

曹艳察,郑永光,盛杰,等,2021. 基于 GRAPES_3 km 模式输出的风雹概率预报技术研究[J]. 气象,47(9):1047-1061. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, et al, 2021. Severe convective wind and hail probabilistic forecasting method based on outputs of GRAPES_3 km model[J]. Meteor Mon, 47(9):1047-1061(in Chinese).

基于 GRAPES_3 km 模式输出的风雹概率 预报技术研究^{*}

曹艳察 郑永光 盛 杰 唐文苑

国家气象中心,北京 100081

提 要: 基于我国自主研发的 GRAPES_3 km 高分辨率模式预报数据,通过计算逐时最大上升螺旋度(updraft helicity,UH)产品,发展了不同预报时效时段内超过指定阈值的 UH 格点概率预报技术。由于 UH 能够表征对流风暴的上升运动和中低层旋转强度,因此通过 UH 格点概率预报产品得到了综合表征对流性大风或冰雹(简称风雹)的概率预报指导产品。对 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日我国华北东北区域和华南区域两个风雹高发区的逐日试验和典型个例预报结果进行了细致评估,结果表明该产品具有良好的预报能力。该产品对华北东北区域和华南区域的风雹 TS 评分均明显高于主观预报,特别是对于华南区域可预报性较低的弱天气尺度强迫过程,能够显著降低漏报率从而明显提高预报准确率。预报产品还能够很好地指示对流风暴的形态分布和移动传播特征,概率落区与实况风雹的落区位置具有较好的匹配效果。对选取不同的 UH 阈值和空间高斯平滑系数的概率产品对比检验结果表明,基于较低 UH 阈值计算的概率预报产品由于漏报率更低,其 TS 评分要高于较高阈值的预报结果,高斯平滑系数取值 20 km 得到的概率产品在各等级概率评分中预报效果总体表现最佳。

关键词: GRAPES_3 km 模式,上升螺旋度,概率预报,预报评估

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.002

Severe Convective Wind and Hail Probabilistic Forecasting Method Based on Outputs of GRAPES_3 km Model

CAO Yancha ZHENG Yongguang SHENG Jie TANG Wenyuan

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the GRAPES_3 km model developed independently by China and calculating the hourly maximum updraft helicity (UH), we have developed the probabilistic forecast technology which exceeds a certain threshold of UH in different forecast time periods. Since the value of UH can represent the ascending motion and rotation intensity of convective storm, the UH probabilistic forecast product can be used as the probabilistic forecast guidance which characterizes severe convective wind and hail. We verified the probabilistic forecast products of daily tests and typical cases in North China, Northeast China and South China from 14 June to 31 July 2019, the results show that it has a good forecast performance. Compared to the subjective forecast, the threat score (TS) of the objective product for severe convective wind and hail is greatly increased in North China, Northeast China and South China, respectively. Especially for the weak large-scale forcing process in South China, the product can significantly reduce the missing alarm rate (MAR) and significantly increase the TS. In addition, the product can predict the shape distribution and

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506104,2018YFC1507504)和中国气象局数值预报(GRAPES)发展专项共同资助

2020 年 7 月 17 日收稿; 2021 年 4 月 23 日收修定稿

第一作者:曹艳察,主要从事强对流天气预报与研究. E-mail:caoych@cma.gov.cn

moving propagation characteristics of convective storm, and the region of probabilistic forecast is similar to the observation of severe convective wind and hail. We verified the probabilistic forecast products with different UH thresholds and spatial Gaussian smoothing parameters, the results show that the TS of the products calculated by lower UH threshold is higher than that of higher threshold due to lower MAR. The products with Gaussian smoothing parameter of 20 km have the best forecast performance.

Key words: GRAPES_3 km model, updraft helicity (UH), probabilistic forecast, forecast verification

引 言

强对流风暴通常会造成雷暴大风、冰雹、极端强降水等强对流天气,但由于其空间尺度小、发展演变快、突发性强等特点,给业务预报带来了很大的难度和挑战,因此,强对流风暴及其产生的分类强对流天气预报一直是数值预报的难点和重要研究方向之一。

近年来,随着高分辨率数值预报模式准确率和精细化程度的不断提高,其在强对流天气预报预警中发挥了越来越重要的作用(Kain et al, 2010; Sun et al, 2014; 漆梁波, 2015; 郑永光等, 2015b)。空间水平格距不超过 4 km 的“对流可分辨”模式(convection-allowing model, CAM)可以提供中尺度对流回波形态、系统环流等可用预报产品(Done et al, 2004),同时具有一定的区分中尺度对流系统模态的预报能力,如区分弓状回波或超级单体等(Kain et al, 2008),从而为该类产品造成的强对流天气预报提供较好的指导(Sobash et al, 2011)。因此,基于 CAM 输出的能更精细表征中尺度对流系统发生发展特征的动力、云微物理等环境特征的物理量参数,综合发展龙卷、冰雹、雷暴大风等强对流天气的预报成为高分辨率数值模式的主要应用方向(Clark et al, 2012b; 2013; Sun et al, 2014; 郑永光等, 2015a; 张小玲等, 2018)。

美国 NOAA 于 2008 年开展的灾害性天气测试平台春季试验中,基于 CAM 输出的集合预报产品,发现模式预报的中气旋、强烈低空风以及与线性或弓状回波结构相关的极大风等现象与实况监测的强对流密切相关(Coniglio et al, 2010; 郑永光等, 2015a),因此,很多与强对流天气系统结构、强度、演变相关的后处理产品被研发并应用于业务预报中,其中,应用发现逐时极值场对分析雷暴系统的演变十分有效。Kain et al(2008)研究表明,基于每一模

式积分时间步计算的每个格点上升螺旋度(updraft helicity, UH)来获得该格点的逐时最大 UH,该产品对超级单体系统预报具有很好的指示意义, Sobash et al(2011)进一步指出基于 UH 计算的强风暴概率预报场对雷暴大风、冰雹以及龙卷等强对流天气预报具有很好的指导意义。Carley et al(2011)结合模式预报反射率因子和 UH,从而识别出中气旋特征产品并应用于业务预报中,帮助预报员快速识别模式预报的不同强度中小尺度对流系统及其演变特征。Clark et al(2012a)基于 CAM 输出的逐时最大 UH,利用三维目标识别算法形成的路径识别产品与美国实际龙卷路径具有较高的相关性,特别对春季龙卷具有很好的预报能力。Flora et al(2019)利用不同层次积分的 UH,发展并形成了中尺度气旋短时概率预报指导产品,针对 2017—2018 年 63 个个例的对比检验结果表明预报效果良好。以上都是美国高分辨数值预报强对流天气的相关研究工作。

2016 年以来,我国国家级自主研发的 GRAPES_3 km 高分辨率数值模式已经在强对流天气预报预警中得到较为广泛的应用。已有较多科技人员相应开展了多种针对 GRAPES_3 km 模式的检验评估工作(唐文苑等, 2018; 刘静等, 2019; 张小雯等, 2020)。检验结果表明,GRAPES_3 km 模式对预报难度较大的高阈值、小尺度对流事件具备较好的预报能力(唐文苑等, 2018)。因此,借鉴美国强风暴预报技术发展思路,发展基于我国高分辨率数值模式的强对流天气预报释用技术,是提升强对流短时预报能力不可缺少的方面。

本文基于 GRAPES_3 km 模式预报计算的逐时最大 UH 预报场,进一步发展了不同 UH 阈值的概率预报技术和产品,并对该产品进行系统性评估分析,以进一步提升 GRAPES_3 km 模式预报的业务应用水平,从而为强对流业务短时和短期预报提供客观技术和产品支撑。

1 资料与方法

1.1 GRAPES_3 km 模式与资料

GRAPES_3 km 是由中国气象局数值预报中心开发运行的高分辨率数值模式,模式空间分辨率为 3 km,目前的覆盖范围为 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$,每日运行 4 次,起报时间分别为 02、08、14 和 20 时(北京时,下同)。

本文使用的预报资料为 GRAPES_3 km 模式 2019 年 6 月 13 日至 7 月 30 日 20 时起报 12~24 h 预报时效、覆盖我国中东部地区($18^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $103^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$)的 UH 预报产品。

1.2 UH 指数

本文所用的 UH 预报产品为逐时最大 UH 预报格点场产品。具体来说,针对每一个模式格点,首先根据 GRAPES_3 km 模式每一积分时间步(目前的积分时间步长为 10 s)的气象物理量计算 UH,然后统计获取逐整点时刻过去 1 h 内的 UH 最大值,这称为逐时最大 UH。

