

张晨悦, 朱科锋, 薛明, 等. 基于对流可分辨集合预报的阜宁龙卷概率预报研究. 气象科学, 2023, 43(4): 438-450.

ZHANG Chenyue, ZHU Kefeng, XUE Ming, et al. Probabilistic forecasting of Funing significant tornado based on convection-allowing ensembles. Journal of the Meteorological Sciences, 2023, 43(4): 438-450.

基于对流可分辨集合预报的阜宁龙卷概率预报研究

张晨悦^{1,2} 朱科锋³ 薛明^{1,4} 孙正齐⁵

(1 南京大学 大气科学学院, 南京 210023; 2 中国民用航空局空中交通管理局航空气象中心, 北京 100018;

3 南京气象科技创新研究院 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041;

4 Center for Analysis and Prediction of Storms and School of Meteorology, University of Oklahoma, Norman, OK 73072;

5 南京恩瑞特实业有限公司, 南京 210019)

摘要 本文针对2016年6月23日江苏阜宁龙卷, 设计了两组对流可分辨尺度集合预报: 一组以ERA5再分析资料为初始和侧边界(CEFS_ERA5); 另一组以NCEP-GEFS为初始和侧边界(CEFS-GEFS), 评估了两组试验对此次龙卷的预报能力。结果显示: 两组对流尺度集合预报均有约半数以上成员能够再现龙卷超级单体的特征; 2~5 km上升螺旋度(UH25)对本次龙卷超级单体有较好的预报指示意义。在上述分析的基础上, 考虑位置预报偏差, 提出了一种基于UH25的邻域龙卷概率预报产品, 分析了龙卷概率预报技巧对关键参数邻域半径和UH25阈值的敏感性, CEFS_ERA5邻域半径取15个格点, UH25阈值取 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 最优; 而CEFS-GEFS邻域半径取15个格点, UH25阈值取 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 最优。总的来说, 邻域概率预报产品显著提升了对此次龙卷概率预报水平。

关键词 龙卷; 对流可分辨尺度集合预报; 上升螺旋度; 邻域概率预报产品

分类号: P456.1

doi: 10.12306/2022jms.0057

文献标识码: A

Probabilistic forecasting of Funing significant tornado based on convection-allowing ensembles

ZHANG Chenyue^{1,2} ZHU Kefeng³ XUE Ming^{1,4} SUN Zhengqi⁵

(1 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2 Aviation Meteorological Center, Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100018, China; 3 Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China;

4 Center for Analysis and Prediction of Storms and School of Meteorology, University of Oklahoma, Norman, OK 73072, USA; 5 Nanjing NRIET Industrial Co. Ltd, Nanjing 210019, China)

Abstract For the significant tornado that occurred in Funing, Jiangsu Province on June 23, 2016, two Convection-allowing Ensemble Forecast Systems (CEFSs) were designed: one initialized from ERA5 reanalysis dataset (named CEFS_ERA5) and the other initialized from NCEP-GEFS (named CEFS-GEFS). The predictability of these two systems was evaluated and the results show that more than half of the members of the two ensemble systems can reproduce the typical characteristics of the tornadic supercell; 2-5 km updraft helicity (UH25) has good skill in indicating tornadic supercell. Further, considering the position prediction deviation, a neighborhood tornado probabilistic forecasting product based on UH25 is proposed. The sensitivity of probabilistic forecasting to the key parameters of the

收稿日期(Received): 2022-04-20; 修改稿日期(Revised): 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41730965); 江苏省科技支撑计划社会发展面上资助项目(BE2022851)

通信作者(Corresponding author): 薛明(XUE Ming). mxue@ou.edu

product, such as neighborhood radius and UH25 threshold, is analyzed: CEFS_ERA5 taking 15 grid spacing as the neighborhood radius and $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ as the UH25 threshold has the best skill; CEFS_GEFs taking 15 grid spacing as the neighborhood radius and $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ as the UH25 threshold has the best skill. In general, the neighborhood probabilistic forecasting products based on UH25 have significantly improved the skill in predicting this tornado.

Key words tornado; convection-allowing ensembles; updraft helicity; neighborhood probabilistic forecasting product

引 言

江苏阜宁龙卷是 1950 年以来江苏省第二次 EF4 级(Enhanced Fujita Scale)龙卷。此次龙卷造成 98 人死亡,846 人受伤,直接经济损失近 50 亿元,是我国有记录以来破坏性最强的龙卷^[1-3]。然而,目前对此次龙卷过程主要着眼于发生的环境分析^[4-6],以及大涡尺度的数值模拟研究^[7-8],对国际上龙卷预测常用的概率预报并没有开展相关研究。

龙卷作为一种小尺度强对流天气,预警和预报依旧是世界性难题。目前龙卷的预警主要是利用高时空分辨率的雷达对中气旋进行识别和追踪^[9],预警位置相对精确,但通常时效只有几分钟到几十分钟,且虚警率较高。Trapp, et al^[10]的研究表明,对于探测到的中气旋,其中仅有 26% 能产生龙卷。针对龙卷的直接预报现阶段主要还停留在研究阶段;Snook, et al^[11]利用 50 m 分辨率的集合预报系统预报出 EF5 级龙卷的环流,但在目前计算条件下,业务应用无法实现。业务中龙卷的高分辨率数值模式预报主要是针对发生龙卷的强对流系统,如龙卷超级单体进行的潜势预报^[12]。业务上常用的 3~5 km 水平网格距预报系统并不能直接解析龙卷过程,需要通过对预报结果后处理,识别出超级单体和中气旋特征,进而预报龙卷。Kain, et al^[13]提出诊断量:上升螺旋度(Updraft Helicity, UH),在对流尺度模式预报中,该诊断量对超级单体系统预报有很好的指导意义。通过邻域方法对输出的小时最大 UH 平滑处理,并制作概率预报,评估结果显示预报和观测有较好的匹配^[14-19]。KONG, et al^[20-21]利用 ARPS 模式对一次龙卷雷暴个例开展了仅包含 5 个成员的集合预报试验,通过对比雷达反射率、累计降水情况及对应的概率预报,发现不同分辨率网格上集合预报均优于单个确定性预报;并且从对流系统结构演变特征上,分辨率最高的 3 km 网格预报结果远优于两个较粗网格。发展基于对流尺度集合预报的龙卷潜势预报产品是目前国际上龙卷预

报业务的重要组成部分。

针对龙卷的潜势预报,美国建立了基于对流尺度模式预报的潜势预报产品。美国俄克拉荷马大学风暴分析和预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)灾害性天气预报试验基地(Hazardous Weather Tested, HWT)春季预报试验(Spring Forecast Experiment, SFE)提供核心雷暴尺度集合数值预报(Storm-Scale Ensemble Forecast, SSEF)及产品。之后发展成为多机构提供多预报成员,并统一纳入名为 Community Leveraged Unified Ensemble(CLUE)的超级集合系统^[22]。在该试验基础上, Kain, et al^[23]对比了不同诊断量,包括 400 hPa 以下上升和下沉运动速度、预报反射率、10 m 风速、2~5 km UH(UH25)等,得到小时最大 UH25 龙卷预报最具指导意义; Sobash, et al^[17, 19]发现基于小时最大 UH25 得到的高预报概率区域和强天气过程(冰雹、强风和龙卷)的落区一致性较强; Clark, et al^[14-15, 24]以小时最大 UH25 构建的龙卷路径总长度和实际龙卷发生强度间有强相关性。春季预报试验极大地推动了龙卷预报能力的提高。

国内集合预报研究更关注强降水过程,业务上全国范围的分辨率是 10 km^[25],已经开展了针对小区域的对流尺度集合预报,但目前针对龙卷的集合预报研究还较为匮乏。2021 年中国共发生 58 个龙卷, EF2 级或以上强度龙卷 16 个,明显多于 2004—2013 年的龙卷记录年平均值;龙卷共造成 23 人死亡, 470 多人受伤^[26]。建立针对龙卷的潜势预报产品对于防灾减灾具有重要意义。为此,本文基于对流尺度集合预报,发展了一种基于上升螺旋度的邻域概率产品,深入分析了龙卷概率预报水平对产品参数包括邻域半径和诊断量阈值的敏感性,为提升对流可分辨尺度集合预报系统对龙卷的概率预报提供参考。

