

一次梅汛期极端降雨过程雨带位置模式 预报性能对比分析

马杰^{1, 2} 尹姗^{1, 2*} 金荣花¹ 李勇^{1, 2} 任宏昌^{1, 2} 梅双丽^{1, 2}

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 北京 100081

摘 要 2016年6月30日-7月4日出现了当年入汛以来最强降雨过程, 然而数值预报却出现了明显误差。为此, 本文首先对比和分析了当今预报性能最优越的欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasting, 简称ECMWF)和美国环境预报中心/全球预报系统(National Centers for Environmental Prediction / Global Forecast System, 简称NCEP)的确定性和集合预报差异及误差原因。结果显示, 针对雨带位置, NCEP模式预报较为准确, ECMWF模式存在明显的偏北误差。基于集合预报的进一步分析表明, 前者预报偏差小, 源于误差在逐日变化中呈现偏北、偏南交替出现所致。而后者偏北误差却呈稳定维持的特征。接着, 将集合预报成员划分为了准确组和偏差组, 通过二者合成分析揭示出, 当雨带位置的预报偏北时, 对应降雨较强, 反之亦然。最后, 讨论了500hPa层西风槽与雨带位置之间的联系。结果表明, 当西风槽强度预报偏强时, 雨带位置偏北、降雨强度偏强。ECMWF模式的西风槽持续偏强, 因而雨带位置稳定偏北。NCEP模式的西风槽偏强、偏弱交替出现, 导致了雨带位置的偏北、偏南误差。研究结果对在实际业务中开展误差订正具有很好的参考意义, 也有助于提高梅汛期预报准确率。

关键词 ECMWF模式 NCEP模式 集合预报 误差

文章编号

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20116

***投稿日期** 2020年2月20日;

网络预出版日期

作者简介 马杰, 男, 1980年出生, 高级工程师, 研究方向为中期延伸期预报。E-mail:

majie@mail.iap.ac.cn

通信作者 尹姗, E-mail: yinshan21@sina.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41575066, 国家科技支撑计划课题 2015BAC03B04

Funded by the National Natural Science Foundation of China (41575066), National Science and Technology Infrastructure Program (2015BAC03B04)

The Comparative Analysis of Rain Band Position Forecasted by the Model in an Extreme Meiyu Rainfall Event

Ma Jie^{1,2}, Yin Shan^{1,2}, Jin Ronghua¹, Li Yong^{1,2}, Ren Hongchang^{1,2}, Mei Shuangli^{1,2}

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

Abstract From June 30th to July 4th, 2016, an extreme precipitation event occurred which is the strongest rainfall process since the flood season. Obvious errors appeared in the prediction of the location of the rain band in operational forecast. Based on the deterministic and ensemble model data from European Centre for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF) and National Centers for Environmental Prediction / Global Forecast System (NCEP), the difference of the model performance between them is compared and the causes of forecast error are analyzed. The results show that the forecast of NCEP is more accurate and there are obvious northward errors in the rain band location forecasted by the ECMWF deterministic model. Further analysis from ensemble data points out that although the forecast error of NCEP is smaller, which is caused by the obvious instability of its errors, it appears alternately northerly and southerly error from day to day. Though ECMWF model predicts the rain band with further north location, this northerly error is stable. In addition, by dividing the ensemble members into the accurate and bias groups, the composite analysis between them reveals that the member with further north rain band location will have stronger precipitation, and vice versa. Finally, the connection between the westerly trough on 500hPa level and the position of rain band is discussed. The results reveal that when the strength of the westerly trough is stronger, the rain belt is located further north and the intensity of rainfall is more obvious, and vice versa. The westerly trough forecasted by the ECMWF model continued to be strong. That's the reason why this model gives a stable northerly position of the rain belt forecast. Because the NCEP model predicts stronger and weaker westerly troughs alternately, its forecast of the rain belt location shows corresponding northerly and southerly errors. This conclusion could serve as an important reference for the forecast errors correction of the rain belt location in the forecast operation, and also help to improve the forecast accuracy of rain band location in Meiyu season.

Key words: ECMWF model; NCEP model; ensemble forecast; error

1 引言

众所周知,随着数值预报模式性能和分辨率的不断提升,现代天气预报越来越依赖数值模式的输出结果。目前,欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasting,简称 ECMWF)和美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,简称 NCEP)的全球确定性和集合预报模式是最先进的两个主流业务模式。前者的确定性预报时效有 240 小时,水平分辨率 0.1° (约 10 公里)。后者预报时效 16 天,前 10 天分辨率 13 公里,11-16 天时效分辨率 34 公里。2019 年开始二者均实现了每日发布 4 次预报产品(金荣花等,

2019)。当前在我国国家级和省级业务预报台站中，二者应用非常广泛（李泽椿等，2014；薛谔彬等，2019）。因此，分析总结其预报能力，尤其针对重大强降雨过程的检验评估，无疑将有助于提升未来预报准确率，对防灾减灾和气象决策服务均具有十分重要的参考意义。众多业务和科研工作者围绕实际业务需求，针对数值模式检验评估也进行了大量的研究（吴志鹏等，2014；潘留杰等，2014）。如公颖（2010）从雨带结构、强度和位置等方面对多个模式的定量降水效果进行了检验评估。王雨和闫之辉（2008）对比了多个检验方案对降水评估效果的影响。孙军等（2018）围绕北京地区多次弱降水过程，利用多个业务数值模式分析了预报偏差及可能原因。

暴雨及其造成的洪涝灾害是我国主要自然灾害之一。每年6月初到7月间的江淮梅汛期，是我国防汛关键时段，暴雨频繁、降水量大，雨日集中（Tao et al., 1987；张德二和王宝贯，1990；魏凤英和张京江，2004；王遵亲 and 丁一汇，2008；李勇等，2017）。据统计，江淮梅雨降水占到了夏季总降雨量的45%左右。研究表明，梅雨雨带在30°N附近通常呈准纬向的分布，并具有狭长的带状特点（徐卫国和江静，2004；Ding et al., 2005；司东等，2010），而在朝鲜半岛和日本地区雨带呈东—东北向（丁一汇等，2007；苏同华和薛峰，2010）。梅汛期雨带位置的变化和停滞时间往往决定着江淮地区的降水空间分布，如当雨带偏南时，即“南涝北旱”，江淮流域会出现旱情；相反，当雨带北移时，江淮流域会出现严重洪涝（陈丽娟等，2019）。因此，准确预报梅雨雨带的位置在业务预报中具有重要意义。

2016年6月30日–7月4日，出现了当年入汛以来最强的降雨过程。自西南地区东部至长江中下游地区连续数日普降大到暴雨。以武汉为例，持续5天的强降雨，使得累计降雨量达到了560.5毫米，造成严重的人员伤亡和经济损失。此次降雨过程受到了国务院防汛部门以及气象部门的高度重视，然而多个业务数值模式，包括ECMWF和NCEP模式，对主雨带位置和降雨强度的预报，在中短期时效均出现了明显偏差。ECMWF连续多日的确定性和集合预报，持续稳定表明主雨带的中心将位于江淮至黄淮一带，而NCEP模式预报却指出雨带位置将位于长江以南地区。什么原因造成了两家模式出现如此明显的差异？本文将在对比分析两家模式性能差异基础上，分析造成这一现象的原因，以期对未来梅汛期降雨预报提供参考。

2 数据和方法

2.1 数据

本文采用了2016年6月24–29日20时（北京时）起报的ECMWF和NCEP模式的集合和确定性预报资料。集合预报数据来自于THORPEX计划的TIGGE数据集（Bougeault et al., 2010）。前者每个预报时次对应51个预报成员，后者成员数为21个。变量包括分辨率为2°的500 hPa位势高度场，1°的850 hPa风场以及0.5°的降雨场。时间分辨率为12小时，预报时长360小时。此外，还选取ECMWF确定性模式的500 hPa高度场和850 hPa风场的初始场作为分析场，

