

2020 年梅雨期暴雨雨带预报不确定性分析*

苏 翔^{1,2} 康志明^{1,2} 庄潇然¹ 陈圣劼^{1,2}

1 江苏省气象台, 南京 210008

2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210009

提 要: 针对 ECMWF 模式在 2020 年我国江淮流域超长梅雨期暴雨雨带预报中的不确定性, 选取 10 个典型的狭长暴雨雨带, 基于对象诊断方法 (MODE) 对雨带东西段的位置预报偏差、稳定性以及偏差的连续性等进行分析, 并基于集合敏感性方法 (ESA) 分析揭示雨带典型偏差特征的关键天气系统。结果表明: 雨带东段的预报不确定性总体高于西段, 尤其是到了中期预报时效, 预报不确定性进一步加强。短期时效内, 雨带东西段均存在偏北的系统偏差, 雨带西段的漏报率低于东段, 稳定性和连续性均好于东段; 中期时效内, 雨带东段的预报误差增长较为明显, 且纬度预报平均变幅也高于西段。集合敏感性分析结果揭示, 500 hPa 高空槽、副热带高压、850 hPa 低空急流和切变线的预报偏差及其和降水潜热之间存在的非自然正反馈共同作用造成雨带东段预报偏北, 其中后半夜高空槽和低空急流的发展加强是出现梅雨锋暴雨雨带东段北偏的背景场特征之一。

关键词: 梅雨, 位置预报, MODE, 集合敏感性, 稳定性, 连续性

* 国家自然科学基金 (41805078) 和中国气象局预报员专项 (CMAYBY2020-046) 共同资助

第一作者: 苏翔, 主要从事预报检验和客观预报技术研究. E-mail: suxiang01@163.com

通讯作者: 康志明, 主要从事集合预报和定量降水预报研究. E-mail: kangzm@cma.gov.cn

Uncertainty Analysis of Heavy Rain Belt Forecast During the 2020 Meiyu Period

SU Xiang^{1,2} KANG Zhiming^{1,2} ZHUANG Xiaoran¹ Chen Shengjie^{1,2}

1 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210009

Abstract: For the uncertainty of heavy rain belt forecast of the ECMWF model in the Yangtze-Huaihe River Basin in China during the extremely long 2020 Meiyu period, 10 typical long and narrow heavy rain belts were collected to analyze the location forecast bias, forecast stability and continuity of forecast bias using the method for object-based diagnostic evaluation (MODE). Ensemble sensitivity analysis (ESA) was also used to analyze the key synoptic systems which cause the typical forecast bias of the heavy rain belts. Result showed that: Forecast uncertainty of the eastern part of rain belts is generally higher than that of the western part, especially during the medium range where forecast uncertainty further strengthens. During short range, both the western and eastern part of rain belts have obvious northward systematic forecast bias. The western part of rain belts has relatively lower missing rate, better stability and continuity than the eastern part. During medium range, the forecast error of the eastern part of rain belts grows obviously and the average latitude variation of the eastern part is also higher than that of the western part. The results of ESA indicate that the northward forecast bias of the eastern part of rain belts is caused by the joint effect of the 500 hPa high-level trough, the subtropical high, the 850 hPa low-level jet, the shear line and the unrealistic positive feedback between them and precipitation latent heat releasing, where the development and strengthen of high-level trough and low-level jet is one of the background characteristics of the northward forecast bias of the eastern part of rain belts.

Key words: Meiyu, location forecast, MODE, ensemble sensitivity analysis, stability, continuity

引 言

受东亚夏季风影响,我国江淮流域地区夏季暴雨灾害频发(丁一汇,2019)。2020年我国该地区出现了持续时间长达62天的超长梅雨期,平均降水量达759.2 mm,为1961年以来最多。这次梅雨过程具有入梅时间早(6月1日)、出梅时间晚(8月2日)、覆盖范围大、极端降水事件频发等特点,为各地的气象预报服务带来不小的压力和挑战。

针对梅雨锋暴雨过程,许多学者已通过数值模拟和诊断分析等方式研究了其动力学特征和发生发展机制。刘建勇等(2011)通过数值试验,从初始误差增长的角度阐释了梅雨期暴雨系统的可预报性。尹韩笑等(2019)利用WRF模式和NCEP再分析资料研究了一次梅雨暴雨过程的动能谱特征并诊断了动能收支方程。闵锦忠等(2018)使用NCEP/NCAR再分析资料、卫星和自动站等观测资料,结合WRF模式,对一次梅雨锋暴雨过程的发生发展机制进行了诊断和模拟。蒋薇和高辉(2013)利用观测资料统计了1961—2011年长江中下游梅雨各特征量的时空变化特征。赵晓琳(2019)基于NCEP/NCAR再分析资料、NOAA OLR资料和降水站点观测资料分析揭示了2018年我国梅雨期降水异常现象及其成因。金琼等(2020)则从环流因子特征的角度对该现象展开了解释。可以说,上述研究多偏向于机理分析,而在实际业务中,预报员面临的最大挑战是梅雨期暴雨雨带的位置预报把握不准的问题,相关研究仍相对缺乏。

在2020年梅雨期暴雨预报实践中,预报员们发现ECMWF模式对一些狭长暴雨雨带的预报出现了东段明显偏北而西段预报则与实况较为一致的现象。以往的研究大多将梅雨雨带作为整体进行分析(王勇等,2012;陈艳丽等,2016),没有考虑雨带东西段位置预报偏差的差异性。梅雨锋东西跨度大,在实际预报中不同位置梅雨暴雨常呈现出不同的预报误差特征,尤其是雨带东段位于亚欧大陆东侧,同时受到西风带冷空气、西南季风以及副热带高压(以下简称副高)等多个天气系统综合影响,经常呈现出预报误差大、预报不稳定等特点,因此有必要将梅雨锋暴雨的狭长雨带分割为东西两段分别进行研究。近年来,随着空间检验技术的不断发展,基于对象的诊断评估方法(MODE)(Davis et al, 2006, 2009)已成为雨带形态属性和位置预报分析的较好工具(尤凤春等,2011;刘凑华和牛若芸,2013;茅懋等,2016;陈笑等,2018;苏翔和康志明,2020)。另一方面,集合预报产品包含了预报误差随天气形势的变化(陈伟斌等,2019),可用于对梅雨锋暴雨预报中存在的不确定性信息进行分析。集合敏感性分析(ESA)方法早期由Ansell and Hakim(2007)提出,是一种基于线性相关定量评估预报量对前期状态量敏感性的方法,不仅有助于揭示影响预报对象的动力学

特征，还能够增加对于预报误差及传播机制的认知。近年来，ESA 技术已被应用于诸如热带气旋（Xie et al, 2013; Keller, 2017）、暴雨（Lynch and Schumacher, 2014; Yu and Meng, 2016; Du and Chen, 2018）、强对流（Hill et al, 2016; Limpert and Houston, 2018）等不同尺度天气系统的可预报性研究中。

