

Summary for “2016 年 7 月华北极端降水的中期预报误差分析”

Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19–20, 2016

Kan Dai^{1*}, Baogui Bi¹ & Yuejian Zhu²

¹ National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

² NOAA/NWS/NCEP/Environmental Modeling Center, Maryland 20740, USA

* Corresponding author, E-mail: daikan1998@163.com

The extreme precipitation event that occurred in North China during July 19–20, 2016, resulted in serious casualties and property loss. The persistence of a strong cyclone originating in the Huang-Huai region led to this event. The cyclone center predicted by almost all operational numerical models tended to the south or east compared to the analysis, and the predicted intensity was weaker beyond the 4-d lead-time. The combination of these two factors meant that the medium-range forecasts for North China did not warn of heavy rain. Ensemble sensitivity analysis (ESA) and comparisons between member subgroups can be used to diagnose the potential sources and evolution of forecast errors. Here, the analysis is based on the 51-member European Centre for Medium-Range Forecast (ECMWF) Ensemble Prediction System initialized 5 days prior to the cyclone's maturity. The ESA calculates the correlation coefficients between the principal components of the leading empirical orthogonal functions on the ensemble sea level pressure forecast of the cyclone and the upper circulation and finds the high correlation (i.e. sensitive) areas. This method can identify sensitive weather systems at earlier lead times and is capable of investigating uncertainties in the cyclone intensity and its track separately, allowing the potential error sources to be distinguished. The results of the ESA indicate that the uncertainty in the cyclone intensity forecast, which explains 54.4% of the variance, is related to the strength of two sensitive systems: the short wave that separated from the deep trough to the west of Xinjiang and the height field over regions south of the Yangtze River. In particular, the uncertainty in the east-west component of the cyclone position has a strong connection to the phase of these sensitive systems. Two groups are selected for further analysis: an accurate group composed of the eight members that had the smallest errors associated with cyclone track, intensity, and precipitation distribution; and a failed group consisting of the eight members that predicted the southernmost and weakest cyclone. The composite normalized differences between these two subgroups are employed to investigate the dynamical processes associated with forecast errors. Three significant difference areas (SDAs) associated with the sensitive systems were identified, including the front and rear positive SDAs of the potential vorticity disturbance (PVD) that split from the deep cyclone over West Siberia, and the negative SDA to the west of the PVD that originated from Western Inner Mongolia. These SDAs can be traced back to the model initialization or early lead times, which means that initializing and short-lead errors have important influences on the model's medium-range prediction. The original SDAs display a maximum at the upper troposphere and present a positive-negative interval array; these SDAs tend to propagate along the high PV gradient and spread out to the lower troposphere. To diagnose the physical mechanism by which these errors (i.e. difference areas) influenced the cyclone development in the model, statistical PV inversion is applied to derive the wind field associated with the PV difference between the accurate and failed subgroups. The results of this analysis show that the two positive SDAs accompanying the split PVD affect the cyclone's formation intensity, its track, and the strength of the downstream ridge. The negative SDA, after arriving at the lower-middle reaches of the Yangtze River, affects the strength of the southerly warm, moist airflow during the cyclogenesis. Overall, the members of the accurate group present more intensive upper PVD and carry the warm, wet air further north, which is conducive to the rapid increase in strength and the more northerly track of the cyclone. In addition, the reasons for large forecast uncertainties are discussed. These may relate to the quality of data assimilation in the warm conveyor belt of the West Siberia deep cyclone, imperfect model parameterizations, and the complex topography of the Qinghai-Tibet Plateau. Finally, the above analysis shows that the ESA and the subgroup difference analysis can complement each other. The former can easily identify the upstream sensitive weather systems that may accompany forecast errors, while the latter can be applied to further diagnose the dynamic processes and mechanisms at play.

extreme precipitation, extratropical cyclone, medium-range forecast, model error source, ensemble forecast

doi: 10.1360/N972017-00889

2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析

代刊^{1*}, 毕宝贵¹, 朱跃进²

1. 国家气象中心, 北京 100081;

2. NOAA/NWS/NCEP/Environmental Modeling Center, Maryland 20740, USA

* 联系人, E-mail: daikan1998@163.com

2017-08-17 收稿, 2017-11-09 修回, 2017-11-09 接受, 2018-01-16 网络版发表

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002, GYHY201206005)、国家科技支撑计划(2015BAC03B00)和气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015Z06)资助

摘要 2016年7月19~20日华北地区受黄淮气旋影响出现极端降水, 数值模式对气旋的中期预报(≥ 4 d)出现显著偏差. 基于欧洲中期天气预报中心集合预报数据, 对中期预报误差的来源和演变进行了分析. 采用集合敏感性分析显示: 敏感系统主要包括新疆以西高空槽分裂出的短波, 及江南上空高度场; 气旋强度与敏感系统强弱显著相关, 而位置与系统位相关密切. 进一步挑选两组集合成员: 一组气旋路径、强度及降水接近实况; 另一组则路径偏南且强度偏弱. 组间标准差分析显示: 有3个来自初始场及早期预报的显著差异区与敏感系统相伴随, 包括从西西伯利亚深厚气旋分裂的位涡扰动的前部、后部的正差异区, 以及内蒙古西部位涡扰动西侧的负差异区; 初始差异区主要位于对流层高层, 呈正负相间波列排列; 差异区沿位涡梯度带向下游移动, 并逐渐向低层伸展. 采用统计位涡反演方法探讨误差影响的机制表明, 两个正差异区影响了气旋生成的强度和路径, 以及下游高压脊的强度; 负差异区影响了气旋生成时偏南暖湿气流的输送; 预报较准确的成员, 表现出更强的高空位涡扰动和低层偏南暖湿气流输送位置更偏北. 最后讨论误差形成的可能原因, 并指出敏感性分析和成员分组对比可以互补, 用于监测中期预报误差的演变和影响.

关键词 极端降水, 温带气旋, 中期预报, 模式误差来源, 集合预报

天气业务数值模式的中期预报能力(4~10 d)得到持续改进^[1]. Laloyaux和Bengtsson^[2]回顾欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Forecast, ECMWF)的全球模式预报技巧改进, 指出利用当前的同化和预报系统, 北半球热带外地区的500 hPa高度场的60%距平相关技巧水平较40年前延长了5 d. Magnusson和Källén^[3]指出模式能力的提升主要来自于数值模式系统的改进(更高空间分辨率、更准确的物理过程描述)、数据同化能力的提升、观测系统的升级以及大量新资料的应用. 此外, 为考虑预报的不确定性, 20世纪90年代开始集合数值模式逐步得

到业务运行及应用, 并体现出较单个模式更高的预报技巧^[4~6].

尽管模式能力不断增强, 但对一些高影响天气系统, 有时仍会出现较大的预报误差. 2015~2016年受超强厄尔尼诺的影响, 极端天气频发^[7]. 毕宝贵等人^[8]统计表明, 2016年夏季极端降水日数发生比例为2000年以来最多, 其中2016年7月19~20日以华北为中心的极端暴雨过程, 决定了2016年7月极端降水的气候分布特征. 此次过程, 除了异常多的水汽输送和副热带高压偏强外, 直接原因是黄淮气旋在华北地区上空强烈发展并维持^[9]. 对该气旋过程, 所有业务数值模式

引用格式: 代刊, 毕宝贵, 朱跃进. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析. 科学通报, 2018, 63: 340~355

Dai K, Bi B G, Zhu Y J. Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19–20, 2016 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 340–355, doi: 10.1360/N972017-00889

在提前4 d及以上的中期时效都预报气旋位置偏东或偏南,且强度偏弱。这导致华北区域的强降水漏报。

已有的研究表明,数值模式对温带气旋的预报有时会出现显著偏差。如在欧洲,1999年12月的气旋Martin和Lothar,即使提前1~3 d也很难做出较准确的预报^[10,11];在北美,2010年12月26~27日的气旋风暴,提前3~5 d的预报出现了较大的位置偏差^[12],而2000年1月24~25日位于东海岸的爆发气旋,甚至很难提前1~2 d预报出强降水的位置^[13];在我国,温带气旋的发生发展会带来剧烈天气^[14],如夏季的黄淮气旋、江淮气旋等常会引发暴雨灾害,且要准确预报这些系统带来的强降水落区有时难度很高^[15,16]。

温带气旋的预报误差既可来自天气系统本身,也可来自大气环流上游地区的传播。Langland等人^[17]研究美国东海岸的气旋个例表明:与气旋位置和强度相关的预报误差来自于东太平洋,沿波列随预报时效向下游传播;误差传播比天气尺度的高空槽和脊移动速度更快,具有下游效应。Hakim^[18]进一步分析发现:中纬度天气系统的最大分析和预报误差位于对流层顶,以群速度传播;这主要由于对流层顶的扰动与诱发地面气旋的垂直速度关系密切,也验证了中纬度系统的可预报性主要通过斜压不稳定来影响^[19]。Zheng等人^[12]和Chang等人^[20]利用集合敏感性方法分析表明:集成员之间的气旋位置和强度的预报差异,源自于成员对上游系统的预报差异;预报显著差异区以类似Rossby波包的方式传播影响预报区域,表现了预报误差的传播特征。Lamberson等人^[21]对2011年12月16日影响欧洲的温带气旋预报诊断分析也表明,东太平洋深槽前部暖区内的次天气尺度短波的模式分析误差,会对最终气旋的生成和发展产生重要影响。

2016年7月19~20日黄淮气旋给华北等地所带来的强降水,造成了严重人员伤亡和财产损失。由于2016年7月上旬持续性暴雨带来的防汛压力,此次气旋天气过程的中期预报偏差给汛期气象服务带来严峻的挑战。为此,有必要分析该类型极端降水过程的预报误差来源和演变,为中期天气预报提供指导和参考。

