

胡胜, 罗聪, 黄晓梅, 等. 基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报的对比分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 274-280.

基于雷达外推和中尺度数值模式的定量 降水预报的对比分析^{* 1}

胡 胜¹ 罗 聪² 黄晓梅³ 李怀宇² 何如意²

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

2 广州中心气象台, 广州 510080

3 广东省湛江市气象局, 湛江 524001

提 要: 应用广东 2010 年出现的 4 次暴雨过程的气象资料, 检验分析了临近预报系统(SWAN)和华南中尺度数值模式(GZMM)中的定量降水产品对晴雨及不同类型降水的预报效果, 在此基础上探讨了临近预报系统和数值模式在 0~6 h 范围内的预报能力的交叉点。结果表明: 首先, 对于晴雨预报, SWAN 系统中降水产品随着预报时效的增加预报效果呈现出减弱的趋势, 且高分辨(0.02°)产品的下降速度要快于低分辨率(0.12°); GZMM 降水产品(0.12°)在 1~3 h 预报能力逐步提升, 在 4~6 h 维持相对稳定的水平。对于分辨率同为 0.12°的 SWAN 系统和 GZMM 模式产品, 在第 1 和第 2 h, SWAN 产品的 CSI 评分分别为 0.504 和 0.442, 高于 GZMM 的 0.306 和 0.375, 但从第 3 小时开始 GZMM 产品 CSI 评分略高于 SWAN 产品, 表明此后华南中尺度数值模式对晴雨的预报能力优于 SWAN 系统, 交叉点介于 2~3 h。其次, 进一步检验了上述产品对弱降水(1 小时雨量为 0.1~2 mm)、一般性降水(2~10 mm)和较强降水(超过 10 mm)的预报能力。对于弱降水, GZMM 产品 CSI 评分在 0~6 h 维持在 0.23, 高于 SWAN 产品, 表明 GZMM 模式对于弱降水的预报能力在整体上要强于 SWAN 系统。对于一般性降水, 在 0~3 h, 分辨率为 0.12°的 SWAN 产品 CSI 评分高于 GZMM 产品; 两者的 CSI 评分曲线的交叉点介于 3~4 h, 即从第 4 小时开始, GZMM 降水产品预报效果更好。对于较强降水, 无论是 SWAN 系统还是 GZMM 模式, 预报能力都呈现出明显的减弱; 但 SWAN 系统在整体上对强降水的预报能力要优于 GZMM 模式。

关键词: 临近预报, 数值模式, 降水, 检验, 交叉点

Comparisons of One Hour Precipitation Forecast Between the Radar Extrapolation and the Mesoscale Numerical Model

HU Sheng¹ LUO Cong² HUANG Xiaomei³ LI Huaiyu² HE Ruyi²

1 Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080

2 Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

3 Zhanjiang Meteorological Office of Guangdong Province, Zhanjiang 524001

Abstract: Verification results of different precipitation forecast products in the SWAN system and the GZMM model for 4 heavy rain cases in 2010 are discussed. The cross-over point of CSI curves in forecast lead time where the model would perform better than the nowcast, is analyzed in particular. Firstly, the radar nowcast for 1-hour precipitation forecast exceeding 0.1 mm starts with higher scores than the model, but the skill of the nowcast drops as the forecast lead time increases. The GZMM model performs at a fairly steady level over 3—6 hour period with lower scores at 1 and 2 hours. The CSI scores of 1-hour QPF with 0.12° resolution in the SWAN at 1 and 2 hours are 0.504 and 0.442, respectively. At $t=3$ h, the two

* 广东省科技计划项目(2011A030200014)和北极阁基金项目(BJG201005)共同资助

2011 年 4 月 22 日收稿; 2011 年 10 月 14 日收修定稿

第一作者: 胡胜, 主要从事强对流短时临近预报技术研究. Email: guyuesheng2000@sohu.com

CSI curves cross, indicating the skill of the radar extrapolation has decreased to the same level as the model forecast. Secondly, the performance of 1-hour precipitation forecast with 3 graded levels is documented. For the 0.1–2 mm rainfall, the CSI score of the model is about 0.23 over the 6-hour period, and the GZMM model performs better than the SWAN. For rainfall between 2 and 10 mm, the SWAN product with 0.12° resolution performs better than the GZMM model over 0–3 hour period. At $t=4$ h, the skill of the radar extrapolation has decreased to the same level as the model forecast. For rainfall over 10 mm, both the SWAN and the GZMM perform not very good. But the skill of the radar nowcast is higher than that of the GZMM model over the 6-hour period.

