

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).

高分辨率模式雷达回波预报能力分析^{*}

刘 静¹ 才奎志¹ 谭政华²

¹ 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

² 本溪市气象局, 本溪 110121

提 要: 利用 2018 年 7—8 月 GRAPES_3 km、东北短临(WRFRUC)高分辨率模式综合雷达回波预报数据和辽宁省 SWAN 雷达组合反射率(MCR)实况, 基于邻域法 FSS 评分指数, 分析模式在台风北上和副热带高压边缘暴雨过程中的雷达回波预报能力。结果表明: 两家模式在不同降水过程中对小阈值雷达回波有较好的预报技巧, 随着回波量级增大, 模式预报 FSS 逐渐减小, 雷达回波 >55 dBz 时, FSS 甚至为 0。当邻域半径是 3 时, 35 dBz 以下的回波预报中 GRAPES 模式在台风北上暴雨中的预报技巧低于副热带高压边缘, >35 dBz 则相反。WRFRUC 模式始终表现为台风北上暴雨中预报较好。当邻域半径 >9 时, WRFRUC 模式在台风暴雨中的 FSS 评分高于 GRAPES 模式, GRAPES 模式在副热带高压暴雨中的 FSS 评分始终高于 WRFRUC 模式。GRAPES 和 WRFRUC 模式的最大 FSS 评分技巧均出现在邻域半径是 11 时, 分别为 0.239 和 0.195。GRAPES 模式中 FSS 评分在 12 h 逐小时预报中前 3 个时次较强, WRFRUC 模式则表现为中间时次强, 两头弱。

关键词: 高分辨率模式, 雷达回波, 邻域法, FSS 评分

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.008

Analysis of Radar Echo Forecasting Capability of Different High-Resolution Models

LIU Jing¹ CAI Kuizhi¹ TAN Zhenghua²

¹ Liaoning Warning Center of Meteorological Disaster Monitoring, Shenyang 110166

² Benxi Meteorological Office of Liaoning Province, Benxi 110121

Abstract: Using the forecasting radar echo data from GRAPES_3 km (Global/Regional Assimilation and Prediction System) and WRFRUC (Weather Research and Forecast Rapid Update Cycle) of July and August in 2018, the real radar echo data from SWAN (MCR), and FSS (fractions skill score), the radar echo forecast abilities of two high-resolution models for typhoon and subtropical anticyclone were analyzed. The results showed that the two models have better skill for weak radar echo forecast, with increase of radar echo, the forecasting skill score decreases. When radar echo reaches 55 dBz, FSS even is equal to zero. When spatial neighborhood radius is 3, the forecast is less skillfull in the typhoon rainstorm than subtropical anticyclone rainstorm with radar echo lower than 35 dBz. If radar echo is bigger than 35 dBz, it is in contrast. The forecasting of radar echo by WRFRUC model is always better for typhoon rainstorm than for subtropical anticyclone rainstorm. When spatial neighborhood radius increases to 9, the echo forecasting FSS of WRFRUC model is higher than that of GRAPES model in typhoon rain, but in subtropical anticyclone rainstorm, GRAPES model has the higher skill than WRFRUC model. The biggest FSSs of

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-025 和 CMAYBY2018-016)共同资助

2018 年 10 月 16 日收稿; 2019 年 9 月 16 日收修定稿

第一作者: 刘静, 主要从事短时临近预报预警研究. Email: liujing-syau@163.com

GRAPES and WRFUC models appear at the spatial neighborhood radius of 11, and the values are 0.239 and 0.195, respectively. In the first three hours of the forecasting, FSS is bigger than in other hours for the GRAPES model. In the middle hours of the echo forecasting of WRFUC model, FSS is higher than in other hours.

Key words: high-resolution model, radar echo, neighborhood method, fractions skill score (FSS)

引 言

中国气象局自主开发建立的多尺度通用资料同化与数值预报系统(陈德辉和沈学顺, 2006) GRAPES 涵盖了两大功能系统, 分别为三维/四维资料变分同化系统(Xue et al, 2008)和数值模式预报系统(Chen et al, 2008)。前人关于 GRAPES 资料的应用研究和预报检验较多(祁莉等, 2017; 张利红和何光碧, 2014; 王静等, 2017), 辽宁省气象局 2017 年在本地部署应用数值预报云资料, 重点在短时临近预报预警中应用高时空分辨率的 GRAPES_3 km 资料。短时临近预报中主要依靠高分辨率资料, Chakraborty (2010)指出, 由于对中小尺度天气的物理过程、参数化方案不完全清楚, 模式中一些细小的相位误差可能导致低命中率和高虚假预警率。于翥等(2018)研究得出, 提高 GRAPES-Meso 模式的空间分辨率可以在一定程度上改善对降水中心的预报, 但对降水落区的预报改进有限。潘留杰等(2015)认为, 对不同天气条件下的降水来说, 增加空间分辨率并不一定能够提高模式降水预报性能。那么, 在分辨率足够精细的前提下, 多大尺度上预报性能会达到最优, 这是高分辨率模式应用研究的重要问题。