针对 ECMWF 模式在 2020 年梅雨期暴雨狭长雨带位置预报上存在偏差的问题，本文首先基于 MODE 技术分别对雨带东西段位置预报的偏差特征展开统计分析，并就不同时效上雨带东西段位置预报的稳定性和持续性降水过程中雨带东西段位置预报偏差的连续性进行评估，在此基础上，结合 ESA 技术研究揭示雨带典型偏差特征的预报不确定性来源，为提升梅雨期暴雨预报准确度提供科学参考。

1 资料和方法

1.1 资料

所使用的预报数据为 ECMWF 模式确定性预报和集合预报数据，分别用于 2020 年梅雨期暴雨雨带的预报偏差分析和集合敏感性分析。ECMWF 模式确定性预报的水平分辨率为 0.125°，选取 12 时（世界时）起报的 36~228 h（间隔 24 h）时效的 24 h 累积降水预报进行分析。ECMWF 集合预报资料的水平分辨率为 0.5°，包含 1 个控制预报和 50 个扰动成员。为保障研究中暴雨雨带的完整性，对中国气象局预报与网络司 2014 年印发的《梅雨监测业务规定》中划分的梅雨区域范围略做扩大调整，选取区域范围 25~38°N、105~123°E 内的 2020 年梅雨期暴雨雨带进行研究。所使用的实况资料为全国 2411 个气象站的逐日（08 时至次日 08 时，北京时间）降水数据，通过反距离权重插值到与预报数据相同的 0.125°网格上。为了研究不同格点降水实况资料对于本文的研究结果是否敏感，还测试了逐小时 0.1°分辨率的全国自动气象站与 CMORPH 融合降水产品和逐日 0.05°分辨率的中国气象局下发格点降水实况分析产品，发现本文插值所得的格点降水实况与这些格点降水分析产品虽存在细微的差别，但并不影响本文的研究结果和结论，这是由于本文的研究对象都是大尺度暴雨雨带的缘故（见 1.2 节）。

1.2 基于对象的诊断评估方法（MODE）

MODE 方法可根据设定的目标阈值识别出预报和观测降水对象，并计算对象的面积、中心位置、长轴、短轴、轴角、曲率等属性，具体内容可参考 Davis et al（2006, 2009）的研究。MODE 方法分析出的降水对象的位移偏差和强度偏差可在一定程度上分别代表来源于

天气系统的空间偏差和剔除天气系统偏差后的降水参数化或物理方案导致的偏差。设定的暴雨目标阈值为 $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。考虑到观测对象不随预报时效变化，故以观测对象为基准，在 2020 年江淮流域梅雨期（6 月 1 日至 8 月 1 日）内选取满足如下条件的狭长暴雨样本：

- (1) 对象面积 $\geq 60\,000 \text{ km}^2$
- (2) 对象中心经纬度在 $28^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ 范围内
- (3) 对象纵横比（长轴与短轴的比例） ≥ 3.0

通过以上条件筛选出 10 个狭长暴雨样本（表 1），基本涵盖 2020 年梅雨期所有典型的狭长暴雨过程。梅雨期暴雨雨带大多呈东西带状分布，预报的重点是雨带的南北位置（纬度）。将筛选的 10 个狭长暴雨样本和与之匹配的不同预报时效的暴雨预报对象，按对象的中心经度进行经向切割，并重新进行 MODE 计算，获得雨带东段和西段的中心位置信息。切割后，对于预报和观测对象面积比（预报和观测对象面积较小者与较大者的比值）低于 1/3 的样本，做漏报处理。这里将基于 MODE 方法的暴雨雨带漏报率定义为：不存在与之匹配的预报暴雨雨带的观测暴雨雨带对象数占总观测暴雨雨带对象数的比例。

表 1 根据设定条件筛选出的 2020 年梅雨期 10 个狭长暴雨样本

Table 1 10 long and narrow heavy rain belts selected based on the above criterias during 2020 Meiyu

period			
序号	降水时段（北京时）	对象面积/万 km^2	对象纵横比
1	6 月 1 日 08 时至 2 日 08 时	8.1	4.6
2	6 月 12 日 08 时至 13 日 08 时	10.1	3.3
3	6 月 16 日 08 时至 17 日 08 时	7.4	4.1
4	6 月 27 日 08 时至 28 日 08 时	16.9	4.9
5	7 月 2 日 08 时至 3 日 08 时	16.2	3.4
6	7 月 5 日 08 时至 6 日 08 时	13.1	5.2
7	7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时	12.1	3.7
8	7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时	21.7	3.5
9	7 月 18 日 08 时至 19 日 08 时	17.1	4.0
10	7 月 21 日 08 时至 22 日 08 时	13.4	5.3

1.3 预报的稳定性

预报的稳定性是用于衡量模式预报量随预报时效变化是否一致的指标，若变化不一致，

说明预报存在较大的不确定性。若相邻两个预报时效的预报量变幅不超过特定阈值，则称这两个预报时效之间的预报是稳定的，反之则是不稳定的（其中一个预报时效出现漏报的情况也算不稳定）。本研究中预报量选取为梅雨期暴雨雨带东西段预报对象中心的纬度值，变幅阈值为 0.5°。图 1a、1b、1c 分别给出了 36 h、60 h、84 h 时效对应的 7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时（北京时，下同）暴雨预报对象，用于示例预报的稳定性。

1.4 预报偏差的连续性

预报偏差的连续性是用以评价持续性降水过程中预报偏差随时间变化连续性的指标，若变化连续，说明前期的预报偏差信息能够为后期的预报订正提供参考。若相邻两个时次的预报偏差变幅不超过特定阈值，则称这两个时次之间的预报偏差是连续的，反之则是不连续的（其中一个时次出现漏报的情况也算不连续）。选取的预报量是梅雨期暴雨雨带东西段对象中心的纬度预报偏差，设定的纬度预报偏差变幅阈值为 0.5°。图 1d、1e、1f 分别给出了 60 h 时效的 7 月 5 日 08 时至 6 日 08 时、7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时、7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时暴雨预报和观测对象重叠图，用于示例预报偏差的连续性。

1.5 集合敏感性分析方法（ESA）

根据 ESA 的定义，假设集合预报在某一个预报时刻的预报状态量与后期某预报量之间存在线性关联，则可通过建立预报量（ J ）与状态量（ x_t ）之间的线性回归方程用以表征二者的关联性：

$$\frac{\partial J}{\partial x_t} = \frac{\text{cov}(J, x_t)}{\text{var}(x_t)} \quad (1)$$