Key words: nowcast, numerical model, precipitation, verification, cross-over point

引 言

近年来,基于多普勒天气雷达、卫星、自动气象站等非常规观测资料和中尺度数值模式的定量降水预报技术得到了快速发展。对于临近(0~2 h)定量降水预报而言,利用雷达回波外推技术和自动站雨量订正技术的临近预报方案具有高精度的时空分辨率,且准确性也较高。一些学者在预报雷达回波运动这一领域做了大量工作^[1-4]。除早期的线性外推(拉格朗日持续性预报),还有基于最优化相关系数的交叉相关法和基于回波多个特征的单体质心法。对于较长的预报时效,基于数值模式的定量降水预报随着数值模式的发展不断进步,但其精度还无法与数值模式中质量场和风场的预报精度相比。定量降水预报的困难在于一方面源于与之相关的动力、热力过程的复杂性,另一方面则由于降水过程多受局地强迫影响较大^[5-7]。尽管如此,对于较长时间的定量降水预报而言,数值模式与单纯的雷达外推技术相比仍具有明显的优势。

Austin 等^[8]和 Golding^[9]研究了数值模式和雷达外推方法的预报能力,随着预报时效的增加,数值模式和临近外推方法之间存在一个交叉点,从这个交叉点开始,数值模式的预报能力要强于临近外推方法。Lin 等^[10]利用 Germann 和 Zawadzki 提出的半拉格朗日临近预报方法和 GEM 数值模式,对上述 6 天降水过程做进一步的分析,寻找数值模式和临近外推方法预报能力的交叉点。

在广东,临近预报系统(SWAN)和华南中尺度数值预报模式(GZMM)均投入了业务运行,提供了定量降水预报产品。本文将利用广东 2010 年出现

的 4 次暴雨过程,对 SWAN 系统和华南中尺度数值模式提供的不同预报时效的定量降水预报产品进行检验,并寻找临近预报系统和数值模式的预报能力的交叉点,为发展基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水融合技术提供基础。

1 “SWAN”系统、华南中尺度数值模式及定量降水预报产品简介

1.1 临近预报系统“SWAN”及其定量降水预报产品

中国气象局业务建设项目“灾害天气短时临近预报预警业务系统建设与改进”项目于 2008 年启动,由广东、湖北、安徽等十多个省市的气象部门和国家气象中心联合开展研发,旨在集中全国短临预报技术和系统开发的优势力量,开展我国自主知识产权的灾害天气短时临近预报系统(Severe Weather Automatic Nowcast System, SWAN)。SWAN 系统在 MICAPS 平台基础上,融合了数值模式产品和雷达、卫星、自动站等探测资料,提供了大量的临近预报产品,如三维雷达拼图^[11]、组合反射率因子、垂直剖面、定量降水估测和预报、COTREC 矢量场、反射率因子预报产品、风暴识别与追踪^[12-14]、TITAN^[15-16]、对流云识别产品等,并具有强天气综合自动报警、预报产品实时检验、灾害天气预报制作和发布等功能。目前,SWAN 系统已经在全国绝大多数的省级气象台投入了业务应用。

SWAN 系统在现有业务中提供 0~3 h 定量降水预报产品。该产品使用了 3 km CAPPI 拼图数据、COTREC 矢量场和自动站雨量等资料。首先,

在对 $Z-I$ 关系做统计时,考虑了将不同强度的回波按照一定的等级进行分类,共分为 13 个等级:10~15、15~20、20~25、25~30、30~35、35~40、40~45、45~50、50~55、55~60、60~65、65~70 和 70 dBz 以上;其次,利用 COTREC 矢量场外推,获取雷达反射率因子预报场;最后,在使用自动站雨量订正雷达定量降水预报时,采取最优插值(OI)法。