来揭示降雨过程期间环流形势演变特征。实况降雨采用了中国气象局国家气象信息中心提供的 2016 年 6 月 30 日-7 月 4 日 2472 个台站的逐日降雨资料，这里日降水量指的是 08-08 时的 24 小时累计降雨量。

2.2 方法

为定量表征雨带位置，本文定义了一种雨带位置指数。具体计算方法为：1) 计算 110° — 120° E 降雨量的纬向平均值。2) 选取 25° — 35° N 范围内降雨量纬向平均值极大值所在的纬度作为整体雨带位置 (Yin et al., 2019)。由于 ECMWF (NCEP) 集合预报每个时次对应 51 (21) 个预报成员，每个成员均能计算得到一个雨带位置值，因而所有预报成员就组成了一个雨带位置序列，即位置指数。此外，为便于和预报资料比较，本文还将站点降雨观测资料利用插值方法，插值到了 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格上。基于上述雨带位置的定义，计算得到 2016 年 6 月 30 日-7 月 4 日降雨过程的实况雨带位置为 31.5° N。

3 环流演变特征

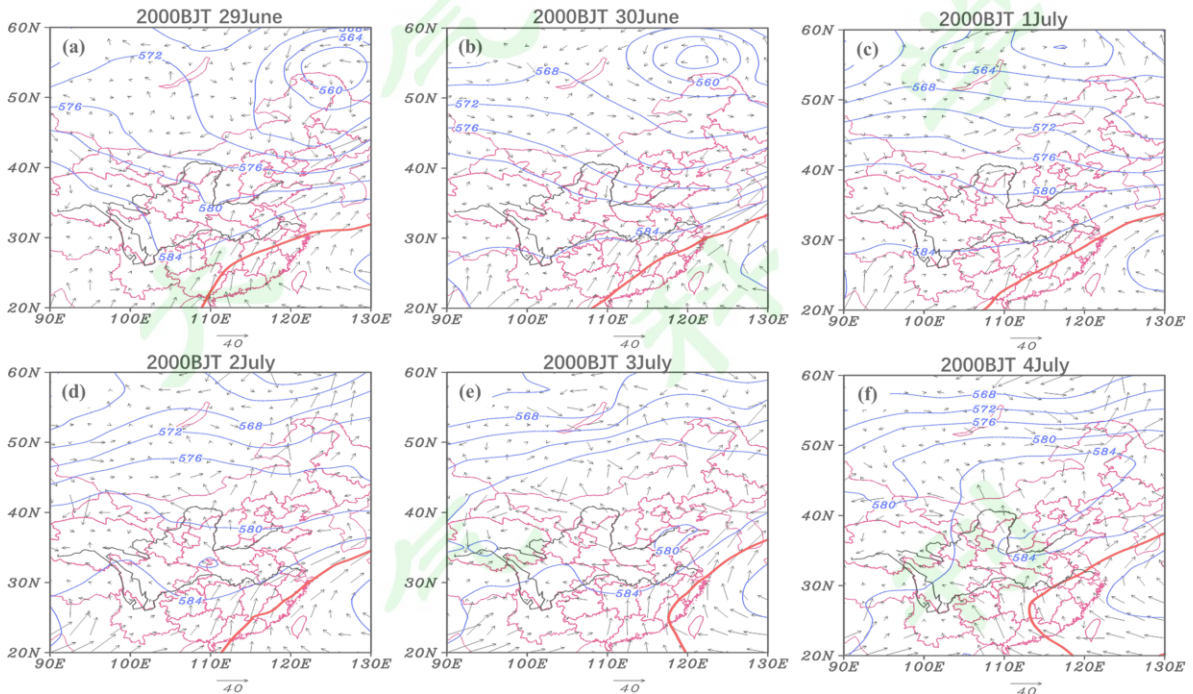


图 1 2016 年 6 月 29 日-7 月 4 日环流形势. (a) 2016 年 6 月 29 日 500hPa 高度场 (10gpm, 等值线) 和 850hPa 风场 (m/s, 风矢量), (b) 同 a, 这里为 6 月 30 日, (c) 同 b, 这里为 7 月 1 日, (d) 7 月 2 日, (e) 7 月 3 日, (f) 7 月 4 日

Fig. 1 The 500 hPa geopotential height field and 850 hPa wind field on June 29th (a), 30th (b), July 1st (c), 2nd (d), 3rd (e) and 4th (f), 2016

由图 1 可见，2016 年 6 月 29 日-7 月 4 日降雨过程期间，在 500hPa 高度层上的西太平洋副热带高压（简称副高）位置较为稳定少动，代表副高的 588 位势什米线持续分布于江南、华南一带。而在中高纬度地区，不断有西风槽自西向东传播，其与东北冷涡相互配合，引导冷空气

分裂南下。在 850hPa 层，西南季风沿副高西北侧不断将暖湿空气向北输送，与北方持续南下的偏北气流交汇形成一稳定切变线，并维持在沿长江一线，使得强降雨不断产生，最终造成了长江中下游的强降雨过程。

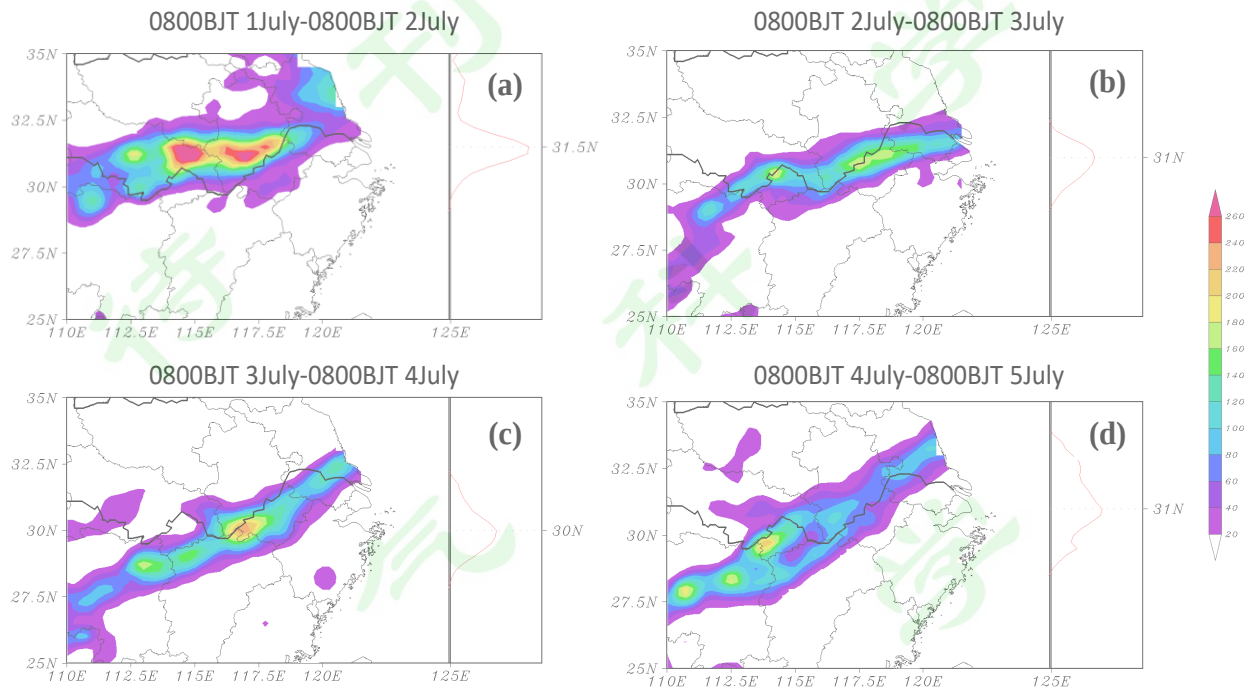


图 2 2016 年 7 月 1 日-4 日逐日降水量分布。(a) 2016 年 7 月 1 日降水量 (mm, 阴影), (b) 同 a, 这里为 7 月 2 日, (c) 同 b, 这里为 7 月 3 日, (d) 7 月 4 日