关于预报检验的方法讨论有很多(李俊等, 2014; 王海霞和智协飞, 2015; 陈法敬和陈静, 2015)。基于评分最优化的模式降水预报订正结果的 TS 评分最优化及 ETS 最优化较传统降水检验指标更优秀(吴启树等, 2017)。曲巧娜等(2019)利用目标对象检验法对多种模式强降水预报能力进行了比较。杨国杰等(2018)对 ECMWF 热带气旋集合预报进行了检验, 任宏昌(2017)、张夏琨(2018)对 T639 等三家模式中后期预报性能进行了检验, 宫宇等(2018)对 GRAPES-GFS 模式暴雨预报进行了天气学检验, 这些都对本文的研究有指导作用。

效果检验是评价模式预报能力的方法之一(黄丽萍等, 2017), Theis et al(2005)将一定范围内格点上降水的有无预报转换成中心点的概率预报, 采

用概率预报评估方法进行检验, Roberts and Lean (2008)计算某个邻域半径内的超过一定阈值的降水的格点数定义了“分数技巧评分”(fractions skill score, FSS)。潘留杰等(2015)基于上述两种研究方法的基础上, 应用邻域法分析了 ECMWF、日本和 T639 的降水预报性能。马申佳等(2018)和张勇等(2019)将时间因素和空间进行匹配, 对降水预报进行不同时空尺度的效果评估检验。

前人关于格点化雷达回波预报检验的研究较少, 尤其是对高分辨率雷达回波预报进行检验的分析更为罕见, 本文利用 GRAPES_3 km 模式、东北短临模式(WRFUC)对不同降水类型中的雷达回波预报进行检验, 基于邻域法分析两家模式在不同邻域半径上的预报能力。

1 研究方法

通常采用的技巧评分在进行高分辨率模式检验时存在一定的弊端(Ebert, 2009)。本研究采用预报邻域与实况邻域进行比较的方法, 对两种邻域都采用相同的处理手段, 然后衡量处理后场的相似度。具体实现时将实况场的尺度缩小, 然后和预报场进行邻域比较。邻域法的邻域半径可以变化, 以此来衡量模式预报在多大尺度内表现最优。

邻域窗通常包括圆形和方形, 本研究为了计算方便, 采用方形网格窗, 定义方形网格窗中心点到边缘的格点数为邻域半径。

$$p_{\text{fcst}}(n)(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_{\text{fcst}} \left[i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right] \quad (1)$$

$$p_{\text{obs}}(n)(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_{\text{obs}} \left[i+k-1 - \frac{(n-1)}{2}, j+l-1 - \frac{(n-1)}{2} \right] \quad (2)$$

Brier 分数评分(FSS)是一种概率型方法, 即分数技巧评分方法, 它是由 FBS 计算而来, FBS 计算方法如下:

$$FBS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{\text{fcst}} - p_{\text{obs}})^2 \quad (3)$$

式中, $p_{\text{fcst}}(n)(i, j)$ 和 $p_{\text{obs}}(n)(i, j)$ 分别表示模式预报场和观测场, i 是区域 x 轴方向的格点, 值是 $1 \sim N_x$, j 是区域 y 轴方向的格点, 值是 $1 \sim N_y$, k 和 l 为邻域窗内包含的格点数, n 是邻域半径。

式(1)和式(2)表示, 对于任意邻域半径的空间窗来说, p_{fcst} 并非有无预报, 而是格点概率预报, 即区域内出现回波的格点与空间窗内总格点的比值。实况场和预报场相同。

根据 Brier 分数评分针对不匹配情况技术评分技巧, 就可以得到正定向的分数技巧评分 FSS。

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{\frac{1}{n} \left[\sum_n p_{\text{fcst}}^2 + \sum_n p_{\text{obs}}^2 \right]} \quad (4)$$

分数技巧评分完全不匹配时为 0, 完全匹配时为 1。本研究的雷达回波范围是 20~65 dBz 之间(间隔是 5 dBz), 采用递增检验的方法。降水类型对 FSS 评分有重要影响, 如果是区域性暴雨, 雷达回波在辽宁省内均有分布, 则 FSS 随着邻域半径的增加而逐渐趋于 1。下文的分析表明, 如果是局地暴雨, 回波分布比较集中, 则增大邻域半径不会使 FSS 逐渐接近 1。

2 资料来源

选取 2018 年汛期辽宁省 5 次典型天气过程(表 1), 分析台风北上和副热带高压(以下简称副高)边缘暴雨过程中高分辨率模式对雷达回波的预报效果。

表 1 暴雨个例
Table 1 Precipitation cases

日期	暴雨类型	主要降雨区域
7 月 24 日	台风北上暴雨	朝阳、阜新、葫芦岛
8 月 14 日	台风北上暴雨	丹东、鞍山、营口、葫芦岛
8 月 20 日	台风北上暴雨	大连、丹东、鞍山、营口
7 月 13 日	副高边缘暴雨	沈阳、鞍山、营口、辽阳、铁岭
8 月 7 日	副高边缘暴雨	丹东、本溪