1.2 华南中尺度数值模式(GZMM)

华南中尺度数值模式(GZMM)是在 GRAPES 基础上发展的热带区域中尺度业务模式^[17-19]。在同化方面,提出了利用“曲率修正线性平衡方程”来改善 3DV 的风压平衡约束关系;开发了资料控制和筛选技术;发展了雷达 VAD 风、自动站、飞机报、云迹风等资料同化技术;研究了在三维变分同化框架中获取雷达覆盖范围内大气水平风场的技术,以及有云情况下红外辐射资料的同化方法。在模式方面,研究了高原地形、侧边界嵌套、陡峭地形的影响;开发了云水、雨水 Nudging 方案、多种对流参数化物理方案;并对陆面过程、城市冠层模式等进行了研究。

华南中尺度数值模式的水平分辨率为 0.12° ,覆盖范围为: $10^\circ\sim 35^\circ\text{N}$ 、 $95^\circ\sim 130^\circ\text{E}$,共 31 层;业务运行时发布 84 h 的天气预报和精细要素预报。

2 资料及检验方法

2.1 天气过程简介

为了对比分析基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报产品,选择了 2010 年广东省出现的 4 次降水过程,其中 2 次为强对流降水过程,另外 2 次为热带气旋造成的降水。

强对流的 1:2010 年 5 月 5 日夜间至 7 日白天,在暖区由于风暴出流边界、干线、低层辐合线等中尺度系统触发了对流系统的活动、合并并加强,使得广东出现了一次“影响范围广、降水强度大、持续时间长、造成影响重”的强对流的 1,降雨落区由广东省北部的一条强降水雨带和垂悬在以广州为主的珠江三角洲大暴雨降水区组成。全省有 10 个站累计雨量超过 250 mm,330 个站为 100~250 mm;其

中韶关翁源的新江镇 422.7 mm,为全省最大过程雨量。

强对流过程 2:受低压槽影响,14 日早晨粤北地区开始出现了强降水,随后粤西北、珠江三角洲地区先后出现了暴雨或大暴雨,并伴有短时雷雨大风。14 日 08 时至 15 日 08 时,有 111 个自动气象站记录雨量超过 100 mm。

热带气旋过程 1:2010 年 8 月 29 日 02 时(世界时,下同),位于南海中部的一热带气压加强为强热带风暴狮子山,9 月 2 日 6:50 在福建漳浦古雷镇登陆,登陆后继续向偏西方向移动,11 时进入广东,强度减弱。“狮子山”在广东陆地停留超过 81 h,受其影响广东省自西向东普降暴雨到大暴雨局部特大暴雨。2 日 08 时至 5 日 20 时,全省共有 26 个站降水记录雨量超过 300 mm,105 个站点雨量超过 200 mm,529 个站雨量介于 100~200 mm。

热带气旋过程 2:2010 年 9 月 18 日 16 时,西太平洋洋面上的热带气旋凡亚比加强为超强台风。19 日 08 时在我国台湾花莲县丰滨附近登陆,并减弱为台风。20 日 7 时在福建省漳浦县再次登陆,09 时减弱为强热带风暴,进入广东并继续西行。根据广东省气象观测网,19 日 00 时至 23 日 14 时,4 个站点雨量超过 400 mm,108 个站点雨量为 200~400 mm,483 个站点雨量介于 100~200 mm 之间。