1 阜宁龙卷发生过程简介

阜宁龙卷发生在江淮梅雨期。22—23 日,西太

平洋副热带高压西侧西南气流向江苏北部地区持续输送热量和水汽,同时,东北冷涡后部一股较强冷空气南下影响江苏北部地区,使得该地区不稳定能量持续增强(对流有效位能 CAPE 达到 $3\ 290\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) 并有充足的水汽条件(抬升凝结高度 LCL = 231 m)。阜宁处于 500 hPa 槽前,高空急流入口的右后侧 $0\sim 6\ \text{km}$ 垂直风切变为 $27\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ $0\sim 1\ \text{km}$ 风暴相对螺旋度 SRH 为 $139\ \text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,整体环境条件有利于龙卷的发生^[1,4-5]。中国天气网雷达回波资料显示,阜宁龙卷生成于一个西北东南走向的准线性对流系统南侧末端的超级单体中,该超级单体最早形成于 2016 年 6 月 23 日 01:12(世界时,下同),之后向东北移动,在 05:51 有明显的钩状回波特征。06:14,龙卷过程开始影响江苏阜宁地区,并在 06:20 开始达到本次过程的最强级别 EF4 级。整个龙卷过程共维持了 50 min 左右,至 07:00 结束。根据 MENG, et al^[1] 的灾害调研结果,其路径呈东西向平直分布,长约 34.5 km,最宽达到 4.1 km,观测到的最大风速达到 $34.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (新沟镇观测站 约 06:29)。

2 资料和方法

2.1 对流可分辨尺度集合预报系统

对流可分辨尺度集合预报系统使用 WRF-ARW 4.2.2 版本。为了减小侧边界的影响,及更充分地覆盖梅雨带并在此基础上抓住龙卷超级单体发生的位置,本文选取了较大的预报范围(图 1),基本涵盖整个中国区域,模式包含 $1\ 500\times 1\ 100\times 51$ 个网格点,分辨率为 $4\ \text{km}$ ^[27]。本文设计了两组试验。一组以美国环境监测中心(NCEP)全球集合预报系统(GEFS) 20 个成员预报场作为对流尺度集合预报系统的初始和侧边界条件。GEFS 数据时间分辨率为 6 h,水平分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$,垂直 27 层。本组试验命名为 CEFS_GEFS,表 1 列出了各成员对应的不同物理配置,该配置参考美国风暴分析预报中心(CAPS)对流可分辨集合预报系统^[28-29]和北京“7·21”极端降水事件配置^[27]并做微调。本次试验中,所有的集合成员从 2016 年 6 月 23 日 00:00 起报,积分时间为 12 h。同时,为了计算诊断量的小时最大值,将龙卷发生时段 06:00—07:00 预报时间加密为分钟输出。另一组以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)对全球气候的第五代大气再分析资料(ERA5)作为初始场和边界条件,使用 2016 年 6 月 23 日 00:00 的分析场。相比于 GEFS 资料,ERA5 的时间和空间分辨率更高,分别是 $1\ \text{h}$ 和 $0.25^\circ\times$

0.25° ,垂直 37 层。利用 ERA5 再分析资料可以研究更精确的初始场能否改进龙卷预报,使集合预报的性能有所提升。本组试验命名为 CEFS_ERA5,物理参数配置同试验 CEFS_GEFS。

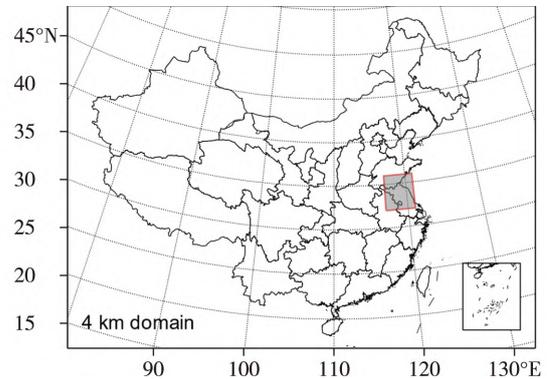


图 1 集合预报系统模式范围;灰色区域为评估区域

Fig.1 The domain of ensemble forecasting systems; the gray shading is the verification area

2.2 基于邻域的龙卷概率预报产品

$4\ \text{km}$ 水平分辨率的对流尺度模式并不能分辨龙卷涡旋^[30],根据前人的工作^[13,17-19],这里主要基于小时最大 UH25 发展潜势预报产品。UH 定义为垂直涡度与速度乘积在一定厚度层的积分(公式 1)^[13],其中 z_0 和 z_1 是定义的积分层次, ζ 是垂直涡度, w 是垂直速度。UH 可用于识别强上升旋转。龙卷发生于 06:14,为了识别发生在对流时间尺度的强环流特征,使用小时内(06:00—07:00)最大的 UH25 作为龙卷预报产品。

$$UH = \int_{z_0}^{z_1} \zeta w dz, \quad (1)$$

考虑到对流尺度模式对龙卷超级单体位置预报存在偏差,提出了一种基于 UH25 的邻域概率预报产品,该方法之前被成功应用于极端降水事件的概率预报^[31],空间邻域概率计算方法如下:

$$n_{l\ i\ j} = \sum_{k=-R_g}^{k=R_g} \sum_{k=-R_g}^{k=R_g} \text{where}(x_{l\ i-k, j-k} \geq UH_0, 1, 0), \quad (2)$$

$$p_{i\ j} = \left(\sum_{l=1}^{l=N} \text{where}(n_{l\ i\ j} \geq F_g, 1, 0) \right) / N. \quad (3)$$

其中: where 表示条件是否为真,真设置为 1,否为 0。首先判断第 l 个成员,以格点 (i, j) 为中心, 2 倍邻域半径 (R_g) 为边长的正方形范围内满足诊断量(06:00—07:00 小时内最大 UH25)大于给定阈值 (UH_0) 的格点数 $n_{l\ i\ j}$ 。 N 表示集合成员总数。如果 $n_{l\ i\ j}$ 大于格点数阈值 F_g ,这里 F_g 取 1,即只要在邻域空间内有 ≥ 1 个点满足 $UH \geq UH_0$,该点就标记为 1(发生龙卷事件),否则标记为 0。对每个集合成员

表 1 集合预报模式方案配置
Table 1 Configuration of ensemble forecasting systems

成员名称	初始和边界条件	微物理方案	陆面过程方案	边界层方案	近地面层方案	长波辐射方案	短波辐射方案
mem01	ERA5/GEFS01	Milbrandt-Yau	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	RRTMG	RRTMG
mem02	ERA5/GEFS02	Morrison 2M	Noah LSM	YSU	Revised MM5	RRTM	Dudhia
mem03	ERA5/GEFS03	Morrison 2M	Pleim-Xiu LSM	ACM2 Pleim	Pleim-Xiu	RRTM	Dudhia
mem04	ERA5/GEFS04	Thompson	Noah LSM	YSU	Revised MM5	Goddard	Goddard
mem05	ERA5/GEFS05	Morrison 2M	Noah LSM	QNSE	QNSE	CAM	CAM
mem06	ERA5/GEFS06	Ferrier	Pleim-Xiu LSM	TEMF	TEMF	CAM	CAM
mem07	ERA5/GEFS07	Milbrandt-Yau	Pleim-Xiu LSM	ACM2 Pleim	Pleim-Xiu	CAM	CAM
mem08	ERA5/GEFS08	Thompson	Pleim-Xiu LSM	MYJ	Monin-Obukhov	RRTM	Goddard
mem09	ERA5/GEFS09	Thompson	Noah LSM	MYJ	Monin-Obukhov	RRTM	Dudhia
mem10	ERA5/GEFS10	Morrison 2M	Noah LSM	YSU	Revised MM5	RRTM	Dudhia
mem11	ERA5/GEFS11	WDM 5-class	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	RRTM	Dudhia
mem12	ERA5/GEFS12	Goddard Lin	Noah LSM	ACM2 Pleim	Revised MM5	RRTMG	RRTMG
mem13	ERA5/GEFS13	Goddard Lin	Noah LSM	ACM2 Pleim	Revised MM5	CAM	CAM
mem14	ERA5/GEFS14	Goddard Lin	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	RRTMG	RRTMG
mem15	ERA5/GEFS15	WSM 6-class	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	Goddard	Goddard
mem16	ERA5/GEFS16	Morrison 2M	Pleim-Xiu LSM	ACM2 Pleim	Pleim-Xiu	GFDL (Eta)	GFDL (Eta)
mem17	ERA5/GEFS17	Morrison 2M	Pleim-Xiu LSM	ACM2 Pleim	Pleim-Xiu	CAM	CAM
mem18	ERA5/GEFS18	WDM 6-class	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	Goddard	Goddard
mem19	ERA5/GEFS19	WDM 6-class	Pleim-Xiu LSM	ACM2 Pleim	Pleim-Xiu	Goddard	Goddard
mem20	ERA5/GEFS20	WDM 6-class	Noah LSM	MYNN 2.5 level TKE	MYNN	GFDL (Eta)	GFDL (Eta)