2.1 实况资料

我国自主知识产权的灾害天气短时临近预报系统(SWAN), 已在全国气象部门进行应用, SWAN 系统是在 MICAPS 平台基础上, 融合了雷达、卫星、自动站等探测资料, 提供了大量的监测和临近预报产品。SWAN 系统在辽宁应用已经达 7 年以上, 其中对辽宁省内 5 部雷达(沈阳、大连、丹东、营口、朝阳)和周边 5 部雷达(赤峰、通辽、烟台、白山、秦皇

岛)进行实时拼图, 在强对流监测中发挥了重大作用, 特别是对东北冷涡天气下的强降水监测预警。本研究采用质量控制后的 SWAN 产品中组合反射率 MCR 作为实况资料(分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$), 检验范围是 $37^\circ \sim 46^\circ \text{N}$ 、 $115^\circ \sim 127^\circ \text{E}$ 。

2.2 模式预报资料

2.2.1 GRAPES 模式

数值预报云资料 2017 年在辽宁省部署应用, 其中国家气象中心开发的 GRAPES-3 km 模式覆盖全国重点区域, 分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$, 每天 08、20 时两个时次进行未来 36 h 的 8 个要素预报, 本研究采用其中的综合雷达回波作为模式预报资料。

2.2.2 WRFruc 模式

WRFruc 基于 WRF 模式及 WRFDA 同化系统, 每天逐小时循环同化预报未来 0~13 h 东北区域 3 km 分辨率的天气。同化的资料主要包括地面自动站、飞机报、雷达等, 对这些资料进行了预处理和质量控制。为了适应逐小时循环同化, 在模式运行方面增加了谱四维数据同化和数字滤波初始化, 进行大尺度形势逼近和高频噪声滤波等。

两种模式预报资料的分辨率均为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$, 更新时间选取 08、20 时两次未来 12 h 的预报。空间范围和实况一致。

3 结果分析

3.1 高分辨率模式在不同类型降水中的雷达回波预报整体表现

根据模式预报的空间分辨率, 选择雷达回波的分辨率是 3 km。根据短时临近预警业务的实际需要, 结合辽宁省预警信号发布特点, 选择邻域半径从 3~11, 间隔是 2。本研究中, 在几个雷达回波阈值及一系列邻域半径里计算分数技巧评分, 以显示与尺度及强度相关的预报性能。

图 1 显示的是在台风北上暴雨过程中, 不同邻域半径下 FSS 随雷达回波强度增加的变化热图。可以看出, 雷达回波强度越小, 高分辨率模式预报技巧越高, 随着雷达回波的增加, FSS 逐渐减小; 当 > 45 dBz 的强回波出现时, 预报的技巧评分显著减小, 甚至为 0。比较 FSS 随邻域半径的变化, 发现大多数情况下 FSS 随邻域半径的增加而变大, 预报技巧随着邻域半径的增加而得到改善。

当邻域半径为 3 时,GRAPES 模式在雷达回波 >40 dBz 时表现出大于其他邻域半径,可能是 >40 dBz 的强回波面积小且集中,增加邻域半径反而缩小了它的比值(式 2),因此表现出小尺度预报技巧高。

图 2 显示的是在副高边缘暴雨过程中,不同邻域半径下 FSS 随雷达回波强度增加的变化热图。可以看出,FSS 随着邻域半径的增加而变大,邻域半径的增大对东北区域快速同化模式雷达回波的预报技巧改善更为明显。GRAPES 模式在副高边缘暴雨中对 >45 dBz 强回波的预报性能高于 WRFRUC 模式。

3.2 相同邻域半径下雷达回波预报技巧在不同降水类型中的对比分析

图 3 显示的是当邻域半径为 3 时,两种高分辨

率模式在台风北上和副高边缘暴雨中的预报技巧评分随回波强度变化的演变分析。可以看出,当雷达回波 <35 dBz 时,GRAPES 模式在台风北上暴雨中的雷达回波预报技巧低于副高边缘。当雷达回波 >35 dBz 时,雷达回波在台风暴雨中预报技巧较好。WRFRUC 模式始终表现为台风北上暴雨中预报较好,但是在不同类型暴雨过程中,WRFRUC 模式对 >45 dBz 的强回波的预报技巧几乎均为 0。

3.3 不同空间尺度下两种模式雷达回波预报技巧对比分析

图 4 显示的是 GRAPES 和 WRFRUC 两种模式对台风北上暴雨和副高边缘暴雨的预报技巧评分随雷达回波的演变,可以看出,在副高边缘暴雨过程中,GRAPES 模式的逐小时雷达回波预报技巧始终优于 WRFRUC 模式。在所有参选个例中,GRAPES