2.2 定量降水预报产品和定量降水估测产品

SWAN 系统在广东业务上每 6 分钟更新一次 0~3 h 的定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)产品,分辨率为 0.02° ,为 640×480 网格,覆盖范围为: $27.7^\circ\sim 18.1^\circ\text{N}$ 、 $107.2^\circ\sim 120^\circ\text{E}$ 。图 1d 给出 2010 年 9 月 20 日 12 时分辨率为 0.02° 的 1 h 定量降水预报产品。为了便于与华南中尺度数值模式进行比较,将 QPF 的细网格处理成与数值模式分辨率相同的粗网格(分辨率为 0.12° ,见图 1c)。另外,为了能对 0~6 h 的定量降水预报产品进行逐时对比分析,沿用 SWAN 系统中 QPF 算法将其预报时效进行扩展。图 1b 给出了华南中尺度数值模式的 1 h 定量降水预报产品。为了能对基于雷达外推和数值模式的定量降水预报进行检验和对比分析,文中还联合雷达和自动站雨量资料,反演了雷达定量降水估测产品(Quantitative

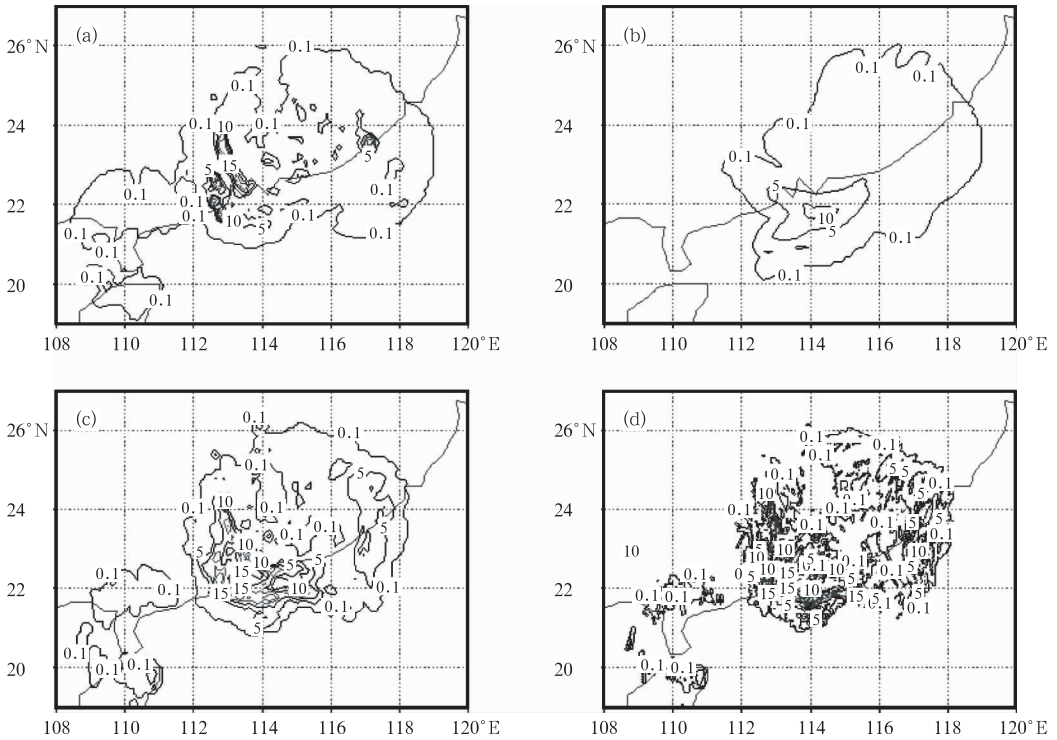


图 1 1 h 雷达定量估测降水产品和 SWAN 系统与 GZMM 模式提供的 1 h 定量降水预报产品

- (a) 2010 年 9 月 20 日 13 时分辨率为 0.12° 的 1 h 雷达定量降水估测产品，
- (b) 2010 年 9 月 20 日 14 时分辨率为 0.12° 的 GZMM 模式提供的 1 h 定量降水预报产品，
- (c) 2010 年 9 月 20 日 12 时分辨率为 0.12° 的 SWAN 系统提供的 1 h 定量降水预报产品，
- (d) 2010 年 9 月 20 日 12 时分辨率为 0.02° 的 SWAN 系统提供的 1 h 定量降水预报产品

