

王毅,马杰,代刊,2018.“7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析[J].气象,44(1):53-64.

“7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析*

王 毅 马 杰 代 刊

国家气象中心,北京 100081

提 要: 中央气象台主观预报和数值模式对 2016 年 7 月 20 日华北强暴雨过程的中期预报出现了一定的误差,本文利用 ECMWF(简称 EC)集合预报和 T639 集合预报等资料对“7·20”华北强暴雨过程的中期预报效果进行了分析,结果发现:(1) EC 集合预报在 7 月 16 日前后对降雨区及强度的预报出现了明显转折,其因是大尺度影响天气系统的预报发生了转折性变化,7 月 16 日 20:00 起报的环流形势集合平均场对比 15 日 20:00 起报场显示,在河套地区附近 500 hPa 低槽发展更深,其下游华北高压脊也更强,形成了移动缓慢“东高西低”的环流型,黄河气旋及中低层西南涡北抬加强,导致降雨预报更接近于实况;(2)集合敏感性分析发现对降雨中期预报敏感的区域与转折前后预报的环流差异的分布型一致,引起降雨预报转折的影响系统也是降雨中期预报不确定性的来源;(3)对于降雨预报最敏感的环流系统是黄河气旋,集成员预报的黄河气旋偏西偏北,强度越强,则预报的京津冀地区降水量越大。

关键词: 华北暴雨,集合预报,中期预报,不确定性

中图分类号: P456,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.005

Ensemble-Based Analysis of Medium-Range Forecast Change and Uncertainty for the 20 July 2016 Severe Heavy Rainfall over North China

WANG Yi MA Jie DAI Kan

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Errors occur for medium-range forecast of heavy rainfall over North China on 20 July 2016 by subjective forecast of National Meteorological Centre and numerical models. The medium-range forecast performance of this heavy rainfall event is analyzed based on ECMWF ensemble forecast and T639 ensemble forecast data. The results reveal that: (1) there are obvious changes of location and intensity of rainfall of EC ensemble forecast which is caused by change of forecast for large-scale weather system before and after 16 July. Compared to forecast initialized at 20:00 15 July, the ensemble mean circulation on 20 July initialized at 20:00 BT 16 July show that trough at 500 hPa over Hetao Region is deeper whereas downstream ridge is stronger, thus forming the pattern of slowly moving “high pressure to the east and low pressure to the west”. The Yellow River cyclone and mid-lower level southwest vortex move northward and become stronger. The forecast heavy rainfall is closer to the observed precipitation accordingly. (2) Ensemble sensitivity analysis shows that sensitivity areas are consistent with the spatial pattern of circulation difference before and after the forecast change. The large-scale weather systems leading to the change of forecast of heavy rainfall are also sources of uncertainty of medium-range rainfall forecast. (3) The most sensitive circulation system to precipitation forecast is the Yellow River cyclone. The Yellow River cyclone, the

* 国家科技支撑计划项目(2015BAC03B01 和 2015BAC03B02)及公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002)共同资助

2017 年 2 月 20 日收稿; 2017 年 7 月 18 日收修定稿

第一作者:王毅,主要从事天气预报和集合预报研究. Email:492783709@qq.com

ensemble member is westward and northward and intensity is deeper, the corresponding forecast precipitation amount over Beijing-Tianjin-Hebei Region is larger.

Key words: heavy rainfall, ensemble forecast, medium-range forecast, uncertainty

引 言

目前,强降雨的落区预报一直是中期预报的主要难点,而在预报服务业务中,对中期预报的需求又十分迫切(王秀文等,2012)。全球中期数值预报模式是现今中期降雨预报的主要工具。我国气象工作者针对特定区域降雨利用数值模式预报的环流形势或物理量场建立了中期降雨客观预报方法,并取得了较好的效果(金荣花等,2004;尹洁等,2004;李向红等,2006)。然而,初始误差、模式误差和天气的可预报性三方面都会造成数值天气预报的不确定性(穆穆等,2011)。对于中期降雨预报,随着预报时效延长,不确定性进一步增加,进而导致预报误差的增加(Gilmore et al, 2004; Danforth et al, 2007)。

集合预报是近年来迅速发展,在国际上公认的解决单一确定性模式预报不确定问题的有效方法(陈静等,2002;杜钧和李俊,2014)。凭借多成员优势,集合预报可以提供降雨的概率预报和极端降雨早期预警等信息(杜钧等,2014; Matsueda and Nakazawa, 2015),此外,集合预报还越来越多地被应用于模式预报误差分析和不确定性研究(Zhu, 2005)。近年来,国内外学者利用全球集合预报模式评估了影响降水预报的关键环流系统,例如,MJO、阻塞高压和西风急流等,发现集合预报相对于确定性预报有更好的预报效果(段明铿等,2009; Matsueda and Endo, 2011; 王毅等,2014; Zhou et al, 2015)。全球集合模式在中期预报目前仍存在欠缺,Gray et al(2014)利用位涡分析发现 Rossby 波的幅度在中期时效预报偏小。Loeser et al(2017)指出全球集合预报模式对 10 d 以上的大尺度波列预报还存在不足。

由于集合预报隐式地包含预报误差随天气形势变化(即流依赖特征),因此可以利用集合预报的预报变量误差和初始误差来研究预报变量对初始要素的敏感性。Torn and Hakim(2008)将这种方法称之为“集合敏感性”分析,为中短期预报不确定性分析提供了一条新途径。该方法计算简便,并且对于

预报变量的选择比较灵活,如降水量,台风位置等(Qian et al, 2013)。Li et al(2014)利用集合敏感性分析方法研究了影响四川盆地暴雨的西南涡的东移特征,结果表明西南涡的移动和强度对初始时刻水汽和风场比较敏感。另外,一些学者也利用全球中期集合预报模式来开展集合敏感性研究,因为这些模式是业务中稳定运行的数值模式,无需单独进行试验设计。Schumacher(2011)利用 EC 集合预报资料研究了美国南部一次低涡暴雨过程,揭示了上游天气系统的扰动对低涡以及降水预报的影响。Yu and Meng(2016)利用集合敏感性方法分析了 2012 年北京“7·21”暴雨的关键影响系统。

2016 年 7 月 19—20 日我国华北出现了一次强暴雨天气过程,其中北京、河北等地出现了特大暴雨,并引发了严重的洪涝和地质灾害。中央气象台对此次强降雨过程的中期预报出现了一定的误差,全球数值模式预报的雨区在中期时效也发生了明显的转折,造成了预报服务的被动。关于北京地区的暴雨过程,以往很多研究从环流形势、诊断分析、数值模拟等方面进行了深入的探讨(丁一汇等,1980;陶诗言,1980;梁丰等,2006;湛芸等,2012;孙军等,2012;孙继松等,2012;俞小鼎,2012;张文龙和崔晓鹏,2012;孙建华等,2013),但主要集中于成因分析,从中期预报和预报不确定角度开展的研究还很少。本文采用全球集合预报模式,分析此次强暴雨过程中期预报的转折及其成因,进一步应用集合敏感性方法研究降雨预报的不确定性,以期强降雨过程中期预报提供一些参考依据。

