雨过程是远距离台风天鹅北侧外围的偏东风急流与北方扩散南下冷空气共同影响下产生。8 月 23 日天鹅再度快速加强, 其北侧外围强东风急流为强降水区提供了源源不断的水汽, 北方南下冷空气与东风急流结合使切变辐合抬升得到加强, 低空切变在上海上空维持, 是上海产生大暴雨的主要原因。

(2) 23 日的卫星云图和雷达回波上可见强降水是由一个强对流云团影响产生的。24 日的上午上海上空有 2 个对流云带形成、合并, 造成了上海中西部地区大暴雨。

(3) 常用的业务模式对本次大暴雨过程 24 h 短期预报, 无论是降水落区、强度还是最强降水时段均存在较大误差。其主要原因是模式难以准确预报台风位置和强度、冷空气的强度, 以及台风外围急流与冷空气之间的汇合位置等等。

(4) 对类似于“8·23—24”大暴雨这样的过程, 在模式存在预报误差时, 预报人员进行科学订正是做好短期预报、短时预警预报的关键。在实际预报订正中, 可根据台风实况路径与集合预报的台风路径对模式台风路径进行订正, 特别是在台风到达对我国海区有影响的洋面时, 通过最新云图监测台风强度变化进行订正, 以确定值得参考的预报信息。

参考文献

- 陈联寿. 2007. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报. 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集, 3-7.
- 陈忠明, 黄福均, 何光碧. 2002. 热带气旋与西南低涡相互作用的个案研究 I: 诊断分析. 大气科学, 26(3): 352-360.
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 2012. 热带气旋远距离暴雨的研究. 气象学报, 70(4): 717-727.

- 曹晓岗,王慧,漆梁波. 2014. 台风与冷空气对“13. 10”上海特大暴雨过程的影响分析. 暴雨灾害, 33(4): 351-362.
- 侯建忠,张弘,李明娟,等. 2010. 台风活动对陕西重大洪灾事件影响的综合分析. 气象, 36(9): 94-99.
- 康岚,牛俊丽,徐琳娜,等. 2013. 台风对四川暴雨影响的环境场对比分析. 气象, 39(4): 427-435.
- 李改琴,梁海河,王树文,等. 2007. 台风海棠远距离暴雨中尺度特征分析. 气象, 33(8): 17-22.
- 钮学新,董加斌,杜惠良. 2005. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析. 应用气象学报, 16(3): 402-407.
- 漆梁波,曹晓岗. 2013. 双台风形势下上海地区一次暴雨过程的预报分析和对比. 热带气象学报, 29(2): 177-188.
- 任丽,王承伟,张桂华,等. 2013. 台风布拉万(1215)深入内陆所致的大暴雨成因分析. 气象, 39(12): 1561-1569.
- 孙兴池,陈金敏,刁秀广,等. 2009. 一次远距离台风暴雨过程分析. 气象, 35(5): 34-41.
- 叶其欣,杨露华,丁金才,等. 2008. GPS/PWV 资料在强对流天气系统中的特征分析. 暴雨灾害, 27(2): 142-148.
- 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. 气象学报, 66(2): 236-250.
- 徐洪雄,徐祥德,张胜军,等. 2014. 台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京 7·21 暴雨的影响. 大气科学, 38(3): 537-550.
- 许映龙,吕心艳,张玲,等. 2015. 1323 号强台风菲特特点及预报难点分析. 气象, 41(10): 1222-1231.
- 张清华,吴建成,刘蕾,等. 2012. 热带风暴莲花外围特大暴雨的成因分析. 气象, 38(5): 543-551.

“预报失败案例分析专辑”征稿启事

《气象》是面向气象业务与科研的科技期刊,是气象科研人员和一线预报员大气科学研究、天气分析和机理研究等的学术交流平台。为了更好地使一线预报员提高对实际天气过程的认识,加深对其中难点和问题的理解,本刊准备组织出版一期专刊,内容是反映预报员对实际业务中失败案例的分析,将自己预报工作中所经历的挫折和体会进行系统总结和剖析,既有助于自己预报能力的提升,也能使更多的人从中受益。这种过程分析,不仅仅是对天气系统的客观诊断、描述,而是将对失败的原因进行细致的剖析,从而使对理论知识的理解更加贴近实际,使以往掌握的预报技能更能有针对性地解决实际问题。

该专辑将在 2017 年底出版。具体事项通知如下:

- (1) 投稿文章为预报失败案例的分析。
- (2) 文章未在国内外公开发行的刊物发表,不涉及保密问题。
- (3) 稿件要求可见《气象》征稿简则(网址: <http://qxqk.cma.gov.cn>)。投稿时请注明预报失败案例分析专辑。
- (4) 征稿截止日期为 2017 年 2 月 28 日。

真诚地希望我们的计划能够得到广大预报人员的支持,欢迎你们积极参与,踊跃投稿,共同分享在实践中得到的真知与感悟。