Fig.1 The 1-hour QPE, and 1-hour QPF products in the SWAN system and GZMM model

- (a) 1-hour QPE at 13:00 UTC 20 September 2010 with 0.12° resolution,
- (b) 1-hour QPF at 14:00 UTC 20 September 2010 with 0.12° resolution in the GZMM,
- (c) 1-hour QPF at 12:00 UTC 20 September 2010 with 0.12° resolution in the SWAN,
- (d) 1-hour QPF at 12:00 UTC 20 September 2010 with 0.02° resolution in the SWAN

Precipitation Evaluation, QPE)^[20], 提供两种不同空间分辨率的 QPE 产品(0.12, 见图 1a; 0.02°, 图略)。

2.3 检验方法

利用两种分辨率(0.02°和 0.12°)的 QPE 资料, 分别对 SWAN 系统提供的 QPF(两种分辨率 0.02°和 0.12°)和 GZMM 模式提供的 QPF 产品(仅一种分辨率 0.12°)进行检验。检验的区域选择 SWAN 系统和 GZMM 模式提供的 QPF 产品的共同覆盖区域。

使用命中率(POD)、空报率(FAR)和临界成功指数(CSI)等来评估 SWAN 系统和 GZMM 模式的定量降水预报的能力。下面给出降水检验相依表(表 1), 对于每个分析的格点, 该表列出了“是”事件

和“非”事件的预报和观测发生频率。

根据表 1, POD、FAR 和 CSI 的计算方法如下:

$$POD = \frac{\text{击中}(H)}{\text{击中}(H) + \text{漏报}(M)} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{\text{空报}(F)}{\text{击中}(H) + \text{空报}(F)} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{\text{击中}(H)}{\text{击中}(H) + \text{漏报}(M) + \text{空报}(F)} \quad (3)$$

表 1 降水检验相依表

Table 1 Contingency rainfall table to each analysis grid point over the verification period

| | 预报“非” | 预报“是” |
|-------|----------|-------|
| 观测“非” | 正确的否定(Z) | 空报(F) |
| 观测“是” | 漏报(M) | 击中(H) |

3 检验结果及对比分析

利用前面介绍的 2010 年广东省出现的 4 次降水过程资料和检验方法,对 SWAN 系统中基于雷达外推的定量降水预报产品(0~6 h)和华南中尺度数值模式降水产品(0~6 h)进行评估和对比分析。

文中的检验分为两类:首先对这些降水产品的晴雨预报能力进行检验,选择每小时雨量阈值为 0.1 mm;其次针对较弱降水(每小时雨量介于 0.1~2 mm)、一般性降水(每小时雨量 2~10 mm)和较强的降水(每小时雨量大于 10 mm)进行评估和对比分析。

3.1 对晴雨的检验结果及对比分析

图 2 给出了 SWAN 系统中定量降水预报产品(0.12°和 0.02°)与 GZMM 模式中定量降水预报产品(0.12°)对于晴雨的评分结果。

首先,从图 2 中评分结果可以看出,对于文中 3 种参与检验的定量降水预报产品[SWAN 系统提供的分辨率为 0.12°和 0.02°的定量降水预报产品,简称为 SWAN(0.12°)和 SWAN(0.02°);GZMM 模式提供的分辨率为 0.12°的降水预报产品,简称为 GZMM(0.12°)],随着预报时效的增加(1~6 h),SWAN(0.02°)和 SWAN(0.12°)的预报能力明显减弱;而 GZMM(0.12°)则在 1~3 h 内预报能力逐步提升,对于 4~6 h,则维持在一个相对稳定的水平。

其次,对比 SWAN(0.12°)和 SWAN(0.02°)这两个产品,虽然随着预报时效的增加,两者的客观评分都表现出下降的趋势,但 SWAN(0.02°)的下降速度要快于 SWAN(0.12°)。SWAN(0.12°)在第 1