1 资料和方法

本文利用 2016 年 7 月 19—20 日降水观测资料、EC 集合预报和 T639 集合预报资料。EC 集合预报有 51 个预报成员,包括 1 个控制预报和 50 个扰动预报。T639 集合预报有 15 个预报成员,包括 1 个控制预报和 14 个扰动预报。数据包括分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的高度场、风场等环境场以及分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的降水量场。

根据 Torn and Hakim(2008)的定义,集合预报

如果有 M 个预报成员 (以 EC 集合预报为例, $M=51$), 初始时刻某一状态变量 X_i 对于任一预报变量 J 的集合敏感性 (sensitivity) 定义为:

$$sensitivity = \frac{cov(J, X_i)}{\sqrt{var(X_i)}} \quad (1)$$

式中, J 代表 M 个成员的 M 个预报变量值, X_i 代表第 i 个格点上的 M 个状态变量值, cov 表示 J 和 X_i 之间的协方差, var 表示方差。很容易证明, 集合敏感性与 J 和 X_i 的相关系数 (cor) 成正比。相关系数更加容易理解, 并且可以比较预报量对不同状态变量的敏感性。因此, 本文用相关系数来表示集合敏感性:

$$sensitivity = cor(J, X_i) \quad (2)$$

相关系数的绝对值越大, 表示初始时刻状态变量的扰动可以引起预报量的较大变化, 即预报量对于状态变量较为敏感。

2 强暴雨过程概况和环流形势演变特征

2.1 强暴雨过程概况和预报情况

2016 年 7 月 19—20 日, 江汉、黄淮、华北地区出现了大范围的强暴雨过程, 19 日强降雨区主要位于江汉、黄淮和华北中南部, 20 日强降雨区东移北

抬至北京、天津和辽宁西部等地。图 1a 是 19 日 08:00 (北京时, 下同) 至 21 日 08:00 的 48 h 降雨实况, 由图可见, 100 mm 以上的强降雨范围很大, 其中, 北京地区有 9 个站超过 250 mm, 霞云岭最大达 342 mm。此次强暴雨过程具有暴雨范围大、持续时间长、强度强的特点。本文将重点研究 7 月 20 日京津冀地区的强降雨过程, 研究区域如图 1a 方框所示。

图 1b 是 7 月 16 日中央气象台发布的 7 月 18—20 日过程降水量预报。由图可见, 暴雨和大暴雨量级的强降雨位于江淮至长江中下游沿线一带, 落区较实况明显偏南, 而京津冀地区只预报了小到中雨, 强度较实况也明显偏弱。

2.2 大尺度环流形势演变特征

中期降雨预报主要关注大尺度环流形势及其演变。从 500 hPa 环流形势和 200 hPa 风场可以看出, 18 日 20:00 (图 2a), 亚洲中纬度呈“东高西低”形势, 河套地区至四川上空为较深的低槽, 副热带高压 (以下简称副高) 控制华南沿海。19 日 20:00 (图 2c), 500 hPa 低槽加深发展成低涡, 致使中纬度环流经向度进一步加大, 副高北抬加强并与东亚沿岸高压脊连体而形成高压坝。同时, 200 hPa 高空急流增强, 华北南部处在急流轴南侧的强辐散区中, 其抽气效应有利于上升运动加强。在 850 hPa

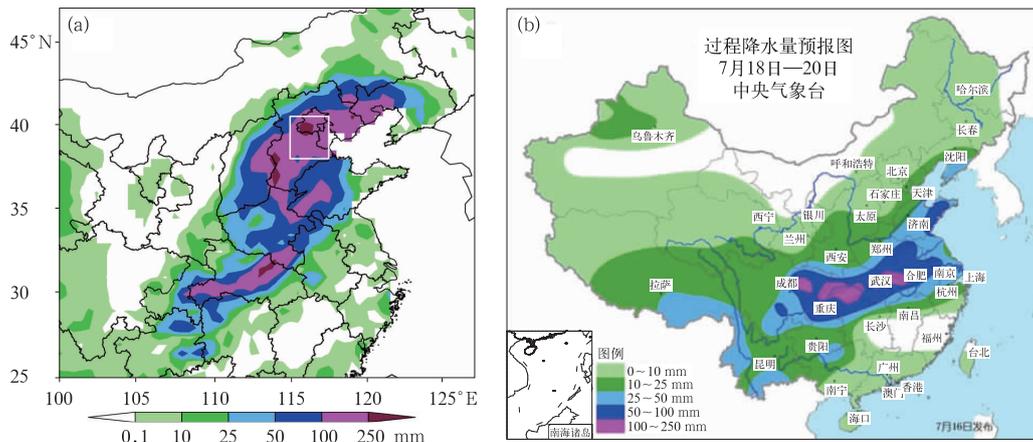


图 1 2016 年 7 月 19 日 08:00 至 21 日 08:00 的实况累积降水量 (a), 中央气象台 7 月 16 日对 7 月 18—20 日降水过程的主观预报 (b) [图 1a 中方框表示京津冀区域 (38°~40.5°N, 115°~117.5°E)]

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 21 July 2016, (b) subjective forecast of precipitation from 18 to 20 July 2016 issued on 16 July by National Meteorological Centre of CMA [Box in Fig. 1a represents Beijing-Tianjin-Hebei Region (38°—40.5°N, 115°—117.5°E)]