基于 Kain et al(2008)的 UH 计算方法,本文 UH 的计算公式为:

$$UH = \sum_{z=2}^5 \overline{w\zeta\Delta z} = (\overline{w\zeta_{2,3}} + \overline{w\zeta_{3,4}} + \overline{w\zeta_{4,5}}) \times 1000 \quad (1)$$

式中: w 为垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ζ 为垂直涡度(单位: s^{-1}); Δz 为每个计算层的间隔厚度,为 1 km;下标分别表示计算层的底部和顶部海拔高度,单位为 km,如 $\overline{w\zeta_{2,3}}$ 表示 2~3 km 计算层之间的平均涡度和平均垂直速度的乘积。在 UH 指数计算过程中,首先将高度信息插值到模式面进行计算,最终输出积分结果。

从式(1)中看出,UH 为 2~5 km 海拔高度之间的垂直速度和垂直涡度乘积的积分,因此,UH 大值区可以反映出模式预报中伴有上升运动的气旋性涡旋系统,即通常所说的中气旋或者中涡旋。由于这些中小尺度涡旋特征能够表征具有涡旋特征的对流风暴,而这些对流风暴(如超级单体)通常易于产生雷暴大风、大冰雹、龙卷等强对流天气,因此,虽然高

分辨率数值模式尚无法直接预报具体的强对流天气类型,但我们期望利用 GRAPES_3 km 模式预报的 UH,进一步获取风雹概率预报产品,从而为业务强对流天气短时和短期预报提供参考依据。

由于 UH 是通过反映高分辨率数值模式预报的中气旋或者中涡旋(由于中气旋是一类较强的中涡旋,因此以下都简称为中涡旋)信息,从而对伴有中小尺度涡旋特征的对流风暴产生的强对流天气具有预报能力,而通常该类对流风暴是在强的垂直风切变和强的不稳定能量条件下形成的(Weisman and Klemp,1982;Bunkers,2002),虽然其也会产生短时强降水天气,但产生的风雹天气更加显著,因此,检验风雹概率产品预报指标采用的实况数据,选取与预报产品时段相对应的 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日白天时段(08—20 时),包括全国基本基准站、一般天气站和自动站经雷暴观测数据质量控制过的 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 雷暴大风和冰雹地面站点观测数据(郑永光等,2013)。

需要说明的是,根据 2013 年 12 月 5 日中国气象局观测司相关规定,自 2014 年 1 月 1 日起,地面气象观测站取消雷暴等 13 种天气现象的人工观测以及冰雹天气的夜间观测,因此,文中用于质量控制雷暴大风的观测资料使用的是国家雷电监测定位网监测的地闪数据。

1.3 风雹概率预报技术

参考 Sobash et al(2011)的方法,针对 GRAPES_3 km 模式 20 时起报的 12~24 h 预报时效内,即次日 08—20 时逐小时最大 UH 格点预报场,通过设置一定的 UH 阈值标准,计算本段预报时效内至少有一个时次超过阈值标准的格点并赋值为 1,即代表模式预报的发生中涡旋(surrogate meso-vortice, SMV)的格点,反之格点概率赋值为 0,经过上述处理后,得到空间格距为 3 km 的概率值为“0”或“1”的格点场数据,从而获得了代表模式预报的 SMV 数据。

已有部分研究(Brooks et al,1998;Theis et al,2005)利用类似“邻域法”生成概率预报产品,该方法通过升尺度技术将高分辨率的预报调整到较低分辨率上,从而提高预报和观测的匹配能力。Brooks et al(1998)提出可利用二维高斯平滑算法得到任意

格点的概率值,即通过计算某一个格点周边一定有效半径内所有格点上的概率权重平均值,得到中心格点的概率值 f 。具体公式如下:

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

式中: N 表示周边格点的总个数, d_n 是从中心格点到标记第 n 个格点的距离, σ 为高斯核的标准偏差,这里代表空间平滑参数,即 x 和 y 方向上的有效半径取值,本文典型强对流过程评估中选取 $\sigma = 20$ km。进一步,为了测试其有效半径的敏感性,对整个预报评估期间, σ 分别采用了 10、20 和 40 km 的取值,并利用该高斯平滑方法计算 SMV 全部网格上的概率值,如前所述,由于对流风暴中的“中涡旋”与风雹天气密切相关,从而得到相应的风雹概率预报(surrogate severe probability forecast, SSPF)产品,然后对其评估检验。

1.4 概率预报检验方法

利用目前国家级强对流业务检验中所使用的“点对面”TS 评分的检验方法(唐文苑等, 2017), 分别对各个阈值标准计算的风雹概率预报产品, 按照 5% 间隔的概率值进行相应的落区预报评估, 其中评分站点如图 1 所示两个方框中的红色圆点。这些站点从全国范围内基准、基本和一般天气站在内的共 2410 个站点(均为中国气象局观测业务考核的站点)中所选取。按照唐文苑等(2017)的方法, “点对面”的评分半径取值为 40 km。

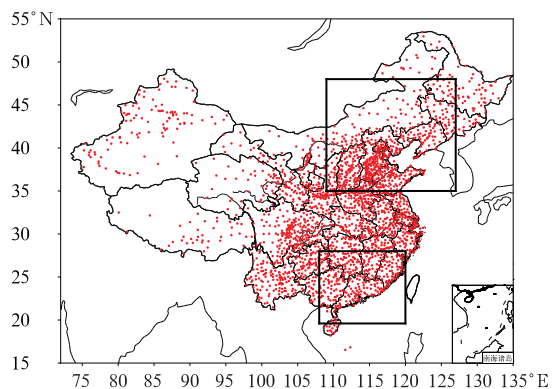


图 1 全国 2410 个评分站点(红色圆点)分布
(黑色方框表示我国中东部南北方两个风雹高发区)

Fig. 1 Distribution of 2410 stations (red dots) in China
(Black boxes show the high incidence regions of severe convective wind and hail in south and north of east-central China, respectively)

检验指标包括 TS 评分、空报率(false alarm rate, FAR)、漏报率(missing alarm rate, MAR)。计算方法如下:

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \quad (4)$$

$$MAR = \frac{NC}{NA + NC} \quad (5)$$

式中: NA 为预报正确的站(次)数, NB 为空报站(次)数, NC 为漏报站(次)数。

2 UH 阈值标准确定

2.1 评估期间风雹空间分布

对评估期间(2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日)我国雷暴大风和冰雹观测数据进行了统计分析, 考虑到 UH 的计算公式表明其不适合应用于高海拔地区, 因此针对我国中东部地区的风雹天气进行分析。统计结果表明(图 2), 评估期间我国中东部风

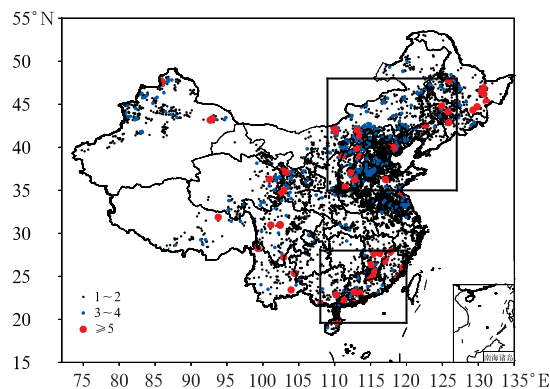


图 2 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日 08—20 时
全国 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 雷暴大风和冰雹实况
观测累积频次空间分布

(圆点表示风雹天气发生的频次, 黑色方框
表示我国中东部南北方两个风雹高发区)

Fig. 2 Spatial distribution of accumulated frequency
of severe convective wind and hail over China during
08:00—20:00 BT from 14 June to 31 July 2019
(Dots represent the cumulative frequency of severe
convective wind and hail, black boxes show the high
incidence regions of severe convective wind and hail in
north and south of east-central China, respectively)

雹天气高发区明显存在南北两个集中区域,其中北方风雹天气多发生在华北及东北地区,南方风雹天气主要多发于江南南部和华南地区。

通过统计和对比这期间全国 9 次区域性强对流天气过程(表 1)的主要影响区域和天气影响系统,发现华北及东北地区的风雹天气过程多与高空冷涡或西风槽系统相关,而江南华南等地的风雹天气则主要与副热带高压、切变线等天气系统有关,因此,考虑到模式对不同天气系统和环境条件下产生的强对流天气预报性能有所差别,下文中将分别针对南北两个风雹高发区的 UH 阈值标准进行统计分析。