Fig. 2 The daily precipitation (shaded, unit: mm) on July 1st (a), 2nd (b), 3rd (c) and 4th (d), 2016

图 2 为此次降雨过程期间的逐日降水量分布。由图可见，主雨带位于江汉、江淮及江南北部一带，其中沿长江地区出现了大到暴雨，部分地区大暴雨。不难发现，强降雨中心虽然缓慢东移，但主雨带位置在南北方向较为稳定，造成了多地连续出现了强降雨天气，如武汉，在这次降水过程中连续 4 天出现了大到暴雨，引发了城市内涝等灾害。

4 模式预报性能分析

4.1 确定性模式

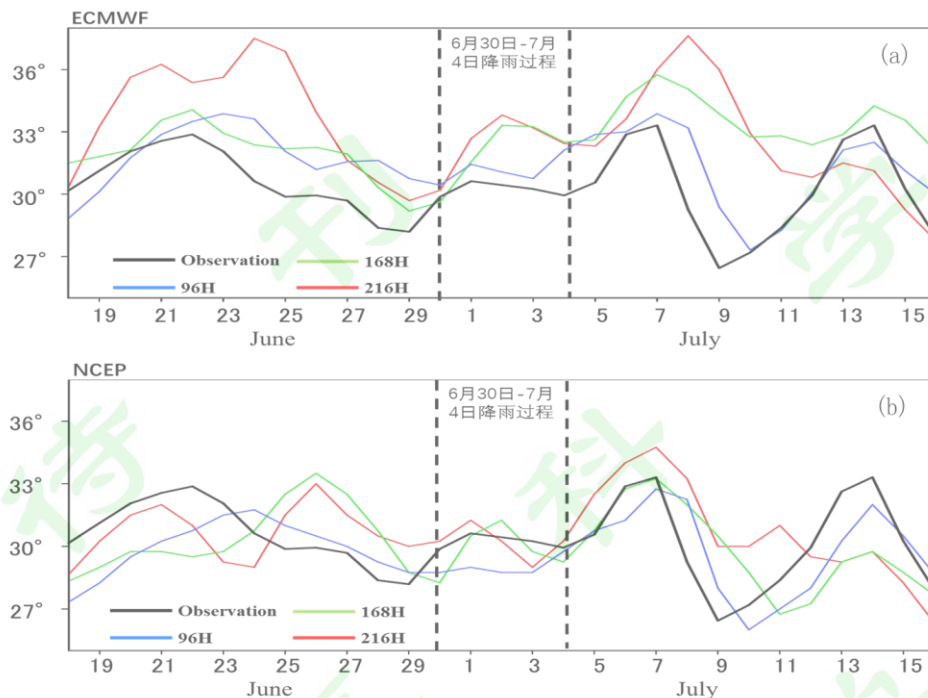


图3 梅汛期主雨带位置的观测和不同时效的预报。(a)为ECMWF模式不同时效主雨带位置的预报和实况(黑色实线), (b)同a, 这里为NCEP模式

Fig.3 The observed and forecasted position of rain band in Meiyu Period. (a) The forecasted position of ECMWF model at different leading time. The black (blue, green, red) contour correspond to observation (96H, 168H, 216H forecast)

2016年梅汛期从6月18日开始,截止于7月16日,前后共持续了29天。图3给出了整个梅汛期中期预报时效的主雨带位置预报性能(为更清楚地展现平均差异,该图使用了9点平滑处理)。由图可见,ECMWF模式预报的雨带位置呈现出稳定偏北的特征(周宁芳等,2018),而NCEP模式则表现出偏北、偏南误差交替出现(图3)。即前者误差较为稳定,这一特征在业务预报中也有利于预报员根据前期模式误差进行下一时刻的订正;而后者则无规律可言。此外,图3还揭示出随着预报时效临近,ECMWF模式预报误差不断缩小,雨带位置不断接近实况。而NCEP模式在某些时段(如6月30日—7月4日)反而随预报时效临近误差呈扩大趋势。

对于6月30日—7月4日极端降雨过程,图4进一步分析了不同预报时效的110-120°E纬向平均的降雨量分布,从中可以看到降雨强度及雨带位置的预报性能变化特征。由图4a同样可见,预报时效越长,ECMWF模式预报雨带位置越偏北、雨强越弱。6月24日(提前时效144小时)预报的主雨带位置北界达到了34°N附近,即强降雨涵盖了黄淮地区,较实况的长江沿岸(31.5°N)偏北了2-3个纬距。之后随着预报时效临近,雨带位置虽不断向南调整,但直至临近的24小时时效(29日的预报),雨带位置依然偏北了1个纬距。一方面说明ECMWF模式对此次降雨过程的可预报性较低,另一方面揭示出讨论此次降雨过程误差的产生,将有助于解释整个梅汛期模式预报性能较低原因。对比而言,NCEP模式预报的主雨带位置(图4b)误差

更小。6月24日给出预报，雨带在经向上的分布虽较宽，但位置却较ECMWF偏南，更接近于实况。自26日后，预报的雨带位置更是持续位于30°N附近。而对降雨强度的预报，NCEP模式虽依然较实况偏弱，但却较ECMWF偏强，且27日后强度较为稳定。综上所述，针对此次降雨过程的雨带位置和降雨强度的确定性预报，NCEP模式优于ECMWF模式。

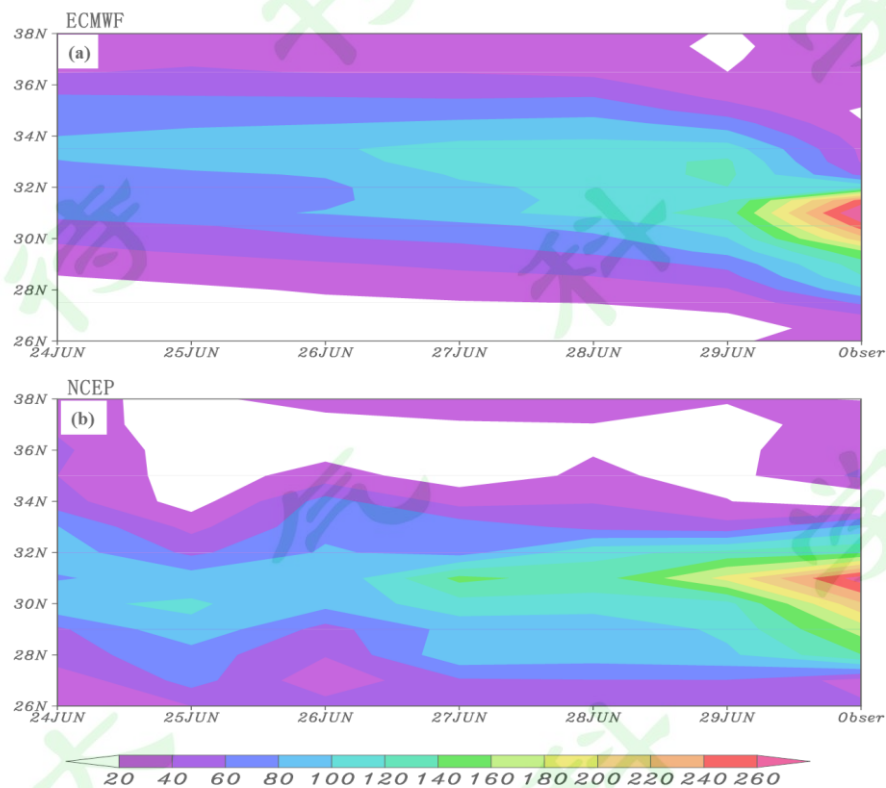


图 4 不同时刻预报的纬向平均（110-120°E）的 2016 年 6 月 30 日-7 月 4 日累计降水量（mm，阴影）分布。（a）ECMWF 模式结果，（b）同 a，NCEP 模式结果