1 天气过程概况及预报检验

1.1 降水特征描述

2016年7月19~20日,华北地区出现了2016年最

强降水过程。本次过程降水具有如下特点(图1): (1) 累积降水量范围广、强度大,山西中东部、山东西部、河北中南部和东部、京津地区以及辽宁西部等地出现了100 mm以上的大暴雨,其中河北西南部、北京南部和辽宁西南部的局地达到了250 mm以上; (2) 具有显著的极端性,有64个国家站超过了1980年以来7月的历史极值,其中北京大兴(242 mm)、河北井陘(380 mm)、武安(374 mm)等县(市)日雨量突破有气象记录以来历史极值; (3) 地形对降水的增幅作用明显,强降水中心主要沿太行山东麓、燕山南麓分布,短时强降水(小时雨强大于20 mm/h)频次大于5次也主要位于上述区域。

1.2 天气系统演变

根据Hakim^[18]的研究,中纬度天气系统的初始预报误差极值位于对流层高层。为此,主要分析黄淮气旋生成之前的对流层顶天气尺度和次天气尺度扰动的演变特征。如图2,基于ECMWF确定模式分析场给出2-PVU(potential vorticity units, $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$)等位涡面上的位温分布。这反映了对流层顶的高度,即

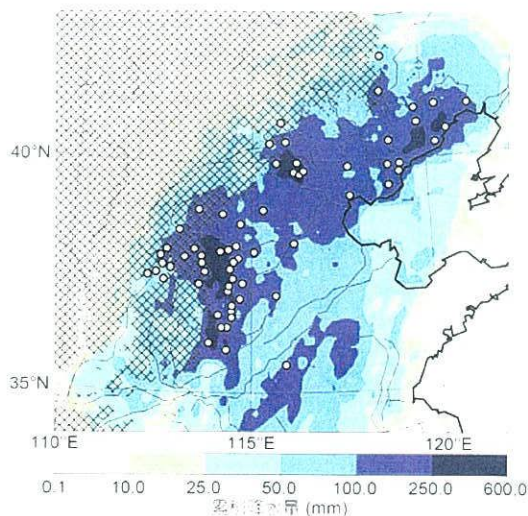


图1 (网络版彩色)2016年7月19日00时至21日00时(UTC)累积降水量分布(填色等值线)。白点代表日降水量超过1980~2015年7月日降水量最大值的站点。网格填充为地形高度大于800 m的区域。降水数据来自国家气象信息中心。

Figure 1 (Color online) The shaded contours represent accumulated precipitation from 0000 UTC 19 July until 0000 UTC 21 July 2016. The white dots denote the observe stations whose daily rainfall exceeds the maximum daily precipitation in July from 1980 to 2015. Hatched regions indicate where terrain height is greater than 800 m. Precipitation data is from the National Meteorological Information Center

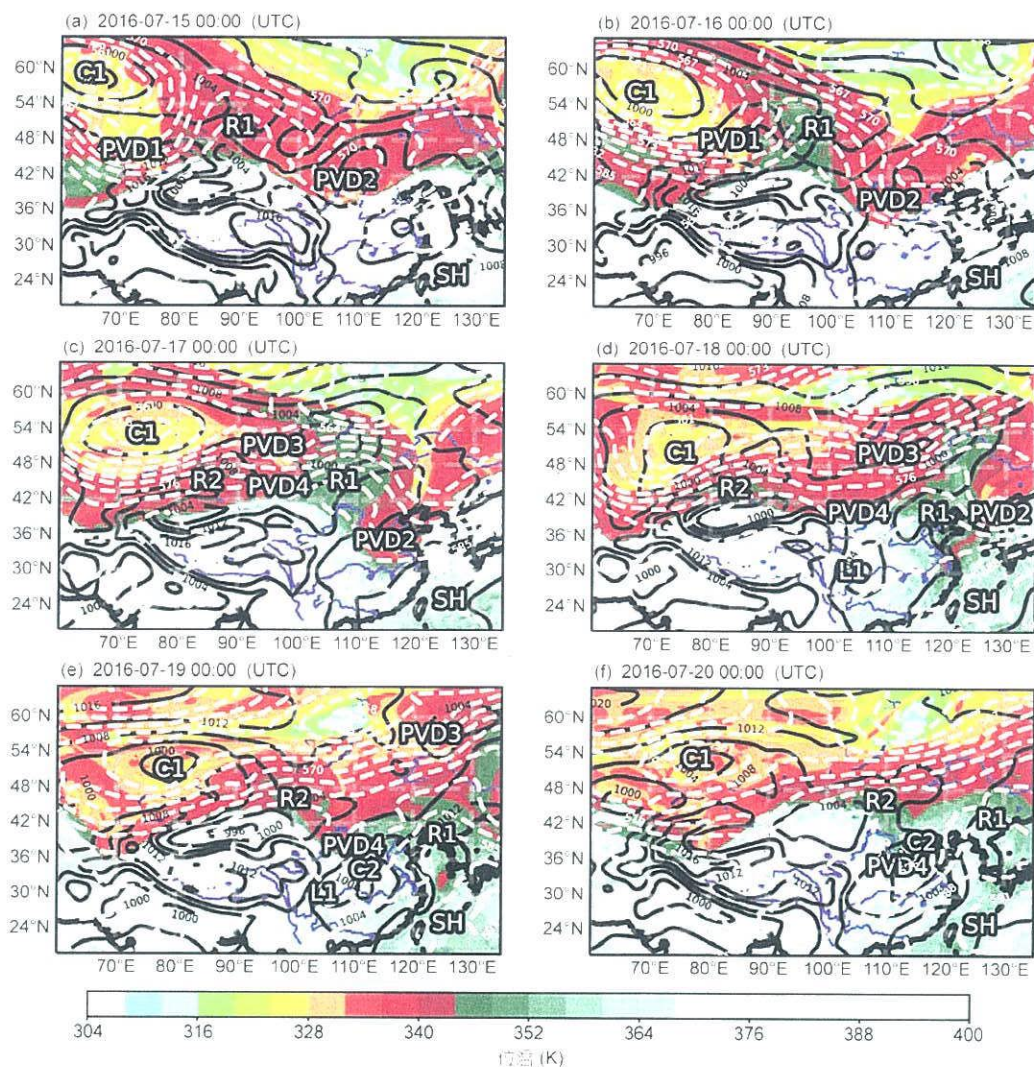


图2 基于ECMWF确定性模式分析场的对流层顶(2-PVU等位涡面)上位温场(填充等值线, 间隔4 K), 以及海平面气压场(黑色等值线, 间隔4 hPa)和500 hPa高度场(白色虚线等值线, 间隔3 gpm). (a) 2016年7月15日00时(UTC); (b) 16日00时; (c) 17日00时; (d) 18日00时; (e) 19日00时; (f) 20日00时. 天气系统用白色文本标记

Figure 2 The deterministic ECMWF analyses of potential temperature (shaded, every 4 K) on the tropopause (2-PVU surface), sea level pressure (black contours, every 4 hPa) and 500-hPa geopotential height (white dashed contours, every 3 gpm). Analyses are valid at (a) 0000 UTC 15 July; (b) 0000 UTC 16 July; (c) 0000 UTC 17 July; (d) 0000 UTC 18 July; (e) 0000 UTC 19 July; (f) 0000 UTC 20 July 2016. Weather systems are labeled in white

相对低的位温区域表示对流层顶位涡扰动(potential vorticity disturbance, PVD), 与高位涡下沉相对应. 当PVD遇到低层斜压区时, 有利于地面气旋的生成^[22].

如图2(a), 2016年7月15日00时(UTC, 下同)在西西伯利亚平原南部上空存在深厚的气旋系统C1(中心气压为992 hPa). 该系统稳定维持, 并不断从高位涡区撕裂出PVD向东移动. 其中之一的PVD1位于C1的东南侧, 在C1的引导下向东移动, 其南侧与位涡梯

度带相邻. 在PVD1下游为位于新疆地区上空的高压脊R1, 由于其南部移动相对较慢, 逐渐向东北-西南向倾斜. R1的前方, 位于内蒙古西部上空存在PVD2. 该扰动将向下层伸展, 与位于淮河地区的江淮气旋形成相联系. 由于没有系统阻挡, 江淮气旋形成后快速东移入海(图2(b)和(c)).

至16日00时(图2(b)), PVD1在C1的引导下东移到了新疆西北部. 由于高原地形的阻挡, PVD1的南部

比北部移动更慢。下游的R1继续东移并倾斜,强度有所增强。PVD2南压到华中地区。

至17日00时(图2(c)), C1缓慢向东南移动到哈萨克斯坦北部上空。在C1旋转引导和蒙古高原阻挡的共同作用下, PVD1分裂成两个扰动, 分别是位于贝加尔湖以西的PVD3和新疆地区的PVD4。PVD3逐渐脱离C1, 并在中西伯利亚诱发地面气旋的生成(图2(c)和(d))。PVD4沿位涡梯度带呈东西向, 其底部向下和向南伸展形成对流层顶折叠(图略)。该扰动是诱发后期黄淮气旋生成的直接影响系统。在PVD4的上游, 有高压脊R2逐步加强。同时下游的R1东移到蒙古国中部。PVD2则进一步东移南压, 位于华东地区上空。

至18日00时(图2(d)), PVD3快速东移至贝加尔湖以东。PVD4则沿位涡梯度带东移至内蒙古西部, 其底部则伸展到青海东部。PVD4对应的500 hPa高空槽加强, 促使四川盆地上空低层有低涡L1形成。高压脊R1东移到我国东部。在R1和副热带高压SH的挤压下, PVD2主体向北收缩, 南部形成一条狭长的位涡带。

至19日00时(图2(e)), PVD4继续南压, 在盆地低涡L1的东侧诱发出新的气旋C2。正是该气旋向东北方向移动, 并不断加强形成黄淮气旋给华北地区带来强降水。PVD4下游的高压脊R1与副热带高压(以下简称副高)SH同位相叠加, 副高SH增强并向北伸展。PVD4上游的高压脊R2东移到蒙古国西部, 逐步向东北-西南向倾斜。