均进行上述处理,计算得到该点发生龙卷的概率 p_{ij} 。同时,本文测试了不同 UH25 阈值(根据美国的研究结果^[19,32]及本次龙卷小时最大 UH25 的极大值情况,取 $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 到 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,每间隔 $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),以及不同邻域半径(36、60 和 84 km)的试验,深入分析了该邻域概率预报产品预报能力对参数 UH_0 、 F_g 的敏感性。

2.3 概率预报评分

考虑到龙卷观测路径范围较小且只有一次龙卷过程,为了能够更合理地评估概率预报产品,对观测进行平滑处理。根据“practically”prefect 预报方法^[33]将龙卷观测路径映射在预报网格中并判断网格是否在龙卷路径范围上,在记为 1,不在记为 0,得到一个 0~1 分布场,并对 0~1 场进行高斯平滑,平滑公式如下:

$$f = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d_n}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

式中: N 是报告的总数, d_n 是格点与第 n 个报告点

之间的距离, σ 是标准差, σ 越大得到的结果越平滑。经过敏感性测试, $\sigma=4$ 时能够得到可靠的概率预报评估结果,因此在本文第四部分中取 $\sigma=4$ 展开后续讨论。

利用观测对概率预报进行评估,评估范围为图 1 中灰色区域。评估工具使用由国家气象中心开发的 python 程序库 Meteva,该库提供了常用的各种气象预报检验评估算法函数,气象检验分析的图片 and 表格型产品的制作函数(<https://www.showdoc.com.cn/meteva/3975600102516402>)。该软件包含了众多基于集合的概率评分,本文主要采用 ROC (relative operating characteristic) 曲线^[34]和可靠性图 (reliability diagram)^[35]。ROC 曲线描点为预报概率设置不同阈值作为预报发生的条件下,对应的空报率、命中率。在 0~1 之间取 T 个值: $P_1=0, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_T$, 满足 $P_1=0 < P_2 < P_3 < \dots < P_{i-1} < P_i < P_{i+1} < \dots < P_T < 1$ 。以 P_i 为概率阈值,得到列联表中的命中样本数量 a_i (观测发生且预报正确),空报样本数

量 b_i (预报但观测未发生) ,漏报样本数量 c_i (观测发生但未预报) 以及正确的否定样本数量 d_i (观测未发生且未预报) 描点的纵坐标为命中率,如公式 5 ,横坐标为空报率,如公式 6:

$$HR_i = a_i / (a_i + c_i) , \quad (5)$$

$$FAR_i = b_i / (b_i + d_i) 。 \quad (6)$$

取 $i=1 \cdots T$ (本次试验中 T 取 9 ,各概率阈值为 $0.0, 0.1, 0.2, \cdots, 0.9$) ,连接各点得到 ROC 曲线。曲线以下部分的面积 AUC(the area under the ROC curve) 用梯形近似计算得到 ,可以用来评估不同预报系统之间的区别 ,AUC 越接近 1 ,概率预报效果越好。在可靠性图中,可靠性曲线越接近对角线,即预报发生概率和观测发生频率越一致,预报结果越好。

3 集合预报结果

3.1 龙卷超级单体预报的特征分析

本次龙卷发生在典型的超级单体中,龙卷在 06:20 达到 EF4 级,该时刻盐城雷达 0.5° 仰角观测显示单体南侧有明显的钩状回波特征(图 2u) 。06:20 ,CEFS_ERA5(图 2) 过半数的成员(mem01 , mem02 , mem04 , mem05 , mem07 , mem10 , mem11 , mem13 , mem14 , mem15 , mem17 , mem18 , mem19) 能够模拟出超级单体的基本特征,包括钩状回波的初略形态,后者受限于较粗的 4 km 分辨率。Potvin , et al^[36] 利用理想模拟对比了不同网格距下超级单体的模拟特征,发现 3 km 及更高分辨率才能较好地模拟出钩状回波特征。集合成员中只有少数成员

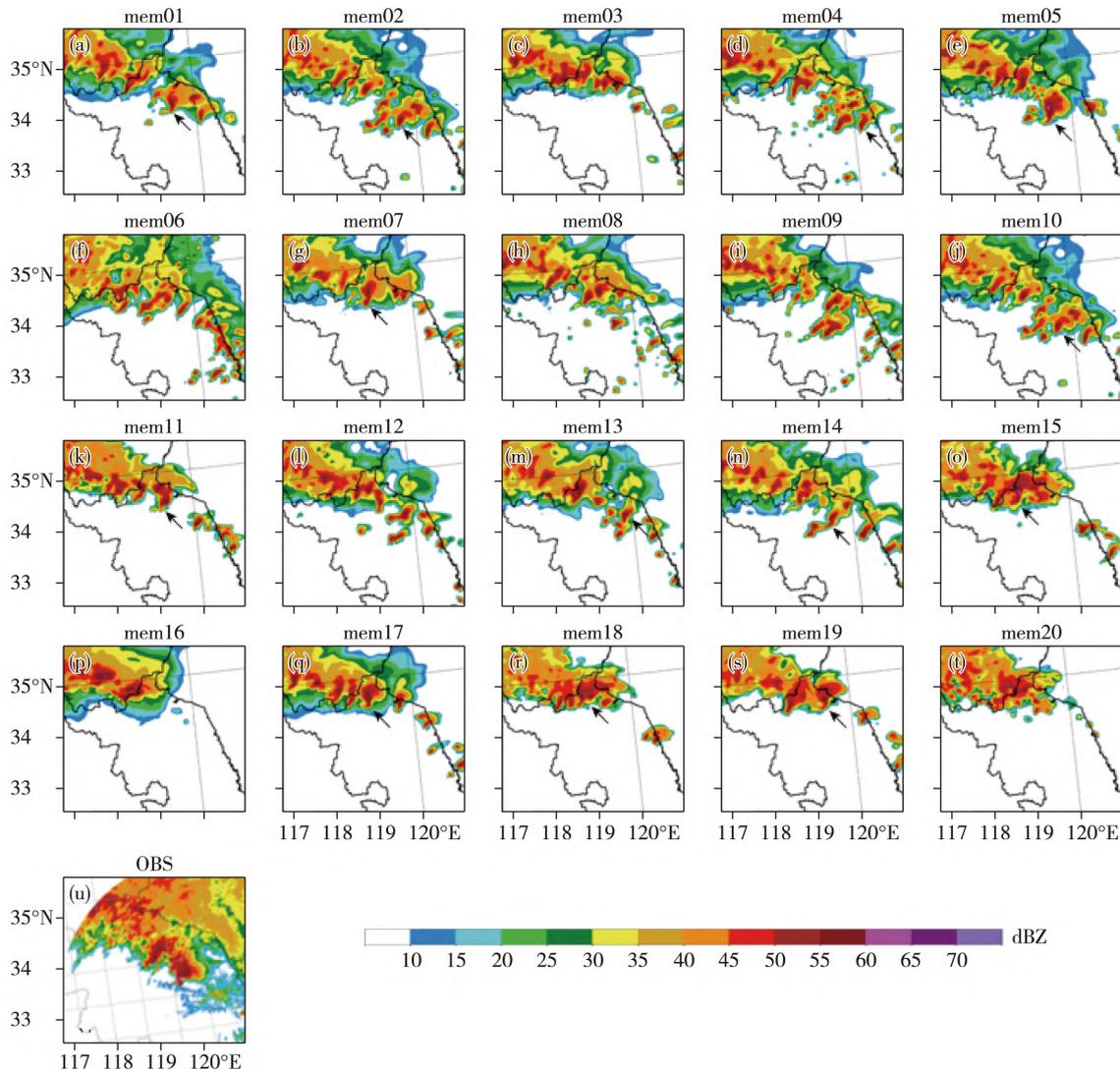


图 2 (a—t) 06:20 CEFS_ERA5 集合预报试验各成员(mem01—mem20) 1 km 高度反射率(阴影, 单位: dBZ) 预报场, 黑色箭头指向模拟出的具有超级单体特征的单体 (u) 江苏盐城雷达 0.5° 仰角雷达反射率观测(阴影, 单位: dBZ)
 Fig.2 (a-t) Mosaic of 1 km radar reflectivity (shaded, unit: dBZ) of CEFS_ERA5 ensemble members (mem01 to mem20); the black arrows point to the simulated cells with supercell characteristics; (u) base reflectivity at the 0.5° elevation angle from the Yancheng radar(shaded, unit: dBZ)