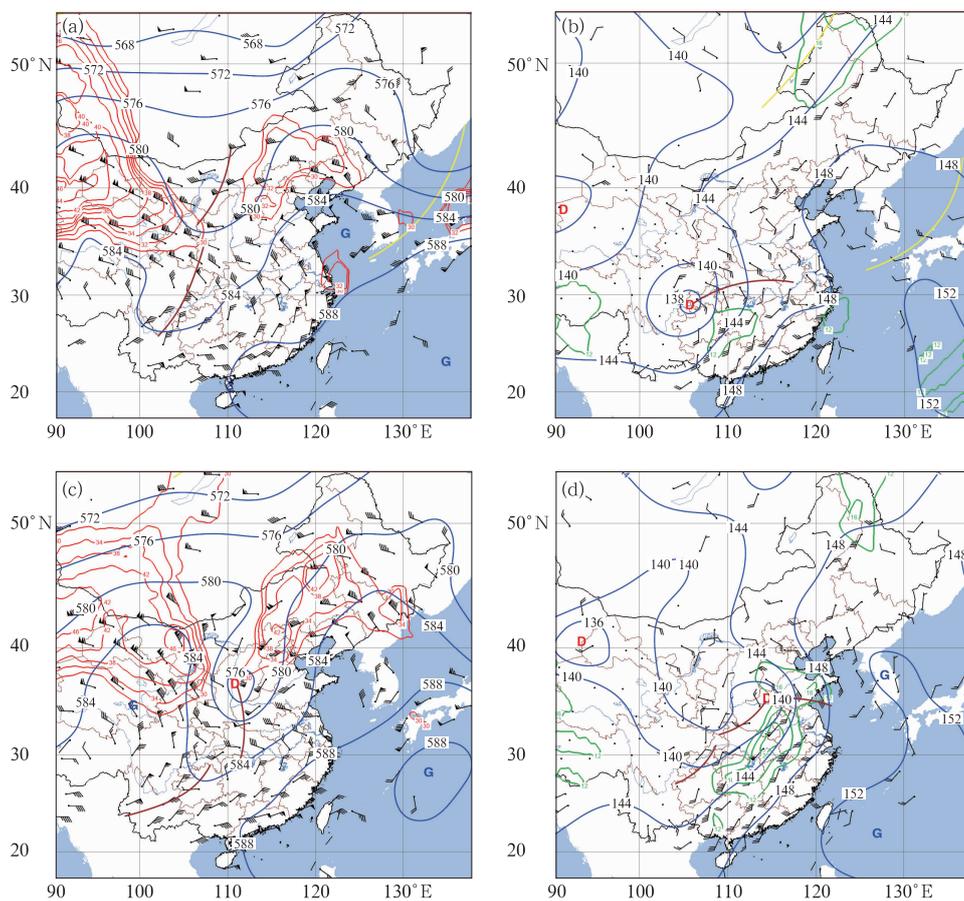


图 2 2016 年 7 月 (a) 18 日 20:00, (c) 19 日 20:00 的 500 hPa 位势高度场和 200 hPa 风场;

(b) 18 日 20:00, (d) 19 日 20:00 的 850 hPa 位势高度场和风场

(红色等值线表示 200 hPa 风速 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 绿色等值线表示 850 hPa 风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 The 500 hPa geopotential height and 200 hPa wind at (a) 20:00 BT 18 and (c) 20:00 BT 19 July 2016; the 850 hPa geopotential height and wind

at (b) 20:00 BT 18 and (d) 20:00 BT 19 July 2016

(Red contours indicate wind speed at 200 hPa $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, green contours indicate wind speed at 850 hPa $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

上(图 2b), 18 日四川盆地有西南涡生成, 19 日 20:00 (图 2d) 西南涡沿太行山东麓北上至华北南部, 低涡南部的西南急流及东侧的东南急流显著增强, 最大风速达 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。至此, 在华北南部中低层建立一条“人”字形低涡切变线, 对应在地面图上有黄河气旋发生发展, 引发了本次华北强暴雨天气过程(图略)。此后, 西南涡缓慢东北移, 并与 500 hPa 低涡同位相叠置, 京津冀强暴雨区位于 500 hPa 低涡东侧及其中低层低涡切变线附近至北侧。

孙建华等(2013)研究 2012 年“7·21”北京特大暴雨指出“7·21”暴雨的大尺度环流形势为“东高西低”型, 高压坝阻挡西风槽东移减慢, 这次“7·20”强暴雨过程也是出现在高空“东高西低”的大尺度环流背景下。这两次极强暴雨过程地面图上均伴有黄河

气旋活动(孟雪峰等, 2013)。但所不同的是“7·20”强暴雨过程高空低涡和西南低涡同相叠置成深厚低涡, 同时, 中低层西南风和东南风低空急流极为强盛, 给暴雨区源源不断地提供水汽、能量和动量。总之, “7·20”强暴雨过程是在强影响系统的激发作用下, 形成强烈的垂直上升运动、充沛水汽输送和对流不稳定等条件, 它们相互作用共同造成本次特大暴雨。

3 暴雨预报转折分析

3.1 暴雨中期预报效果检验

利用 EC 和 T639 集合预报来检验对京津冀强

降雨的预报效果。图 3 给出了 EC 和 T639 集合预报提前 9~1 d 不同起报时间预报的“7·20”京津冀

超过 50 mm 降水量的 TS 评分箱须图和 BS 评分。由图 3a 可知,15 日以前起报的 EC 集合预报个别成员 TS 评

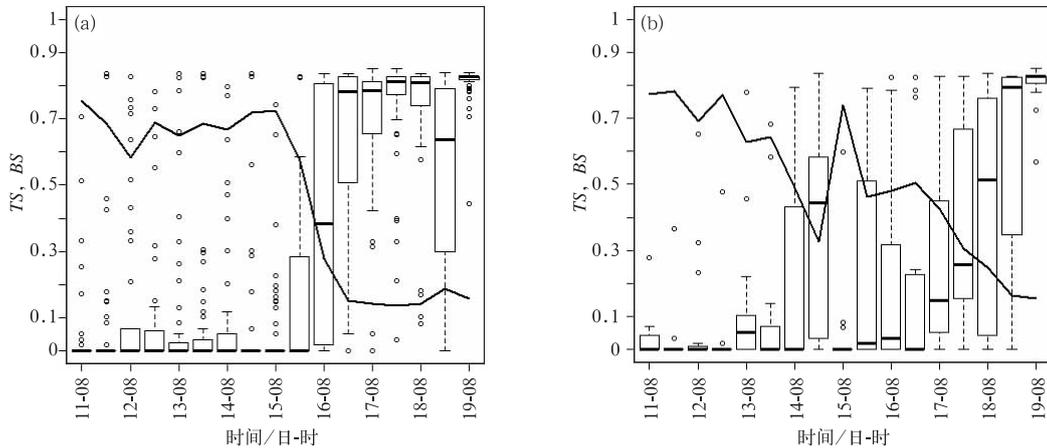


图 3 EC(a)和 T639(b)集合预报不同起报时间预报的 2016 年 7 月 19 日 08:00 至 21 日 08:00 京津冀区域超过 50 mm 降水量的 TS 评分箱须图和 BS 评分(实线)

Fig. 3 Boxplot of TS, BS of EC (a) and T639 (b) ensemble members of precipitation greater than 50 mm over Beijing-Tianjin-Hebei Region from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 21 July 2016 at different lead times (Solid lines are BS)

分超过 0.8,但整体较低。16 日 08:00 起报的 TS 评分中位数为 0.39,说明一半以上成员预报较好。随着预报时效临近,TS 评分逐渐增加。Brier(BS)评分可用于集合概率预报的检验(Brier, 1950)。BS 评分的范围为 0~1,BS 越小,预报准确率越高。可以看出,EC 集合预报的 BS 评分在 7 月 16 日发生了转折,16 日以前 BS 都高于 0.5,16 日以后 BS 都低于 0.2。因此,EC 集合模式对“7·20”京津冀强降雨过程提前 3 d 开始有较好的预报能力。T639 集合模式虽然在 7 月 14 日 20:00 预报的 TS 评分中位数达到 0.44,优于 EC 集合模式,但随后又出现起伏,到 17 日 20:00 以后稳定在 0.2 以上,对此次强降雨过程预报能力在 1.5 d,总体上 T639 集合预报相对于 EC 集合预报稳定性较差。