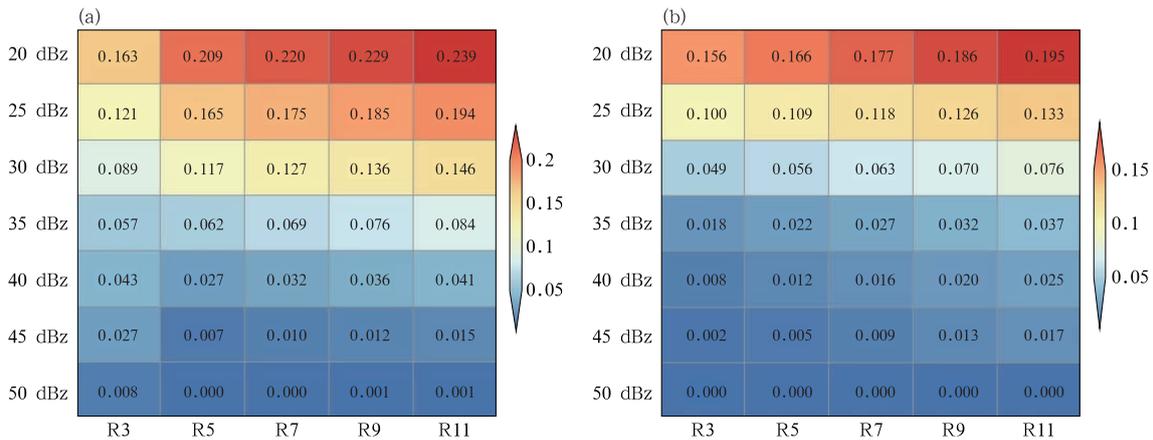


图 1 不同邻域半径下 GRAPES(a)和 WRFRUC(b)1 h 雷达回波预报在台风暴雨中分数技巧评分

Fig. 1 One-hour radar echo FSS in different spatial neighborhood on the rain day induced by typhoon rainstorm (a) GRAPES, (b) WRFRUC

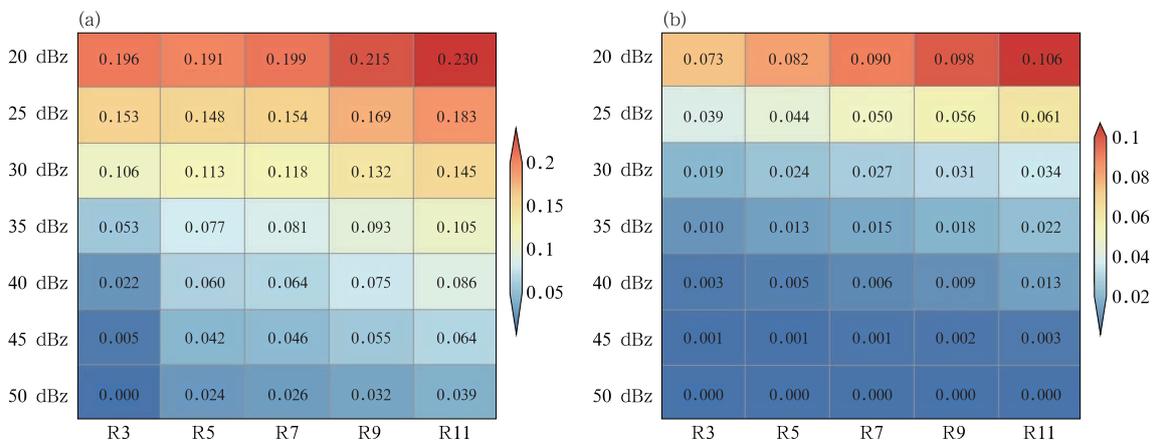


图 2 同图 1,但为在副高边缘暴雨中分数技巧评分

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the rainstorm induced by subtropical anticyclone

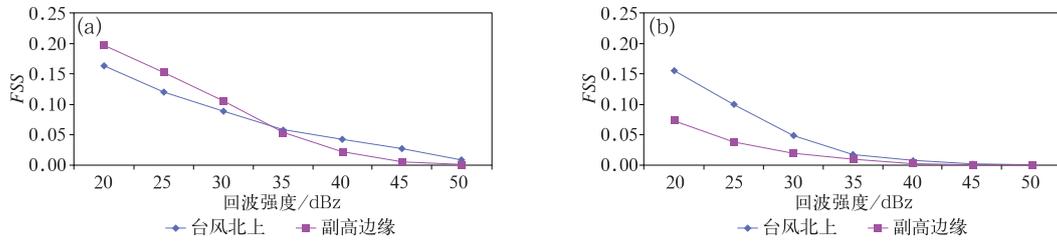


图 3 GRAPES(a)和 WRFRUC(b)1 h 雷达回波在分型暴雨中的分数技巧评分
 Fig. 3 One-hour radar echo FSS in different types of rainstorms
 (a) GRAPES, (b) WRFRUC