(mem02 ,mem04 ,mem05 ,mem10 ,mem14) 模拟得到的超级单体与观测单体的位置偏差较小,大部分成员预报的单体较观测偏北。从模拟的单体形态及空间位置上,CEFS_ERA5 mem05 是表现最好的成员。CEFS_GEFS(图 3) 约半数成员(mem01, mem03, mem05, mem06, mem08, mem10, mem11, mem15, mem17, mem18, mem19) 也能够模拟出超级单体形态特征,但其成员模拟的单体位置普遍偏北。CEFS_GEFS 中超级单体形态模拟较好且较接近观测的是 mem19。整体而言,两组试验均有超过半数成员能抓住中气旋上升旋转的特征,但均存在位置偏西北的问题,CEFS_GEFS 比 CEFS_ERA5 偏北更严重,这可能是因为前者使用 GEFS 预报场作为初始和侧边界,而后者是使用 ERA5 再分析作为初始和侧边界。相对来说,ERA5 对大尺度环境场分析精度更高,使得整体位置预报更好。

选取 CEFS_ERA5 中最好的成员 mem05 和 CEFS_GEFS 最好的成员 mem19 进一步对比分析了两种初始和侧边界条件下对产生龙卷超级单体的预报差异。CEFS_ERA5 mem05 的单体钩状特征从 05:30 出现直到 06:40 消失;相比之下,CEFS_GEFS mem19 的龙卷超级单体钩状回波特征出现时间更早且维持时间更长,从 05:00 开始出现到 07:00 逐渐减弱;两个成员均在 06:20 有明显的钩状回波特征(图 4a、c),单体南侧对应 UH25 高值中心。在 06:20 沿过 UH25 高值中心和 3 km 高度雷达反射率弱回波区的线段 A1B1 和 A2B2 做垂直剖面得到图 4b、d,可以看到较为典型的超级单体特征:弱回波区及强回波悬垂;两个成员模拟的回波顶达到 16 km 以上,对应非常强的对流;CEFS_ERA5 mem05 模拟单体的垂直最大速度约 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,CEFS_GEFS mem19 模拟单体的垂直最大速度约为 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对

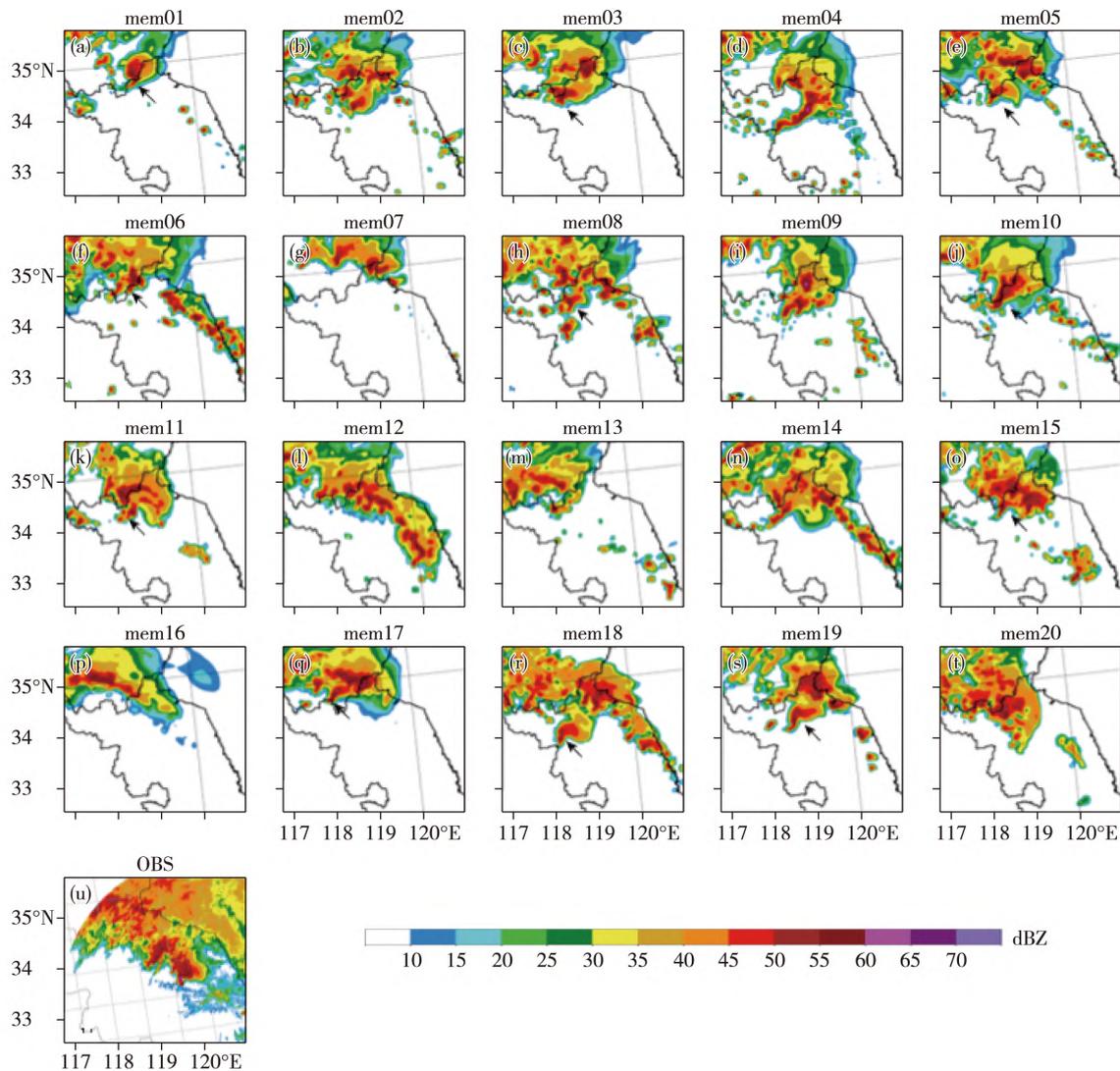


图3 同图2,为 CEFS_GEFS 集合预报试验成员
Fig.3 Same as fig. 2, except for CEFS_GEFS

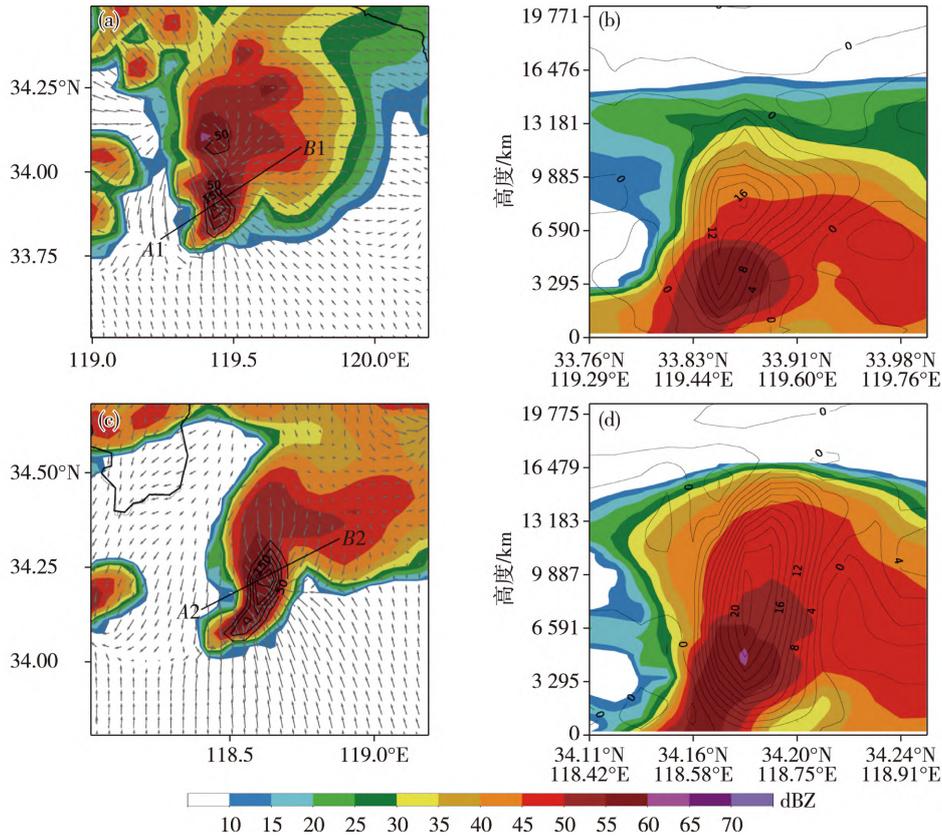


图4 06:20 (a) CEFS_ERA5 mem05 (c) CEFS_GIFS mem19 3 km 高度雷达反射率(阴影,单位: dBZ) 叠加 UH25 (等值线,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 及地面风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 沿(a)中 A1B1 (d) 沿(c)中 A2B2 做垂直剖面, 雷达反射率(阴影,单位: dBZ) 叠加垂直速度(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实线速度为正; 虚线速度为负)