式中： J 为预报响应函数， x_t 为 t 时刻的状态向量， $\frac{\partial J}{\partial x_t}$ 即为预报量对初值的敏感性，在

集合预报中对等式右侧进行计算，当中 cov 为协方差算子，var 为方差算子。在本研究中，将响应区域内的区域平均 6 h 降水量作为 J ，将前期环境场作为 x_t 。

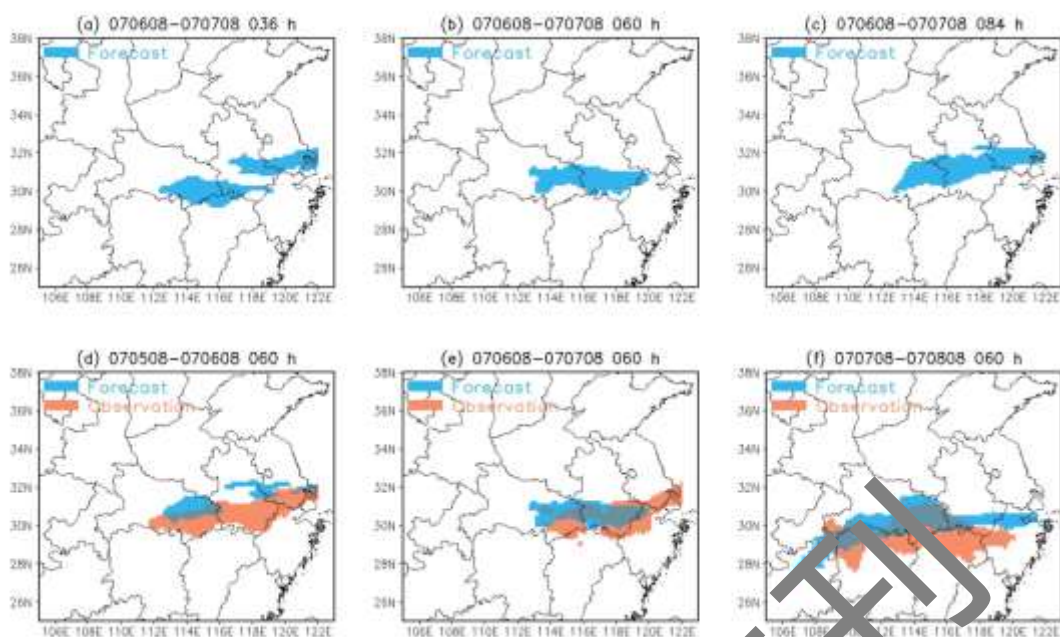


图1 以 (a) 36 h、(b) 60 h、(c) 84 h 预报时效对应的 2020 年 7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时暴雨预报对象 (蓝色) 示例预报的稳定性概念, 和以 60 h 预报时效对应的 (d) 7 月 5 日 08 时至 6 日 08 时、(e) 7 月 6 日 08 时至 7 日 08 时、(f) 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时暴雨预报 (蓝色) 和观测 (红色) 对象

示例预报偏差的连续性概念

Fig.1 Use the (a) 36 h, (b) 60 h, (c) 84 h forecast of the heavy rain objects (blue) during 08 BT 6 to 08 BT 7 July in 2020 to illustrate the concept of forecast stability, and use the 60 h forecast of the heavy rain objects (blue) and corresponding observed heavy rain objects (red) during (d) 08 BT 5 to 08 BT 6 July, (e) 08 BT 6 to 08 BT 7 July, (f) 08 BT 7 to 08 BT 8 July in 2020 to illustrate the concept of continuity of forecast bias

2 预报偏差分析

2.1 雨带东西段位置预报偏差分析

图 2 展示了 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段纬度预报平均误差和漏报率。从纬度预报平均误差来看, 除了雨带西段在中期时效前半段 (108~156 h) 平均误差有所降低以外, 平均误差整体上随预报时效的增加不断上升。在短期时效内 (36~84 h), 雨带东西段的纬度预报误差大小相当 (平均为 0.6°), 而在 36 h 时效下仅为 0.4° 左右。而到了中期时效 (108~228 h), 雨带东段的纬度预报误差明显高于西段, 尤其是中期时效前半段 (108~156 h), 东西段的纬度预报误差分别为 1.2° 和 0.7°。从漏报率上看, 短期时效内雨带西段的漏报率 (10% 以内) 相比于东段更低 (20% 以内)。到了中期时效后半段 (108~228 h), 雨带东段和西段的漏报

率相对较高，分别在 30%以上和 40%以上。

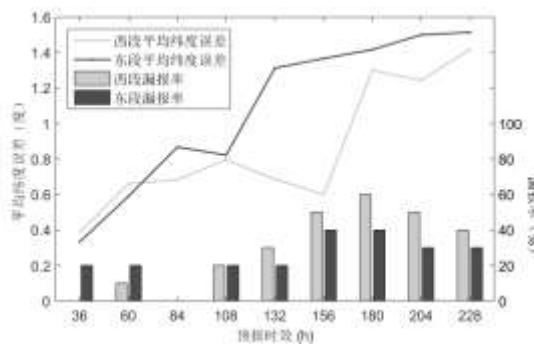


图 2 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段平均纬度误差和漏报率（单位：%）。

Fig.2 The average latitudinal error and miss rate (unit: %) of the western and eastern parts of heavy rain belts during the 2020 Meiyu period

图 3 展示了 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段预报偏北和偏南的比例（比例的分母已去除漏报样本）。这里仅统计纬度预报偏差达 0.25° （2 倍格距）以上的样本，并认为纬度预报偏差在 0.25° 以下（不超过 1 倍格距）的样本没有南北预报偏差。可以看出，在短期时效内，雨带东西段偏北的比例（60%~90%）远高于偏南的比例（0%~20%），偏北的系统偏差非常明显。为了进一步考察预报偏北和偏南的雨带在环流形势上的差异，选取一天四次的 FNL 再分析数据（分辨率为 0.25° ）对偏北个例与偏南个例分别进行合成分析。由图 4 可见，梅雨带预报位置偏北和偏南时的环流背景存在着显著差异。在偏北型中（图 4a），对流层中低层西南暖湿气流较强，850hPa 低空急流出口位于江淮中部地区，副高北抬至江淮地区南部，强度较强，受此形势场控制，ECMWF 模式对梅雨带东段预报易发生北偏。反之，在南偏型中（图 4b），对流层中低层暖湿气流相对偏弱，副高偏南、偏东，低空西南暖湿气流偏弱、偏南，我国东部总体处于西风槽控制下，冷空气偏强，此时 ECMWF 模式对雨带东段预报易发生偏南。到了中期时效，雨带东段偏北的比例开始减少，偏南的比例开始增多，偏南偏北的系统性偏差逐步消失。而雨带西段在中期时效前半段出现了偏南比例上升并超过偏北比例的现象，而这可能是导致其纬度预报平均误差降低的原因（图 2）。