至20日00时(图2(f)), 副高SH西伸, R1位置维持并继续增强, 同时R2继续向东移动到蒙古国东部。在R1和R2的共同作用下, 将PVD4从北方高位涡区的切断出来。PVD4继续南压到河南西部, 相应的500 hPa上有切断低涡形成。西南地区上空的低涡L1减弱消失, 而C2快速发展增强。C2受东侧高压阻挡, 气旋中心缓慢由东北向移动到山东西部, 中心气压值加深到992 hPa。

由上述分析可见, 黄淮气旋形成的直接诱因是来自西西伯利亚深厚气旋系统分裂出来的对流层顶位涡扰动, 沿位涡梯度带向下游传播到我国中部从而引起黄淮气旋的生成。同时, 来自新疆上空的高压脊与副高的叠加增强, 形成的阻挡作用也有利于黄淮气旋移动缓慢且路径偏北。

1.3 确定性和集合模式预报检验

对于此次气旋过程, 全球业务模式(ECMWF,

NCEP GFS和T639)的中期确定性预报出现明显的偏差。如图3(a), 2016年7月20日00时的ECMWF模式分析场显示: 黄淮气旋的地面中心(最低气压位置)位于山东西部; 气旋结构呈现非对称性; 850 hPa层风场显示来自西南方向的低空急流沿涡旋东侧进入华北地区; 充沛的暖湿空气加上天气系统、地形的动力抬升作用, 为暴雨的发生提供了必要条件。提前5~4 d的确定性模式预报(图3(b)和(c))与分析场对比差异显著: 气旋中心较实际位置偏南约200~300 km; 尽管中心气压相差2~5 hPa, 但预报的850 hPa风速 ≥ 16 m/s的范围明显偏小, 急流顶端只到达江淮地区, 导致降水预报显著偏南。

除确定性模式之外, 大部分集合预报成员也出现了类似的预报误差, 且表现出较大的不确定性。14日12时起报(图3(b))的气旋中心偏东或偏南, 其中偏南的大部分成员中心强度偏弱或没有预报出闭合气旋, 偏东的大部分成员尽管中心气压偏差不大, 但风场的强度仍明显偏弱(图略)。15日12时起报(图3(c))的气旋中心预报偏东北的成员数增加, 且强度有所增强; 但大部分成员预报的降水偏差大。进入短期时效(提前3 d), 如图3(d), 气旋中心位置以及850 hPa风场结构更接近分析场, 集合成员中心位置也更加集中。可见, 从中期到短期的预报, 数值模式有显著调整使得预报不确定性快速减小。

2 数据及分析方法

采用ECMWF全球集合预报(ECMWF ENS)^[23]分析模式预报误差的来源和演变。ECMWF ENS总体预报性能优于其余业务模式, 且具有1个控制和50个扰动成员。成员数量较多更能完整地描述预报的不确定性^[24], 有利于统计分析结果的可靠性。重点分析2016年7月15日12时起报的预报结果, 提前更长的时效预报具有类似结论。

集合敏感分析方法能够识别出不同环流形势下模式预报的敏感区域, 有助于诊断预报误差的传播^[12]。该方法利用集合成员的预报量与状态量之间的线性相关或回归关系, 来推导出预报量对于模式初始和预报场的敏感区域和程度。由于线性关系的假设, 通常集合敏感分析适用于1~3 d的预报, 但Chang等人^[20]的研究表明对于较强的温带气旋, 仍能够追溯到提前6 d的敏感信号。依据Torn等人^[25]的定义, 若集合预报有 M 个成员, 任何预报量 J 相对于状

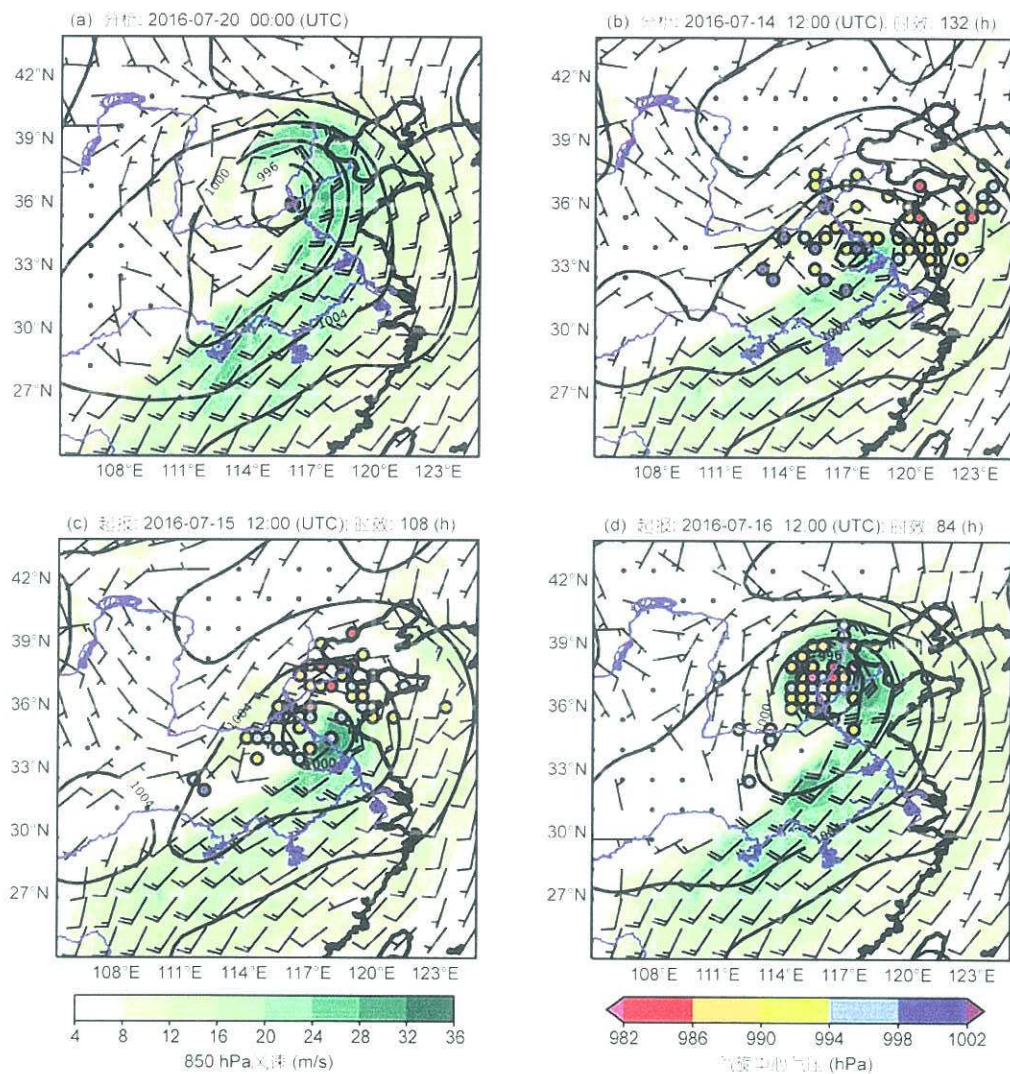


图3 2016年7月20日00时(UTC)850 hPa风场(填充等值线, 间隔4 m/s)及海平面气压场(黑色等值线, 间隔4 hPa)的ECMWF确定性数值模式的分析与预报场。黑色圆点为分析场气旋中心。彩色圆点为ECMWF集合模式预报的气旋中心(颜色表示中心气压值, 若成员没有预报出闭合气旋系统则无标记)。(a) 7月20日0时分析; (b) 7月14日12时起报; (c) 7月15日12时起报; (d) 7月16日12时起报

Figure 3 The deterministic ECMWF analysis and forecasts valid at 0000 UTC 20 July 2016 for 850-hPa wind speed (shaded, every 4 m/s) and sea level pressure (black contours, every 4 hPa). The black dot shows the location of cyclone's analyzed sea level minimum at 0000 UTC 20 July 2016. The other dots show the locations of cyclone's predicted sea level minimum by the ECMWF ENS, and the color represents the strength of cyclone (hPa). (a) Analysis is valid at 0000 UTC 20 July 2016; (b) forecasts are initialized at 1200 UTC 14 July 2016; (c) forecasts are initialized at 1200 UTC 15 July 2016; (d) forecasts are initialized at 1200 UTC 16 July 2016

态变量 X_i 的敏感性可用下式表示:

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

式中, J 和 X_i 分别表示预报量和第 i 个状态变量, 为 $1 \times M$ 的矩阵; cov 表示 J 和 X_i 之间的协方差; var 表示方差。上述公式中敏感性与预报量具有相同的维度, 描述了被选状态变量的一个标准方差的变化和所对应

的预报量的变化。可以证明, 敏感性与 J 和 X_i 的相关系数成正比, 因此实际计算中使用相关系数代表敏感性。预报量的选取影响敏感信号的强弱, 需要反映气旋结构特征^[20]。为此采用经验正交函数EOF(empirical orthogonal function)来分解气旋活动范围内的海平面气压场集合预报, 选取主要模态的主成分序列PC(principal components)作为预报量, 状态变量则