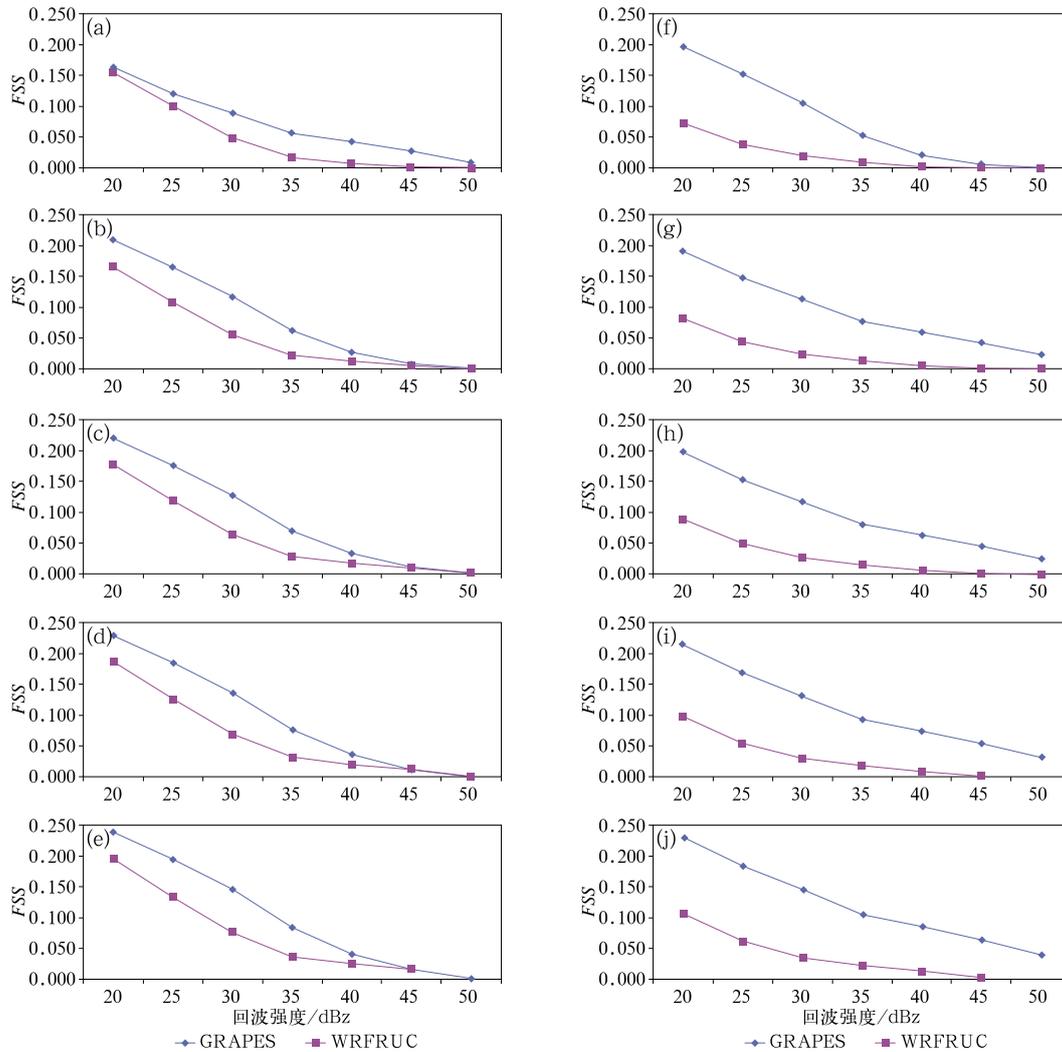


图 4 台风北上暴雨(a~e)和副高边缘暴雨(f~j)雷达回波在不同模式中的分数技巧评分
 (a, f) 邻域半径 3, (b, g) 邻域半径 5, (c, h) 邻域半径 7, (d, i) 邻域半径 9, (e, j) 邻域半径 11
 Fig. 4 Radar echo FSS of typhoon rainstorm (a~e) and subtropical anticyclone rainstorm (f~j)
 in different high-resolution models
 (a, f) neighborhood radius of 3, (b, g) neighborhood radius of 5,
 (c, h) neighborhood radius of 7, (d, i) neighborhood radius of 9,
 (e, j) neighborhood radius of 11

和 WRFRUC 模式的最大 FSS 评分技巧均出现在邻域半径是 11 时,分别为 0.239 和 0.195。

当邻域半径是 3 时,两种模式 20 dBz 雷达回波预报的预报技巧差异最小出现在台风北上暴雨中, FSS 之差为 0.007。在副高边缘暴雨中,两种模式 20 dBz 雷达回波预报的预报技巧表现出最大差值, FSS 之差为 0.123。