2.2 雨带东西段位置预报的稳定性

图 5 展示了 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段纬度预报平均变幅和稳定比例。在短期时效内，雨带东段稳定的比例为 40%，西段稳定的比例略高，为 50%~60%，东西段纬度预报平均变幅差距不大，均在 0.6° 左右。到了中期时效，雨带东西段纬度预报稳定的比例总体呈下

降趋势，在中期时效后半段稳定的比例不超过 20%。从中期时效的纬度预报平均变幅来看，西段没有明显的上升趋势，而东段的上升趋势相对明显，且纬度预报的平均变幅（0.8°）总体高于西段（0.6°）。

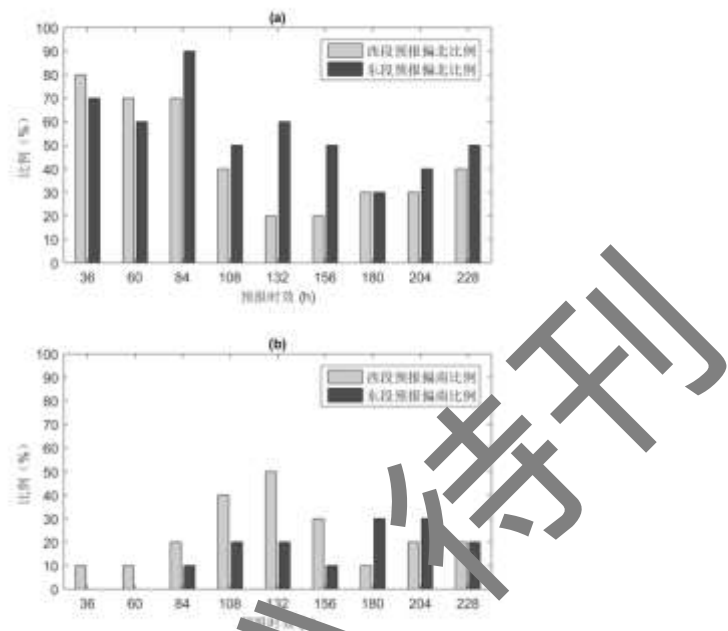


图 3 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段预报 (a) 偏北和 (b) 偏南的比例 (单位: %)。

Fig.3 Proportion (unit: %) of the (a) northward and (b) southward forecast bias of the western and eastern parts of heavy rain belts during the 2020 Meiyu period

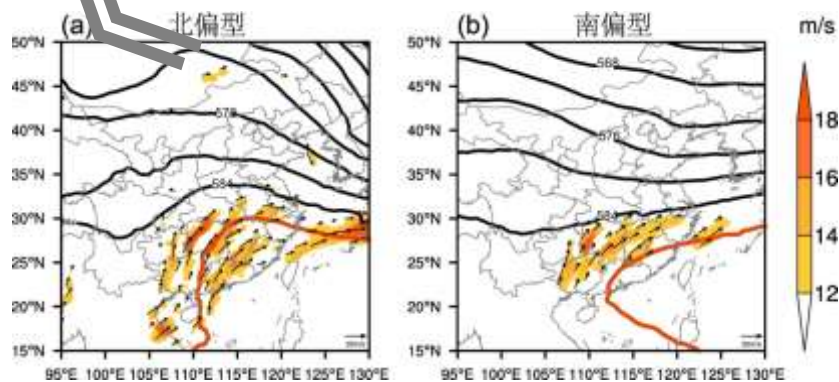


图 4 2020 年梅雨期梅雨带预报 (a) 偏北型和 (b) 偏南型 500 hPa 位势高度和 850 hPa 低空急流的合成分析

(填色为 850 hPa 风速 $\geq 12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域，红线为 588 dagpm 等值线)

Fig.4 Composite analysis of 500 hPa geopotential height and 850 hPa low-level jet for the (a) northward and (b) southward patterns of Meiyu rain belt forecast bias during the 2020 Meiyu period
(Area of 850 hPa wind speed $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ is shaded and the red line is 588 dagpm isoline)

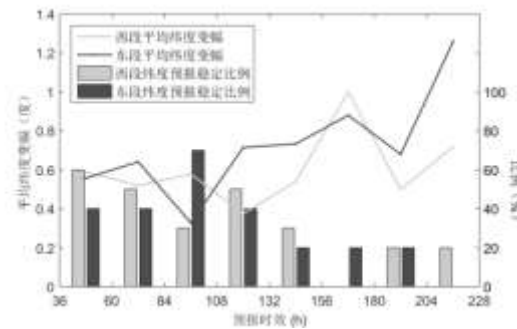


图 5 2020 年梅雨期暴雨雨带东西段纬度预报的平均变幅和稳定比例（单位：%）。

Fig.5 The average latitudinal amplitude of variation and proportion of stability (unit: %) of the western and eastern parts of heavy rain belts during the 2020 Meiyu period

2.3 雨带东西段位置预报偏差的连续性

选取 2020 年 7 月 5 日 08 时至 5 日 08 时持续性暴雨过程中逐日（08 时至次日 08 时）暴雨雨带对象，用于分析雨带东西段位置预报偏差的连续性，考察雨带前期的位置预报偏差信息能否为后一天的预报订正提供参考。图 6 展示了该暴雨过程中 36 h、60 h 和 84 h 时效雨带东西段纬度预报偏差的逐日变化情况。在 36 h 时效内，雨带东西段的预报连续性均表现较好，其中西段表现为 5—7 日都没有明显的南北预报偏差，东段表现为 5—7 日都有小幅的偏北预报偏差；在 60 h 时效内，雨带西段的连续性依旧表现较好，表现为连续的偏北预报偏差，而东段先后出现了漏报和不连续的情况；到了 84 h 时效，雨带东西段均出现一半比例的不连续。

2.4 预报偏差分析小结

通过上述分析可知：短期时效内，雨带东西段均存在偏北的系统偏差，雨带西段的漏报率低于东段，稳定性和连续性均好于东段；中期时效内，雨带东段的预报误差增长较为明显，且纬度预报平均变幅也高于西段。由此可见，雨带东段的预报不确定性总体高于西段，尤其是到了中期预报时效，预报不确定性进一步加强。在盛夏季节，降水系统在自西向东发展的

过程中往往伴随着地面锋区和低空急流的增强，而预报员们在预报实践中发现 ECMWF 模式常常对这种增强有过度预报的趋势。为了进一步分析造成雨带东段预报偏差较大的关键天气系统，下面将基于 ESA 方法分析揭示雨带典型偏差特征的不确定性来源。