不难发现,EC 集合预报对此次强降雨的预报在 7 月 16 日前后出现明显的转折性。在实际预报业务中,由于集合预报资料的滞后性,预报员参考的是 7 月 15 日起报的数值预报结果,因此给预报服务造成了一定程度的被动。下面将重点分析 EC 集合预报的中期预报的转折性及其原因。

图 4 是 EC 集合预报 7 月 16 日 08:00 前后起报的降水量箱须图,15 日 08:00 起报有 2 个成员预

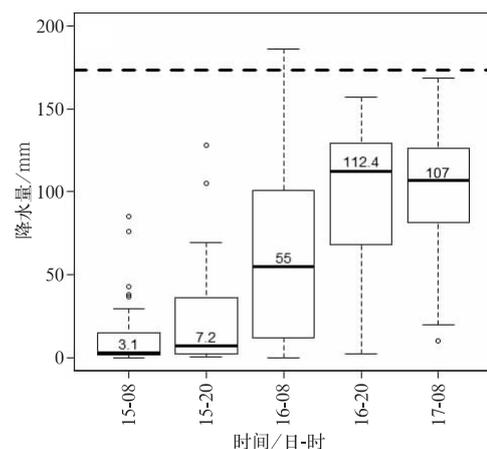


图 4 EC 集合预报不同起报时间预报的 2016 年 7 月 19 日 08:00 至 21 日 08:00 京津冀区域平均降水量箱须图

(数字表示集合预报中位数,粗虚线表示观测的区域平均降水量)

Fig. 4 Boxplot of area averaged precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei Region from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 21 July 2016 of EC ensemble forecast at different lead times (Number represents median, dashed line represents observed precipitation)

报了累积降水超过 50 mm,但总体降水量非常小,降水量中位数为 3.1 mm。16 日 08:00 起报的降水量中位数达 55 mm,并且部分成员预报的降水量超过了观测值(173.6 mm);然而此时箱须图的箱子长度较长,表明集合成员预报的降水量离散度比较大,即不确定性较大。16 日 20:00 起报的箱须图显示箱子底端已超过 50 mm,且中位数达 112.4 mm,说明大部分集合成员都报出了暴雨量级的降水,而且不确定性已经明显减小。

3.2 转折前后的降雨预报对比

根据集合预报中期时效的暴雨预报结果,我们分别选取 EC 集合预报转折前后 7 月 15 日 20:00 及 16 日 20:00 起报的预报进行对比分析。图 5 是上述两个时次预报的 19 日 08:00 至 21 日 08:00 的累积降水量集合平均值和集合最大值。不难看出,15 日起报的集合平均强降雨区位于长江中游至黄淮地区,而 16 日起报的雨区北抬至黄淮西部至华北地区,雨带趋于南北经向分布。同时,降雨强度也比前一天预报明显加强,在北京南部至河南北部预报出了大暴雨。对比实况可以看出,16 日起报的强降雨强度仍然比实况偏小,这是全球模式分辨率较低的结果,但是预报的雨区位置已经接近于实况。

从集合最大值的分布可以发现,15 和 16 日起报的集合最大值的大暴雨范围与相应的集合平均大

雨范围一致,但是前者集合最大值在北京南部等地预报出了特大暴雨,较集合平均明显偏西偏北;后者集合最大值特大暴雨与集合平均的大暴雨范围基本一致,说明 15 日起报的降雨预报不确定性较大,不仅存在雨强预报的不确定,而且强降雨区位置也存在不确定性;而 16 日起报的降雨预报不确定性较小,以雨强预报的不确定性为主。

3.3 暴雨预报转折前后的环流形势对比

大范围强降雨落区和强度的转折是与大尺度环流形势的调整密切相关的,下面对转折前后预报的对流层中低层形势场进行对比分析。图 6 分别是 7 月 15 日 20:00 和 16 日 20:00 预报的 20 日 08:00 的 500 hPa 位势高度及海平面气压(MSLP)的集合平均。为了更清楚地反映两者的差异,图中填色表示后者与前者预报的集合平均差值,并给出了对应的零场进行检验。由图 6a 可知,15 日预报的 500 hPa 低涡位于华北东部,较零场明显偏东,强度也明显弱于零场中心达 576 dagpm 的低涡;16 日预报的低涡较前一日预报偏西,相对于零场位置略偏北,中心强度略弱于零场(图 6b)。此外,在低涡下游也存在明显差异,16 日预报的副高及北侧高压脊更强,副高向北伸展更明显。结合 19 日 20:00 的环流形势(图略)不难发现,15 日预报的高空形势为浅槽快速东移,而 16 日预报的则是高空低涡受加强的高压脊

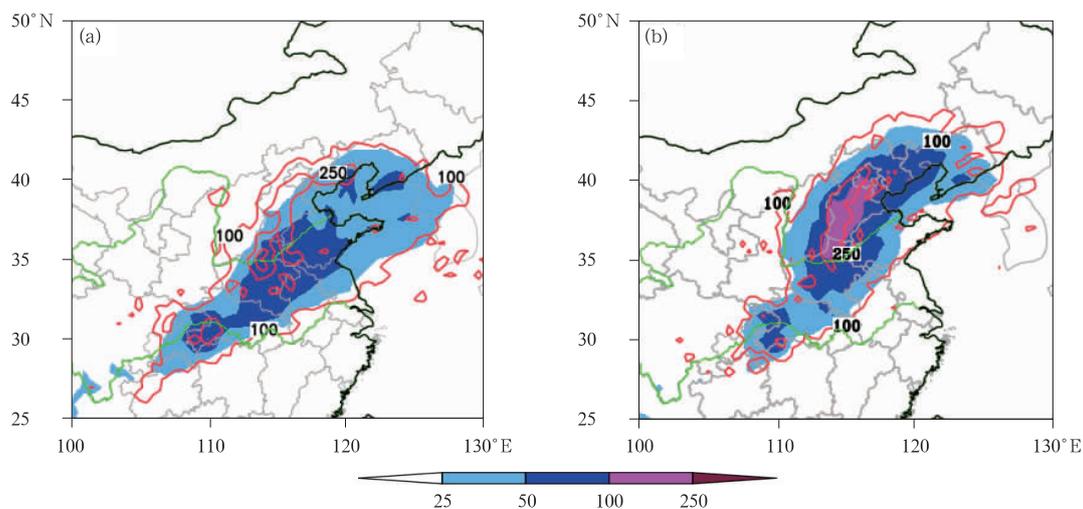


图 5 EC 集合预报 2016 年 7 月 (a) 15 日 20:00 和 (b) 16 日 20:00 起报的 7 月 19 日 08:00 至 21 日 08:00 的累积降水量集合平均值(填色)和集合最大值(等值线,单位:mm)