其中,北方风雹高发区简称华北东北区域,统计范围为 $35.2^{\circ}\sim 48.1^{\circ}\text{N}$ 、 $109^{\circ}\sim 127^{\circ}\text{E}$,南方风雹高发区简称华南区域,统计范围为 $19.6^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 、 $108.1^{\circ}\sim 120.1^{\circ}\text{E}$ (图 2)。需要说明的是,评估期间华北东北区域雷暴大风共发生了 4150 站次,冰雹为 29 站次,而华南区域共发生雷暴大风 1805 站次,冰雹 10 站次。相对于雷暴大风站次数而言,冰雹明显偏少,主要是由于雷暴大风采用的是自动站观测数据,而冰雹目前只有国家站的人工观测,且由于冰雹局地性强,国家级观测站点捕捉到的概率较小,因此,冰雹观测样本数较少。

表 1 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日全国强对流过程纪要表

Table 1 Summary of severe convective processes in China from 14 June to 31 July 2019

序号	过程时段	影响区域	强对流类型	主要天气影响系统
1	6 月 15—18 日	华北北部	雷暴大风、冰雹为主 伴随短时强降水	冷涡、切变线
2	6 月 20—23 日	西南东部 江南华南	短时强降水为主 伴有雷暴大风	副热带高压、切变线、 倒槽低压
3	7 月 2—3 日	东北地区 华北地区	龙卷、雷暴大风为主 伴有短时强降水	冷涡、横槽、切变线
4	7 月 5—7 日	华北地区 黄淮江淮东部	雷暴大风、短时强降 水,伴有冰雹	横槽、切变线、低空急流、 地面气旋
5	7 月 18—19 日	西南东部 江南华南	短时强降水为主 伴有雷暴大风	西风槽、切变线
6	7 月 22—23 日	西南东部 华北黄淮 江汉江淮	短时强降水为主 伴有雷暴大风	西风槽、切变线、 低空急流
7	7 月 24—25 日	东北中南部 华北北部	雷暴大风、 短时强降水	冷涡、西风槽、高空急流、 切变线
8	7 月 24—25 日	黄淮江淮	短时强降水,伴有雷 暴大风	西风槽、副热带高压、 切变线
9	7 月 28—30 日	东北地区 华北黄淮 西南东部	短时强降水、 雷暴大风	冷涡、西风槽、副热带高压、 低空急流,地面冷锋

2.2 不同 UH 阈值选取

通过统计 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日期间 GRAPES_3 km 输出的我国南北两个风雹高发区内的 UH 累积频率分布的百分位数值确定 UH 的阈值标准,并对一定范围的阈值标准下输出的概率预报产品进行敏感性测试。

在长时间序列的 UH 频率分布中,选取第 99.90%~99.99%分位对应的 UH 值,其中华北东北区域对应的 UH 取值范围为 $29\sim 102\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,华南区域对应的范围为 $36\sim 80\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ (表 2)。总体来看,从第 99.97%分位开始,同一百分位数对应

的 UH 阈值,华北东北区域的 UH 阈值统计结果要大于华南区域,特别是第 99.99%分位以上的阈值,二者差异较大,这可能与华北东北区域受冷涡影响下动力条件更强有关。

3 典型强对流过程评估

考虑到不同区域、不同影响系统下强对流天气的可预报性不同,因此,分别基于华北东北区域和华南区域的相应 UH 阈值标准,在上述两个区域内,分别选取一次典型强对流过程进行检验和对比分析。

表 2 评估期间南北风雹高发区域统计得到的不同百分位数对应的 UH 阈值(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)Table 2 UH thresholds corresponding to different quantile obtained from the two high incidence regions of severe convective wind and hail in North and South China during the evaluation period (unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

不同区域	百分位数										
	99.90	99.91	99.92	99.93	99.94	99.95	99.96	99.97	99.98	99.99	99.995
华北东北区域	29	32	33	36	40	44	51	60	73	102	136
华南区域	36	38	40	42	45	48	52	58	66	80	96

3.1 2019 年 7 月 29 日华北黄淮风雹过程

2019 年 7 月 29 日,受高空冷涡东移及低层切变线共同影响,华北、黄淮地区处于“上干冷下暖湿”的热力不稳定层结环境中,高空槽引导干冷空气东移南下,侵入地面低压,与低层强盛的偏南暖湿气流交汇于华北南部、黄淮一带,造成山西中南部、河北中东部、河南北部、山东西部、辽宁南部等地自西向东出现了大范围的强降水、风雹天气过程,其中,山西南部、河北东部和南部、河南北部以及山东北部等多地出现 8 级以上雷暴大风,并伴有局地冰雹(图 3)。雷达回波监测显示,此次过程是由多条线状及弓形回波对流系统造成,其中,山东北部局地伴有超级单体发展。总体而言,此次过程是在冷涡背景下,一次强强迫抬升条件下触发的中尺度强风暴系统造成的大范围风雹天气过程。

基于 GRAPES_3 km 模式 28 日 20 时起报的 12~24 h 时效的 UH 预报数据,计算得到 29 日 08—20 时超过一定 UH 阈值的 SMV 和 SSPF 产

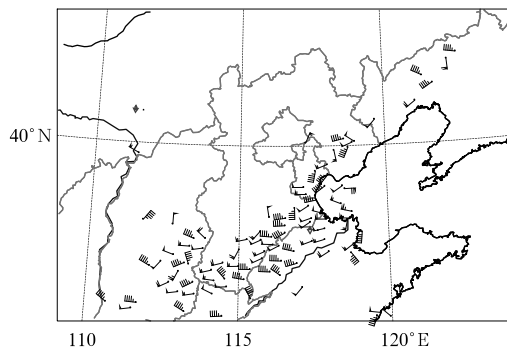


图 3 2019 年 7 月 29 日 08—20 时华北黄淮地区雷暴大风及冰雹实况观测

Fig. 3 Observation of severe convective wind and hail in North China and Huang-Huai Region from 08:00 BT to 20:00 BT 29 July 2019

品(图 4)。其中,SMV 产品结果表明,在该时段内,GRAPES_3 km 模式在山西中南部、河北中东部以及辽宁西南部、山东西部等地预测出多条呈“东北—西南”带状分布的对流单体风暴路径,特别是在河北中东部通过 SMV 产品中的“长条带状”特点显示出该地区模式预测会出现长生命周期的中气旋或中涡旋系统,而这些特点与本次过程中雷达回波实况体现的中尺度对流系统的位置和强度分布以及移动传播情况是相匹配的。

基于不同 UH 阈值计算得到的概率预报 SSPF 产品的高概率区域与实况风雹出现的位置匹配较好,相应地反映出在河北中东部、山东西部一直延伸至辽宁西南部的高概率落区预报范围。与最低 UH 阈值($29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)形成的概率预报产品相比,使用最高 UH 阈值($102 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)生成的概率预报产品落区范围更小,仅在本次过程对流最强区域,即河北中东部有所体现。

利用“点对面”TS 评分方法,对 29 日 08—20 时基于不同 UH 阈值标准产生的风雹天气概率预报产品进行检验,并与同一时段国家级预报员风雹落区预报检验评分结果进行对比分析。检验区域为选取的华北东北区域,即 $35.2^\circ \sim 48.1^\circ \text{N}$ 、 $109^\circ \sim 127.1^\circ \text{E}$,包含 625 个评分站点。检验结果表明(图 5),基于最低 UH 阈值($29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)计算得到的概率预报产品 10% 概率落区的预报 TS 评分最高,达 0.513,随着预报概率值的增大,TS 评分逐渐减小,MAR 明显增长,FAR 变化相对较小,如 20% 概率相较于 10% 概率落区预报 TS 评分从 0.513 减小至 0.441,FAR 仅从 0.31 减小至 0.28,而 MAR 却从 0.33 增长为 0.47,因此,更高概率落区预报 TS 评分较低主要是由于 MAR 的迅速增长。同样,其他 UH 阈值标准下形成的概率落区预报评分也具有类似的特点。