Fig.4 (a) CEFS_ERA5 mem05 (c) CEFS_GIFS mem19 3 km radar reflectivity (shaded, unit: dBZ) superimposed UH25 (contour unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and surface wind field (vector unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) make a vertical section along A1B1 in (a), (d) make a vertical section along A2B2 in (c), and the radar reflectivity (shaded unit: dBZ) superimposes the vertical velocity (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, solid line represents positive velocity; dotted line represents negative velocity) at 0620 UTC

应强烈的上升运动;说明较好成员能够较好地再现龙卷超级单体的主要特征。

总的来说,两组试验预报的龙卷超级单体位置有较大差异,但整体特征上差别不大,都能较好再现超级单体的主要特征;UH25 大值中心与地面风场辐合区及超级单体龙卷发生位置对应(图 4a、c),对龙卷发生位置有较好的指示意义,结合前人工作^[13, 17-19]在本文后续分析中采用 UH25 作为诊断量进行龙卷概率预报分析。

3.2 诊断量叠加场路径

图 5 展示了集合成员 05:30—07:00 每隔 10 min 输出的 $\text{UH25} \geq 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 等值线。Sobash, et al^[18]指出 $\text{UH25} = 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 能够较好地指示龙卷性超级单体的发生,因此这里使用 $200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 作为阈值,可以滤去本次过程中非龙卷的中尺度对流系统影响。

图 5 显示了两组试验各成员 UH25 诊断路径与龙卷观测路径的相对位置。其中 CEFS_ERA5

mem20 和 CEFS_GIFS mem12、mem13、mem16 没有 $\text{UH25} \geq 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的诊断路径,即模拟的中气旋强度不够。CEFS_ERA5 整体预报偏西北,但得益于好的初始场,与龙卷观测路径相对较接近;成员预报的路径离散度方面,多物理参数组合预报下,得到的各成员诊断路径南北方向差异比较明显,约 1° 左右,东西向差异在 0.8° 左右。多数成员分布在观测北侧,其中分布最北的成员 mem18,靠近江苏和山东交界线处,位置误差约 110 km;有约 1/5 的成员在南侧有分布,有效减少了系统偏北的空间误差,使得高概率落区更可能覆盖龙卷观测路径。最好成员 mem05 的诊断路径与龙卷观测路径的空间误差在 20~30 km 左右。CEFS_GIFS 整体预报也偏西北,与观测偏差较大;成员预报的路径离散度上,扰动初始边界条件及多物理参数组合预报下,得到的各成员诊断路径南北和东西方向差异明显且相当,南北向差异 1.2° 左右,东西向差异为 1.5° 左右。除 mem18 外,所有成员都分布在观测北侧,其中最

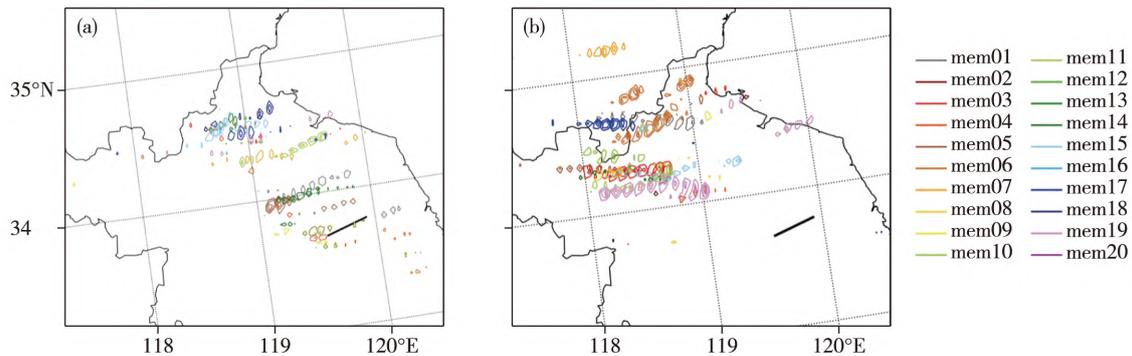


图5 (a) CEFS_ERA5 (b) CEFS_GEFS 集合预报 05:30—07:00 时段 10 min 间隔输出的不同集合成员的 UH25 叠加场 (阈值: $200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)。深灰色实线为龙卷观测路径

Fig.5 The UH25 superposition fields of different ensemble members output at 10 minute intervals from 0530 UTC to 0700 UTC of (a) CEFS_ERA5 and (b) CEFS_GEFS (threshold: $200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). The dark gray solid line is the tornado observation path

北的成员 mem07 位于山东省内,位置误差约 170 km 左右。最好成员 mem19 预报的龙卷路径接近观测,空间误差为 60 km 左右。总的来说,CEFS_ERA5 预报路径更接近观测,但由于 CEFS_ERA5 主要依靠不同物理方案配置产生位置预报差,预报路径的离散度相对较小;CEFS_GEFS 预报路径与观测偏差较大,预报路径的离散度相对较大。

4 概率预报及评估

4.1 基于邻域概率产品的预报结果

图 6 展示了基于 UH25 的集合 CEFS_ERA5 概率预报结果。分析了概率预报空间分布对 UH25 阈值的敏感性:当 UH25 阈值取 $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (图 6a),概率值集中在 0.5 以下,观测落在 0.1~0.3 区间,预报的高概率中心位于江苏和山东的交界处,与观测相比偏西北;当阈值增大到 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,只有少部分成员能满足此条件,对此次龙卷几乎没有预报能力 (图 6c)。龙卷是一个小概率事件,当处理集合输出中的小概率事件时,对于高分辨率集合预报的网格点,该点在多个成员中均有诊断量满足阈值条件的可能性很小,因此未取邻域时,概率值较低^[37]。为此,分析了邻域法对概率预报的影响,当邻域半径 $R_g=15$ 个格距,即 60 km,预报的龙卷发生概率值明显变大,此时高概率落区能更好地覆盖观测路径。小阈值取邻域后 (图 6b),龙卷观测路径落在 0.8~1 之间;大阈值取邻域后 (图 6d),龙卷观测路径落在 0.4~0.6 之间。CEFS_GEFS 预报的高概率中心位于江苏山东交界,与观测相比偏西北 (图 7a)。相比 CEFS_ERA,因为 CEFS_GEFS 预报的 UH25 高值区域位置偏差更大,观测落在了更小的概率区间 0~0.1。同样,当阈值增大到 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,CEFS_GEFS

对此次龙卷几乎无预报能力。CEFS_GEFS 取邻域后,对最低和最高阈值,观测路径分别落在 0.6~0.7 和 0~0.2 概率区间,比相同条件下的基于 CEFS_ERA5 预报的概率小。总的来说,邻域法显著提升了集合预报对此次龙卷的概率预报水平,但对关键参数取值较为敏感,接下来将进一步分析预报技巧对 UH25 阈值和邻域半径的敏感性。

4.2 概率预报评分对关键参数敏感性分析

在实际的评估中,概率预报评分技巧对邻域法关键参数包括阈值、邻域半径都比较敏感。本小节通过检验广泛使用的概率预报评分 AUC 对影响 UH 邻域概率预报的关键参数进行敏感性试验,确定给出最佳概率预报技能的参数值,为实际预报中 UH25 阈值及邻域大小的选取提供参考;此外结合可靠性图,检验邻域法对概率分布改进是否合理。

首先,分析了概率预报评分对不同 UH25 阈值的敏感性 (图 8)。ROC 曲线以下的面积 AUC 能够指征预报技巧:AUC=1,表明概率预报系统很完美;AUC=0.7 是表明概率预报系统有预报能力的下限;AUC<0.5 表明概率预报系统完全没有预报能力^[38]。不考虑邻域时,CEFS_ERA5 的 AUC 为 0.565,只有很弱的预报能力;CEFS_GEFS 的 AUC 刚好 0.5,几乎无预报能力 (图 8a)。考虑邻域后,两组试验 AUC 都明显增大,预报技巧提升 (图 8b)。

其次,分析取固定邻域半径 15 格点后,概率预报评分对阈值的敏感性。一般来说,阈值越小,满足发生龙卷判别条件的成员越多,预报的概率就越高。CEFS_ERA 预报的概率随阈值增大而减少,但 AUC 随着阈值的增加而增大,这是因为当邻域取 15 格点时,小阈值使得观测落在了一致的高概率区 (图 6b),随着阈值增大,观测频次分布和概率预报