Fig. 5 Ensemble mean (shaded area) and maximum of precipitation (contours) from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 21 July of EC ensemble forecast initialized at (a) 20:00 BT 15, (b) 20:00 BT 6 July 2016 (unit: mm)

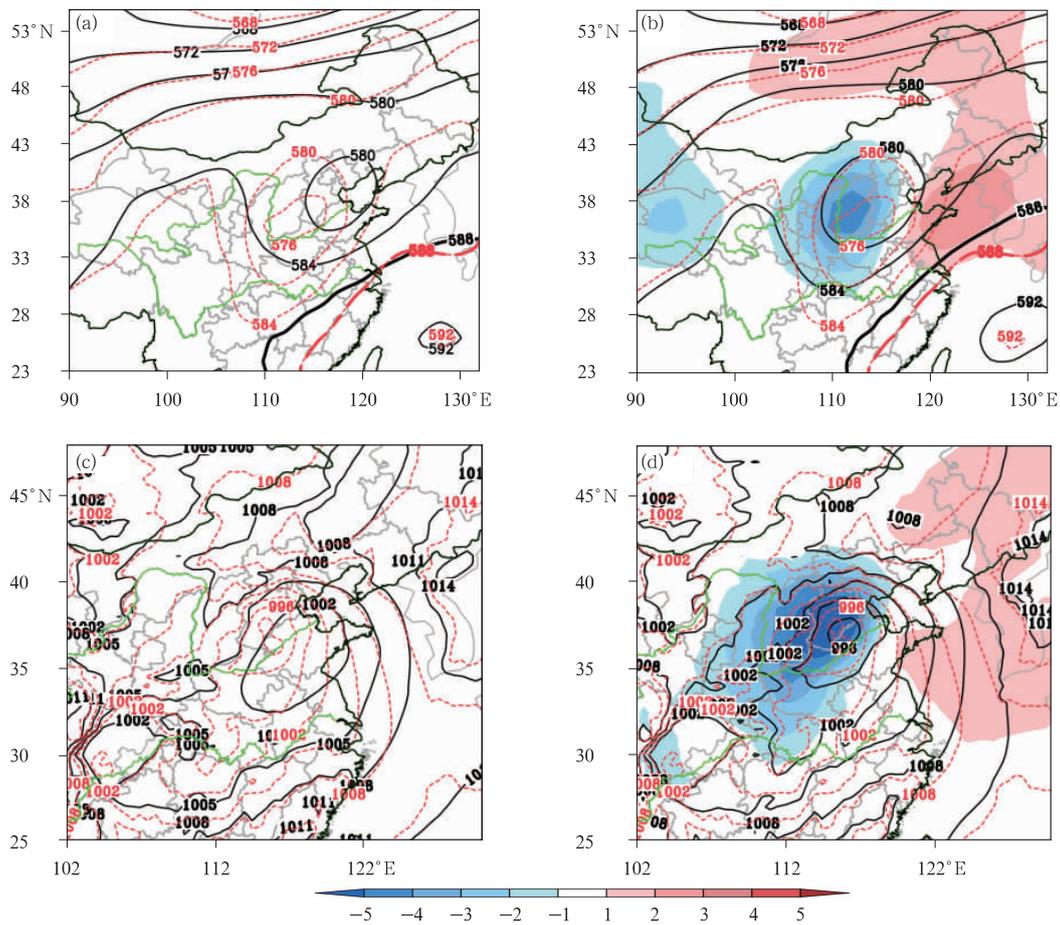


图 6 EC 集合预报 2016 年 7 月 15 日 20:00 起报的 20 日 08:00 的 500 hPa 位势高度(a, 单位:dagpm)和 MSLP 集合平均(c,单位:hPa),7 月 16 日 20:00 起报的 20 日 08:00 的 500 hPa 位势高度(b,单位:dagpm)和 MSLP 集合平均(d,单位:hPa) (填色为前后起报的集合平均差值,红色虚线为零场)

Fig. 6 EC ensemble forecast (a) 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), (c) MSLP ensemble mean (unit: hPa) at 08:00 BT 20 initialized at 20:00 BT 15 July 2016, (b) 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), (d) MSLP ensemble mean (unit: hPa) at 08:00 BT 20 initialized at 20:00 BT 16 July 2016 (Shaded area represents ensemble mean difference between different lead times, red dashed lines represent analysis)

阻挡,形成移动缓慢“东高西低”的环流型。

黄河气旋是影响此次京津冀地区强暴雨的直接影响系统。15 日预报的黄河气旋在 20 日 08:00 位于山东半岛,相比于 19 日 20:00 中心强度有所减弱。16 日预报的黄河气旋 19 日 20:00 位于河南北部,20 日 08:00 缓慢北抬至河北南部,中心强度维持,气压达 996 hPa,与零场基本一致。前后预报的 MSLP 差异可达 5 hPa 以上,主要位于黄河气旋的西北部。同时,与黄河气旋一致,16 日预报的 850 hPa 上西南涡表现出北抬加强的变化趋势(图略),但是,前后起报时次预报的位势高度差在 4 dagpm,

不如 MSLP 明显。

综上所述,15 和 16 日预报的环流形势存在明显差异,最显著的差异是黄河气旋,16 日预报的形势演变更加接近零场,即中层河套附近低槽受下游高压脊加强阻挡缓慢东移加深,形成“东高西低”型配置,黄河气旋及西南涡北抬加深,导致预报的雨区发生了明显的北抬,降雨强度更大。

4 暴雨集合预报敏感性分析

上述对暴雨预报的检验结果表明,对于华北

“7·20”强暴雨过程,EC 集合预报从 16 日 08:00 起报开始有较好的预报能力,同时,该时刻预报的降水量离散度较大,说明还存在较大的不确定性,有利于探求不确定性的来源。下面将基于该时刻起报的集合预报利用集合敏感性分析方法研究对暴雨过程预报敏感的环流系统及关键区。

图 7a 和 7b 分别是 19 日 08:00 和 20 日 08:00 的 500 hPa 位势高度与 19 日 08:00 至 21 日 08:00 的京津冀区域降水量的相关系数。可以看出,19 日 08:00 在河套南部和山东半岛分别有负相关和正相

关区,并且超过了显著性检验,因此,这些区域为暴雨过程预报的敏感区。结合 500 hPa 高度集合平均可知,集合成员预报的 19 日 08:00 河套南部低槽越强,山东半岛高压脊越强,则集合成员预报的京津冀 48 h 累计降水量越大。到了 20 日 08:00,上述敏感区位置东移,位于华北西部和山东半岛及黄海,通过显著性检验的范围更大,相关性也更高,相关系数绝对值达到 0.6 以上。此外,敏感区位于 500 hPa 低涡东西两侧,表明暴雨对低涡的位置比强度更加敏感,如果低涡偏西,则降水量偏大。从降水量与