GRAPES 和 WRFRUC 模式在台风北上暴雨和副高边缘暴雨中,邻域半径增加到 5 时的 FSS 比邻域半径是 3 时有所增加,但邻域半径增加到 7 时 FSS 和邻域半径为 5 的差异不大,说明回波系统比较局地,扩大到一定区间后在增加检验范围对 FSS 没有改善作用。

当邻域半径是 3 时,GRAPES 模式在台风北上暴雨中对于 >45 dBz 的强回波有一定的预报技巧, FSS 可以达到 0.027;当邻域半径 >5 时,GRAPES 模式在副高边缘暴雨中 >45 dBz 的强回波有一定的预报技巧, FSS 平均为 0.052。增加预报技巧评分检验邻域半径可以提高 GRAPES 模式对强回波的 FSS 评分。

WRFRUC 在台风北上和副高边缘暴雨中的表现为:台风北上暴雨优于副高边缘暴雨,最大差值表现在检验邻域半径是 7 时, FSS 在台风北上暴雨和副高边缘暴雨的 FSS 之差为 0.087;40 dBz 以内的

雷达回波预报中,邻域半径是 3 时 WRFRUC 模式在两种暴雨过程中的 FSS 评分差异最小,仅为 0.005;增加邻域半径可以提高 WRFRUC 模式在台风北上暴雨中对 45 dBz 强回波的预报技巧,当邻域半径是 11 时,其 FSS 评分最大,可以达到 0.017。

也就是说,当邻域半径 >9 时,WRFRUC 模式在台风北上暴雨中的 FSS 评分高于 GRAPES 模式,GRAPES 模式在副高边缘暴雨中的 FSS 评分高于 WRFRUC 模式。

3.4 不同预报时次雷达回波预报技巧对比分析

由邻域半径是 3 时,GRAPES(图 5a)和 WRFRUC(图 5c)模式不同预报时次的 FSS 评分,可以看出,GRAPES 模式在预报开始时次的 FSS 为 0,实际上没有数据,只有未来 1~12 h 的预报数据,雷达回波强度由弱到强, FSS 评分基本呈现递减的趋势,前 3 h 的预报 FSS 技巧最高,20 dBz 的 FSS 评分可以达到 0.257。WRFRUC 模式表现出 FSS 评分高值出现在预报的第 4~6 h,前 3 h 预报效果次之,所有预报中只有 20 dBz 的 FSS 评分可以达到 0.1 以上。

当邻域半径为 7 时,GRAPES(图 5b)和 WRFRUC(图 5d) FSS 评分随预报时次变化趋势与邻域半径是 3 时基本一致,相同强度雷达回波在各

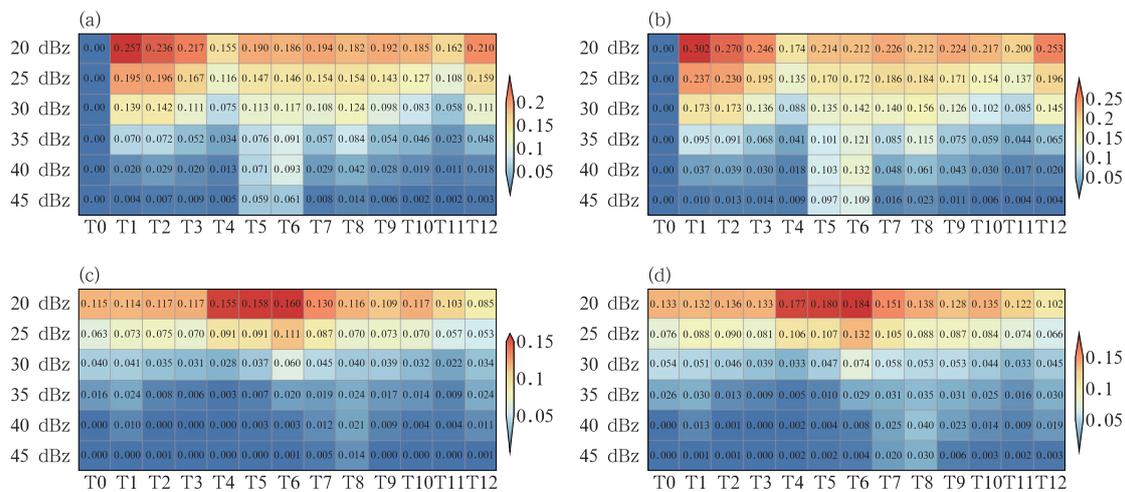


图 5 不同预报时次雷达回波在台风北上暴雨中 GRAPES(a),WRFRUC(c)和副高边缘暴雨中 GRAPES(b),WRFRUC(d)的分数技巧评分 (a,c)邻域半径 3,(b,d)邻域半径 7

Fig. 5 Radar echo FSS in different rain types at different times in the GRAPES (a, b) and WRFRUC (c, d)