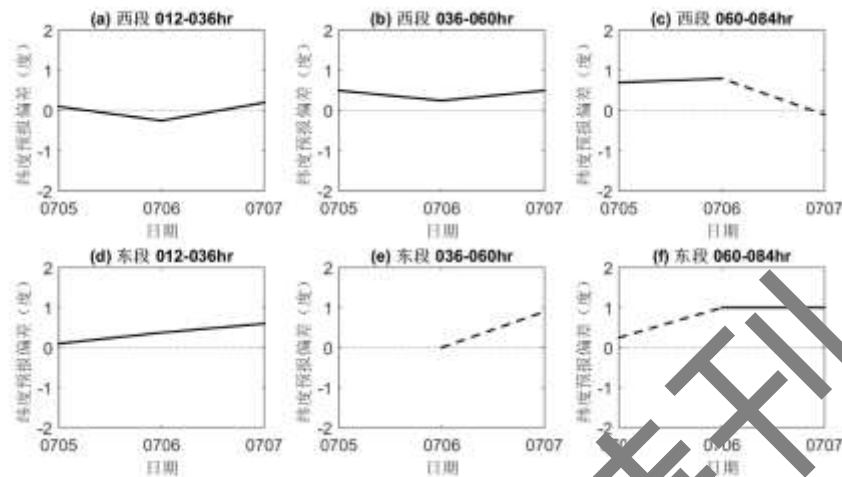


图 6 2020 年 7 月 5 日 08 时至 8 日 08 时 (a、d) 36 h、(b、e) 60 h、(c、f) 84 h 时效
暴雨雨带西段 (a~c) 和东段 (d~f) 纬度预报偏差的逐日变化
(实线代表预报偏差连续，虚线代表预报偏差连续，空白代表漏报)

Fig.6 The daily variation of latitudinal forecast bias of the (a~c) western, (d~f) eastern parts and the (a, d) 36 h, (b, e) 60 h, (c, f) 84 h forecast of heavy rain belts during 08 BT July 5 to 08 BT July 8 in 2020. Solid lines represent continuous forecast bias, dashed lines represent discontinuous forecast bias, blank represents miss)

3 集合敏感性分析

3.1 梅雨雨带东段预报明显偏北的个例

选取 2020 年 7 月 18 日发生的一次典型梅雨锋锋面雨带东段预报偏北的案例,采用 ESA 方法对其不确定性来源及相应的动力学特征进行分析。图 7 分别给出了 7 月 18 日 08 时至 19 日 08 时控制预报和观测的 24 h 累积降水分布 (图 7a、7b) 及二者在暴雨量级上的雨带对象分布(图 7c),可以看出预报和观测雨带整体均呈现东北—西南走向,二者在西段(114 E 以西)的空间位置上呈现出较高的匹配度。但对于东段而言 (114 E 以东),观测雨带呈东—西走向影响河南南部到安徽中部一带,而预报雨带则较观测出现明显偏北,对河南南部到安徽北部地区产生影响。

图 8 给出了 7 月 18 日 08 时到 19 日 08 时 ECMWF 集合预报逐 6 h 累积降水的离散度和集合平均分布。通过绘制相应的集合预报邮票图（图略）发现，集合离散度大值区处的强降水雨带位置存在较大的不确定性。由图 8 可以看出降水预报不确定性较大（离散度较高）的区域基本与强降水区相一致，均首先在西段快速发展，此后在 7 月 18 日 20 时后雨带东段的集合平均降水中心逐渐发展至红框所标注的预报北偏区域。与之相对应，在 19 日 02 时至 08 时红框附近的降水离散度呈明显增加并达到与西段相近的水平，最大值超过 20 mm，说明在该时段的预报不确定性对雨带东段预报偏北的贡献最大，可作为此次预报“转折点”。

3.2 与 500hPa 高度场的集合敏感性

对预报“转折点”进行敏感性分析，用以解释雨带东段偏北的成因，将 7 月 19 日 02—08 时红框区域内的区域平均 6 h 降水量作为预报量，分别计算其与 7 月 18 日 02 时（-6 h）、18 日 20 时（-12 h）、18 日 14 时（-18 h）环境场的 ESA。图 9 给出了预报量与前期 500 hPa 高度场的 ESA，从集合平均场上可以看出在预报发生“转折”前 500 hPa 高空槽处于发展加深状态，且降水偏差的发生区域均位于高空槽前（图 9 红框），附近存在正负偶极型分布且通过显著性检验的敏感区，说明该高空槽越深（或向下游移速度越慢），则集合成员在响应区域内预报的 6 h 累积降水量越大，这意味着数值模式对预报偏北发生前期高空槽强度的过报是导致此次预报降水雨带东段偏北的重要因素之一。注意到越临近降水发生偏差的时刻，槽线位置的负敏感区和槽前的正敏感区均出现缓慢东移且强度增加，呈现出“上游消、下游长”的发展效应，说明 ESA 在该案例中的应用具有清晰的物理意义。另一方面，注意到南侧副高脊线附近存在显著的正敏感区域，说明副高预报的偏强也是导致雨带出现预报偏北的原因之一。

3.3 与 850hPa 风场的集合敏感性

图 10 给出了预报量与低层 850 hPa 水平风场的 ESA 及对应时次的集合平均场，从集合平均风场上可以看出从 18 日 14 时至 19 日 02 时低层存在稳定的低空急流向降雨区输送暖湿气流，且急流强度入夜后逐渐加强。在纬向风和经向风的 ESA 场上，预报偏差区域西南侧均存在明显的正敏感区，说明模式对西南低空急流预报越强则偏差区域的降水量越大，与 500 hPa 高度场的 ESA 相比，此处敏感区数值的绝对值更大，即 850 hPa 西南低空急流强度预报偏强是导致此次降水雨带西段偏北的最主要因素。此外，对比纬向风场（图 10a~10c）和经向风场（图 10d~10f）二者在急流区正 ESA 的数值可以发现，经向风场的影响更为突出。另一方面，与 500 hPa 高度场的 ESA 不同（图 9），尽管低空急流在凌晨（19 日 02 时）发

展最为强盛（图 10c, 10f），但此时的 ESA 较前两个时次反而有所减弱，考虑到锋面降水往往具有凌晨加强的日变化特征（Xue et al, 2018），因此在实际预报业务中考虑低空急流对于梅雨锋暴雨预报偏差的判断时，需着重对其前期（6 h 前）的急流预报进行研判。此外，注意到偏差区域西侧和东南侧存在纬向风场的负敏感区而西南侧有正敏感区，说明锋面附近气旋性风切变的预报偏高也会导致降水雨带预报偏北。陈涛等（2020）也对类似的气旋锋生梅雨暴雨个例进行了研究，发现该类过程中 ECMWF 数值预报常出现低涡急流系统和降水潜热之间的非自然正反馈，致使天气系统和雨带预报偏差明显，与本文的结论相一致。