Fig. 4 The zonal average (110-120°E) of the accumulated precipitation from June 30th to July 4th, 2016 forecasted by (a) ECMWF model and (b) NCEP model initialized at different time

4.2 集合模式

图 5a-b 分别为 ECMWF 和 NCEP 模式给出的集合平均的 6 月 30 日-7 月 4 日过程累计降雨量水平分布。比较发现二者差异明显。首先，ECMWF 模式的雨带位置较 NCEP（图 5b）和实况（图 5c）均显著偏北，尤其在 115°E 以东地区，大于 100 毫米的雨区位于黄淮地区，雨区北界更是伸展到了沿黄河沿岸。而 NCEP 模式的雨区偏南，雨带位于江淮地区。二者预报结果相差了 2-3 个纬距。若与实况观测（图 5c）相比，最大偏差更是达到了 4 个纬距左右。其次，由图 5c 的实况观测可见，沿长江中下游地区的累计降水量超过了 250mm，然而两模式的集合平均强度均明显偏弱。最后，从雨带水平分布特征看，ECMWF 模式的雨带更为紧凑，其经向范围更小。同图 4 一样，集合平均的结果表明了 NCEP 模式更接近于实况。

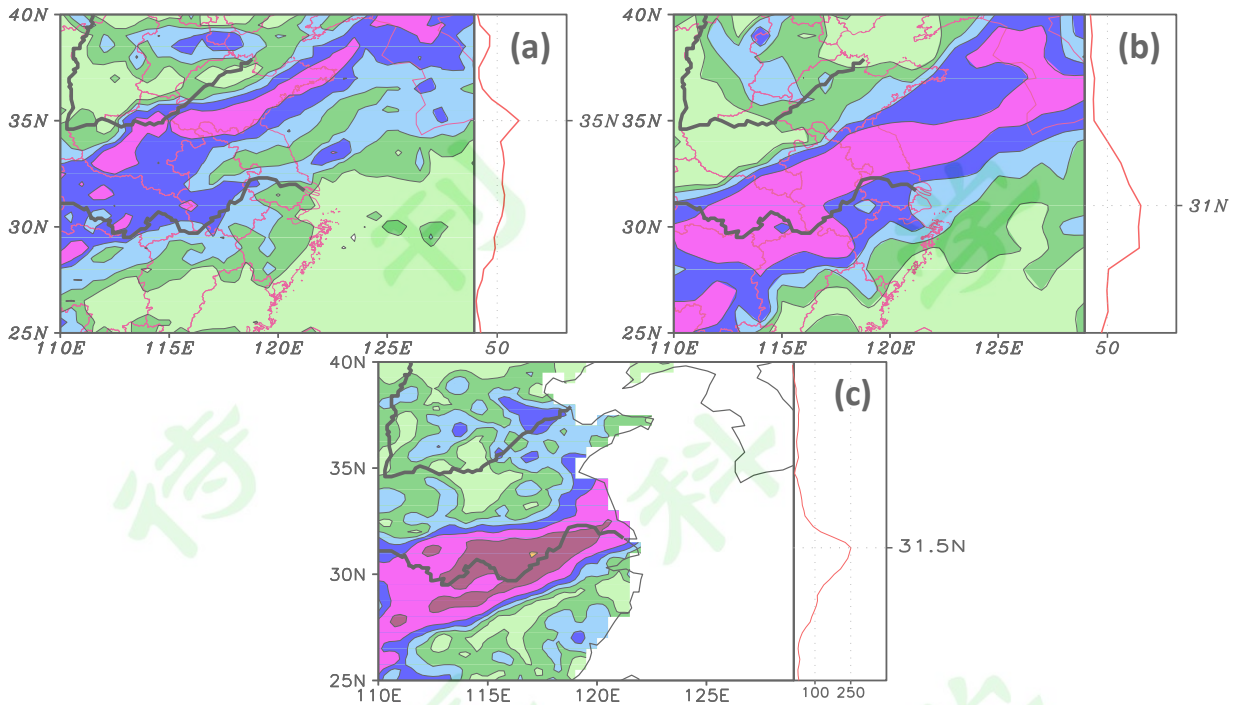


图 5 集合平均的过程降雨量分布。(a) ECMWF 模式结果, (b) 同 a, 这里为 NCEP 结果。起报时间为 6 月 29 日 20 时。(c) 过程累计降雨量实况

Fig. 5 The accumulated precipitation forecasted by (a) ECMWF model, (b) NCEP model initialized at 1200 UTC June 29th and (c) the observation from June 30th to July 4th, 2016

图 6a 为 ECMWF 模式的 51 个集合成员预报此次降水过程的雨带位置。由图可见, 大部分成员给出的雨带位置较实况依然明显偏北, 只有个别成员偏南。与之相反, NCEP 模式的绝大部分集合成员预报的雨带则偏南 (图 6b)。

在图 6a 的基础上, 本文对雨带位置指数进行了标准化和排序, 选取大于两个标准差的成员作为偏差组; 小于 0.24 个标准差的成员作为准确组。二者分别涵盖了 15 个成员, 准确组为 14, 38, 39, 51, 4, 5, 7, 12, 15, 20, 27, 28, 29, 43, 48, 偏差组对应 11, 24, 36, 40, 41, 42, 44, 47, 49, 2, 13, 18, 22, 32, 37 号成员。每日最准确成员与图 6 中整体降雨过程的准确成员是不固定的。进一步分析了两组成员的逐日演变差异 (图 7a)。不难看到, 在逐日变化中 ECMWF 模式预报的雨带位置在大多数时段依然表现为偏北误差。而对于 NCEP 模式, 图 7b 表明其预报的雨带位置在 31°N 附近摆动。后者与实况观测 (图 2) 的雨带位置更为一致。此外, 在降雨过程的大多数时段 ECMWF 模式的偏差组预报的雨带位置较准确组偏北, 且最大偏差出现在 7 月 1-2 日, 说明 ECMWF 对整个降雨过程的预报误差主要来源于这两日 (图 7a)。而 NCEP 模式两组成员之间的差异不稳定, 7 月 1 日偏差组预报的雨带位置偏北, 而在 7 月 2 日和 4 日则以偏南误差为主 (图 7b)。不难看出, 图 7 与图 3 均揭示出 ECMWF 模式对雨带位置的预报呈持续稳定的偏北。而 NCEP 模式误差不稳定, 呈现偏北、偏南交替出现。