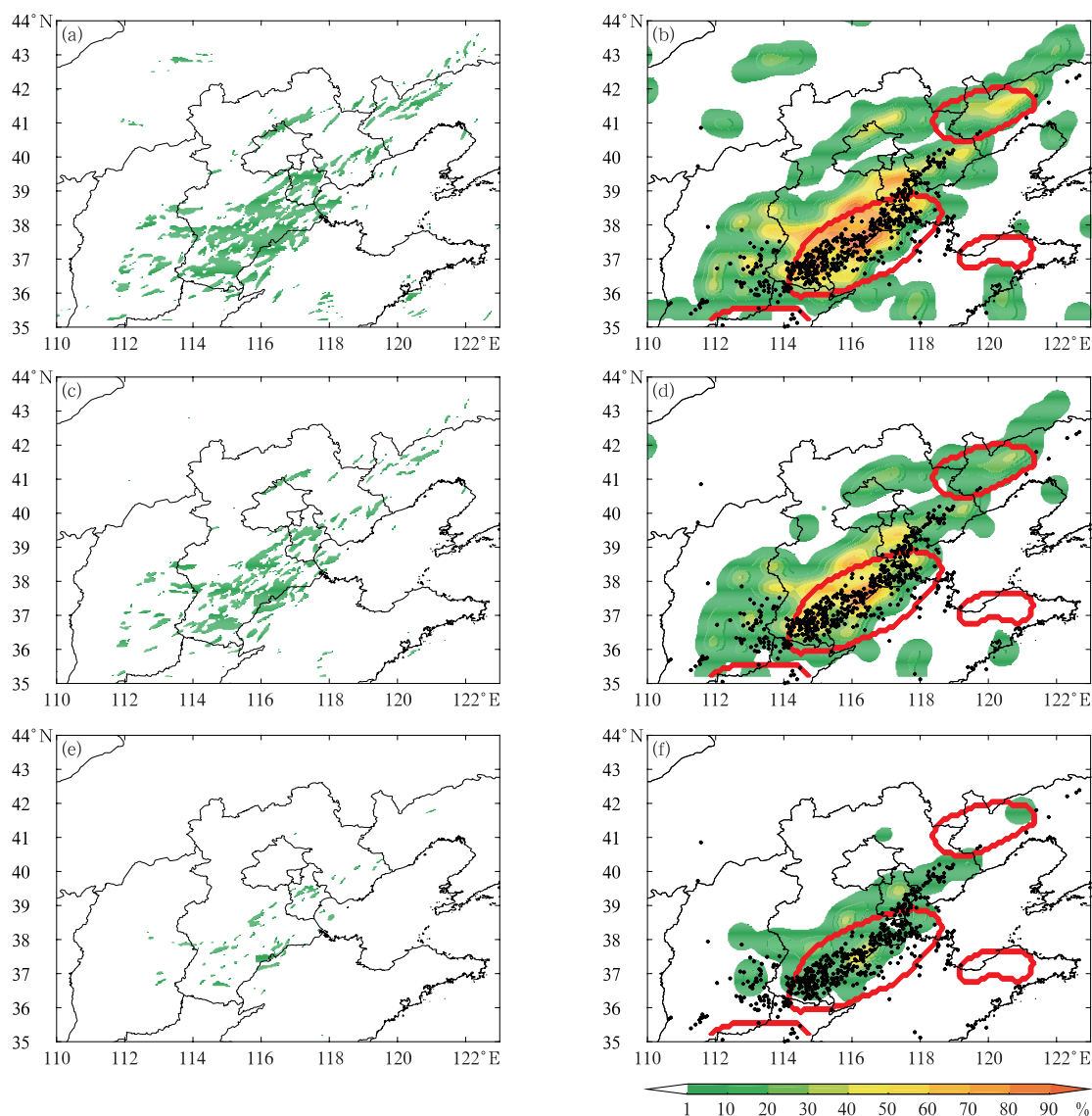


图4 2019年7月29日08—20时(a,c,e)超过一定UH阈值的SMV(阴影,值为1)和
(b,d,f)客观概率预报(阴影)、预报员落区预报(红色等值线)以及风雹实况站点分布(黑点)
(a,b) $UH \geq 29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (c,d) $UH \geq 44 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (e,f) $UH \geq 102 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 4 (a, c, e) SMV (shaded, value for 1) and (b, d, f) SSPF (shaded), forecasters' subjective forecasts (red contour) and observation of severe convective wind and hail (black dots) from 08:00 BT to 20:00 BT 29 July 2019 for the different UH thresholds
(a, b) $UH \geq 29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (c, d) $UH \geq 44 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (e, f) $UH \geq 102 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

本次过程同一时段预报员落区预报 TS 评分为 0.368,说明对于大尺度强强迫背景下触发的系统性大范围风雹天气业务可预报性较强,预报员可以通过对环境场物理量的诊断分析,结合自身预报经验给出准确率较高的预报,但即便如此,客观概率预报相对主观预报仍然具有更低的漏报率和更高的 TS 评分,因此,基于高分辨数值模式开发的 UH 概率预报产品在风雹天气预报中具有业务支撑能力。

3.2 2019年6月23日华南强对流过程

2019年6月23日白天,华南地区处于副热带高压边缘的高温高湿环境中,整层可降水量普遍达 60 mm 以上,K 指数超过 36℃。受低层切变线系统影响,在广西、广东等地触发多条“东北—西南”向分布的线状对流系统,并逐步向偏东方向发展加强为多条飑线系统,造成广西中南部、广东大部等地自西

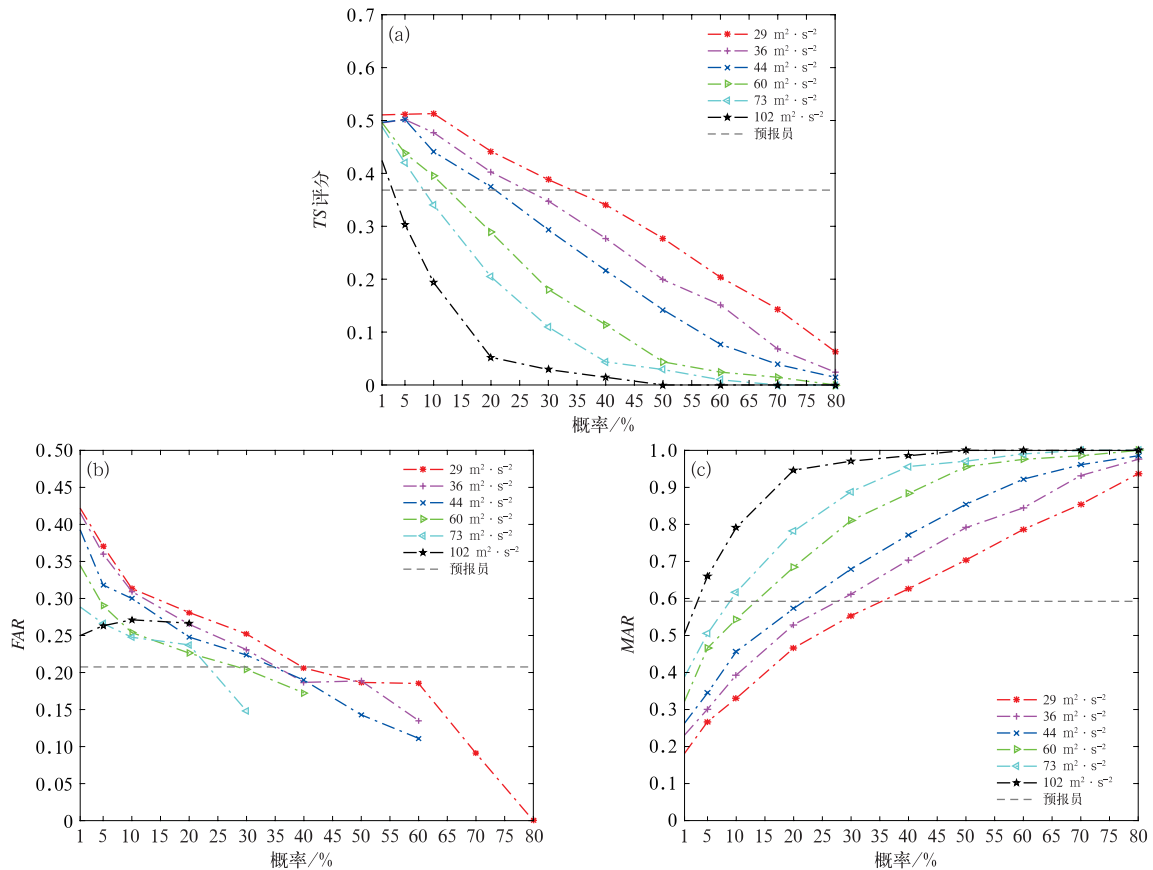


图 5 2019 年 7 月 29 日 08—20 时不同 UH 阈值标准下概率预报产品和主观预报的(a)TS 评分、(b)FAR、(c)MAR 结果对比

Fig. 5 Comparison of (a) TS, (b) FAR and (c) MAR of forecasters' subjective forecasts and objective probabilistic forecasts with the different UH thresholds from 08:00 BT to 20:00 BT 29 July 2019