选择各等压面的高度场。

为进一步分析模式误差的来源、演变及动力特征,参照Lamberson等人^[21]的组间差异分析方法,从51个集合成员中挑选出两组成员,每组包括8个成员:一组成员预报的黄淮气旋路径偏北,中心气压低,更接近实况,称为优势组;另一组成员预报的气旋位置偏南,且中心气压高,偏差显著,成为劣势组。具体方法为:追踪每个集合成员对19日12时至20日12时的气旋路径和强度预报;然后与分析场对比,按照路径和强度的绝对误差大小分别排序;每个成员的路径和强度的排序序号相加,即为该成员总的预报排序;序号越小(大),表示越接近(偏离)分析场。除排序之外,注意到由于气旋的非对称结构,只用路径和强度不足以反映成员的降水预报能力,为此还参照19日12时至20日12时的降水预报与实况的对比,即若排序序号较小,但降水误差大,也不予考虑进入优势组。对15日12时起报的成员分组结果为:优势组包括第1, 9, 10, 13, 24, 25, 32, 40号成员(控制预报为0,扰动预报标号与模式输出一致);劣势组包括第4, 18, 21, 26, 30, 33, 34, 38号成员。图4给出分析路径和不同分组的预报路径,可以看到:优势组成员路径偏北,主要沿山东北部向东北方向移动,与实况相比移动偏快,但都给华北地区带来强降水;劣势组成员路径偏南到苏皖北部,且强度弱,则降水偏南偏弱。

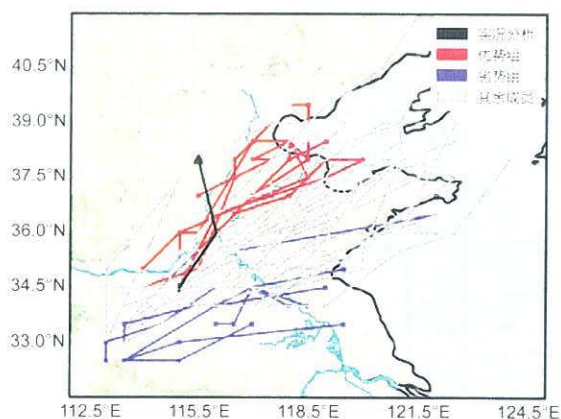


图4 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报的19日12时至20日12时的气旋路径预报。黑色实线表示分析路径,红色实线表示优势组预报,蓝色表示劣势组预报,灰色表示其余成员预报

Figure 4 Ensemble forecasts from 0000 UTC 15 July 2016 initialization of ECMWF ENS of cyclone's track between 1200 UTC 19 July and 1200 UTC 20 July. The black line indicates cyclone's track from ECMWF analyses during this time period. The red lines indicate Accurate member tracks; the blue lines indicate failed member tracks, and the gray lines denote non-subgroup member tracks

分组完成后,通过诊断两组成员集合平均之间的差别,分析误差的来源和动力过程。依据Torn等人^[26]的定义,使用标准差来表现组间差异:

$$\Delta x_i = \frac{\bar{x}_i^{\text{good}} - \bar{x}_i^{\text{bad}}}{\sigma_{x_i}}, \quad (2)$$

式中, $\bar{x}_i^{\text{good}}$ 和 $\bar{x}_i^{\text{bad}}$ 分别表示优势组和劣势组的第*i*个状态量的集合成员组平均, σ_{x_i} 表示所有集合成员的方差。标准化的差异可以使得不同层次、时效和变量之间进行对比。采用Bootstrap不插回重采样技术^[27]评估标准差的显著性,即从51个成员中随机、不插回地抽取两组成员,计算其组间标准差,重复1000次,以获得95%的信度水平。

3 预报误差来源及演变诊断分析

3.1 集合敏感性分析

集合成员的EOF分析可以确定其变率。如图5(a), 2016年7月15日12时起报,预报的20日0时海平面气压场(mean sea level pressure, MSLP),集合平均的气旋中心位于山东北部(118.4°E, 37.5°N),而集合离散度的极值中心略偏北约80 km;与实况相比(图3(a)),集合平均的气旋中心偏东北约300 km。图5(b)~(d)给出MSLP集合预报的前3个EOF模态。EOF1(图5(b))解释54.4%的变率,呈现单级型,其中心与离散度中心重合,表现气旋强度的不确定性;正值说明成员的PC值越小,则气旋强度越强。EOF2(图5(c))解释17.3%变率,呈现东西向的偶极型,表现气旋位置东西向的不确定性;值分布呈现东负西正,说明PC值越小,气旋向西偏移;EOF3(图5(d))解释9.8%变率,呈现南北向的偶极型,表现位置南北向的不确定性;北正南负说明PC值越小,气旋向北偏移。

上述分析可见,EOF的不同模态反映了气旋的强度和位置的不确定性。为分析不确定性与上游地区的初始条件和预报的关系,计算不同EOF模态PC序列与不同时效预报的等压面高度场之间的相关系数(敏感值),进而分析敏感区的分布和移动来推断误差的演变特征。这里正(负)敏感值表示增强(减弱)的模式。主要分析EOF1和EOF2的400 hPa敏感区特征,EOF3的敏感区不显著。

EOF PC1(即EOF1的PC序列)对应96 h时效的敏感值分布(图6(a))显示,大范围的正敏感区(中心值 ≥ 0.5)位于华北地区上空,与高空槽对应,表明高空

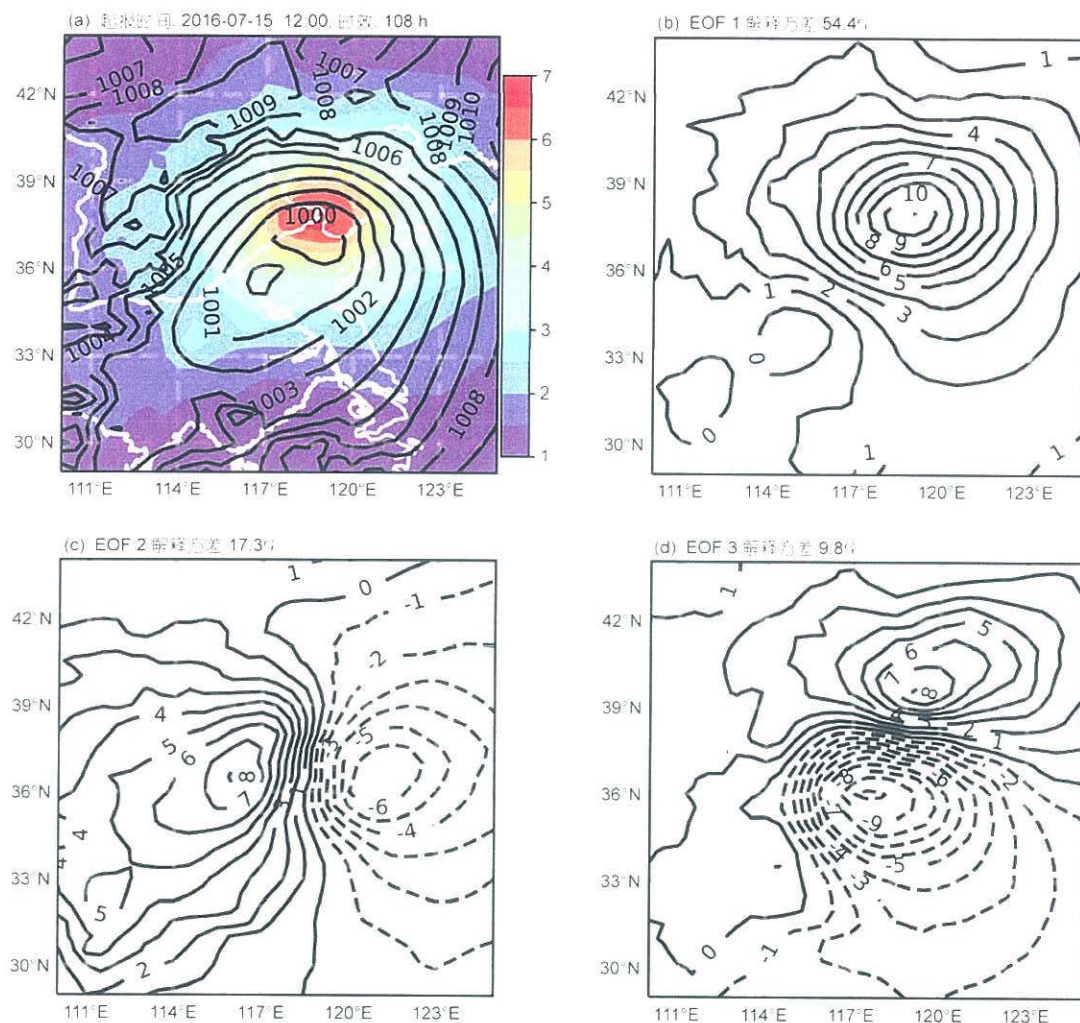


图5 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报, 预报时刻为20日0时的海平面气压场(MSLP)集合平均(黑色等值线, 间隔1 hPa)及离散度(填充等值线, 间隔1 hPa)预报(a). MSLP经验正交函数分解(EOF)的第一模态EOF1(b), 第二模态EOF2(c), 第三模态EOF3(d). 图上方标出EOF模态所解释的方差

Figure 5 The ECMWF ENS forecasts valid at 0000 UTC 20 July and are initialized at 1200 UTC 15 July 2016 for the ensemble mean (black contour, every 1 hPa) and spread (shaded, every 1 hPa) of mean sea level pressure (MSLP) (a). The leading three EOF patterns for this MSLP forecast are EOF1 MSLP pattern (hPa) (b), EOF2 MSLP pattern (c) and EOF3 MSLP pattern (d). The variance explained by each EOF MSLP pattern is labelled above the figure

槽越深(高度场越低), PC1越低, EOF1模态强度越弱, 则气旋强度越强. 至72 h时效(图6(b)), 正敏感区追溯到西北地区东部和内蒙古西部, 对应高空短波槽, 敏感值降低(中心值 ≥ 0.4); 同时江南地区出现大范围的负敏感区(中心值 ≤ -0.5), 表明该区域高度场越高, 气旋强度越强. 至48 h时效(图6(c)), 正敏感区略有西移, 中心值达到0.5以上; 同时江南地区的负敏感区减弱. 至24 h时效(图6(d)), 正敏感区可追溯到新疆中东部, 强度减弱, 但范围仍明显; 江南的负敏

感区已经消失. 至初始场(图6(e)), 正敏感区仍小范围存在, 位于新疆以西的高空槽前.