(a, c) neighborhood radius of 3, (b, d) neighborhood radius of 7

个时次的预报技巧随着邻域半径的增加而增加。GRAPES 模式中, FSS 在 12 h 预报中的表现前 3 个时次较高, WRFRUC 模式在 12 h 预报中表现为中间时次强, 两头弱。GRAPES 模式 20 dBz 雷达回波的最大 FSS 比最后一个时次大 0.049, WRFRUC 模式则为 0.082。在两种邻域半径下, FSS 均表现为 GRAPES 模式在不同预报时次间差异小于 WRFRUC 模式。

4 结论和讨论

基于邻域法, 对辽宁省常用高分辨率资料 GRAPES 和 WRFRUC 模式在不同尺度上进行雷达回波预报能力检验分析。

(1) 当雷达回波阈值较小时, 两家模式在不同降水系统下预报技巧较大, 随着回波强度增大, FSS 逐渐减小, 当雷达回波强度 > 50 dBz 时, FSS 甚至为 0, 表明无预报技巧。当邻域半径增大时, 所有模式的预报技巧均增加, 邻域半径增大对 GRAPES 模式在台风北上暴雨中的 FSS 影响相对较大, 对 WRF 模式在副高边缘暴雨中的 FSS 改善作用明显。GRAPES 模式在副高边缘暴雨中对 > 45 dBz 强回波的预报性能优于 WRFRUC 模式。说明在副高边缘降水过程中, 选用 GRAPES 模式能获得更好的强回波预报效果。

(2) 当邻域半径为 3 时, 雷达回波 < 35 dBz, GRAPES 模式在台风北上暴雨中的雷达回波预报技巧低于副高边缘; 雷达回波 > 35 dBz, 雷达回波在台风北上暴雨中预报技巧较好。WRFRUC 模式始终表现为台风北上暴雨中预报较好。但是在 > 50 dBz 的强回波中两种模式的预报技巧几乎均为 0。以 3 为邻域半径评定 > 35 dBz 回波的预报技巧, GRAPES 模式在两种天气系统下均能取得较高的 FSS 评分。

(3) 在副高边缘暴雨过程中, GRAPES 模式的逐小时雷达回波预报技巧始终优于 WRFRUC 模式。GRAPES 和 WRFRUC 模式在台风北上暴雨和副高边缘暴雨中, 邻域半径增加到 5 时的 FSS 比邻域半径是 3 时有所增加, 但邻域半径增加到 7 时 FSS 和邻域半径为 5 的差异不大, 说明回波系统比较局地, 扩大到一定区间后再增加检验范围对 FSS 没有明显改善作用。当邻域半径 > 9 时, WRFRUC 模式在台风北上暴雨中的 FSS 评分高于 GRAPES

模式, GRAPES 模式在副高边缘暴雨中的 FSS 评分高于 WRFRUC 模式。在台风降水过程中(多为区域性降水), 邻域半径 > 9 , WRFRUC 模式对 > 45 dBz 强回波可以有较好的预报效果。

(4) GRAPES 模式在预报开始时次的 FSS 为 0, 雷达回波强度由弱到强, FSS 评分呈现递减的趋势。FSS 在 12 h 预报中的表现前 3 个时次较高, WRFRUC 模式在 12 h 预报中表现为中间时次强, 两头弱。在两种邻域半径下, FSS 均表现为 GRAPES 模式在不同预报时次间差异小于 WRFRUC 模式, 说明 GRAPES 模式在各个时次间的预报表现更为稳定。

整体上看, GRAPES 模式在副高边缘暴雨过程中能同时兼顾回波强度、回波面积的预报表现, 和 WRFRUC 相比评分较高。对于强降水天气, 使用较大邻域来评定回波预报并不合理(很难突出强对流落区), 对于两种模式在不同降水系统中的回波预报, 使用邻域半径 5 作为评定的空间尺度能取得较高的 FSS 评分, 说明使用这一邻域范围进行评定比较合适。

参考文献

- 陈德辉, 沈学顺, 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报, 17(6): 773-777. Chen D H, Shen X S, 2006. Recent progress on GRAPES research and application[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6): 773-777(in Chinese).
- 陈法敬, 陈静, 2015. “SEEPS”降水预报检验评分方法在我国降水预报中的应用试验[J]. 气象科技进展, 5(5): 6-13. Chen F J, Chen J, 2015. The application experiment of a new score for precipitation verification based on the SEEPS principle[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(5): 6-13(in Chinese).
- 宫宇, 代刊, 徐珺, 等, 2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象, 44(9): 1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast [J]. Meteor Mon, 44(9): 1148-1159(in Chinese).
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等, 2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 28(1): 25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 25-37(in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 陈超君, 2014. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J]. 气象, 40(5): 580-588. Li J, Du J, Chen C J, 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction [J]. Meteor Mon, 40(5): 580-588(in Chinese).
- 马申佳, 陈超辉, 智协飞, 等, 2018. 基于时空不确定性的对流尺度集