向东出现大范围短时强降水、伴随雷暴大风的强对流过程(图 6)。雷暴大风天气主要集中在广西东南部至广东地区。与 7 月 29 日北方区域的强对流过程相比,此次过程的大尺度动力强迫抬升条件相对较弱,水汽和热力条件更加显著。

同样利用 GRAPES_3 km 模式 22 日 20 时起报的 12~24 h 时效的 UH 指数预报数据,计算得到 23 日 08—20 时超过一定 UH 阈值的 SMV 和 SSPF 产品(图 7)。其中,SMV 产品结果表明,该时段内,GRAPES_3 km 模式在广西中东部、广东北部等地预测出多条呈“东西”或“东北—西南”带状分布的对流单体风暴路径,通过与雷达回波实况对比发现,这些特点与该时段中尺度对流风暴系统的位置和移动方向匹配较好。而相应的概率预报 SSPF 产品的高概率区域与实况风雹出现的位置具有较好的一致性,同样在广西东部偏南区域至广东西部和

北部预报出高概率。同时,与 7 月 29 日华北黄淮过

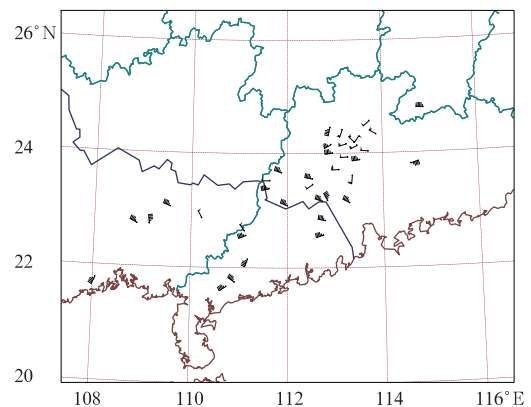


图 6 2019 年 6 月 23 日 08—20 时华南地区雷暴大风及冰雹实况观测

Fig. 6 Observation of severe convective wind and hail in South China from 08:00 BT to 20:00 BT 23 June 2019

程相一致的是,使用最高 UH 阈值($80 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)生成的概率预报产品落区范围更小,但其对对流发展最强,雷暴大风等级最高的广东北部及广西东南部地区具有一定的指示意义,因此,模式预报的较高等级的 UH 值可能预示风暴系统发展越强,产生的风雹天气越剧烈。

针对选取的华南区域范围,即 $19.6^\circ \sim 28^\circ \text{N}$ 、 $108.1^\circ \sim 120.1^\circ \text{E}$ (包含 425 个评分站点),通过检验 23 日 08—20 时基于不同 UH 阈值标准产生的概率预报产品,结果发现与 7 月 29 日北方区域过程的评分结果不同的是,本次过程并非基于最低 UH 阈值

($36 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)的概率预报产品 TS 评分最高,而是基于 $42 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 计算得到的概率预报产品 5% 概率落区的预报 TS 评分最高,达 0.30(图 8a)。此外,对于同一 UH 阈值形成的概率落区预报产品,随着概率值的增加,空报率一般表现为先降低再升高,漏报率则表现为单调增加。因此对于高概率落区预报,会由于空报率和漏报率的同时增长,使得其 TS 评分快速减小。

由于本次过程发生在副热带高压边缘高湿高能区域中,整体大尺度强迫抬升条件较弱,属于由湿下击暴流系统导致的伴随强降水的雷暴大风天气,此

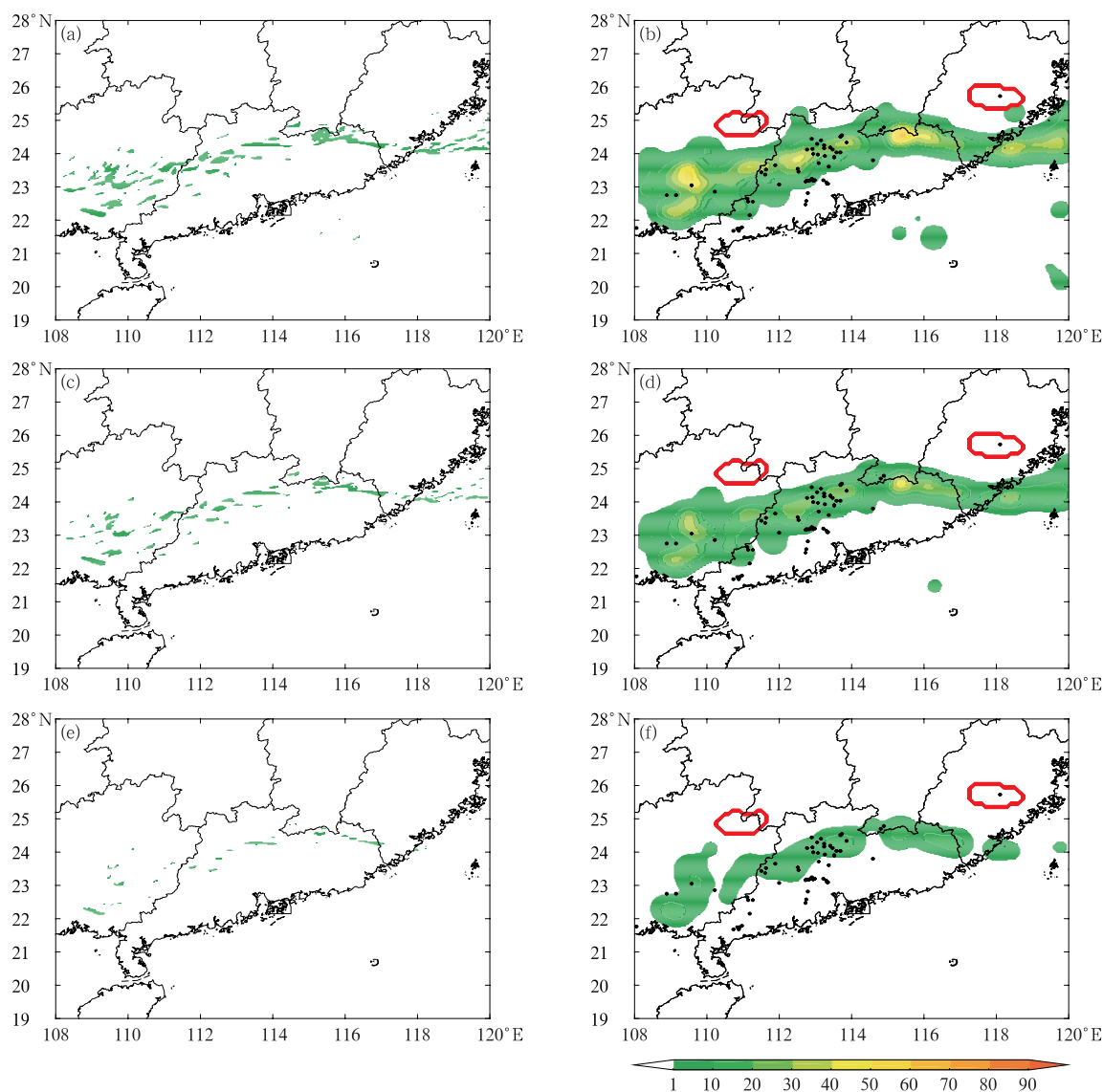


图7 同图4,但为2019年6月23日,不同UH阈值

(a,b) $UH \geq 36 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (c,d) $UH \geq 48 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (e,f) $UH \geq 80 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for 23 June 2019 with the different UH thresholds

(a, b) $UH \geq 36 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (c, d) $UH \geq 48 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, (e, f) $UH \geq 80 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