3.4 集合敏感性分析小结

通过上述分析可知，造成锋面暴雨东段预报偏北的主要天气尺度系统包括 500 hPa 高空低槽、副热带高压以及 850 hPa 上的低空急流和切变线，数值模式中高空槽预报偏深（曲率增加）、副高偏强、低空急流和锋面气旋性切变的偏强均是构成此次降水雨带预报偏差的因素，其中低空急流的影响最为明显。低空急流南风分量的预报偏强配合副高偏强导致雨带北推速度加快，并加强了向降水区的水汽和能量输送，和降水潜热之间存在非自然正反馈，造成虚假强降水，最终导致了雨带东段整体偏北。此外，注意到集合平均场上高空槽和低空急流的过度预报均发生于二者发展加强时段中，因此就这个典型个例可认为高空槽和低空急流在后半夜发展加强的时段是出现梅雨锋暴雨雨带东段北偏的背景场特征之一。为了对该情形加以验证，对另外 4 次雨带东段偏北案例（表 1 中序号 1、4、7、8）的环流形势和逐 6h 累积降水进行分析（图略），得到了与此次案例一致的结论。

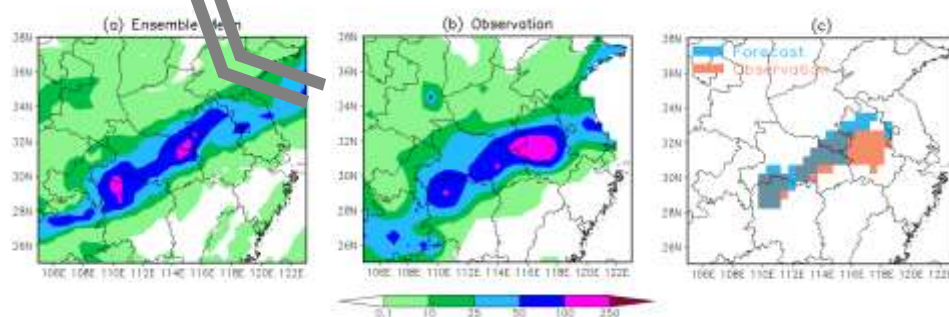


图 7 （a）36 h 时效的控制预报和（b）观测在 2020 年 7 月 18 日 08 时至 19 日 08 时的累积降水分布以及（c）预报和观测的暴雨雨带对象（蓝色填色为预报暴雨对象，红色填色为观测暴雨对象）

Fig.7 (a) 36 h control forecast and (b) observation of the accumulated precipitation distribution

duing 08 BT 18 to 08 BT 19 July 2020, and (c) heavy rain belt objects of forecast and observation

(forecast heavy rain object is blue shaded while observed heavy rain object is red shaded)

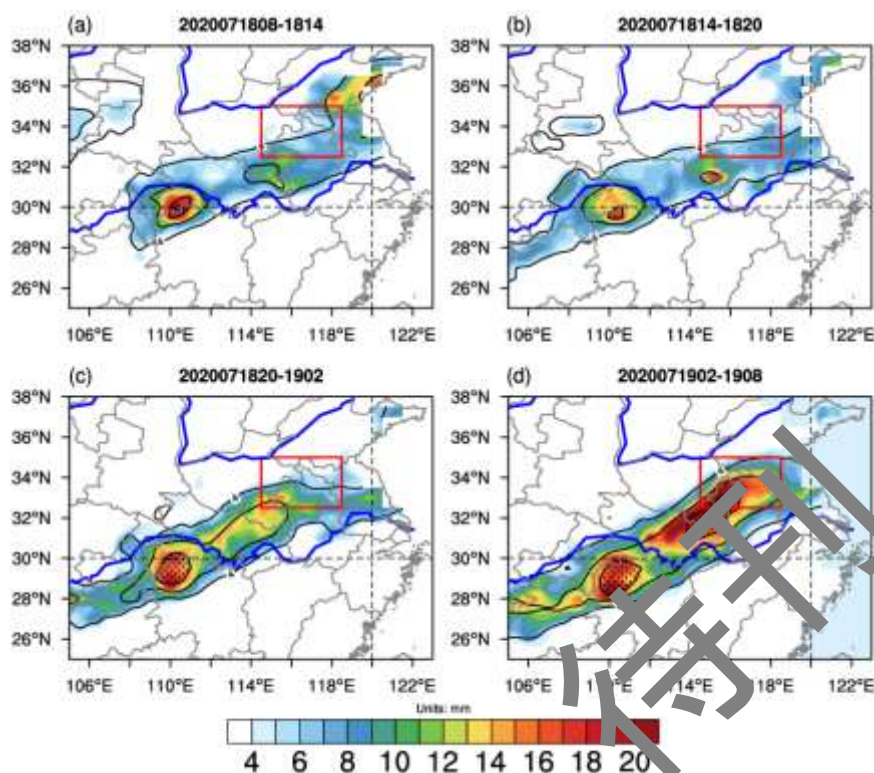


图8 2020年7月18日08时至19日08时ECMWF集合预报逐6h累积降水离散度(填色,单位:mm)

和集合平均(等值线,单位:mm)

(a)7月18日08—14时,(b)7月18日14—20时,

(c)7月18日20时至19日02时,(d)7月19日02—08时

(黑色点状区域为集合平均降水大于10mm的区域,

红色方框标出了ECMWF确定性预报雨带偏北的区域,下同)

Fig.8 The every 6 h ECMWF accumulated precipitation ensemble forecast spread (shaded, unit: mm)

and ensemble mean (isoline, unit: mm)

(a) 08 BT 18 to 14 BT 18 July, (b) 14 BT 18 to 20 BT 18 July, (c) 20 BT 18 to 02 BT 19 July, (d) 02 BT 19 to

08 BT 19 July

(Area of ensemble mean precipitation larger than 10 mm is in black dotted area, area of northward

rain betl bias of ECMWF determinictic forecast is in red box, the same below)

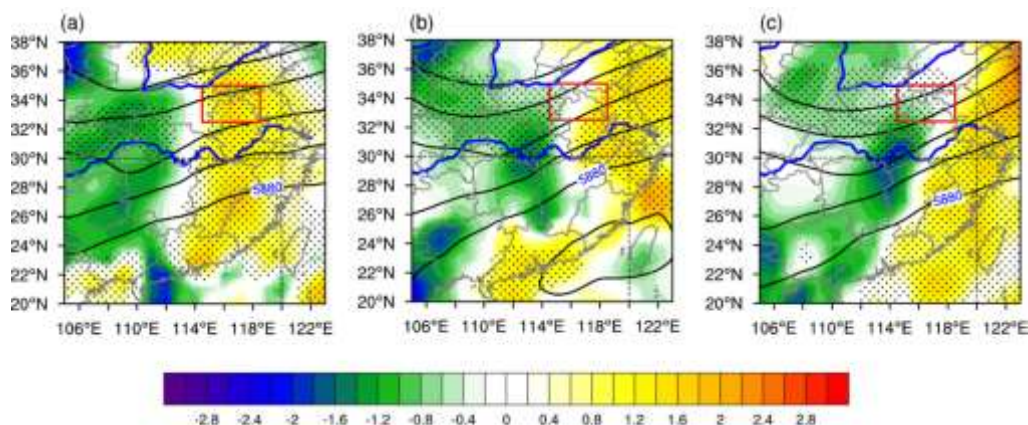


图9 2020年7月19日02时至08时降水预报偏北区域(红框)的平均6 h累积降水与前期500 hPa位势高度场的ESA

(a) 7月18日14时(-18 h), (b) 7月18日20时(-12 h), (c) 7月19日02时(-6 h)
(等值线为对应时次的集合平均位势高度场, 黑色打点区域表示通过0.05显著性水平检验)