小时的 CSI 和 POD 分别为 0.504 和 0.537,到第 6 小时 CSI 和 POD 分别降低到 0.37 和 0.45;对于 SWAN(0.02°),CSI 和 POD 分别从第 1 小时的 0.608 和 0.75,下降到第 6 小时的 0.226 和 0.357。这是由于 SWAN(0.02°)分辨率非常高,随着预报时效增加,预报能力减弱也就较 SWAN(0.12°)明显了。此外,SWAN(0.02°)的虚警率(FAR)在 1~6 h 范围内均明显高于 SWAN(0.12°),这也可能是分辨率较高的原因所造成的。

最后,对 SWAN 系统和 GZMM 模式中的 0.12°分辨率的定量降水预报产品进行了对比分析。在图 2a CSI 评分中,在 0~2 h 范围内,SWAN(0.12°)为 0.504 和 0.442,有所下降;GZMM(0.12°)CSI 分别为 0.306 和 0.375,略有上升。但 SWAN(0.12°)评分仍明显高于 GZMM(0.12°),这表明在较短预报时效内,基于雷达外推的 SWAN(0.12°)定量降水预报产品要优于华南中尺度数值模式降水预报产品。从第 3 小时开始,SWAN(0.12°)的 CSI 评分下降至 0.405,而 GZMM(0.12°)则上升至 0.407,表明从第 3 小时开始,华南中尺度数值模式在晴雨预报能力上开始优于 SWAN 系统了。此后,随着预报时效的进一步增加,SWAN(0.12°)CSI 评分继续降低,而 GZMM(0.12°)则维持在一个相对稳定的水平(约 0.428)。从上面的分析中可以看出,SWAN(0.12°)和 GZMM(0.12°)对晴雨的预报能力的交叉点介于 2~3 h 之间,并靠近于 3 h。对于图 2b POD 评分分析,SWAN(0.12°)和 GZMM(0.12°)的表现类似于 CSI 分析,两者的交叉点也介于 2~3 h 之间,但更靠近于 2 h。在图 2c FAR 中,GZMM(0.12°)在 1~6 h 范围内虚警率均高于 SWAN(0.12°)。

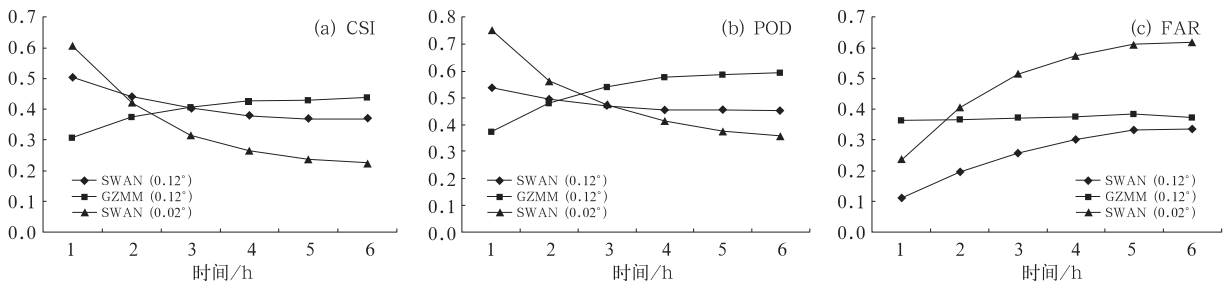


图 2 SWAN 系统和 GZMM 模式中的定量降水预报产品对晴雨的评分结果

(a) CSI, (b) POD, (c) FAR

Fig. 2 Verification results of probability of 1 hour precipitation forecast exceeding 0.1 mm in the SWAN system and the GZMM model