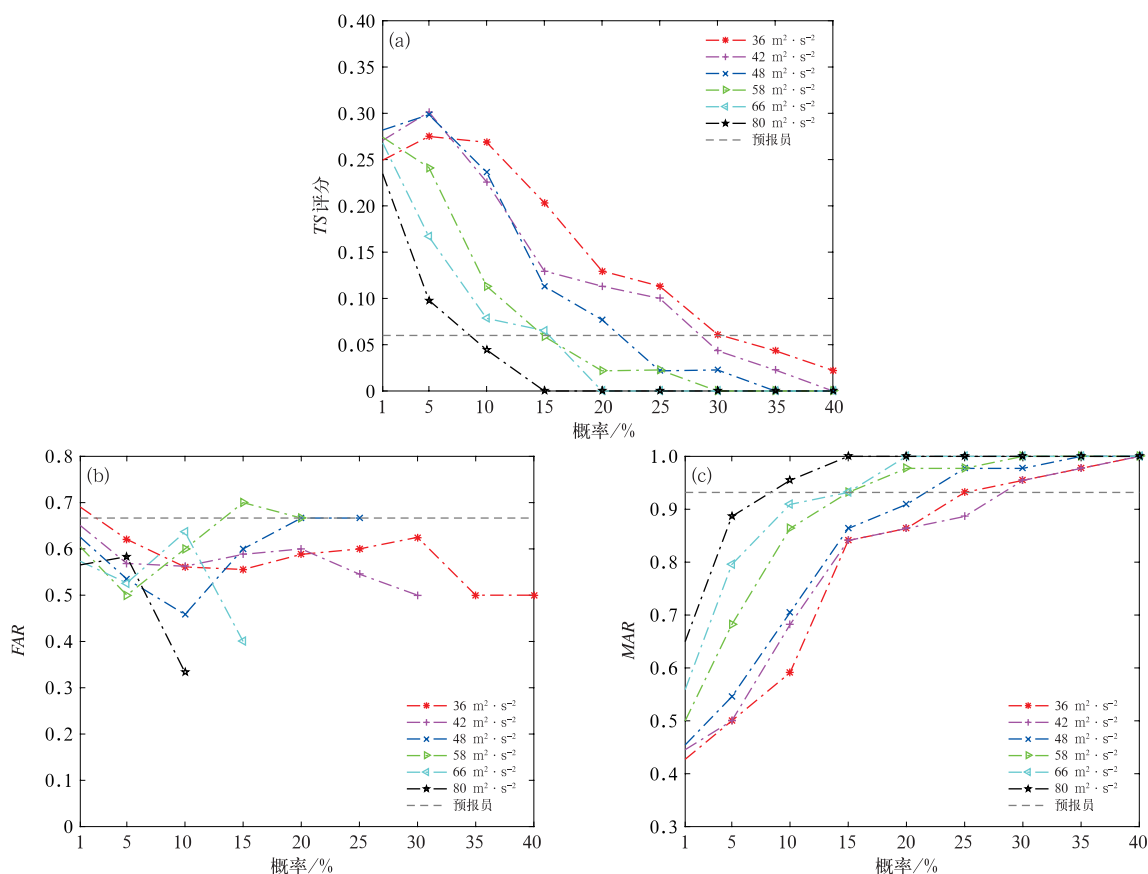


图 8 同图 5, 但为 2019 年 6 月 23 日

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for 23 June 2019

类天气与对流云中的大水滴拖曳和中层干空气的卷夹、蒸发冷却过程有关,对于落区位置和强度的预报具有较大挑战性,因此,对于本次过程,雷暴大风和冰雹天气预报员落区预报的 FAR 和 MAR 都分别达到 0.67 和 0.93, TS 评分仅为 0.06, 预报效果并不理想。尽管本次过程天气尺度强迫较弱,但具备有利的水汽和能量条件,仍在某些中尺度过程的驱动和对流系统自身的反馈下,形成了伴随中涡旋的飑线系统,因此,基于 UH 指数开发的风雹概率预报产品对这类过程的风雹天气也具有较好的指示意义,且相对于主观预报表现出更加明显的优越性,主要是通过大大降低漏报率使得其 TS 评分结果相对于主观预报得到大大提高。由此可见,特别是对于可预报性较低的强对流天气过程,通过上述方法得到的客观概率预报产品在风雹天气预报中具有很好的业务指导意义。

4 统计检验评估

研究表明(Sobash et al, 2011),不同的空间高

斯平滑系数 σ 取值也会对概率预报产品的预报效果产生一定影响。总体而言,空间平滑系数 σ 取值较低时,形成的概率预报产品落区范围相对较小,可能导致相对实况存在一定的面积低估或者位置偏差,而随着 σ 取值的增大,会导致形成的概率预报产品落区面积扩大,但中心高概率值减小的问题。因此,选取的空间高斯平滑系数和 UH 阈值是否合适,对概率预报产品的预报效果优劣具有决定性作用。

为了同时评估测试不同空间高斯平滑系数 σ 和 UH 阈值标准对概率预报产品的影响,基于试验期间,即 6 月 14 日至 7 月 31 日 08—20 时模式预报生成的 SMV, 高斯平滑系数 σ 分别采用 10、20 和 40 km 的变化取值,计算输出各阈值标准下的概率预报产品并对其进行检验评分和对比分析。

主客观落区预报产品检验结果显示(图 9),无论是华北东北区域还是华南区域,使用该方法得到的客观概率预报产品其 TS 评分均在预报员落区预报基础上有所提升,与典型个例检验结果类似,对于华南区域的风雹天气,客观预报产品的预报效果在主观预报基础上提升的幅度更加明显。

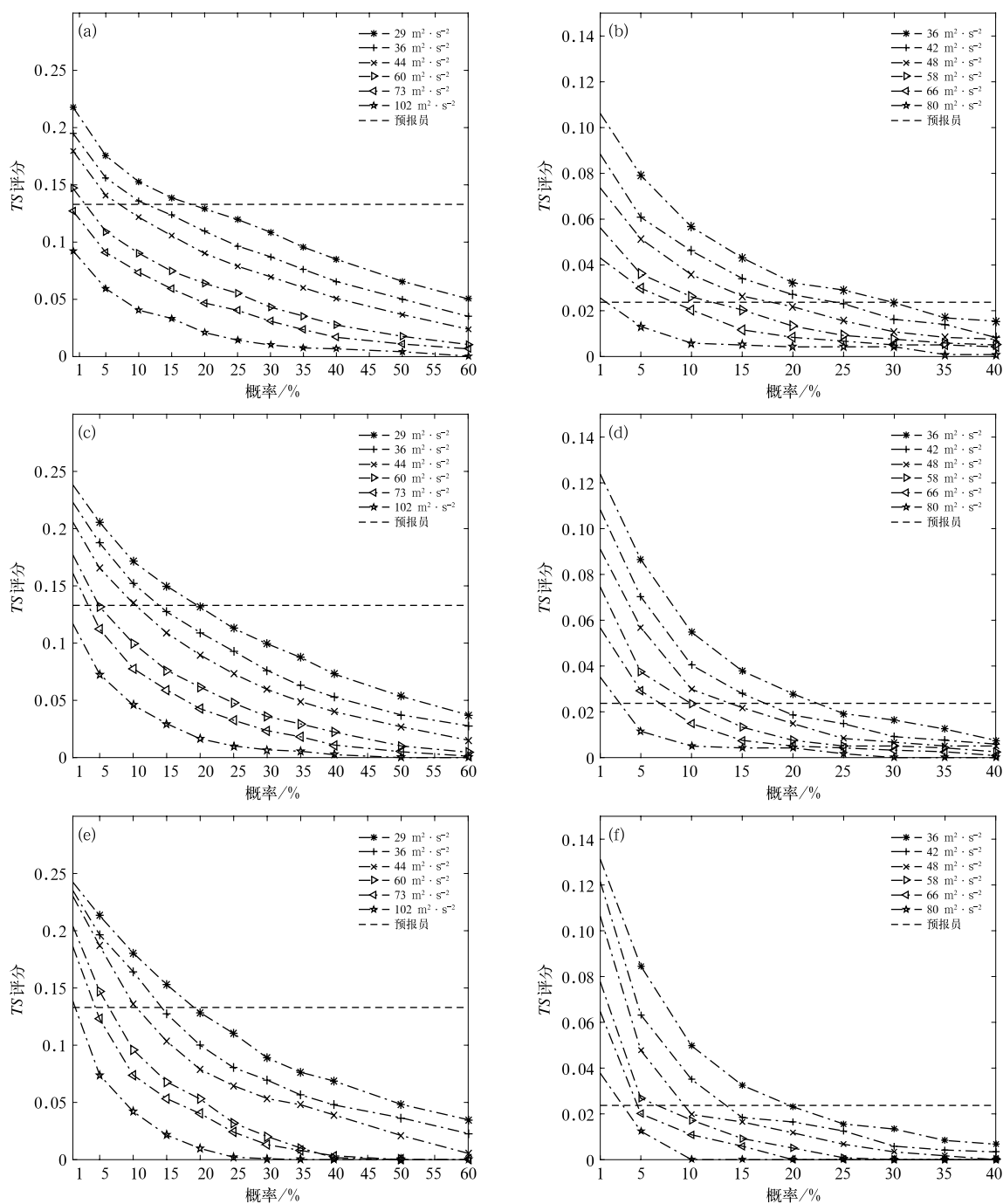


图9 2019年6月14日至7月31日08—20时(a,c,e)华北东北区域,(b,d,f)华南区域

各 UH 阈值标准和 Gaussian 平滑系数下概率预报产品的 TS 评分结果

(a,b) $\sigma=10$ km,(c,d) $\sigma=20$ km,(e,f) $\sigma=40$ km

Fig. 9 TS of forecasters' subjective forecasts and objective probabilistic forecasts corresponding to different UH thresholds and Gaussian smoothing parameters for (a, c, e) North China, Northeast China and (b, d, f) South China during 08:00—20:00 BT from 14 June to 31 July 2019