Fig.9 ESA of the 6 h average accumulated precipitation with northward forecast bias during 02 BT to 08 BT 19 July and the earlier 500 hPa geopotential heights of (a) 14 BT 18 July (-18 h), (b) 20 BT 18 July (-12 h), (c) 02 BT 19 July (-6 h) in 2020 (Isolines are the ensemble mean geopotential height of corresponding forecast lead times, the black dotted area represents the area passing the 0.05 significant level test)

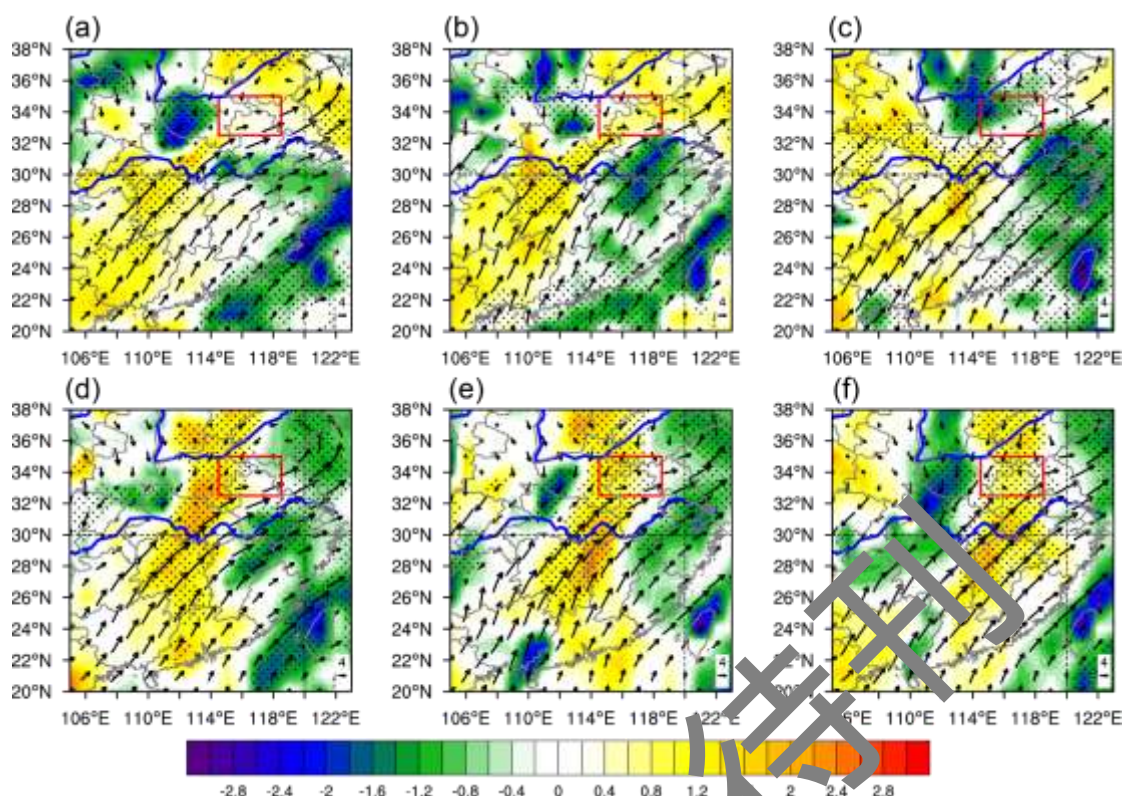


图 10 2020 年 7 月 19 日 02—08 时降水预报偏北区域（红框）的平均 6 h 累积降水与

前期 850 hPa (a~c) 纬向、(d~f) 经向水平风场的 ESA

(a, d) 7 月 18 日 14 时 (-18 h), (b, e) 7 月 18 日 20 时 (-12 h), (c, f) 7 月 19 日 02 时 (-6 h)

(风矢量为对应时次的 850 hPa 集合平均风场, 黑色打点区域表示通过 0.05 显著性水平检验)

Fig.10 ESA of the 6 h average accumulated precipitation with northward forecast bias during 02 BT to

08 BT July 19 and the earlier 850 hPa (a~c) zonal and (d~f) meridional horizontal wind field:

(a, d) 14 BT July 18 (-18 h), (b, e) 20 BT July 18 (-12 h), (c, f) 02 BT July 19 (-6 h) in 2020

(Wind vectors are the 850 hPa ensemble mean wind field of corresponding forecast lead times,

the black dotted area represents the area passes the 0.05 significant level test)

4 结论和讨论

针对 ECMWF 模式在 2020 年我国江淮流域超长梅雨期暴雨雨带预报中的不确定性, 选取 10 个典型的狭长暴雨雨带, 基于 MODE 技术分析了雨带东西段的位置预报偏差、稳定性以及预报偏差的连续性, 并基于 ESA 方法分析揭示了雨带典型偏差特征的关键天气系统。结果表明:

(1) 雨带东段的预报不确定性总体高于西段, 尤其是到了中期预报时效, 预报不确定性进

进一步加强。

(2) 短期时效内, 雨带东西段均存在偏北的系统偏差, 雨带西段的漏报率低于东段, 稳定性和连续性均好于东段; 中期时效内, 雨带东段的预报误差增长较为明显, 且纬度预报平均变幅也高于西段。

(3) 500hPa 高空槽、副热带高压、850hPa 低空急流和切变线的预报偏差及其和降水潜热之间存在的非自然正反馈共同作用造成雨带东段预报偏北, 其中后半夜高空槽和低空急流的发展加强是出现梅雨锋暴雨雨带东段北偏的背景场特征之一。

梅雨期暴雨雨带的位置预报是预报业务的关键着眼点, 掌握模式雨带预报偏差的特性对于提升预报准确率和防灾减灾具有重要意义。在今后的工作中, 还需要进一步增加更多年份的梅雨期暴雨样本以提升研究结论的说服力, 并针对更多常用数值预报产品(例如 GFS, GRAPES-GFS, GRAPES-3KM 等)进行分析研究。