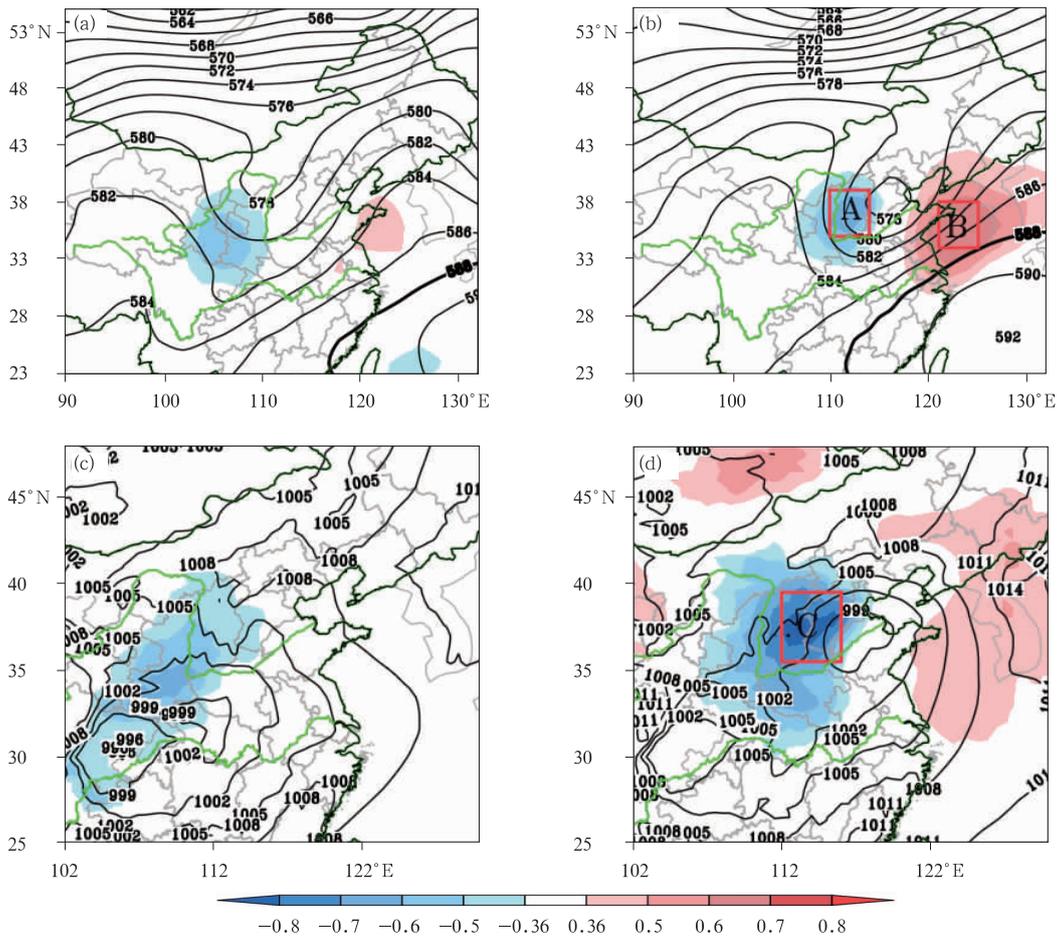


图 7 EC 集合预报 2016 年 7 月 16 日 08:00 起报的 19 日 08:00 至 21 日 08:00 的区域平均降水量和集合预报的 19 日 08:00 的(a)500 hPa 位势高度(单位:dagpm)和(c)MSLP(单位:hPa), 20 日 08:00 的(b)500 hPa 位势高度(单位:dagpm)和(d)MSLP(单位:hPa)的相关系数(填色)(等值线表示集合平均值,各个方框代表敏感关键区)

Fig. 7 Correlation coefficient (shaded area) between regional average precipitation from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 21 July initialized at 08:00 16 July of EC ensemble forecast at 08:00 BT 19 July (a) 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), (c) MSLP (unit: hPa), and at 08:00 BT 20 July (b) 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), (d) MSLP (unit: hPa) (Contours represent ensemble mean, boxes indicate sensitivity areas)

MSLP 的相关系数(图 7c 和 7d)可知,黄河气旋对暴雨有更显著的影响。19 日 08:00,陕西附近存在显著负相关,20 日 08:00 负相关区随黄河气旋北抬而北移,并且相关系数增强,中心值达到 -0.8 以上,强于 500 hPa 的相关性。此外,负相关区位于集合平均的黄河气旋中心西侧,说明气旋的位置对于降水量也有重要的影响。

综合上述分析结果发现,对于暴雨最敏感的环流系统是黄河气旋,集合成员预报的黄河气旋位置偏西偏北,强度越强,则预报的京津冀降水量越大。

5 关键环流系统转折分析

通过转折前后环流对比和敏感性分析不难看出,环流结构的差异与敏感区的空间分布非常一致,据此我们确定了三个关键区,即影响京津冀强暴雨预报转折或不确定性的关键区域(图 7),分别是 500 hPa 上华北西部(A 区),山东半岛东部(B 区),海平面气压上河北西南部和山西东部(C 区)。

图 8 是 EC 集合预报提前 9~1 d 不同起报时间预报的 7 月 20 日 08:00 的 500 hPa A 区和 B 区的位势高度以及零场。由图可知,16 日以前预报的河套南部低槽强度存在起伏,16 日以后预报的位势高度已稳定在较低值。对于下游高压脊,20 日 08:00 零场位势高度超过 586 dagpm,11 日 08:00(提前 9 d)没有成员预报出下游的高压脊。但是与上游低槽不同,从中位数的演变趋势可以看出 EC 集合预报对于高压脊预报呈明显增强的趋势。对于黄河气

旋,16 日前后 MSLP 预报存在明显的从高到低的转折(图 8c)。值得注意的是,虽然高低空形势在 16 日前后都存在预报上的转折,但 16 日 08:00 预报的 A、B 区 500 hPa 高度及 C 区 MSLP 的标准差分别为 1.8 dagpm、2.2 dagpm 和 3.1 hPa,说明低层黄河气旋的预报不确定性更大。

以上分析表明黄河气旋的强度预报存在着转折,但是强降雨落区的转折可能与黄河气旋的位置关系更密切。图 9 是 EC 集合预报提前 7~1 d 不同起报时间预报的 7 月 20 日 08:00 的 MSLP 最低值中心的经纬度箱须图以及零场,所选的区域范围是 33°~44°N、110°~127°E。箱子的长度反映出,16 日之前预报的黄河气旋中心位置纬向不确定性较大,总体较零场偏东,而 16 日以后预报的黄河气旋更加偏西。在经向上,16 日之前预报的黄河气旋虽然总体偏南,但呈现出向北调整的趋势。到 16 日 08:00,黄河气旋中心的纬度中位数已超过零场,且纬度的离散度小于经度的离散度,说明气旋的东西位置仍存在较大不确定性,这也解释了集合敏感性相关系数最高的区域位于集合平均的西北偏西一侧(图 7d)。