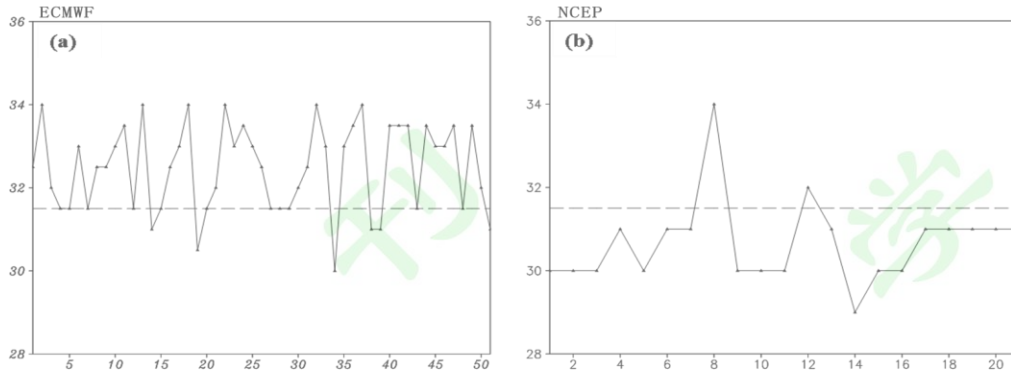


图 6 集合成员预报的此次降雨过程的雨带位置序列。(a) ECMWF 模式 51 个成员结果, (b) 同 a, 这里为 NCEP 模式 21 个成员结果, 起报时间为 6 月 29 日 20 时

Fig.6 The rain belt location serials of this precipitation event forecasted by (a) 51 members of ECMWF model and (b) 21 members of NCEP model initialized at 1200 UTC June 29th

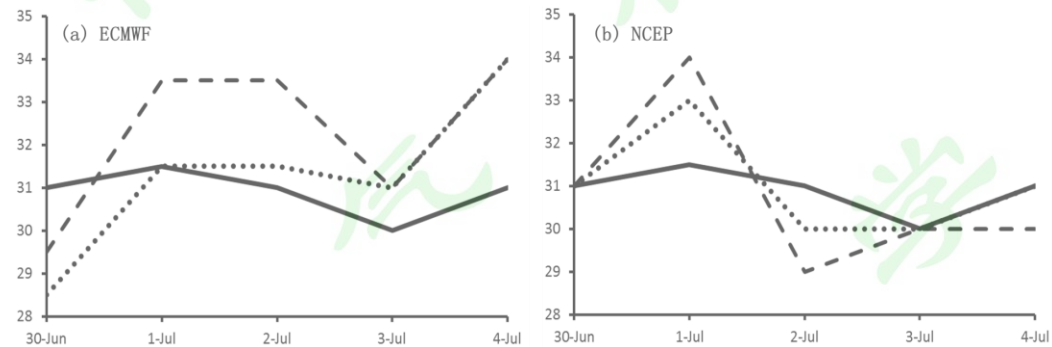


图 7 准确组(点线)、偏差组(短虚线)成员及实况观测(实线)的雨带位置逐日变化。(a) ECMWF 模式, (b) 同 a, 这里为 NCEP 模式, 起报时间为 6 月 29 日 20 时

Fig.7 The daily rain belt location variation in correct group (dotted line), error group (dashed line) and observation (solid line), (a) ECMWF model, (b) NCEP model initialized at 1200 UTC June 29th

图 8 为两组成员在 7 月 1 日的降水量水平分布。由图 8b 可见, ECMWF 偏差组的主雨带沿黄河下游分布, 而准确组主雨带分布于江淮地区(图 8a), 二者雨带位置相差了 2-3 个纬距(200-300 公里)。此外, 偏差组降雨强度更大, 图 8b 中显示出成片降雨强度超过 100 毫米的大暴雨区。NCEP 模式两组成员的雨带位置差异较小(图 8c-d)。同样, 它的偏差组降雨较准确组更强。由此, 两集合模式均表明当预报成员给出的雨带位置预报越偏北, 对应的降雨强度将更大。

在 7 月 2 日两个模式的预报误差刚好相反, ECMWF 模式偏北, 而 NCEP 模式偏南(图 7b)。图 9 分别显示了 7 月 2 日两个模式的准确组和偏差组降雨量水平分布。由图可见, 相较 7 月 1 日, 两个模式均揭示出了雨带将缓慢南移趋势。同样, ECMWF 模式的偏差组雨强较准确组略偏大(图 9a-b)。而 NCEP 模式则表明, 当雨带偏南时降雨偏弱。

综上所述, 对雨带位置的预报, 虽然 NCEP 模式总体优于 ECMWF, 但由于 NCEP 模式的误差呈现偏北、偏南交替出现, 使得平均的位置误差较小造成的。在雨带逐日演变以及误

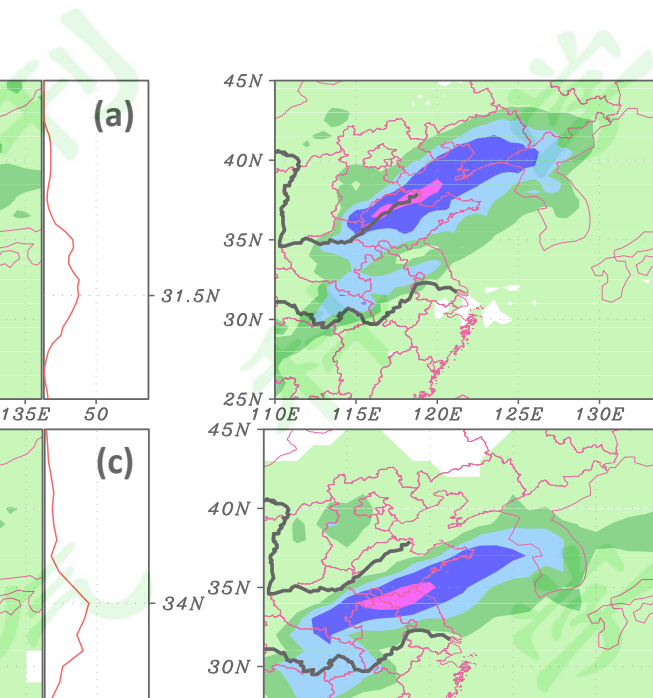
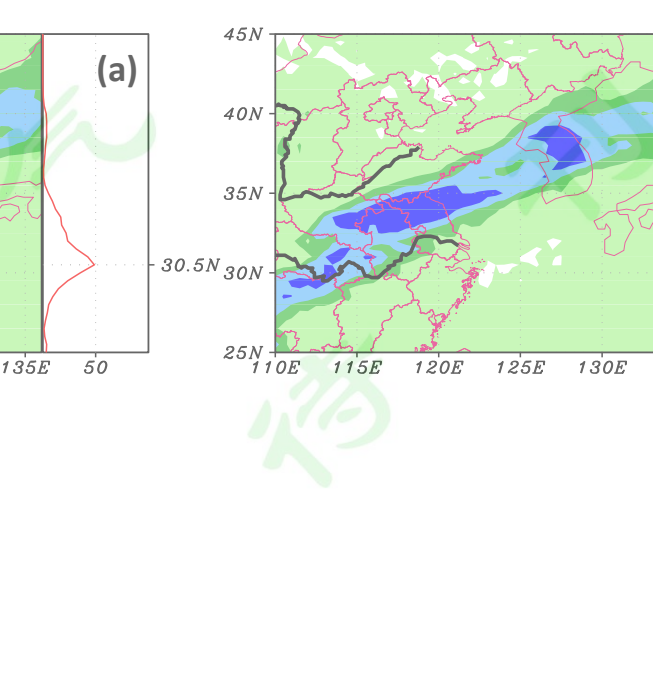


Fig.8 The precipitation on July 1st forecasted by ECMWF model (a and b) and NCEP model (c and d) initialized at 1200 UTC June 29th, (a) and (c) are from correct group, while (b) and (d) are from error group

Fig.8 The precipitation on July 1st forecasted by ECMWF model (a and b) and NCEP model (c and d) initialized at 1200 UTC June 29th, (a) and (c) are from correct group, while (b) and (d) are from error group