参考文献

- 陈涛, 张芳华, 于超, 等, 2020. 2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. 气象, 46(11): 1415-1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al, 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June-July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1415-1426 (in Chinese).
- 陈伟斌, 翟舒楠, 韩慎友, 等, 2019. 一次沿海局地特大暴雨的集合敏感性分析[J]. 气象研究与应用, 40(1): 11-15. Chen W B, Zhai S N, Han S Y, et al, 2019. Ensemble sensitivity analysis of torrential rainstorm in coastal area[J]. J Meteor Res Appl, 40(1): 11-15 (in Chinese).
- 陈笑, 赵东, 何晓凤, 等, 2018. 基于 MODE 对模式预报强风天气的检验分析[J]. 气象, 44(8): 1009-1019. Chen X, Zhao D, He X F, et al, 2018. Evaluation and analysis of model forecast performance of high wind based on MODE method[J]. Meteor Mon, 44(8): 1009-1019 (in Chinese).
- 陈艳丽, 宋洁, 李崇银, 2016. 梅雨雨带北跳过程研究[J]. 大气科学, 40(4): 703-718. Chen Y L, Song J, Li C Y, 2016. A study on northward jump of the Meiyu rainbelt[J]. Chin J Atmos Sci, 40(4): 703-718 (in Chinese).
- 丁一汇, 2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 38(5): 395-406. Ding Y H, 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 395-406 (in Chinese).
- 蒋薇, 高辉, 2013. 21 世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J]. 气象, 39(9): 1139-1144. Jiang W, Gao H, 2013. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st century and the possible causes[J]. Meteor Mon, 39(9): 1139-1144 (in Chinese).
- 金琼, 戴竹君, 李聪, 等, 2020. 2018 年南京梅雨异常特征及环流分析[J]. 大气科学学报, 43(3): 557-567. Jin Q, Dai Z J, Li C, et al, 2020. Characteristics and associated circulation analysis of Meiyu anomalies in 2018 in Nanjing[J]. Trans Atmos Sci, 43(3): 557-567 (in Chinese).
- 刘凑华, 牛若芸, 2013. 基于目标的降水检验方法及应用[J]. 气象, 39(6): 681-690. Liu C H, Niu R Y, 2013. Object-based precipitation verification method and its application[J]. Meteor Mon, 39(6): 681-690 (in Chinese).
- 刘建勇, 谈哲敏, 顾思南, 2011. 梅雨期暴雨系统的流依赖中尺度可预报性[J]. 大气科学, 35(5): 912-926. Liu J Y, Tan Z M, Gu S N, 2011. Flow-dependent mesoscale predictability of Meiyu heavy rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 35(5): 912-926 (in Chinese).
- 茅懋, 戴建华, 李佰平, 等, 2016. 不同类型强对流预报产品的目标对象检验与分析评价[J]. 气象, 42(4): 389-397. Mao M, Dai J H, Li B P, et al, 2016. Object-based verification and evaluation for different types of severe convection forecasting products[J]. Meteor Mon, 42(4): 389-397 (in Chinese).

闵锦忠, 张申葵, 杨婷, 2018. 一次梅雨锋暴雨发生发展机制的诊断与模拟[J]. 大气科学学报, 41(2): 155-166. Min J Z, Zhang S Y, Yang T, 2018. Diagnosing analysis and numerical simulation of formation and development mechanism of a rainstorm associated with Meiyu front[J]. Trans Atmos Sci, 41(2): 155-166 (in Chinese).

苏翔, 康志明, 2020. 基于对象诊断的超强台风“利奇马”(1909)模式强降水预报检验[J]. 气象科学, 40(1): 30-40. Su X, Kang Z M, 2020. Verification of heavy precipitation forecast based on object diagnosis for typhoon "Lekima" model (1909)[J]. J Meteor Sci, 40(1): 30-40 (in Chinese).

王勇, 丁治英, 李勋, 等, 2012. 2007 年 7 月 7—9 日淮河流域梅雨锋雨带特征分析[J]. 气象科学, 32(1): 45-52. Wang Y, Ding Z Y, Li X, et al, 2012. The analysis on the feature of the rain-band along Meiyu front in Huaihe River Basin from July 7 to 9, 2007[J]. J Meteor Sci, 32(1): 45-52 (in Chinese).

尹韩笑, 张立凤, 王颢, 等, 2019. 一次梅雨暴雨的动能谱特征分析及收支诊断[J]. 大气科学, 43(5): 1143-1157. Yin H X, Zhang L F, Wang Y, et al, 2019. Kinetic energy spectrum analysis and budget diagnosis of a Mei-yu rainstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 1143-1157 (in Chinese).

尤凤春, 王国荣, 郭锐, 等, 2011. MODE 方法在降水预报检验中的应用分析[J]. 气象, 37(12): 1498-1503. You F C, Wang G R, Guo R, et al, 2011. The application analysis of MODE method to the rainfall forecast test[J]. Meteor Mon, 37(12): 1498-1503 (in Chinese).

赵晓琳, 2019. 2018 年我国梅雨特征及梅雨期降水异常成因分析[J]. 气象与环境科学, 42(3): 29-33. Zhao X L, 2019. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2018[J]. Meteor Environ Sci, 42(3): 29-33 (in Chinese).

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

Davis C, Brown B, Bullock R, 2006. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas[J]. Mon Wea Rev, 134(7): 1772-1784.

Davis C A, Brown B G, Bullock R, et al, 2009. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program[J]. Wea Forecasting, 24(5): 1252-1267.

Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis[J]. Mon Wea Rev, 146(11): 3827-3844.

Hill A J, Weiss C C, Ansell B C, 2016. Ensemble sensitivity analysis for mesoscale forecasts of dryline convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 144(11): 4161-4182.

Keller J H, 2017. Amplification of the downstream wave train during extratropical transition: sensitivity studies[J]. Mon Wea Rev, 145(4): 1529-1548.

Limpert G L, Houston A L, 2018. Ensemble sensitivity analysis for targeted observations of supercell thunderstorms[J]. Mon Wea Rev, 146(6): 1705-1721.

Lynch S L, Schumacher R S, 2014. Ensemble-based analysis of the May 2010 extreme rainfall in Tennessee and Kentucky[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 222-239.

Xie B G, Zhang F Q, Zhang Q H, et al, 2013. Observing strategy and observation targeting for tropical cyclones using ensemble-based sensitivity analysis and data assimilation[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1437-1453.

Xue M, Luo X, Zhu K F, et al, 2018. The controlling role of boundary layer inertial oscillations in Meiyu frontal precipitation and its diurnal cycles over China[J]. J Geophys Res: Atmos, 123(10): 5090-5115.

Yu H Z, Meng Z Y, 2016. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012[J]. Tellus A, 68(1): 31045.