为了更清楚地揭示黄河气旋的位置对强降雨的影响,图 10 给出了 EC 集合预报 15 和 16 日预报的 20 日 08:00 各成员的黄河气旋中心位置,圆圈的大小表示相应成员预报的 19 日 08:00 至 21 日 08:00 京津冀区域平均降水量。很容易看出,15 日预报的黄河气旋中心比较发散,集合平均位于山东西南部。此外,集合成员预报的降水量与黄河气旋的位置有

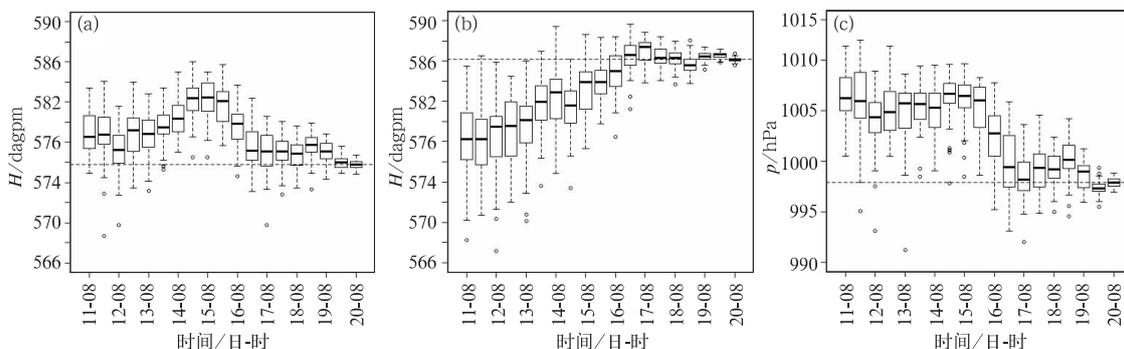


图 8 EC 集合预报不同起报时间预报的 2016 年 7 月 20 日 08:00 的 A 区的 500 hPa 位势高度(a)、B 区的 500 hPa 位势高度(b)和 C 区的 MSLP(c)箱须图 (虚线为零场)

Fig. 8 Boxplot of EC ensemble forecast at 08:00 BT 20 July 2016 (a) 500 hPa geopotential height of area A, (b) 500 hPa geopotential height of area B, (c) MSLP of area C at different lead times (Dashed line represents analysis)

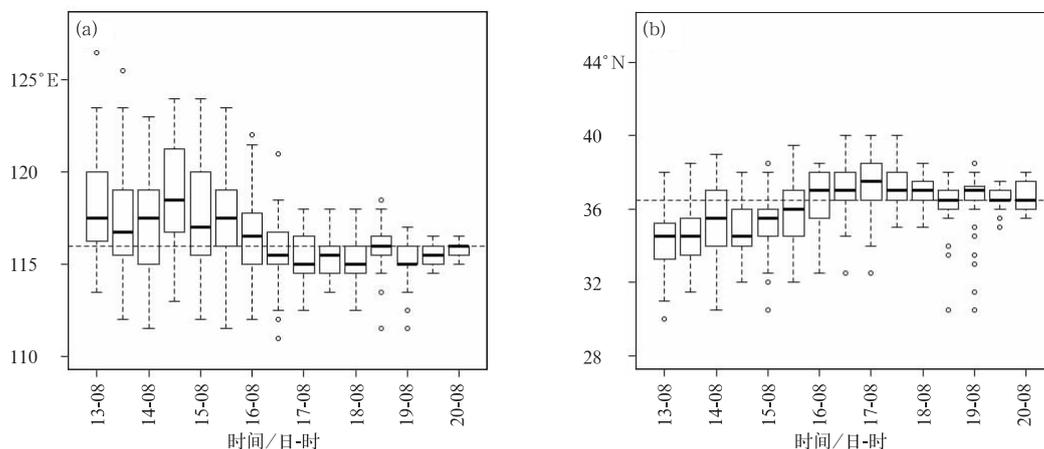


图 9 EC 集合预报不同起报时间预报的 2016 年 7 月 20 日 08:00 的 MSLP 最低值中心的经度(a)和纬度(b)箱须图
(虚线为零场)

Fig. 9 Boxplot of the MSLP minimum center (a) longitude and (b) latitude at 08:00 BT 20 July 2016 of EC ensemble forecast at different lead times
(Dashed line represents analysis)

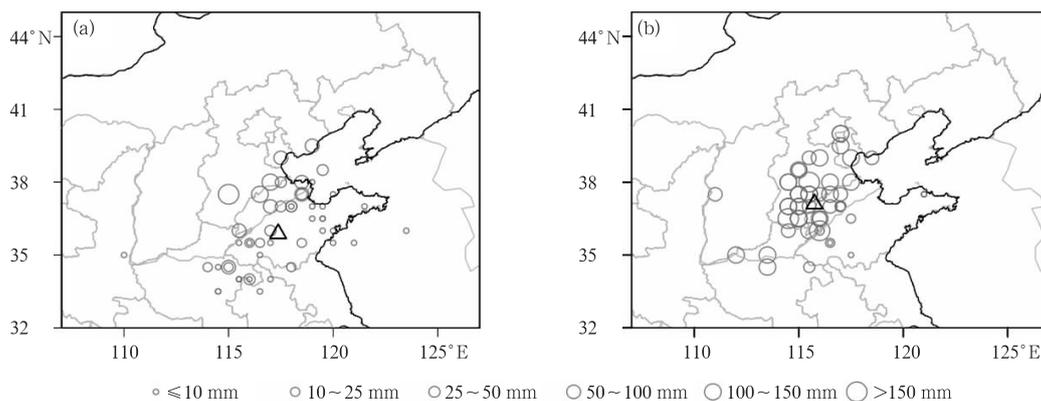


图 10 EC 集合预报 2016 年 7 月(a)15 日 20:00 起报、(b)16 日 20:00 起报的 7 月 20 日 08:00 各成员的黄河气旋中心位置
(圆圈大小表示各成员预报的 7 月 19 日 08:00 至 21 日 08:00 京津冀区域平均降水量, 三角形表示黄河气旋中心的集合平均)

Fig. 10 The Yellow River cyclone center of ensemble members at 08:00 BT 20 July of EC ensemble forecast initialized at (a) 20:00 BT 15 July, (b) 20:00 BT 16 July 2016
(Circle size indicates the corresponding area averaged precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei Region from 08:00 BT 19 July to 08:00 BT 21 July, triangle indicates the ensemble mean of the Yellow River cyclone center)

密切的关系,黄河气旋偏东偏南的成员预报的降水量较小,偏北偏西的成员预报的降水量较大。16 日预报的黄河气旋中心则比较集中,说明不确定性较小,而位置集合平均较前一日北抬到河北南部,对应的成员预报的降水量也明显增大。