对于EOF PC2, 对应96 h时效的敏感值分布(图6(f))显示: 华北地区上空高空槽前至下游高压脊后为负敏感区(中心区域值 ≤ -0.5), 而上游位于西北地区的高压脊前为正敏感区(中心区域值 ≥ 0.3), 表明气旋的东西向位置与高空槽、上下游高压脊的位相关. 至72 h时效(图6(g)), 高空槽前的负敏感区位置维持且强度减弱, 而上游的正敏感区则追溯到西北

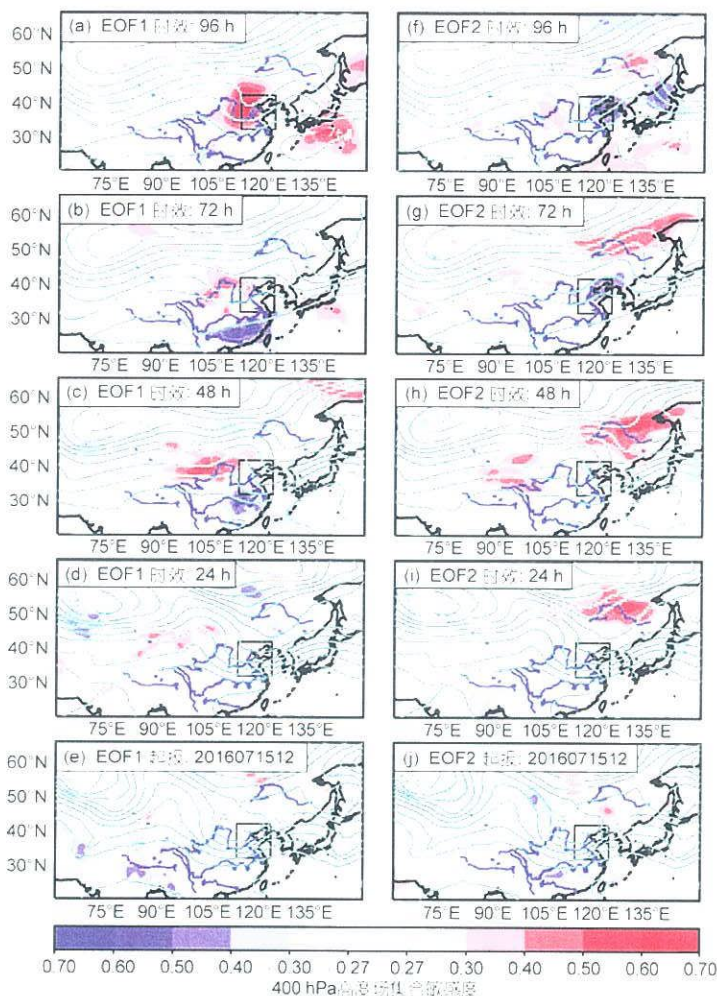


图6 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报,20日0时的海平面气压场(黑色方框内)EOF模式主成分的敏感性分析。(a)~(e)为EOF PC1对400 hPa高度场(实线等值线,间隔4 gpm)之间的敏感值(填充等值线);(f)~(j)则为EOF PC2

Figure 6 The ensemble sensitivity valid at 0000 UTC 20 July and are initialized at 1200 UTC 15 July 2016 for the principle component (PC) for EOF patterns of the ECMWF ENS MSLP in the black box. (a)~(e) Sensitivity (shaded) of EOF PC1 to geopotential height (contour lines, every 4 gpm) at 400 hPa. (f)~(j) Sensitivity of EOF PC2 to geopotential height

地区中部。至48 h时效(图6(h)),负敏感区减弱缩小,移动到下游高压脊前;而上游的正敏感区范围扩大,值增强(中心值 ≥ 0.4)。至24 h时效(图6(i)),在新疆南部和内蒙古中部分别有小范围的正负敏感区存在;至初始场,正敏感区已经不显著,而负敏感区还存在于高压脊前,位于蒙古国中部。

将敏感区与前述天气系统相联系可见:与气旋强度不确定性相关的正敏感区可以追溯到初始场上新疆以西的高空槽前,其移动与PVD1分裂出的PVD4相对应;而负敏感区可追溯到48 h时效预报,对应PVD2的底部。与气旋位置不确定性相关的敏感

区则与PVD4、上下游高压脊R1和R2的位相相关。

3.2 集合成员分组间的差异分析

上述敏感性分析,表明气旋预报不确定性与上游敏感天气系统的传播密切相关。可以假设,预报误差与敏感天气系统相伴,也具有类似的传播特征。为证实,通过对集合成员优势组与劣势组的标准差分析,进一步诊断预报误差的来源和演变。涡度能反映天气系统的位置和强度,为此选取各等压层的涡度作为对比的状态量。由于涡度场包含不同尺度系统而具有较多噪音,为关注主要的、具有一致结构的预

报误差,采用区域平均法进行滤波,即对每个格点及其周围400 km半径范围内格点求平均.图7给出400 hPa等压面上组间标准差的演变.

在初始场上(图7(a)),C1,PVD1及其南侧延伸到30°N的区域为集合平均正涡度带,在PVD1西部为负

差异区(中心47°N,74°E),东侧为较大范围的显著正差异区(中心45°N,87°E).这说明优势组中,PVD1对应高空槽向下游伸展更显著,且强度更强.从剖面图分析(图8(a)),正差异区主要分布在500~300 hPa之间,且400 hPa上最强;表明初始误差主要分布在

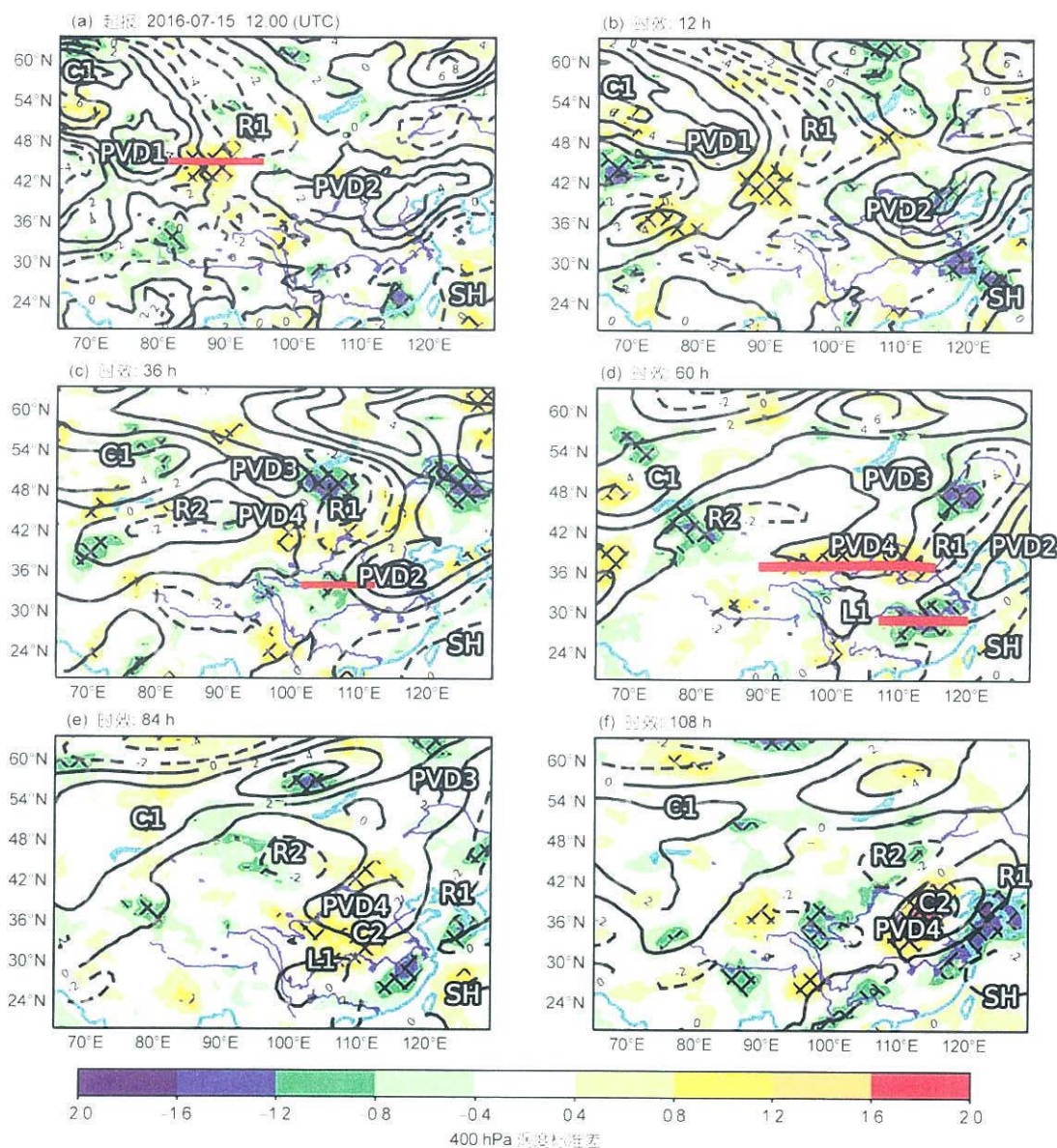


图7 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报,400 hPa涡度集合平均场(黑色等值线)以及优势组与劣势组之间的涡度标准化差异(填充等值线). (a)为初始场, (b)~(f)分别为12, 36, 60, 84和108 h时效预报. 方格填充区域为差异显著性超过95%信度水平的区域. 与图2中对应的天气系统用白色文字标注. 红色实线表示图8中剖面所在的位置