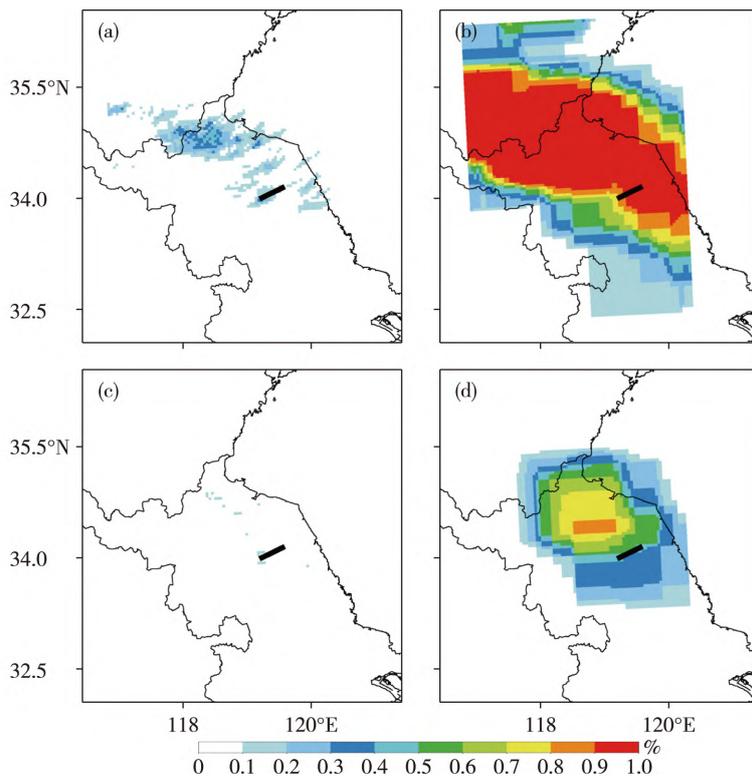


图6 CEFS_ERA5 (a,c) 不取邻域; (b,d) 取邻域半径为 15 个格点间距的概率预报: (a,b) 阈值 $UH_{25} = 50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; (c,d) 阈值 $UH_{25} = 250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。黑色实线为龙卷观测路径

Fig.6 CEFS_ERA5 probabilistic forecasting by (a c) not taking the neighborhood, (b d) taking 15 grid spacing as the neighborhood radius: (a b) threshold $UH_{25} = 50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; (c d) threshold $UH_{25} = 250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. The black solid line is the tornado observation path

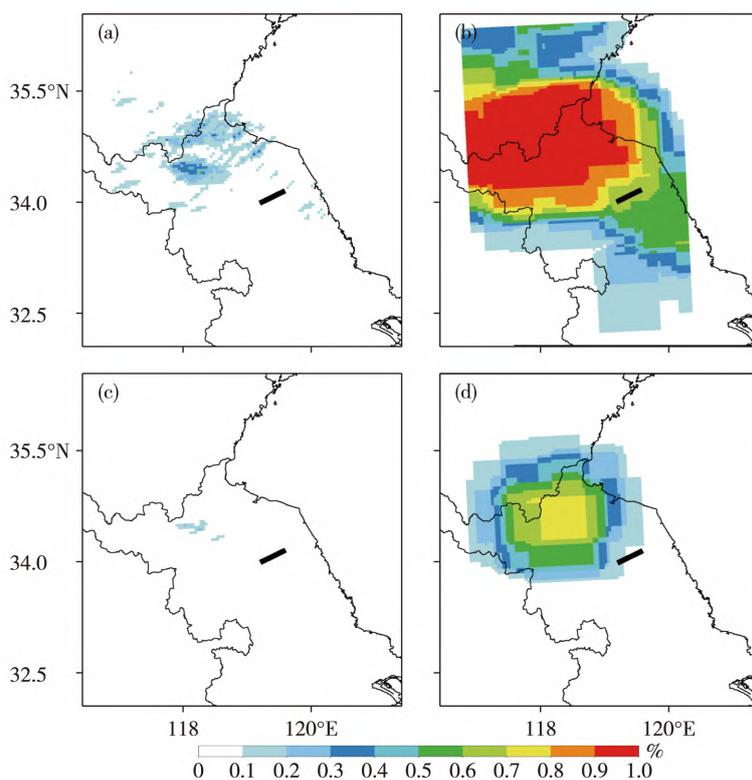


图7 同图6,但为 CEFS_GIFS

Fig.7 Same as in fig. 6, except for CEFS_GIFS

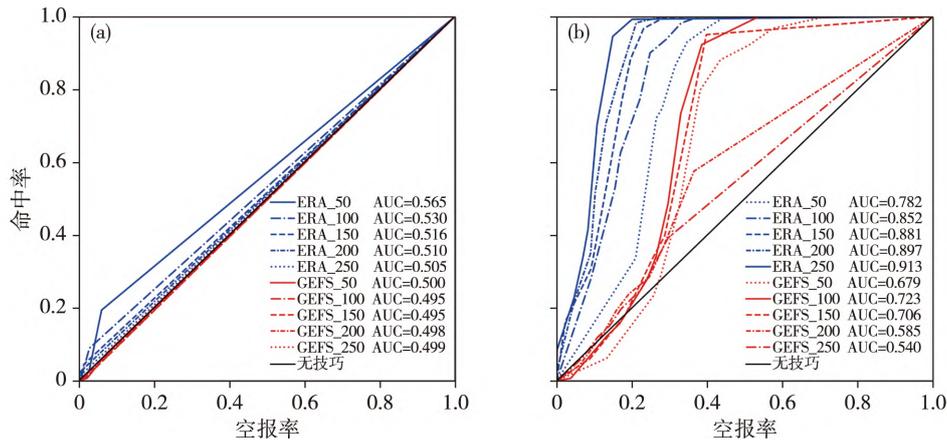


图 8 (a) 不取邻域和 (b) 邻域半径取 15 个格点间距 ,CEFS_ERA5 和 CEFS_GEFS 集合预报系统 UH25 取不同阈值 (阈值: 50、100、150、200、250 $m^2 \cdot s^{-2}$) ROC 曲线; 对应 AUC 在图注中给出

Fig.8 (a) Not take neighborhood and (b) take 15 grid spacing as neighborhood radius , the ROC curves with different UH25 thresholds (thresholds: 50 , 100 , 150 , 200 , 250 $m^2 \cdot s^{-2}$) for CEFS_ERA5 and CEFS_GEFS; The corresponding AUC is given in the legend

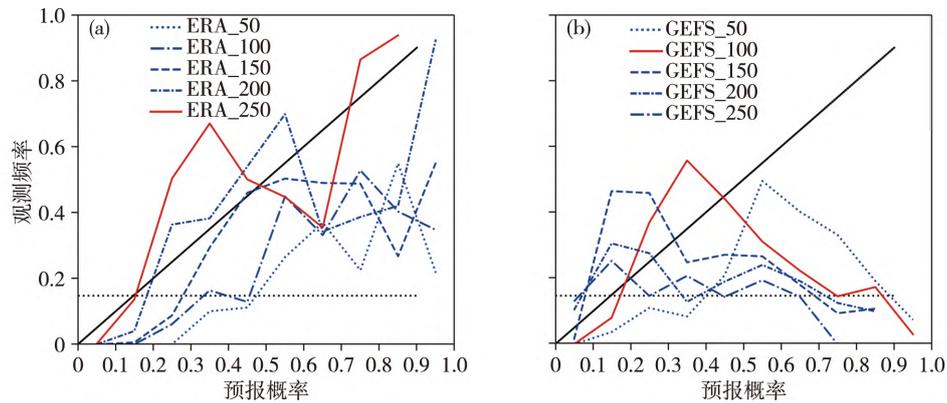


图 9 邻域半径为 15 个格点间距 (a) CEFS_ERA5 和 (b) CEFS_GEFS 取 UH25 阈值为 50、100、150、200 和 250 $m^2 \cdot s^{-2}$ 的可靠性曲线
Fig.9 Taking 15 grid spacing as neighborhood radius , the reliability curves of (a) CEFS_ERA5 and (b) CEFS_ GEFS with UH25 threshold of 50 , 100 , 150 , 200 and 250 $m^2 \cdot s^{-2}$