实际上,15 日集合预报个别成员预报的黄河气旋位于河北南部,接近于实况,其预报的降水量甚至超过 150 mm,虽然相对于全体成员概率较小,但为

预报员提供了一种可能性。总体而言,黄河气旋的强度和位置是影响此次华北强暴雨的关键,也是导致中期预报出现转折的重要原因。

6 结论与讨论

本文利用常规气象观测资料、EC 集合预报和 T639 集合预报等资料对 2016 年“7·20”华北强暴

雨过程的中期预报转折进行了初步分析,并通过集合敏感性分析研究了影响降雨中期预报不确定性的环流系统及关键区,得到如下主要结论:

(1) “7·20”华北强暴雨过程具有降雨范围大、持续时间长、强度强的特点。高空“东高西低”环流形势的稳定维持为强降雨发生提供了有利的大尺度环流背景条件,发展北抬的黄河气旋是造成华北强降雨的直接影晌系统,“7·20”强暴雨是高低空系统共同配合的结果。

(2) EC 集合预报在 7 月 16 日前后对降雨落区、强度的预报发生了明显的转折,其因是大尺度影响天气系统的预报发生了转折性变化,EC 集合预报 16 日 20:00 起报的环流形势集合平均对比 15 日 20:00 起报场显示,在河套附近 500 hPa 低槽受下游加强的高压脊阻挡,形成了移动缓慢“东高西低”的环流型,而黄河气旋及西南涡则北抬加深。

(3) 集合敏感性分析发现对华北降雨预报敏感的区域与暴雨预报转折前后环流差异的分布型一致,引起降雨预报转折的影响系统也是降雨中期预报不确定性的来源。对于降雨预报最敏感的环流系统是黄河气旋,集合成员预报的黄河气旋偏西偏北,强度越强,则相应预报的京津冀降水量越大,反之,黄河气旋东移减弱,则不利于京津冀强降水的发生。

Yu and Meng (2016) 利用集合敏感性分析了 2012 年“7·21”北京特大暴雨的关键影响系统,发现强降雨预报对 850 hPa 低涡比高空槽更加敏感。本文的结论与之类似,强降雨预报对低层系统尤其黄河气旋更敏感,可能一方面由于黄河气旋尺度较小,其初始误差较大,另一方面其移动比高空槽更明显,也容易导致误差增加更快。因此,对于黄河气旋影响的华北地区暴雨,中期预报需要关注黄河气旋的路径和强度,特别是利用集合预报分析黄河气旋的位置,同时利用前后时次的预报把握其不确定性及趋势。限于本文所用的是全球模式低分辨率资料,主要从大尺度上分析了暴雨中期预报转折和误差的成因,未涉及中、小尺度对流的影响,将来需要利用高精度模式资料开展更加深入的研究。

参考文献

陈静,陈德辉,颜宏,2002. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报,13(4):497-507.

湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考

- (一)观测分析和思考[J]. 气象,38(10):1255-1266.
- 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等,1980. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[C]//暴雨及强对流天气的研究——中国科学院大气物理研究所集刊,第 9 号. 北京:科学出版社:1-13.
- 杜钧,Grumm R H,邓国,2014. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”:以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例[J]. 大气科学,38(4):685-699.
- 杜钧,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.
- 段明镗,王鑫兴,吴洪宝,等,2009. 夏季亚欧中高纬度环流的集合预报效果检验[J]. 应用气象学报,20(1):56-61.
- 金荣花,李月安,晁淑懿,等,2004. 长江中下游旱涝中期预报方法及其业务应用[J]. 气象,30(12):47-52.
- 李向红,蒋丽娟,薛荣康,等,2006. 广西季风暴雨中期预报平台研制思路与应用[J]. 气象,32(5):110-115.
- 梁丰,陶诗言,张小玲,2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析[J]. 应用气象学报,17(3):257-265.
- 孟雪峰,孙永刚,萨日娜,等,2013. 河套气旋发展东移与北京 721 暴雨的关系[J]. 气象,39(12):1542-1549.
- 穆穆,陈博宇,周非凡,等,2011. 气象预报的方法与不确定性[J]. 气象,37(1):1-13.
- 孙继松,何娜,王国荣,等,2012. “7·21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害,31(3):218-225.
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,等,2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学,37(3):705-718.
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象,38(10):1267-1277.
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社:1-225.
- 王秀文,李勇,周兵,2012. Rossby 波列传播效应在梅汛期强降雨中期预报中的应用研究[J]. 气象,38(9):1070-1077.
- 王毅,金荣花,代刊,等,2014. 2008 年 1 月欧亚阻塞形势的 ECMWF 集合预报效果评估检验[J]. 大气科学学报,37(3):257-267.
- 尹洁,陈双溪,刘献耀,2004. 江西汛期连续暴雨形势特征与中期预报模型[J]. 气象,30(5):16-20.
- 俞小鼎,2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象,38(11):1313-1329.
- 张文龙,崔晓鹏,2012. 近 50 a 华北暴雨研究主要进展[J]. 暴雨灾害,31(4):384-391.
- Brier G W, 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability[J]. Mon Wea Rev,78(1):1-3.
- Danforth C M, Kalnay E, Miyoshi T, 2007. Estimating and correcting global weather model error[J]. Mon Wea Rev,135(2):281-299.
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N, 2004. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme[J]. Mon Wea Rev, 132(11):2610-2627.
- Gray S L, Dunning C M, Methven J, et al, 2014. Systematic model forecast error in Rossby wave structure[J]. Geophys Res Lett,

- 41(8):2979-2987.
- Li Jun, Du Jun, Zhang Dalin, et al, 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China[J]. *Q J Roy Meteor Soc*,140(680):766-782.
- Loeser C F, Herrera M A, Szunyogh I, 2017. An assessment of the performance of the operational global ensemble forecast systems in predicting the forecast uncertainty[J]. *Wea Forecasting*,32(1):149-164.
- Matsueda M, Endo H, 2011. Verification of medium-range MJO forecasts with TIGGE[J]. *Geophys Res Lett*,38(11):L11801.
- Matsueda M, Nakazawa T, 2015. Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts[J]. *Meteor Appl*,22(2):213-222.
- Qian Chuanhai, Zhang Fuqing, Green B W, et al, 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010)[J]. *Wea Forecasting*,28(6):1562-1577.
- Schumacher R S, 2011. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event [J]. *Mon Wea Rev*,139(9):3016-3035.
- Torn R D, Hakim G J, 2008. Ensemble-based sensitivity analysis [J]. *Mon Wea Rev*,136(2):663-677.
- Yu Huizhen, Meng Zhiyong, 2016. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012[J]. *Tellus A*,68(1):31045.
- Zhou Baiquan, Niu Ruoyun, Zhai Panmao, 2015. An assessment of the predictability of the East Asian subtropical westerly jet based on TIGGE data[J]. *Adv Atmos Sci*,32(3):401-412.
- Zhu Yuejian, 2005. Ensemble forecast: a new approach to uncertainty and predictability[J]. *Adv Atmos Sci*,22(6):781-788.