(a) CSI, (b) POD, (c) FAR

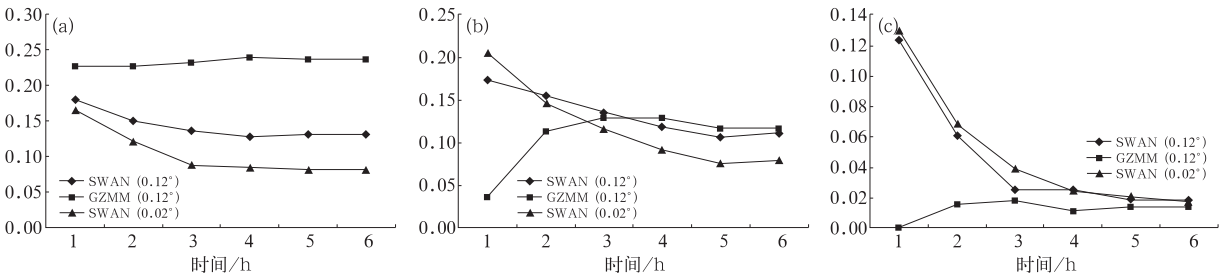


图3 SWAN系统和GZMM模式中的定量降水预报产品对不同强度降水的CSI评分1 h雨量划分的CSI评分1 h雨量划分

(a) 0.1~2 mm·h⁻¹, (b) 2~10 mm·h⁻¹, (c) >10 mm·h⁻¹

Fig. 3 CSI scores of each graded level for 1 hour precipitation forecast in the SWAN and GZMM

(a) 0.1~2 mm·h⁻¹, (b) 2~10 mm·h⁻¹, (c) >10 mm·h⁻¹

3.2 对不同强度降水的检验结果及对比分析

为了更好地检验SWAN系统和GZMM模式对不同强度的降水类型的预报能力,文中将降水分为以下三类:弱降水(每小时雨量为0.1~2 mm)、一般性降水(每小时雨量介于2~10 mm)和较强降水(每小时雨量超过10 mm)。图3给出了SWAN系统和GZMM模式中定量降水预报产品对不同强度降水的CSI评分结果(POD和FAR评分略)。

对于弱降水(图3a),SWAN系统降水预报产品在1~3 h时段内有一个明显的下降,SWAN(0.12°)的CSI从1 h的0.18下降到3 h的0.136,而在4~6 h则维持在一个相对稳定的水平,CSI约为0.13。对于GZMM模式而言,降水产品的CSI在1~6 h时段内一直维持在0.23的水平,且在整个时段上,其CSI评分结果要较SWAN(0.12°)和SWAN(0.02°)要高一些。这表明,对于弱的降水,GZMM模式的预报能力要明显强于SWAN系统中的降水产品。

对于一般性降水(图3b),SWAN系统中降水产品的CSI评分随着预报时效的增加呈现出一定的下降趋势;GZMM模式降水预报产品的CSI评分在1~3 h内则明显上升,此后则维持在相对稳定的水平。在1~3 h时段内,SWAN(0.12°)CSI评分由0.174下降到0.136,GZMM(0.12°)则由0.037迅速上升到0.129,SWAN(0.12°)的预报效果在这个时段内要优于GZMM(0.12°)。两者的CSI评分曲线的交叉点出现在3~4 h,此后,GZMM(0.12°)的CSI评分略高于SWAN(0.12°),表明此时GZMM(0.12°)的预报能力更强了。

对于较强的降水(图3c),无论是SWAN系统还是GZMM模式,降水产品的预报能力都表现出明显的减弱。尤其是对于GZMM模式,其降水预报产品的CSI评分在1 h为0,对较强的降水无预报能力,此后的2~6 h,CSI也仅仅为0.015左右,预报能力很低。对于SWAN(0.12°),1 h的CSI评分为0.124,此后迅速降低,在2和3 h分别为0.061和0.025,表明该产品对较强降水的预报时效非常有限。尽管如此,对于较强的降水,SWAN(0.12°)在整体上表现要好于GZMM(0.12°)。

4 小 结

本文利用广东2010年4次降水过程,对临近预报系统(SWAN)和华南中尺度数值模式(GZMM)中的降水预报产品进行了检验,并分析了两者的预报能力在0~6 h范围内的交叉点,得到如下结论:

(1)对于晴雨预报,SWAN系统降水产品随着预报时效的增加预报能力减弱;而GZMM模式在1~3 h内预报能力逐步提升,在4~6 h维持在一个相对稳定的水平。

(2)对于SWAN系统中不同分辨率的降水预报产品,高分辨率(0.02°)产品对晴雨的CSI评分随着预报时效的增加,下降速度要快于低分辨率(0.12°)产品。

(3)对于分辨率同为0.12°的SWAN系统和GZMM模式产品,CSI评分曲线的交叉点介于2~3 h之间,表明在1~2 h,临近预报系统SWAN对晴雨的预报能力好于GZMM模式,从第3 h开始,GZMM模式的预报效果则更好。