(a, b) $\sigma=10$ km, (c, d) $\sigma=20$ km, (e, f) $\sigma=40$ km

不同阈值和不同概率的客观预报产品检验结果表明,基于较低 UH 阈值计算的概率预报产品 TS

评分要高于较高阈值的预报结果,且随着概率值的增加,TS 评分会逐渐下降。通过对比 FAR(图 10)

和 MAR(图 11)的检验结果得出,基于较低阈值计算的概率预报产品的 FAR 要略高于较高阈值的预报结果,但 MAR 前者会明显低于后者,且对于 20% 以下的低概率值尤为显著。因此,基于较低阈值获得的低概率对应的落区预报 TS 评分较高,主要与其 MAR 相对更低有关(图 11)。总体来看,华北东北区域基于 $29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的 UH 阈值、华南区域

基于 $36 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的 UH 阈值获得的概率预报产品最低概率值(1%)对应的落区预报 TS 评分最高。

针对不同平滑系数取值下得到的概率预报产品评分结果显示,随着平滑系数 σ 的增大,相同阈值标准下产生的概率预报产品的最高 TS 评分会有所增加,但相对而言,当 σ 由 10 km 扩大为 20 km 时,TS 评分的增长更加明显,主要与 MAR 明显减小有关

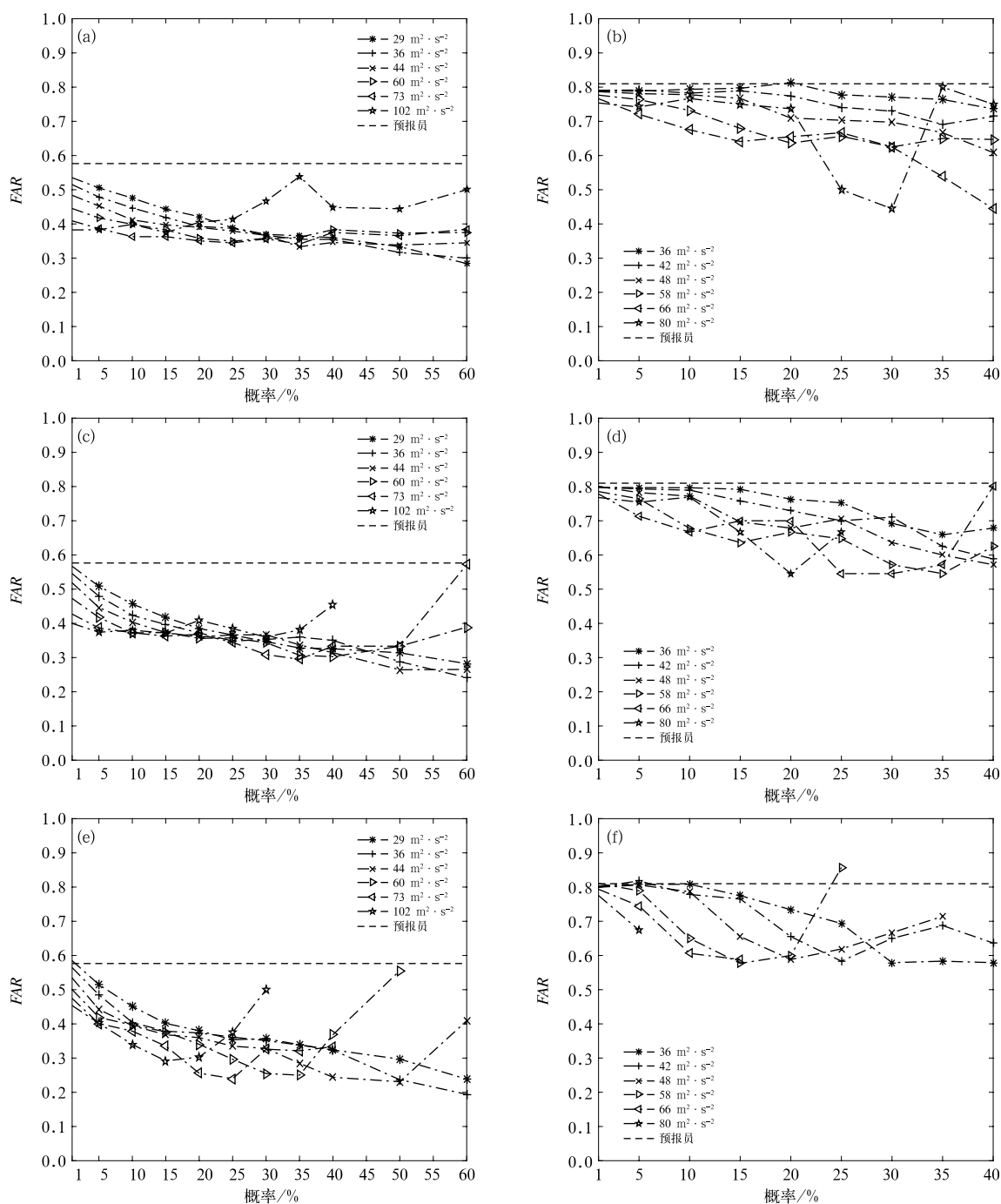


图 10 同图 9, 但为 FAR

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for FAR

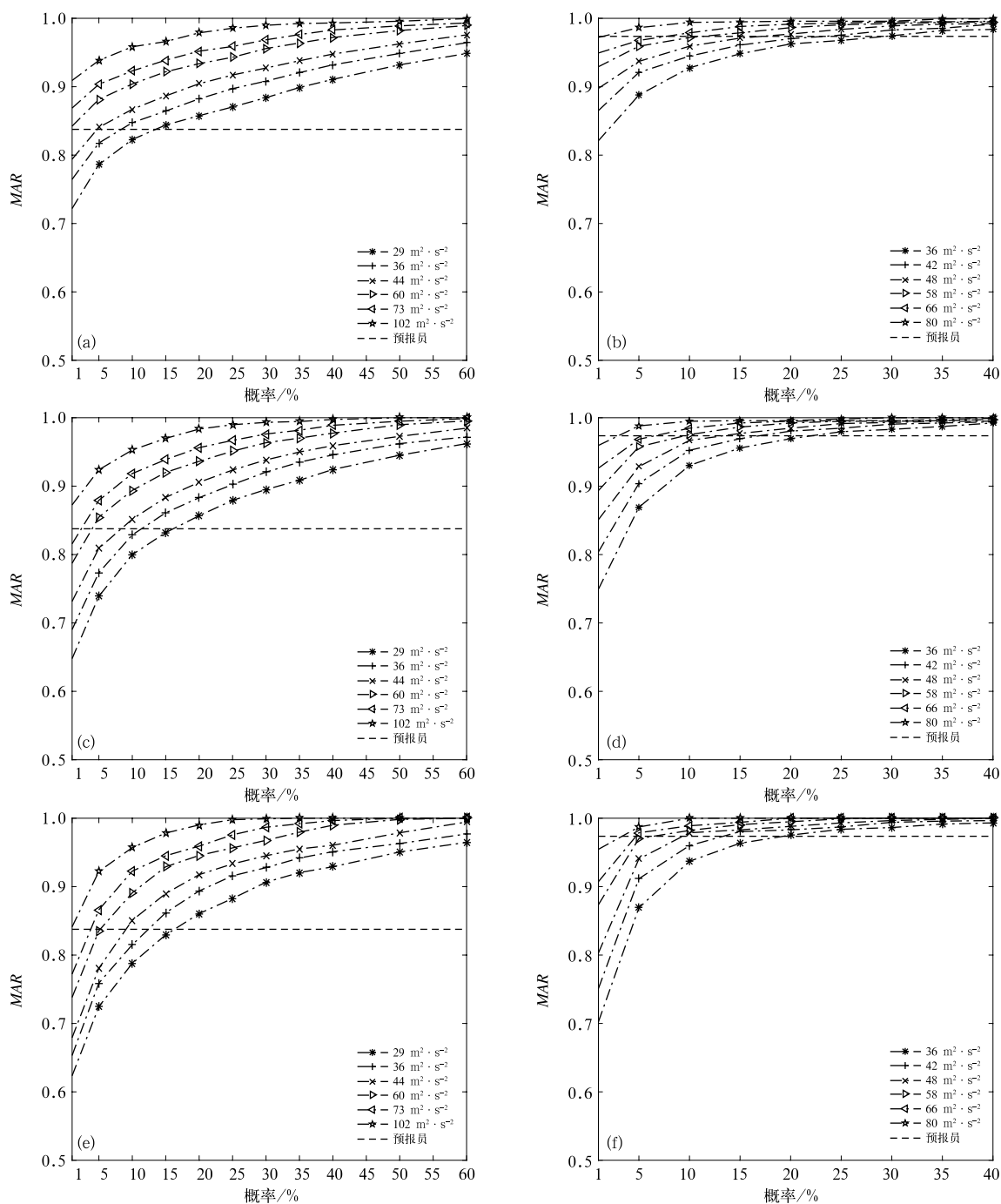


图 11 同图 9, 但为 MAR

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for MAR

(图 11), 而当 σ 由 20 km 扩大到 40 km 时, 其低概率值对应的 TS 评分结果变化不大, 且高概率值对应的 FAR 和 MAR 会出现同时增加的现象 (图 10、图 11), 从而导致评分结果反而有所下降。因此, 从评分结果综合判断, 平滑系数 σ 取值 20 km 得到的概率产品预报效果最佳。

5 结论与讨论

本文基于 GRAPES_3 km 高分辨率数值模式输出的逐小时最大 UH 格点预报结果, 通过计算并累积一段预报时效内超过一定阈值标准的 UH 格

点概率预报场,作为代表模式预报的风雹概率指导产品。利用该方法,重点针对 2019 年 6 月 14 日至 7 月 31 日我国北方和南方两个风雹高发区域进行 UH 阈值统计并计算输出每日 08—20 时的概率指导产品,进一步结合风雹实况对逐日和典型个例的预报结果进行检验评估分析,得出以下结论:

(1)典型个例应用及检验结果显示,该方法获得的强风暴指导产品可以很好地指示对流风暴的形态分布和移动传播特征,概率预报产品的高概率区与实况风雹的落区位置也具有较好的匹配效果。无论是对于华北东北区域强强迫过程,还是华南区域弱强迫过程,概率预报产品的 TS 评分都明显高于预报员落区预报,特别是对于可预报性较低的弱强迫过程,客观预报能够通过大大降低漏报率使得评分提高幅度更加明显。

(2)对于第 99.90%~99.95%各分位数对应的 UH 阈值,华北东北区域和华南区域差异不大,但随着分位数的提高,华北东北区域对应的 UH 阈值要明显大于华南区域,这可能与华北东北区域多受冷涡系统影响,动力条件更强有关。

(3)试验期间基于不同 UH 阈值和高斯平滑系数得到的概率预报产品对比检验结果表明,基于较低 UH 阈值计算的概率预报产品 TS 评分要高于较高阈值的预报结果,总体来看,华北东北区域基于 $29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的 UH 阈值、华南区域基于 $36 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的 UH 阈值获得的概率预报产品最低概率值(1%)对应的落区预报 TS 评分最高,高斯平滑系数 σ 取值 20 km 得到的概率产品预报效果最佳。

需要指出的是,本文中基于 UH 指数的风雹概率预报技术仅适用于“对流可分辨”模式预报,而对于网格距不低于 10 km 的模式预报,由于其无法分辨出中尺度对流系统的运动特征,该方法将难以适用;而对于网格距不超过 1 km 的模式预报,可能由于其反映的中小尺度系统运动特征不同,也应当对该方法进行相应调整。

参考文献

刘静,才奎志,谭政华,2019. 高分辨率模式雷达回波预报能力分析[J]. 气象,45(12):1710-1717. Liu J, Cai K Z, Tan Z H, 2019. Analysis of radar echo forecasting capability of different high-resolution models[J]. Meteor Mon, 45(12):1710-1717 (in Chinese).

漆梁波,2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. 气象,41(6):661-673. Qi L B, 2015. Operational progress

of high-resolution numerical model on severe convective weather warning[J]. Meteor Mon, 41(6):661-673 (in Chinese).

唐文苑,郑永光,张小雯,2018. 基于 FSS 的高分辨率模式华北对流预报能力评估[J]. 应用气象学报,29(5):513-523. Tang W Y, Zheng Y G, Zhang X W, 2018. FSS-based evaluation on convective weather forecasts in North China from high resolution models[J]. J Appl Meteor Sci, 29(5):513-523 (in Chinese).

唐文苑,周庆亮,刘鑫华,等,2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析[J]. 气象,43(1):67-76. Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al, 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecasts[J]. Meteor Mon, 43(1):67-76 (in Chinese).

张小玲,杨波,盛杰,等,2018. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展,8(3):8-18. Zhang X L, Yang B, Sheng J, et al, 2018. Development of operations on forecasting severe convective weather in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(3):8-18 (in Chinese).