分布才逐步趋向一致(图 9);对 CEFS_ERA 试验, $UH25 = 250 m^2 \cdot s^{-2}$ 有最好的预报技巧。CEFS_GEFS 概率预报评分对 UH 阈值先增大后减少,当 $UH25 = 100 m^2 \cdot s^{-2}$ 有最好的预报技巧,同样,也是在观测频次分布和概率预报分布趋向一致时(图 9),评分最高。总体上,CEFS_GEFS 预报评分要低于 CEFS_ERA5,CEFS_ERA5 的不同阈值 ROC 曲线簇始终在 CEFS_GEFS 不同阈值 ROC 曲线簇的上方(图 8);当阈值使得观测和预报概率分布较为一致时,概率评分最优。

最后,基于前述两组试验的最优预报技巧 UH25 阈值,分析了概率预报评分对不同邻域半径的敏感性。图 10 显示,预报的龙卷发生概率随邻域半径增大而增大。在邻域半径为 9 个格点间距时,观测主要落在 CEFS_ERA5 预报的龙卷发生概率 0.3~0.4 区间,而 CEFS_GEFS 则对应 0.1~0.3 区间;邻域半径为 21 个格点间距时,观测主要落在

CEFS_ERA5 落在预报的龙卷发生概率 0.6~0.8 区间,CEFS_GEFS 则对应 0.4~0.8 区间,也即随着邻域半径增大,预报的龙卷发生高概率区更容易覆盖观测路径。然而,实际应用中,邻域半径并非越大越好,只有当观测频率和预报概率趋于一致时,预报结果才有较好的可靠性。Wilks^[35]指出当分布落在对角线下方时,预报的概率高估(overforecasting);反之,当分布落在对角线上方时,预报的概率低估(underforecasting)。对于 CEFS_ERA5,邻域半径为 9 个格点间距时,预报概率低估;为 21 个格点间距时,预报概率略高估;为 15 个格点间距时,可靠性曲线最接近对角线,即预报概率与观测频率最一致(图 11a)此时客观评分 AUC 也最大,达 0.913,相比之下 9 个和 21 个格点间距的 AUC 分别为 0.850 和 0.888。CEFS_GEFS 由于位置误差较大,整体上高概率区存在明显低估,结合 AUC,15 个格点邻域半径结果最优。

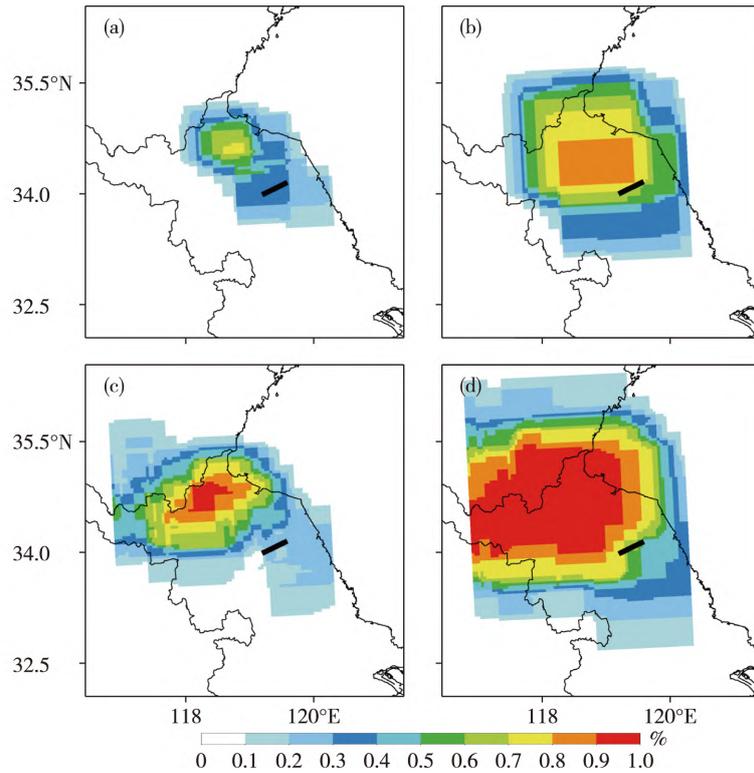


图 10 CEFS_ERA5 取 UH25 阈值为 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (a) 邻域半径为 9 个格点间距 (b) 邻域半径为 21 个格点间距的概率预报; CEFS_GEFS 取 UH25 阈值为 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (c) 邻域半径为 9 个格点间距 (d) 邻域半径为 21 个格点间距的概率预报。黑色实线为龙卷观测路径
 Fig.10 Taking (a) 9 grid spacing , (b) 21 grid spacing as the neighborhood radius , the probabilistic forecasting of CEFS_ERA5 with UH25 threshold of $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; taking (c) 9 grid spacing ,(d) 21 grid spacing as the neighborhood radius , the probabilistic forecasting of CEFS_GEFS with UH25 threshold of $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. The black solid line is the tornado observation path

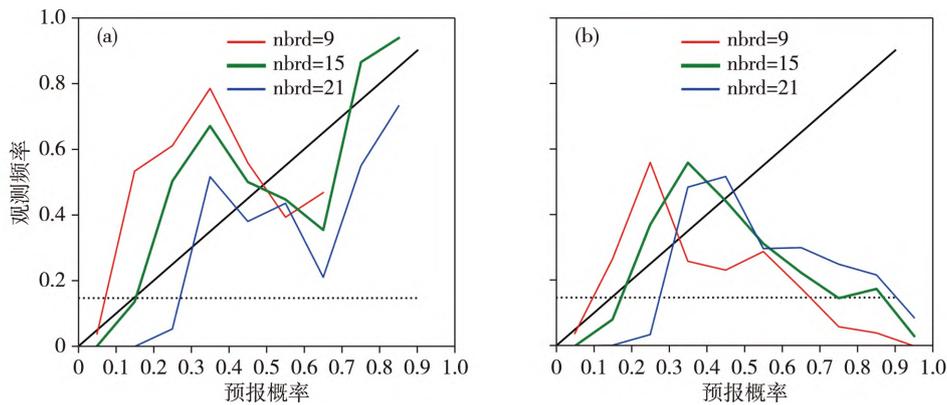


图 11 (a) CEFS_ERA5 取 UH25 阈值为 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; (b) CEFS_GEFS 取 UH25 阈值为 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 邻域半径为 9 ,15 21 个格点间距的概率预报

Fig.11 Taking neighborhood radius as 9 ,15 and 21 grid spacing ,the probabilistic forecasting of (a) CEFS_ERA5 with the UH25 threshold of $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ and (b) CEFS_GEFS with the UH25 threshold of $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

5 结论

利用 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷的观测 ,对 CEFS_ERA5 和 CEFS_GEFS 两组对流尺度集合预报试验的结果及概率预报结果进行了评估。主要结论如下:

(1) 两组对流尺度集合预报均有约半数以上成

员能够再现龙卷超级单体的特征 $2 \sim 5 \text{ km}$ 上升螺旋度(UH25) 对龙卷单体预报有较好的指示意义; 基于 $\text{UH25} = 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 预报的路径与观测龙卷路径走向基本一致 ,但存在较大的位置误差: CEFS_ERA5 预报的路径与观测路径较为接近 ,主要分布在观测南北两侧 ,多数偏北 ,各成员诊断路径南北方向差异比较明显 ,由于 CEFS_ERA5 主要依靠不

同物理方案配置产生位置预报差,预报路径的离散度相对较小。CEFS_GEFS 预报的路径基本都分布在观测的西北方向,预报路径偏差较大,各成员诊断路径南北和东西方向差异明显且相当,预报路径离散度相对较大。

(2) 考虑到位置预报偏差,提出了一种基于 UH25 的邻域龙卷概率预报产品。邻域法在满足一定 UH25 阈值设置条件下,一方面能有效提升预报概率值,另一方面,改进了预报的概率分布,使得龙卷观测落在预报概率相对较高的区域,该邻域方法显著提升了预报的龙卷发生概率,使得龙卷概率预报技巧能有很大的提升。

(3) 研究了龙卷概率预报评分技巧对邻域法关键参数邻域半径和 UH25 阈值的敏感性,增大邻域半径和减小 UH25 阈值都能显著提升预报的龙卷发生概率。测试了多组参数配置组合,针对阜宁龙卷,CEFS_ERA5 选择邻域半径为 15 个格点(60 km),阈值为 $250 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 最优,而 CEFS_GEFS 则选择邻域半径为 15 个格点,UH25 阈值为 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 结果最优,这是因为不同背景下预报的龙卷单体强度不同造成的。