Figure 7 The ensemble-mean 400-hPa vorticity (black contours, every $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) and normalized difference in 400-hPa vorticity between the accurate and failed members (shading) at 0 (a), 12 (b), 36 (c), 60 (d), 84 (e), and 108 h (f) lead time for the ECMWF ENS forecast initialized at 1200 UTC 15 July 2016. Hatching indicates where the differences between the two subgroups is statistically significant at the 95% confidence level. Weather systems identified in the text are labeled in white. Red lines denotes cross sections shown in Figure 8

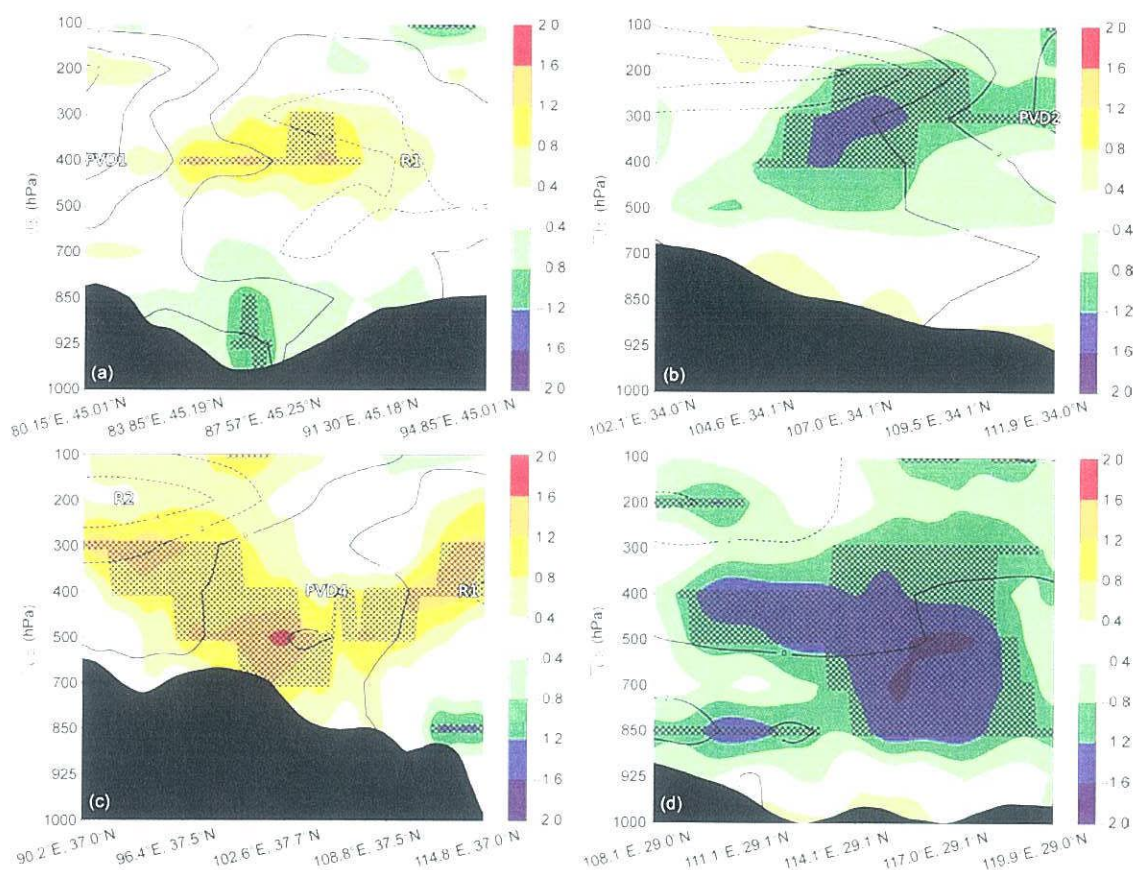


图8 优势组与劣势组之间涡度标准化差异的剖面图。剖面位置如图7中红线, (a)为初始场, (b)为36 h时效, (c)和(d)为60 h时效且分别位于河套地区和江南地区。地面以下的层次用黑色填充, 其余说明与图7相同

Figure 8 Cross sections of the ensemble mean vorticity (black contour, every $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and normalized difference in vorticity between the accurate and failed subgroups (shaded) at initial (a), 36 h (b), and 60 h in Hetao area (c) and regions south of the Yangtze River (d), respectively. Hatched regions indicate where the difference is statistically significant at the 95% confidence level. Weather systems identified in the text are labeled in white. The levels below the ground are masked by black area

流层高层, 与图6(e)比较, 正差异区对应正敏感区。此外, 正差异区的下游, 即PVD2的西侧(中心 44°N , 97°E), 存在微弱负差异区, 与前述负、正差异区形成波列, 这与Hakim^[18]指出的预报误差结构一致。

12 h时效之后(图7(b)), PVD1向东移动, 相应正涡度带的南部受高原地形阻挡移动缓慢; 且出现正差异区, 表明优势组的高空槽更深。PVD1前侧的正差异区沿位涡梯度带向东移动到新疆西部。PVD2西侧的负差异区也东移, 且范围有所扩大, 表明劣势组成员的PVD2西伸更多。

至36 h时效(图7(c)), PVD1分裂成PVD3和PVD4后, 正差异区位于PVD4的前部, 继续沿位涡梯度带移动到甘肃西部和内蒙古西部, 正差异值减小。PVD4后部的负涡度区伸展到新疆上空(与高压脊R2

对应)。之前PVD1南侧的正涡度带受其挤压转为东西向; 该正涡度带的西部(即新疆西南部)在300 hPa有显著的正差异区(图略), 表明优势组在高层有更强的短波系统。同时, 随PVD2的东移南压, 其西侧的负差异区移动到陕西中南部, 中心标准差值增强到-1.2以下; 垂直剖面(图8(b))显示该负差异区分布在500~100 hPa之间, 其中400~200 hPa更显著。

至60 h时效(图7(d)), PVD4沿位涡梯度带移动到内蒙古西部, 其前部的正差异区有所增强; 垂直剖面(图8(c))显示正差异区位于500~200 hPa, 且向前倾斜, 表明优势组PVD4向东延展更多。之前位于R2南侧的正涡度带向东收缩, 对应的正差异区位于PVD4后部, 且更加显著; 垂直剖面(图8(c))显示向上游倾斜, 前下方一直伸展到地面, 位于PVD4中心下方,

且极值位于500 hPa(达到1.6),表明优势组预报的PVD4更强且位置偏西,而向上游倾斜表示高空的更强位涡有利于前侧低层系统的发展.此外,PVD2东移,并受到R1的挤压,其西侧的负差异区东移南压到长江中下游地区,且范围和差异值都增大;垂直剖面(图8(d))显示中心值达到-1.6以下,底部向下伸展到850 hPa,表明优势组比劣势组在该区域的反气旋环流更强、更深厚.

至84和108 h时效(图7(e)和(f)),PVD4前侧的正差异区减弱消失,其后侧正差异区伴随PVD4移动并变大,表明两组间差异越来越大.在108 h时效标准差达到1.6以上,位于集合平均正涡度区的西侧,表明相对于大多数集合成员,优势组成员预报的低涡更强,且移动更慢,这有利于华北地区出现强降水.此外,江南地区的负差异区移动到低涡的前方,表明优势组的高压脊R1发展更强,有利于阻挡气旋东移,并引导其向北移动,更接近实况分析.

综合上述分析,表明敏感天气系统(如分裂的PVD4和PVD2)与组间显著差异区相伴随,且敏感区移动能反映预报误差的传播特征.直接影响气旋系统的3个显著差异区中:PVD4东侧正差异区和PVD2西侧负差异区可以追溯到初始场,而PVD4西侧的正差异区也可追溯到12 h时效,表明模式初始场和早期预报误差对中期预报具有重要影响;差异区呈现正负相间的波列状排列,且都沿位涡梯度带向下游移动,上下游效应不明显;此外,初始时刻差异区主要位于对流层高层,之后逐渐向下层传播,在黄淮气旋系统形成时延伸到对流层整层.对14日12时起报的集合成员进行同样的分组和差异分析(图略),结果显示除了初始时刻的差异区形成位置不同,以及气旋形成时差值更大,其余表现出同样的差异区传播和演变特征,这表明预报误差的传播具有一定的稳定性.

3.3 误差影响的物理机制分析

上述组间标准差异分析表明,与敏感天气系统相伴随的预报误差对黄淮气旋最终的路径和强度有重要影响.为分析影响产生的物理机制,利用统计位涡反演方法SPVI(statistical PV inversion)^[28]计算两组成员间由于位涡差异而产生的水平风场,进而分析不同差异区对天气系统演变的改变.这里位涡差异为两组成员平均之间的直接差值.SPVI方法利用对集合预报场的奇异值分解,计算位涡场与风场之间

的线性算子,从而用于指定位涡区域的反演.该方法主要优点是不受边界条件的限定,不足之处在于集成员数量有限可能使统计关系的自由度有限.具体方法可参考Hakim和Torn^[28].

分析PVD4前侧和后侧正差异区、PVD2西侧负差异区带来的动力影响.如图9(a),给出17日12时400 hPa等压面的组间位涡差:在PVD4前侧的位涡差值为正(中心值 ≥ 0.3 PVU),表明优势组成员在该区域具有更高的位涡值;该位涡正差值产生非对称气旋性风场,其西侧通过PVD4中心为1~1.5 m/s左右的偏北风,这有利于优势组的PVD4南压,使其与低层偏南气流结合更紧密,有利于气旋的形成;其东侧为大范围0.5~1 m/s的偏南风,这有利于下游高压脊R1的增强;其东南侧的黄淮地区上空为1~2 m/s的偏西风,有利于PVD2北收.图9(b)给出18日0时700 hPa等压面的组间位涡差:PVD2西侧负差异区对应位涡差的负值,位于长江中下游上空呈东西带状(中心区域值 ≥ 0.1 PVU);反演风场显示在四川盆地、西北地区东部、华中地区中北部上空为0.2~1.0 m/s偏南风,表明优势组成员能把暖湿空气输送到更北的位置,这为气旋形成提供能量条件.图9(c)显示,18日12时300 hPa等压面上PVD4已经南压到河套地区上空,其西侧的正差异区对应较大的位涡正差值(中心值达 ≥ 0.5 PVU),表明优势组成员具有更强的高位涡下沉运动,这为气旋发展提供上升运动条件;此外,通过PVD4中心有0.5~1 m/s的偏南风,在其西部有0.5~0.8 m/s的偏东南风,表明优势组成员的天气系统移动偏慢且偏北,这与气旋形成后的实际移动路径更相近.从上述分析可以看到,不同的预报误差,在不同阶段和垂直层次上,改变与气旋形成发展相关的动力条件和能量条件,从而对最终的降水位置产生影响.