张小雯,唐文苑,郑永光,等,2020. GRAPES_3 km 数值模式对流风暴雨预报能力的多方法综合评估[J]. 气象,46(3):367-380. Zhang X W, Tang W Y, Zheng Y G, et al, 2020. Comprehensive evaluations of GRAPES_3 km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods[J]. Meteor Mon, 46(3):367-380 (in Chinese).

郑永光,林静隐,朱文剑,等,2013. 强对流天气综合监测业务系统建设[J]. 气象,39(2):234-240. Zheng Y G, Lin Y J, Zhu W J, et al, 2013. Operational system of severe convective weather comprehensive monitoring[J]. Meteor Mon, 39(2):234-240 (in Chinese).

郑永光,薛明,陶祖钰,2015a. 美国 NOAA 试验平台和春季预报试验概要[J]. 气象,41(5):598-612. Zheng Y G, Xue M, Tao Z Y, 2015a. An overview of NOAA testbeds and spring experiment in the United States[J]. Meteor Mon, 41(5):598-612 (in Chinese).

郑永光,周康辉,盛杰,等,2015b. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,26(6):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015b. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6):641-657 (in Chinese).

Brooks H E, Kay M, Hart J A, 1998. Objective limits on forecasting skill of rare events [C] // 19th Conference on Severe Local Storms. Minneapolis: American Meteor Society: 552-555.

Bunkers M J, 2002. Vertical wind shear associated with left-moving supercells[J]. Wea Forecasting, 17(4):845-855.

Carley J R, Schwedler B R, Baldwin M E, et al, 2011. A proposed model-based methodology for feature-specific prediction for high-impact weather[J]. Wea Forecasting, 26(2):243-249.

Clark A J, Gao J D, Marsh P T, et al, 2013. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity[J]. Wea Forecasting, 28(2):387-407.

Clark A J, Kain J S, Marsh P T, et al, 2012a. Forecasting tornado pathlengths using a three-dimensional object identification algorithm

- applied to convection-allowing forecasts[J]. *Wea Forecasting*, 27(5):1090-1113.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al, 2012b. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(1):55-74.
- Coniglio M C, Elmore K L, Kain J S, et al, 2010. Evaluation of WRF model output for severe weather forecasting from the 2008 NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment[J]. *Wea Forecasting*, 25(2):408-427.
- Done J, Davis C A, Weisman M, 2004. The next generation of NWP: explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model[J]. *Atmos Sci Lett*, 5(6):110-117.
- Flora M L, Skinner P S, Potvin C K, et al, 2019. Object-based verification of short-term, storm-scale probabilistic mesocyclone guidance from an experimental warn-on-forecast system[J]. *Wea Forecasting*, 34(6):1721-1739.
- Kain J S, Weiss S J, Dembek S R, et al, 2008. Severe-weather forecast guidance from the first generation of large domain convection-allowing models: challenges and opportunities[C]// 24th Conference on Severe Local Storms, Savannah: American Meteor Society.
- Kain J S, Xue M, Coniglio M C, et al, 2010. Assessing advances in the assimilation of radar data and other mesoscale observations within a collaborative forecasting-research environment[J]. *Wea Forecasting*, 25(5):1510-1521.
- Sobash R A, Kain J S, Bright D R, et al, 2011. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts[J]. *Wea Forecasting*, 26(5):714-728.
- Sun J Z, Xue M, Wilson J W, et al, 2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(3):409-426.
- Theis S E, Hense A, Damrath U, 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach[J]. *Meteor Appl*, 12(3):257-268.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. *Mon Wea Rev*, 110(6):504-520.