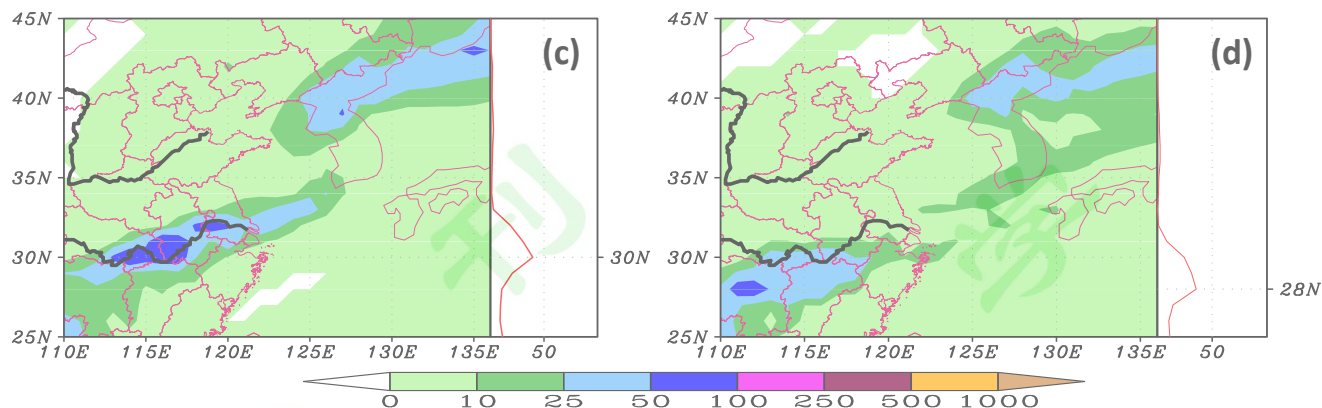


图9 同图8，这里为7月2日情形

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for the precipitation on July 2nd

5 误差原因分析

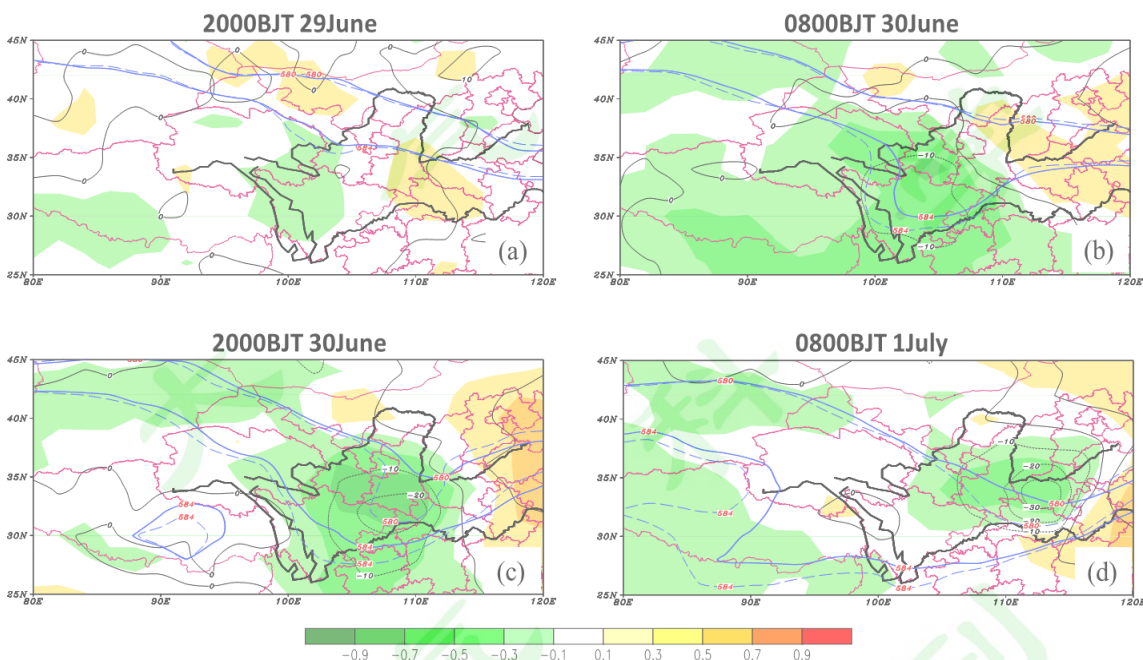


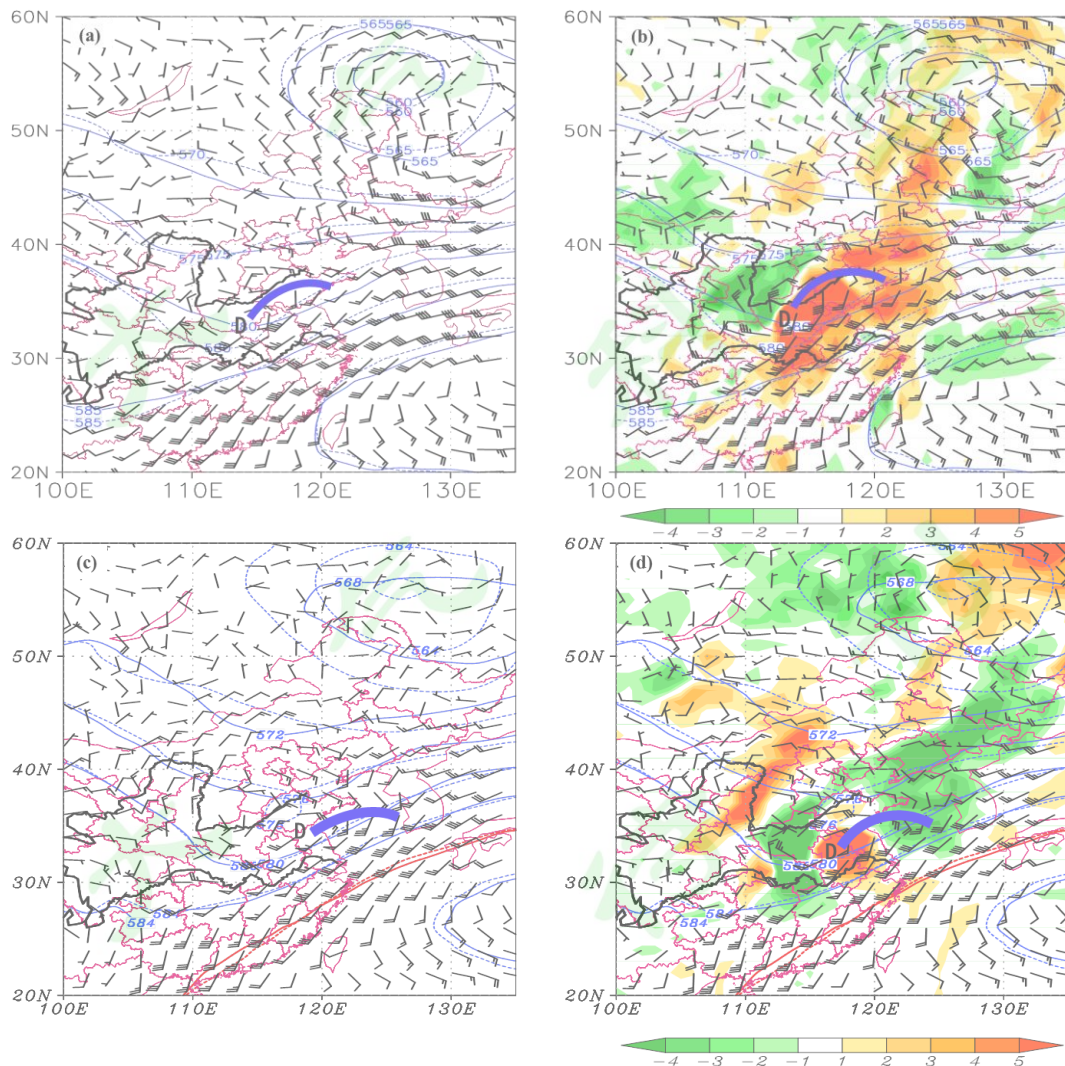
图 10 ECMWF 模式计算的雨带位置指数与不同时刻 500hPa 高度场(10gpm)的相关系数分布。(a) 6 月 29 日 20 时高度场与雨带位置指数之间的相关系数分布（填色区）。蓝色实线(蓝色虚线)为准确组（偏差组）成员，黑色线为两组高度场差值，(b) - (d) 分别对应 6 月 30 日 08 时、30 日 20 时及 7 月 1 日 08 时。这里起报时间为 6 月 29 日 20 时