3.4 集成员分组检验

敏感性分析和组间差异分析表明,初始分析或早期预报差异最终对黄淮气旋的路径和强度会产生重要影响.优势组成员对于对流层高层敏感天气系统的预报能力应更准确,从而能够得到更接近实况的气旋预报结果.为验证这一结论,在差异区移动范围内($80^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $24^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$),分别计算不同预报时效的优势组和劣势组成员与相应分析场之间的300 hPa涡度场相关系数,为重点关注敏感天气系统伴随的预报误差,只有差异显著性超过95%信度水平的格

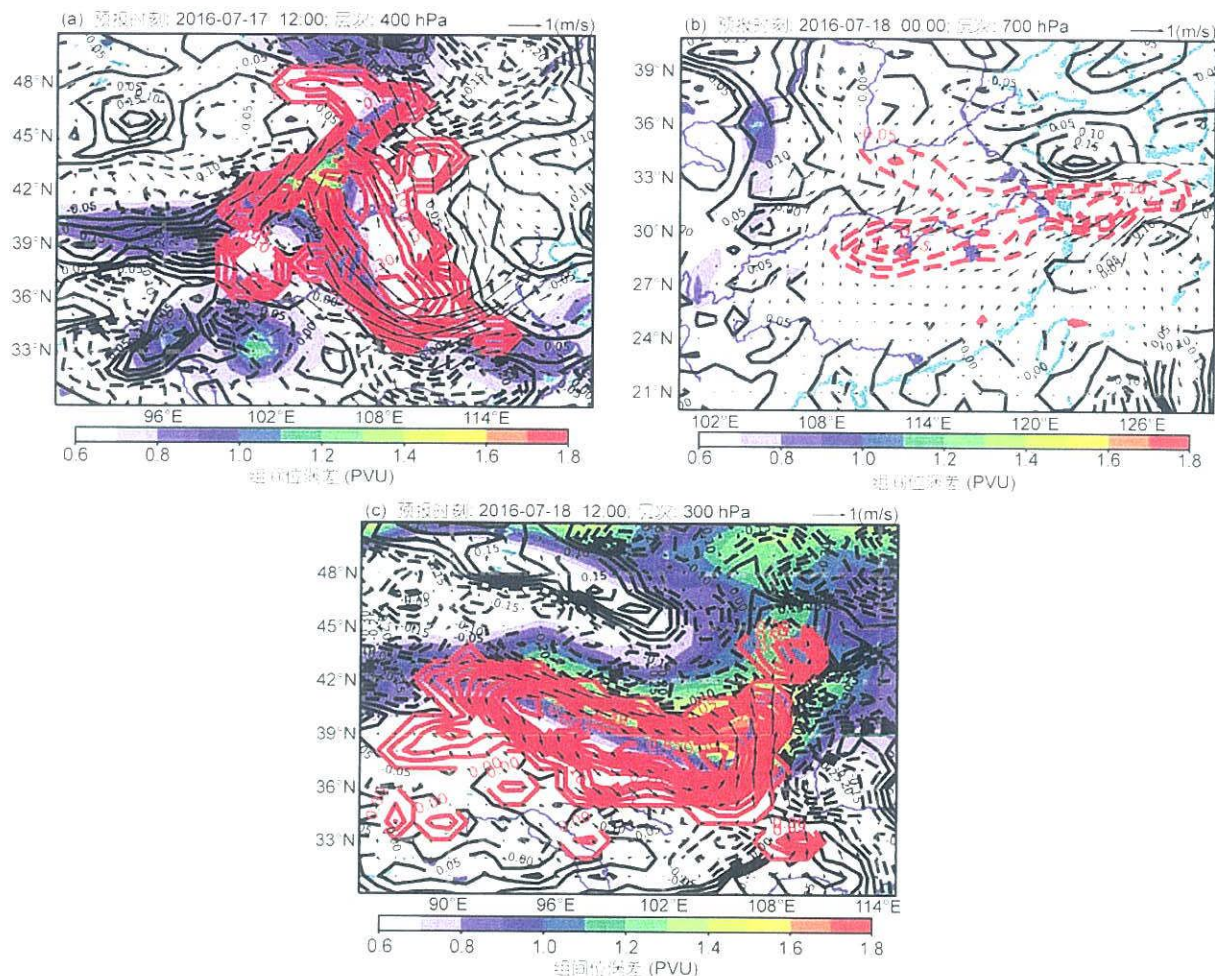


图9 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报,优势组与劣势组之间的位涡差值的反演风场(黑色箭头)。(a)48 h时效400 hPa; (b)60 h时效700 hPa; (c)72 h时效300 hPa。填色等值线为集合平均位涡场,红色等值线为用于反演的位涡差值,黑色等值线为位涡差值

Figure 9 The inverted wind field (black vector) is generated by statistical piecewise PV inversion of the PV differences between the accurate and failed subgroup for the ECMWF ENS forecast initialized at 1200 UTC 15 July 2016. (a) 48 h lead time at 400 hPa level; (b) 60 h lead time 700 hPa level; and (c) 72 h lead time at 300 hPa level. The shaded contours show the ensemble mean PV. The red contours denote the area of subgroup PV differences being inverted, while black contours denote the subgroup PV differences

点进入计算。

图10给出300 hPa优势组和劣势组的相关系数平均随预报时效的演变,其中两组成员相关系数的差别通过95%信度水平 t 检验的预报时刻用圆点标出。0~36 h时效,两组相关系数的差别很小,并逐步下降;之后差别逐渐增加,至72 h时效优势组和劣势组的相关系数平均分别为0.7和0.4,差别达到了显著性水平,其中劣势组的下降趋势更快,这期间对应敏感天气系统越过高原北部进入我国中部;72~108 h时效,相关系数平均随时效波动,且差别一直显著;至108 h时效,气旋发展成熟,劣势组相关系数平均为0.47

左右,而优势组为0.79。上述检验表明优势组成员对于敏感天气系统的预报更加准确,而劣势组则在72 h后显著低于优势组,最终导致气旋的强度和位置出现较大偏差。

4 结论和讨论

对2016年7月19~20日造成华北地区极端降水的黄淮气旋,本文分析其中期天气预报的误差来源和演变。诊断分析表明:气旋强度和路径,依赖于对流层顶位涡扰动与低层偏南暖湿气流的结合时机和强弱;当对流层顶扰动强,以及低层暖湿空气输送更偏

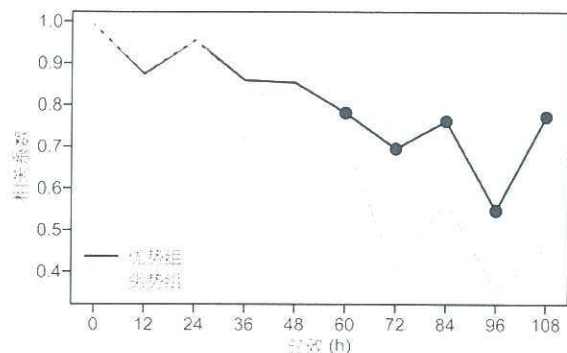


图10 ECMWF集合模式2016年7月15日12时起报,不同预报时效的优势组(实线)和劣势组(虚线)与实况分析的300 hPa涡度场相关系数。圆点标记出两组的相关系数差异达到了95%的统计显著水平。

Figure 10 Pattern correlation of ECMWF forecasted 300-hPa vorticity initialized at 1200 UTC 15 July 2016 with the corresponding analysis field. The solid line shows the ensemble mean correlation for the accurate subgroup, and the dashed line shows the ensemble mean correlation for the failed subgroup. Dots indicate times where the difference between the two subgroups is statistically significant at the 95% level.