- 合预报效果评估检验[J]. 气象学报, 76(4): 578-589. Ma S J, Chen C H, Zhi X F, et al, 2018. The assessment and verification of convection-allowing ensemble forecast based on spatial-temporal uncertainties[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 578-589 (in Chinese).
- 潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等, 2015. 基于邻域法的高分辨率模式降水的预报能力分析[J]. 热带气象学报, 31(5): 632-642. Pan L J, Zhang H F, Chen X T, et al, 2015. Neighborhood-based precipitation forecasting capability analysis of high-resolution models [J]. J Trop Meteor, 31(5): 632-642 (in Chinese).
- 祁莉, 马琼, 张文君, 2017. GRAPES 模式对 2011/2012 年冬季寒潮天气过程预报能力的检验[J]. 大气科学学报, 40(6): 791-802. Qi L, Ma Q, Zhang W J, 2017. Verification of forecasting capability of cold wave process in the winter of 2011/2012 with GRAPES[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 791-802 (in Chinese).
- 曲巧娜, 盛春岩, 范苏丹, 等, 2019. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象, 45(7): 908-919. Qu Q N, Sheng C Y, Fan S D, et al, 2019. Comparison of the multi-model forecasts for severe precipitation based on the object verification[J]. Meteor Mon, 45(7): 908-919 (in Chinese).
- 任宏昌, 2017. 2017 年 6—8 月 T639、ECMWF 及日本模式中后期预报性能检验[J]. 气象, 43(11): 1439-1445. Ren H C, 2017. Performance verification of medium-range forecasts by T639, ECMWF and Japan Models from June to August 2017[J]. Meteor Mon, 43(11): 1439-1445 (in Chinese).
- 王海霞, 智协飞, 2015. 基于 TIGGE 多模式降水量预报的统计降尺度研究[J]. 气象科学, 35(4): 430-437. Wang H X, Zhi X F, 2015. Statistical downscaling research of precipitation forecast based on TIGGE multimodel ensemble[J]. J Meteor Sci, 35(4): 430-437 (in Chinese).
- 王静, 陈静, 钟有亮, 等, 2017. GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估[J]. 气象, 43(4): 385-401. Wang J, Chen J, Zhong Y L, et al, 2017. Verification and evaluation of the southwest vortex forecast by GRAPES-REPS[J]. Meteor Mon, 43(4): 385-401 (in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等, 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报, 28(3): 306-317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al, 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 306-317 (in Chinese).
- 杨国杰, 沙天阳, 程正泉, 2018. 2009—2015 年 ECMWF 热带气旋集合预报的检验及分析[J]. 气象, 44(2): 277-283. Yang G J, Sha T Y, Cheng Z Q, 2018. Verification and analysis on tropical cyclone ensemble forecast of European center for medium-range weather forecasts from 2009 to 2015[J]. Meteor Mon, 44(2): 277-283 (in Chinese).
- 于翥, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. 大气科学, 42(5): 1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1146-1156 (in Chinese).
- 张利红, 何光碧, 2014. GRAPES_Meso 模式对 2011 年夏季青藏高原东部及周边区域的预报检验[J]. 青藏高原, 33(1): 14-25. Zhang L H, He G B, 2014. Verification for GRAPES_Meso model in eastern Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings in summer of 2011[J]. Plateau Meteor, 33(1): 14-25 (in Chinese).
- 张夏琨, 2018. 2017 年 12 月至 2018 年 2 月 T639、ECMWF 及日本模式中后期预报性能检验[J]. 气象, 44(5): 713-718. Zhang X K, 2018. Performance verification of medium-range forecasts by T639, ECMWF and Japan Models from December 2017 to February 2018[J]. Meteor Mon, 44(5): 713-718 (in Chinese).
- 张勇, 吴胜刚, 张亚萍, 等, 2019. 基于 SWAN 雷达拼图产品在暴雨过程中的对流云降水识别及效果检验[J]. 气象, 45(2): 180-190. Zhang Y, Wu S G, Zhang Y P, et al, 2019. Identification and effect verification of convective cloud precipitation in rainstorm processes based on SWAN mosaic products[J]. Meteor Mon, 45(2): 180-190 (in Chinese).
- Chakraborty A, 2010. The skill of ECMWF medium-range forecasts during the year of tropical convection 2008[J]. Mon Wea Rev, 138(10): 3787-3805.
- Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific design[J]. Chin Sci Bull, 53(22): 3433-3445.
- Ebert E E, 2009. Neighborhood verification: a strategy for rewarding close forecasts[J]. Wea Forecasting, 24(6): 1498-1510.
- Roberts N M, Lean H W, 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. Mon Wea Rev, 136(1): 78-97.
- 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.
- Xue J S, Zhuang S Y, Zhu G F, et al, 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES[J]. Chin Sci Bull, 53(22): 3446-3457.