Fig.10 The lag correlation coefficients between the forecasted rain belt location index (RBI) and the 500 hPa geopotential height (shaded) along with the geopotential height difference (black contour, contour interval: 10 gpm) between correct group (solid blue contour) and error group (dashed blue contours), valid at 1200 UTC 29 June, initialized time at 1200 UTC 29 June. (b) Valid at 0000 UTC 30 June. (c) Valid at 1200 UTC 30 June. (d) Valid at 0000 UTC 1 July. Thin red contours denote political boundaries and thick black lines denote the Huanghe and Yangtze Rivers to the north and south, respectively

图 10 计算了 7 月 1 日的位置指数与多个时次 500hPa 高度场之间的相关。图 10d 给出了 7 月 1 日的雨带位置指数与同期 500hPa 位势高度场所计算的相关系数分布。由图可知，500hPa

层上的西风槽强度与降雨雨带位置关系密切。即当预报的西风槽偏强时，雨带位置偏北，反之亦然（Ma et al., 2019）。图 10a-c 为超前时刻的高度场与 7 月 1 日雨带位置之间的相关系数，其中图 10a 对应初始时刻。由图可见两组成员在青藏高原东北侧（青海到四川西部）的西风槽区域对应着明显负相关系数。说明初始时刻（6 月 29 日 20 时）高空槽强度的微小偏差与 7 月 1 日江淮地区降雨位置存在密切联系。之后，随着西风槽东移出青藏高原（图 10b-c），西风槽明显增强（两组成员预报的西风槽区强度差异以及对应的相关系数更加明显）。当西风槽移动至江淮流域时，造成了降雨落区与强度之间的差异（图 10d）。

图 11 进一步分析了两组成员预报的 850hPa 风场差异。由图 11a-b 可见，当 ECMWF 预报的西风槽偏深时，对应 850hPa 层低涡强度偏强，表现为低涡东侧切变线南侧（北侧）的偏南季风（偏北风）偏强，同时切变线位置也偏北，因而造成了降雨偏强、雨区位置偏北（图 8a-b）。这一结论同样存在于 NCEP 模式 7 月 1 日的预报中（图 11c-d 和图 8 c-d）。反之，当西风槽预报偏弱时，850hPa 层偏南季风偏弱、切变线偏南（图 11e-f），造成降雨偏弱、雨区偏南（图 9c-d）。



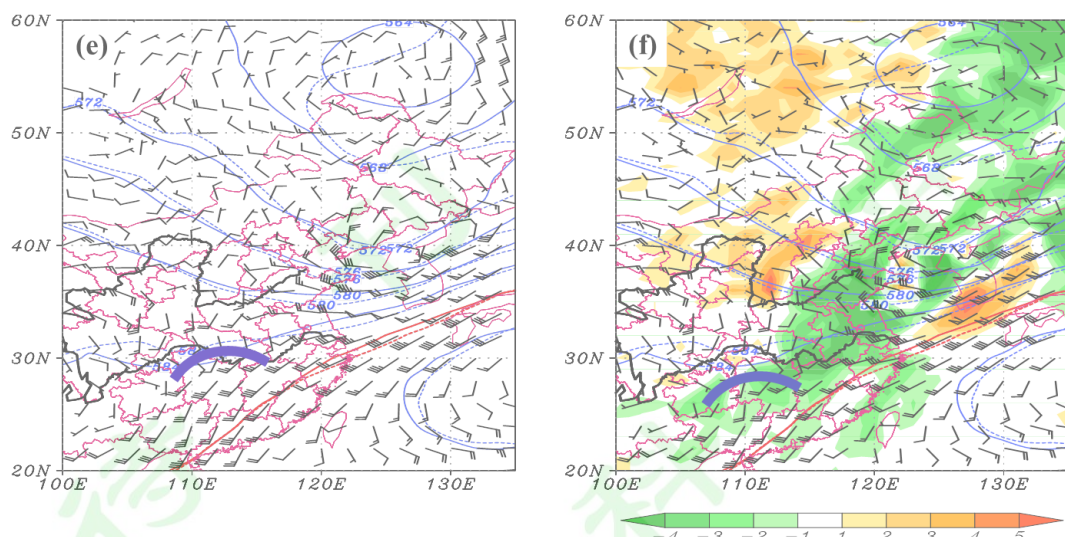


图 11 (a) ECMWF 模式预报的 7 月 1 日 500hPa 高度场，其中蓝色实线（虚线）对应准确组（偏差组）高度场，红色实线（虚线）分别为准确组（偏差组）副热带高压位置；以及准确组 850hPa 风场（黑色风矢量），其中蓝色粗实线为其东侧切变线位置。起报时间为 6 月 29 日 20 时。(b) 同 a，这里偏差组的 850hPa 风场。阴影为偏差组与准确组经向风速的差值。(c) 和 (d) 分别同 a 和 b，这里是 NCEP 模式 7 月 1 日的情形。(e) 和 (f) 分别同 c 和 d，这里是 NCEP 模式 7 月 2 日的情形

Fig.11 The 500 hPa geopotential height (contour) and 850 hPa wind (black wind vector) on July 1st forecasted by ECMWF model initialized at 1200 UTC June 29th (a and b). The solid (dashed) blue lines present the correct (error) group forecast and the solid (dashed) red line presents the position of subtropical high in correct (error) group. The solid bold blue line shows the position of shear line. The difference of 850 hPa winds between the correct group (a) and error group (b) is showed (shaded) in fig. (b). Fig. (c) and (d) are same as fig. (a) and (b), but for the NCEP model on July 1st. Fig. (e) and (f) are same as fig. (a) and (b), but for the NCEP model on July 2nd

综上所述，此次降雨过程中西风槽预报误差是造成长江中下游地区雨带位置出现误差的主要原因。当西风槽偏强时，对应雨带偏北、降雨强度偏强，反之亦然。具体到 ECMWF 模式，其西风槽强度预报持续偏强（高度场误差表现为持续的负值），对应的 850hPa 层低涡强度稳定偏强、切变线位置偏北，造成了雨区位置偏北、降雨偏强。而 NCEP 模式，其 7 月 1-2 日预报的雨带位置呈偏北、偏南差异，源于对西风槽的预报偏强、偏弱，造成了 850hPa 层切变线位置偏北、偏南以及切变线南侧季风偏强和偏弱。

6 总结和讨论

2016 年 6 月 30 日-7 月 4 日降雨是当年入汛后最强的一次极端降雨过程。在实际业务预报中，针对其雨带位置的预报，无论中期还是临近时效均出现了较明显的预报误差。为此，本文基于 ECMWF 和 NCEP 模式的确定和集合预报资料，比较二者的预报性能差异及其出现的原因。得出以下结论：

- (1) 针对此次降雨过程整体雨带位置的预报，虽然 NCEP 的确定性和集合平均结果较

ECMWF 更为准确。但进一步分析却表明, NCEP 预报误差在逐日变化中呈现偏北、偏南交替出现, 因而造成了平均的预报误差较小。而 ECMWF 模式无论确定性模式还是大部分集合成员, 雨带预报呈现稳定偏北误差。