本文对基于 UH 的龙卷概率预报产品的阈值和邻域参数进行了讨论,并得到有较好预报效果的参数组合,为研发针对我国龙卷预报的概率预报产品提供了重要参考,但考虑到目前只是针对一次强龙卷过程,相关最优参数配置并不一定适合所有强度龙卷,同时,也注意到不同集合系统预报的龙卷单体强度、位置等误差不尽相同,实际应用时需针对具体集合预报系统和更多个例样本进行优化。

参 考 文 献

- [1] MENG Zhiyong, BAI Lanqiang, ZHANG Murong, et al. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China. *Wea. Forecasting*, 2018, 33(3): 693-713.
- [2] XUE Ming, ZHAO Kun, WANG Mingjun, et al. Recent significant tornadoes in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [3] 郑永光,朱文剑,姚聘,等. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计. *气象*, 2016, 42(11): 1289-1303.
ZHENG Yongguang, ZHU Wenjian, YAODan, et al. Wind speed scales and Rating of the Intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing county, JiangsuProvince. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [4] 张小玲,杨波,朱文剑,等. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析. *气象*, 2016, 42(11): 1304-1314.
ZHANGXiaoling, YANGBo, ZHUWenjian, et al. AnalysisoftheEF4 tornado in Funingcounty, Jiangsu Province on 23 June 2016. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [5] 郑永光,朱文剑,田付友. 2015 年“东方之星”翻沉事件和 2016 年阜宁 EF4 级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. *气象科技进展*, 2018, 8(2): 44-54.
ZHANG Yongguang, ZHU Wenjian, TIAN Fuyou. Environmentalconditions, structures, and mechanisms of convectivestorms of 2015 “Oriental Star” capsizing event and 2016 Funing EF4 tornado. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2018, 8(2): 44-54.
- [6] 周海光. “6·23”江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究. *地球物理学报*, 2018, 61(9): 3617-3639.
ZHOU Haiguang. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in FuningCounty, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Geophysics(in Chinese)*, 2018, 61(9): 3617-3639.
- [7] SUNZhengqi, XUE Ming, ZHUKefeng, et al. Prediction of an EF4 supercell tornado in Funing, China: Resolution dependency of simulated tornadoes and their structures. *Atmos. Res.* 2019, 229: 175-189.
- [8] YAO Dan, XUE Haile, YINJinfang, et al. Investigation into the Formation, Structure, and Evolution of an EF4 tornado in East China using a high-resolution numerical simulation. *J. Meteor. Res.* 2018, 32(2): 157-171.
- [9] Doswell C A. Severe convective storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001:433-480.
- [10] Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, 2005, 20(4): 680-687.
- [11] Snook N, XUE Ming, Jung Y. Tornado-resolving ensemble and probabilistic predictions of the 20 May 2013 Newcastle-Moore EF5 tornado. *Mon. Wea. Rev.* 2019, 147(4): 1215-1235.
- [12] 姚聘. 龙卷预报预警体系建设—气象现代化的前沿挑战. *气象科技进展*, 2020, 10(6): 19-22.
YAO Dan. Construction of tornado forecast and early warning system: the frontier challenge of meteorological modernization. *Advances in Meteorological Science and Technology(in Chinese)*, 2020, 10(6): 19-22.
- [13] Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Wea. Forecasting*, 2008, 23(5): 931-952.
- [14] Clark A J, GAOJidong, Marsh P T, et al. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity. *Wea. Forecasting*, 2013, 28(2): 387-407.
- [15] Clark A J, Kain J S, Marsh P T, et al. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm applied to convection-allowing forecasts. *Wea. Forecasting*, 2012, 27(5): 1090-1113.
- [16] Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. Toward improved convection-allowing ensembles: model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. *Wea. Forecasting*, 2010, 25(1): 263-280.

- [17] Sobash R A , Kain J S , Bright D R , et al. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts. *Wea. Forecasting* 2011 , 26(5) : 714-728.
- [18] Sobash R A , Romine G S , Schwartz C S , et al. Explicit forecasts of low-level rotation from convection-allowing models for next-day tornado prediction. *Wea. Forecasting* 2016 , 31(5) : 1591-1614.
- [19] Sobash R A , Schwartz C S , Romine G S , et al. Severe weather prediction using storm surrogates from an ensemble forecasting system. *Wea. Forecasting* 2016 , 31(1) : 255-271.
- [20] KONG Fanyou , Droegemeier K K , Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: storm-scale experiments. *Mon. Wea. Rev.* 2007 , 135(3) : 759-782.
- [21] KONG Fanyou , Droegemeier K K , Hickmon N L. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part I: comparison of coarse-and fine-grid experiments. *Mon. Wea. Rev.* 2006 , 134(3) : 807-833.
- [22] Clark A J , Jirak I L , Dembek S R , et al. The Community Leveraged Unified Ensemble (CLUE) in the 2016 NOAA/ Hazardous Weather Testbed Spring Forecasting Experiment. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2018 , 99(7) : 1433-1448.
- [23] Kain J S , Dembek S R , Weiss S J , et al. Extracting unique information from high-resolution forecast models: monitoring selected fields and phenomena every time step. *Wea. Forecasting* , 2010 , 25(5) : 1536-1542.
- [24] Clark A J , Jirak I L , Gallo B T , et al. A real-time , simulated forecasting experiment for advancing the prediction of hazardous convective weather. *Bull. Am. Meteor. Soc.* , 2020 , 101(11) : E2022-E2024.
- [25] 王婧卓, 陈法敬, 陈静, 等. GRAPES 区域集合预报对 2019 年中国汛期降水预报评估. *大气科学* 2021 , 45(3) : 664-682.
WANG Jingzhuo , CHEN Fajing , CHEN Jing , et al. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)* , 2021 , 45(3) : 664-682.
- [26] 植江玲, 黄先香, 白兰强, 等. 2021 年中国龙卷活动及灾情特征. *气象科技进展* 2022 , 12(1) : 26-36.
ZHI Jiangling , HUANG Xianxiang , BAI Lanqiang , et al. Characteristics of tornado activity and disaster of China in 2021. *Advances in Meteorological Science and Technology(in Chinese)* , 2022 , 12(1) : 26-36.
- [27] ZHU Kefeng , XUE Ming. Evaluation of WRF-based convection-permitting multi-physics ensemble forecasts over China for an extreme rainfall event on 21 July 2012 in Beijing. *Adv. Atmos. Sci.* 2016 , 33(11) : 1240-1258.
- [28] XUE Ming , KONG Fanyou , Weber D , et al. CAPS realtime storm-scale ensemble and high-resolution forecasts as part of the NOAA Hazardous Weather Testbed 2007 spring experiment// Preprints , 22nd Conf. on Weather Analysis and Forecasting/18th. Conference on Numerical Weather Prediction Amer. Meteor. Soc. , Park City , UT , 2007.
- [29] KONG Fanyou , XUE Ming , Thomas K W , et al. Real-time storm-scale ensemble forecast experiment-Analysis of 2008 spring experiment data//Preprints , 24th Conf. on Severe Local Storm , Amer. Meteor. Soc. Savannah , 2008.
- [30] Done J , Davis C A , Weisman M. The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model. *Atmos. Sci. Lett.* , 2004 , 5(6) : 110-117.
- [31] ZHU Kefeng , ZHANGChenyue , XUE Ming , et al. Predictability and skill of convection-permitting ensemble forecast systems in predicting the record-breaking “21·7” extreme rainfall event in Henan province , China. *Sci. China Earth Sci.* , 2022 , doi: 10.1007/s11430-022-9961-7.
- [32] Gallo B T , Clark A J , Dembek S R. Forecasting tornadoes using convection-permitting ensembles. *Wea. Forecasting* 2016 , 31(1) : 273-295.
- [33] Hitchens N M , Brooks H E , Kay M P. Objective limits on forecasting skill of rare events. *Wea. Forecasting* , 2013 , 28(2) : 525-534.
- [34] Marzban C. The ROC curve and the area under it as performance measures. *Wea. Forecasting* 2004 , 19(6) : 1106-1114.
- [35] Wilks D S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 4th ed. Philadelphia: Elsevier , 2019: 369-483.
- [36] Potvin C K , Flora M L. Sensitivity of idealized supercell simulations to horizontal grid spacing: implications for warn-on-forecast. *Mon. Wea. Rev.* 2015 , 143(8) : 2998-3024.
- [37] Marsh P T , Kain J S , Weiss S J , et al. Investigating a fundamental component of a warn-on-forecast system in a collaborative real-time experiment // 19th Conference on Severe Local Storms , Minneapolis , Minnesota Denver , CO , 2010.
- [38] Buizza R , Hollingsworth A , Lalauette F , et al. Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF ensemble prediction system. *Wea. Forecasting* , 1999 , 14(2) : 168-189.