(4)对于弱降水,GZMM 模式产品在 1~6 h 表现稳定,CSI 约为 0.23,在整个时段上都高于 SWAN 系统产品,表明 GZMM 模式具有更强的弱降水预报能力。

(5)对于一般性降水,GZMM 模式和 SWAN 系统产品的 CSI 评分曲线的交叉点介于 3~4 h。在 1~3 h,SWAN 系统表现更好,从第 4 小时开始,GZMM 模式预报能力强于 SWAN 系统。

(6)对于较强的降水,无论是 SWAN 系统还是 GZMM 模式,预报能力都明显减弱,尤其是 GZMM 模式,预报效果很差。尽管如此,SWAN 系统对较强降水的预报能力整体上仍优于 GZMM 模式。

参考文献

- [1] 陈雷,戴建华,陶岚.一种改进后的交叉相关法(COTREC)在降水临近预报中的应用[J].热带气象学报,2009,25(1):117-122.
- [2] 张亚萍,程明虎,夏文梅,等.天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用[J].气象学报,2006,64(5):631-645.
- [3] 曾小团,梁巧倩,农孟松,等.交叉相关法在强对流天气临近预报中的应用[J].气象,2010,36(1):31-40.
- [4] 符式红,钟青,寿绍文.对多普勒雷达集合交叉相关外推技术的构造与实例检验[J].气象,2012,38(1):47-55.
- [5] 彭新东,李兴良.多尺度大气数值预报的技术进展[J].应用气象学报,2010,21(2):129-138.
- [6] Xue Jishan, Liu Yan. Numerical weather prediction in China in the New Century-Progress, problems and prospects[J]. Adv Atmos Sci,2007,24(6):1099-1108.
- [7] 薛纪善.和预报员谈数值预报[J].气象,2007,33(8):3-10.
- [8] Austin G L, Bellon A, Dionne P, et al. On the interaction between radar and satellite image nowcasting systems and meso-scale numerical models[C]. Symposium on Mesoscale Analysis and Forecasting. Vancouver, ESA SP,1987,282:225-228.
- [9] Golding, B W. A system for generating automated very short range forecasts[J]. Meteorol Appl, 1998, (5): 1-16.
- [10] Lin C A, Vasic S, Turner B. Precipitation forecast based on numerical weather prediction models and radar nowcasts [C]. Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Melbourne, ERAD, 2004, 201-205.
- [11] 肖艳姣,刘黎平.新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J].气象学报,2006,64(5):647-657.
- [12] 胡胜,罗兵,黄晓梅,等.临近预报系统(SWIFT)中风暴产品的设计及应用[J].气象,2010,36(1):54-58.
- [13] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,2011,37(7):795-801.
- [14] 胡胜,汪瑛,陈荣,等.“雨燕”中风暴算法在北京奥运天气预报示范项目中的应用及改进[J].高原气象,2009,28(6):1434-1442.
- [15] 周毓荃,潘留杰,张亚萍. TITAN 系统的移植开发及个例应用[J].大气科学学报,2009,32(6):752-764.
- [16] 郑永光,陈炯,沃伟峰,等.改进的客观分析诊断图形软件[J].气象,2011,37(6):735-741.
- [17] 陈子通,黄燕燕,万齐林,等.快速更新循环同化预报系统的汛期实验与分析[J].热带气象学报,2010,26(1):49-54.
- [18] 张诚忠,万齐林,黄燕燕,等.华南暖区降水数值预报的初值同化实验[J].热带气象学报,2008,24(6):576-589.
- [19] 陈静,薛纪善,颜宏.华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验[J].气象学报,2003,61(4):432-446.
- [20] 刘晓阳,杨洪平,李建通,等.新一代天气雷达定量降水估测集成系统[J].气象,2010,36(4):90-95.