(2) 基于集合预报成员的分组对比分析表明, 当雨带位置预报偏北时, 对应降雨强度偏强, 反之亦然。这一结论在 NCEP 模式和 ECMWF 模式中均存在。

(3) 500hPa 高度场的西风槽预报差异是造成雨带位置误差的重要原因。当西风槽预报偏强时, 雨带位置偏北、降雨强度偏强。反之, 当西风槽强度偏弱时, 雨带位置偏南、降雨强度偏弱。NCEP 模式西风槽强度预报偏强、偏弱交替出现, 对应了其雨带位置偏北、偏南, 而 ECMWF 模式西风槽预报持续偏强, 造成了雨带位置的预报稳定偏北。

虽然本工作只讨论了 2016 年 6 月 30 日—7 月 4 日的降雨过程, 但分析中利用了 ECMWF 和 NCEP 集合模式的连续多个预报时次资料, 且前者有 51 个成员、后者有 21 个成员, 因此结论具有一定的代表性。ECMWF 模式预报的稳定性, 使得其在业务预报中更受欢迎。而 NCEP 模式的预报虽存在明显不稳定现象, 使得基于其进行模式检评估和订正困难较大。但另一方面, 其集合平均结果却明显优于 ECMWF 模式预报, 更接近于实况观测, 揭示在未来的预报实践中, 还需要进一步研究和讨论二者的具体差异。此外, 本工作还表明数值模式初始场上 500hPa 层西风槽微小的差异在造成雨带位置和强度误差的重要作用。当其东移出青藏高原时, 西风槽强度及对应的误差同时突然增强, 是什么原因(如对流潜热或地形影响)造成了这一现象? 除了初始场误差外, 数值模式自身预报误差, 对流参数化、潜热释放等因素, 造成了什么样的影响, 这些均有待于进一步研究。

致谢: 感谢匿名评审专家们给本文提供的宝贵建议和意见。

参考文献 (References)

- Bougeault P, Z Toth, C Bishop, et al. 2010. The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91: 1059-1072.
- 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等. 2019. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报, 30(4): 385-400.
- Chen Lijuan, Zhao Junhu, Gu Wei, et al. 2019. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese), 30(4): 385-400.
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究[J]. 大气科学, 31(6): 1082-1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A Study of the Synoptic-Climatology of the Meiyu System in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1082-1101.
- Ding Yihui, Chan, J. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 89: 117-142.
- 公颖. 2010. SAL 定量降水预报检验方法的解释与应用[J]. 暴雨灾害, 29(2): 51-57. Gong Ying. 2010. The Explanation and Application of SAL Quantitative Verification for Precipitation Forecasts [J]. Torrential Rain and Disasters (in

Chinese), 29(2): 51-57.

- 金荣花, 马杰, 任宏昌, 等. 2019. 我国 10~30 天延伸期预报技术进展与发展对策[J]. 地球科学进展, 34 (8): 814-825. Jin Ronghua, Ma Jie, Ren Hongchang, et al. 2019. Advances and development countermeasures of 10~30 days extended-range forecasting technology in China[J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 34(8): 814-825.
- 李勇, 金荣花, 周宁芳, 等. 2017. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析[J]. 气象学报, 75(5):717-728. Li Yong, Jin Ronghua, Zhou Ningfang, et al. 2017. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai region[J]. Acta Meteorological Sinica(in Chinese), 75(5):717-728.
- 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 2014. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J], 气象学报, 72(6): 1069-1078. Li Zechun, Bi Baogui, Jin Ronghua, et al. 2014. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years[J]. Acta Meteorological Sinica(in Chinese), 72(6): 1069-1078.
- Ma Jie, Kevin A. Bowley, Fuqing Zhang. 2019. Evaluating the Forecast Performance of the Meiyu Front Rainbelt Position: A Case Study of the 30 June to 4 July 2016 Extreme Rainfall Event[J]. Atmosphere. 10.648.
- 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 2014. 数值天气预报检验方法研究进展[J]. 地球科学进展, 29(3): 327-335. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Wang Jianpeng. 2014. Progress on Verification Methods of Numerical Weather Prediction[J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 29(3): 327-335.
- 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 2010. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因[J]. 科学通报, 55(1): 68-73. Si Dong, Ding Yihui, Liu Yanju. 2009. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause[J]. Chinese Sci Bull, 54: 4742-4748.
- 孙军, 马学款, 代刊, 等. 2018. 北京几次弱降水过程预报失误分析[J]. 气象, 44(1): 26-41. Sun Jun, Ma Xuekuan, Dai Kan, et al. 2018. Analysis of Unsuccessful Forecasts of Several Weak Rainfall Processes in Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(1):26-41.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化[J]. 大气科学, 34 (3): 611-628. Su Tonghua, Xue Feng. 2010. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia[J]. Chin. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 611-628.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A Review of Recent Research on the East Asian Summer Monsoon in China[M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology, Oxford UP, NY. 60-92.
- 王遵亲, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征[J]. 大气科学, 32(1): 1-13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(1):1-13.
- 王雨, 闫之辉. 2007. 降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析[J]. 气象, 33(12):53-61. Wang Yu, Yan Zhihui. 2007. Effect of Different Verification Schemes on Precipitation Verification and Assessment Conclusion [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(12):53-61.
- 魏凤英, 张京江. 2004. 1885-2000 年长江中下游梅雨特征量的统计分析[J]. 应用气象学报, 15(3): 313-321. Wei Fengying, Zhang Jingjiang. 2004. Climatic variation of Meiyu in the middle-lower reaches of Changjiang River during 1885-2000[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15(3): 313-321.
- 吴志鹏, 陈静, 张涵斌, 等. 2014. 基于集合预报的持续性强降雨可预报性评估方法研究[J]. 暴雨灾害, 33(2):97-105. Wu Zhipeng, Chen Jing, Zhang Hanbi et al. 2014. A study of evaluation method for predictability of persistent heavy rain fall event based on ensemble forecast [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(2): 97-105.
- 徐卫国, 江静. 2004. 我国东部梅雨雨区的年际和年代际的变化分析[J], 南京大学学报(自然科学版), 40 (3): 292-303. Xu Weiguo, Jiang Jing. 2004. Characteristics of rainbelt of Meiyu between interannual and interdecadal

- climate variations[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences) (in Chinese), 40 (3): 292-303.
- 薛湛彬, 陈娴, 张瑛, 等.2019. ECMWF 高分辨率模式 2m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象,45(6): 831-842.
- Xue Chenbin, Chen Xian, Zhang Ying, et al. 2019. Bias correction method for the 2m temperature forecast of ECMWF high resolution model[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(6): 831-842.
- Yin Shan, Ma Jie, Jin Ronghua, et al. 2019. Application Research of Big Data in Heavy Rainfall Forecast Model in Meiyu Season.[C]// Sun Songlin, Fu Meixia, Xu lexi. Signal and Information Processing, Networking and Computers. ICSINC 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 550. Singapore: Springer, 531-541.
- 张德二, 王宝贯. 1990.18 世纪长江下游梅雨活动的复原研究[J].中国科学 B, 20(12): 1333-1339. Zhang Deer, Wang Baoguan. 1990. A study on Meiyu activity of eighteenth century in the lower Yangtze Region[J]. Science in China (Series B) (in Chinese) , 20(12): 1333-1339.
- 周宁芳, 马杰, 刘湊华. 2018. 2016 年梅汛期降雨环流特征及 ECMWF 中期预报偏差分析[J]. 热带气象学报, 34 (4): 499—506. Zhou Ningfang, Ma Jie, Liu Couhua. 2018. Analysis of mid-range forecast bias by ECMWF on precipitation features and related large-scale circulation during 2016 Meiyu Season[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese) , 34 (4): 499-506.