北,两者结合更加紧密,有利于气旋的形成和快速发展;气旋发展将增强偏南气流而带来更多暖湿空气,有利于产生更多降水。Brennan等人^[29]和陶祖钰等人^[30]指出,降水伴随的潜热释放,将引起对流层低层等压面高度下降,从而气旋式涡度增加及低空急流增强,形成正反馈作用。对流层顶天气系统演变分析显示,诱发黄淮气旋的位涡扰动来自西西伯利亚深厚气旋系统的分裂,沿位涡梯度带经过西北地区到达我国中部,从而与低空偏南气流结合。对提前4 d及以上时效的预报检验显示,业务数值模式预报的位涡扰动强度以及低空偏南气流都弱于实况,从而使形成的气旋风场强度偏弱,移动路径偏南或偏快,导致华北地区强降水漏报;而提前3 d及以内的模式能够较好地预报天气系统的结合,给出较准确的预报结果。

采用集合敏感性分析,识别出对气旋强度和路径预报不确定性影响最大的系统或区域,帮助判别误差可能产生的位置。结果显示:气旋强度预报的不确定性为主要因素,与对应的高空槽深浅和江南地区上空高度场分别呈现显著的正相关(正敏感区)和负相关(负敏感区);其中正敏感区可追溯到初始场上新疆以西高空槽前,而负敏感区主要出现在48~72 h时效;两者都与对流层顶PVD强度有关;其次是气旋位置的预报不确定性,其正、负敏感区分别在高空槽后和脊前,可以追溯到初始场或早期预报场,显示

气旋位置预报与系统位相预报的关系密切。

为证实预报误差与敏感天气系统的关系,并进一步诊断误差的来源和传播,将从提前4 d起报的ECMWF集合预报成员中选取优势组和劣势组,其中优势组成员预报的气旋路径、强度和降水更接近实况分析,而劣势组预报的气旋路径偏南且强度偏弱。分析两组间标准差异随时效的演变,找出优势组预报更准确的动力原因,从而反映误差来源和传播特征。结果表明:有3个直接影响气旋生成发展的组间显著差异区,与敏感天气系统相伴随,包括从西西伯利亚深厚气旋C1分裂出来的PVD4的前部、后部的正差异区,以及内蒙古西部PVD2西侧的负差异区;差异区可追溯到初始场或12 h预报,表明初始场和早期预报误差对气旋中期预报具有重要影响;初始差异区主要位于对流层高层,呈正负相间的波列状排列,之后沿位涡梯度带向下游移动,并逐渐向低层伸展,在气旋形成时延伸到对流层整层,这些特征与北美气旋误差研究结果相似^[17,18]。利用统计位涡反演方法分析误差产生影响的动力机制,显示优势组中PVD4前部位涡更强,有利于PVD4南压与低层偏南气流结合,以及下游高压脊R1增强和位涡扰动PVD2的北收;PVD2西侧负差异区从蒙古国西部东移南压到长江中下游,优势组的反气旋性更强,能把暖湿空气输送到更偏北的位置;此外,随着PVD2后部的正差异区变得显著,有利于优势组的低层气旋快速形成,且移动缓慢、路径偏北。

需要讨论的是,本例中15日12时起报,先后产生的两个正差异区起源于温带气旋C1的暖输送带内(warm conveyor belt, WCB)。已有研究表明,WCB内建立的高压脊会调节波列中次天气尺度系统的移速,对下游天气产生重要影响^[21,31]。而在本例中,直接来自WCB的次天气尺度扰动,通过调节高空扰动与低层偏南暖湿空气的结合程度,对气旋强度和路径产生重要影响。初始误差出现在WCB的重要原因包括:WCB常伴随大面积云覆盖,这影响卫星资料同化的信息量;特别在新疆及其上游地区探空观测站稀疏,不利于对不足的卫星信息进行补充,因此容易出现分析误差^[21,32]。另外由于模式物理过程的不完整,也会导致误差的出现^[33]。本例中产生正差异区的WCB区域天气活动剧烈,而负差异区在东移南下过程也伴随云量的增加,都可能使得误差得到加强。地形影响也需要考虑^[34],PVD4前部正差异区位于新疆天山

地区,后部的正差异区也来自于新疆西南部,两者在越过青藏高原北部后得到了明显加强。此外,对于16日12时起报的初始场,系统PVD4已经移动到甘肃西部,这里具有更多的探空观测资料补充,这可能是模式得到重要调整的原因之一。以上误差产生因素,具体哪种占主要地位,还需要进一步进行更多个例统计分析 & 数值模拟研究。

最后,本研究表明预报员需要持续监视上游天

气系统的模式分析和预报误差。通过集合敏感性和成员分组标准差分析,能够有效、可靠地识别和追踪模式误差。对于集合敏感性分析,优点是若预报量和状态量选择适当,能够快速、便捷地判别敏感天气系统,缺点是无法细致地分析误差产生的来源及动力机制。分组标准差分析,在集合成员样本量足够大的情况下,可以弥补集合敏感性分析的不足,但缺点是找出合理的成员分组需要一定的主观经验。

参考文献

- Harper K, Uccellini L W, Morone L, et al. 50th Anniversary of operational numerical weather prediction. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2007, 88: 639–650
- Laloyaux P, Bengtsson L. Forty years of improving global forecast skill. *ECMWF Newsllett*, 2015, 145: 2–3
- Magnusson L, Källén E. Factors influencing skill improvements in the ECMWF forecasting system. *Mon Weather Rev*, 2013, 141: 3142–3153
- Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1993, 74: 2317–2330
- Molteni F, Palmer T N. Predictability and finite-time instability of the northern winter circulation. *Q J R Meteorol Soc*, 1993, 119: 269–298
- Zhu Y. Ensemble forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22: 781–788
- Li Q Q, Min Q Y. A dialogue with Renhe Zhang: The heavy rainfall over southern China in the first half year of 2016 and its relation to the 2015/2016 super El Niño (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2659–2662 [李清泉, 闵庆华. 对话张人禾: 2016 年上半年中国南方强降雨与超强厄尔尼诺. *科学通报*, 2016, 61: 2659–2662]
- Bi B G, Zhang X L, Dai K. Characteristics of 2016 severe convective weather and extreme rainfalls under the background of super El Niño (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 928–937 [毕宝贵, 张小玲, 代刊. 2016 年超强厄尔尼诺背景下的强对流和极端降水天气特点. *科学通报*, 2017, 62: 928–937]
- Fu J L, Ma X K, Chen T, et al. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2017, 43: 528–539 [符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. “16.7”华北极端强降水特征及天气学成因分析. *气象*, 2017, 43: 528–539]
- Leutbecher M, Barkmeijer J, Palmer T N, et al. Potential improvement to forecasts of two severe storms using targeted observations. *Q J R Meteorol Soc*, 2002, 128: 1641–1670
- Walser A, Arpagaus M, Appenzeller C, et al. The impact of moist singular vectors and horizontal resolution on short-range limited-area ensemble forecasts for two European winter storms. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 2877–2887
- Zheng M, Chang E K M, Colle B A. Ensemble sensitivity tools for assessing extratropical cyclone intensity and track predictability. *Weather Forecast*, 2013, 28: 1133–1156
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. Mesoscale predictability of the surprise snowstorm of 24–25 January 2000. *Mon Weather Rev*, 2002, 130: 1617–1632
- Ding Y H. *Advanced Synoptic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 150–187 [丁一汇. *高等天气学*. 北京: 气象出版社, 2005. 150–187]
- Yan L F, Sun X C, Zhou X S. Analysis on the areas of torrential rains affected by Huang-Huai Cyclone in Shandong Peninsula (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2014, 40: 1439–1445 [阎丽凤, 孙兴池, 周雪松. 影响山东的黄淮气旋暴雨落区分析. *气象*, 2014, 40: 1439–1445]
- Zhang X H, Luo J, Chen X, et al. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang-Huaihe river basin and diagnostic analysis of rainstorm (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2016, 42: 716–723 [张晓红, 罗静, 陈兴, 等. 一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析. *气象*, 2016, 42: 716–723]
- Langland R H, Shapiro M A, Gelaro R. Initial condition sensitivity and error growth in forecasts of the 25 January 2000 East Coast snowstorm. *Mon Weather Rev*, 2002, 130: 957–974
- Hakim G J. Vertical structure of mid-latitude analysis and forecast errors. *Mon Weather Rev*, 2005, 133: 567–578

- 19 Tribbia J J, Baumhefner D P. Scale interactions and atmospheric predictability: An updated perspective. *Mon Weather Rev*, 2004, 132: 703–713
- 20 Chang E K M, Zheng M, Raeder K. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme pacific extratropical cyclones. *Mon Weather Rev*, 2013, 141: 211–231
- 21 Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim. *Weather Forecast*, 2016, 31: 1197–1214
- 22 Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q J R Meteorol Soc*, 1985, 111: 877–946
- 23 Buizza R, Bidlot J R, Wedi N, et al. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). *Q J R Meteorol Soc*, 2007, 133: 681–695
- 24 Ma J H, Zhu Y J, Wobus R, et al. An effective configuration of ensemble size and horizontal resolution for the NCEP GEFS. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 782–994
- 25 Torn R D, Hakim G J. Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 663–677
- 26 Torn R D, Whitaker J S, Pegion P, et al. Diagnosis of the source of GFS medium-range track errors in Hurricane Sandy (2012). *Mon Weather Rev*, 2015, 143: 132–152
- 27 Livezey R E, Chen W Y. Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques. *Mon Weather Rev*, 1983, 111: 46–59
- 28 Hakim G J, Torn R D. Ensemble synoptic analysis. In: Bosart L F, Bluestein H B, eds. *Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting: A Tribute to Fred Sanders*. Boston: American Meteorological Society, 2008. 147–162
- 29 Brennan M J, Lackmann G M, Mahoney K M. Potential vorticity (PV) thinking in operations: The utility of non-conservation. *Weather Forecast*, 2008, 23: 168–182
- 30 Tao Z Y, Zhou X G, Zheng Y G. Vorticity, potential vorticity and stratospheric dry intrusion: Origin, application and misuse of potential vorticity concept (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2012, 38: 28–40 [陶祖钰, 周小刚, 郑永光. 从涡度、位涡、到平流层干侵入——位涡问题的缘起、应用及其歧途. *气象*, 2012, 38: 28–40]
- 31 Grams C M, Wernli H, Böttcher M, et al. The key role of diabatic processes in modifying the upper-tropospheric wave guide: A North Atlantic case-study. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137: 2174–2193
- 32 Hwang S O, Hong S Y. The impact of observation systems on medium-range weather forecasting in a global forecast system. *Asia-Pacific. J Atmos Sci*, 2012, 48: 159–170
- 33 Elmore K L, Schultz D M, Baldwin M E. The behavior of synoptic-scale errors in the ETA model. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 3355–3366
- 34 Zhang Y, Chen D H, Zhong J Q. The numerical prediction uncertainties of the Tibetan Plateau impacting the forecasts of its downstream region (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2016, 35: 1430–1440 [张宇, 陈德辉, 钟跻芹. 数值预报在青藏高原的不确定性对其下游预报的影响. *高原气象*, 2016, 35: 1430–1440]