

毛冬艳, 朱文剑, 樊利强, 等. 2014. GRAPES_MESO V3.3 模式强天气预报性能的初步检验. 气象, 40(12): 1429-1438.

GRAPES_MESO V3.3 模式强天气预报 性能的初步检验^{*1}

毛冬艳¹ 朱文剑¹ 樊利强¹ 蔡雪薇¹ 张 涛¹
陈 静² 黄丽萍² 王 雨²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

提 要: 本文针对 2013 年 6 月升级后的 GRAPES_MESO V3.3 模式预报产品进行了天气学检验。检验结果表明: 模式能够较好地反映强对流过程发生发展的水汽、稳定性和垂直风切变等物理条件, 8—10 月期间, 预报准确率随着季节的转换而有所不同, 对于达到一定阈值条件的部分物理参数预报效果较好, 对业务具有较好的参考价值。模式对于强降水以及华北雷暴大风和冰雹等强天气过程具有一定的预报能力, 特别是高时空分辨率的产品能够在一定程度上较好地描述过程的发生发展, 但对于极端强降水、受地形影响的强降水等, 预报能力有限。

关键词: GRAPES_MESO V3.3 模式, 预报, 天气学检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.001

Preliminary Synoptic Verification on the Performance of GRAPES_MESO V3.3 in Severe Weather Forecasting

MAO Dongyan¹ ZHU Wenjian¹ FAN Liqiang¹ CAI Xuewei¹
ZHANG Tao¹ CHEN Jing² HUANG Liping² WANG Yu²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Numerical Weather Prediction Centre of CMA, Beijing 100081

Abstract: The synoptic verification is conducted for the GRAPES_MESO V3.3 updated in June 2013. The results indicate that the model can forecast the physical conditions well, including the water vapor, the instability and the vertical wind shear, but the forecast accuracy is different from August to October. For some of the physical conditions that reach a given threshold, the model can forecast better. Moreover, the initiation and development of the rainstorm and convective weather can be reflected well, especially the details from the high resolution products, but not very good for the rainstorm that is extreme or affected by the topography.

Key words: GRAPES_MESO V3.3 model, forecasting, synoptic verification

引 言

中尺度模式 GRAPES_MESO 自 2004 年 5 月 9

日开始业务试运行, 2006 年 7 月 GRAPES 模式通过业务化验收并投入业务运行(陈德辉等, 2008), 2006 年 8 月 7 日正式替代 HLAFS 模式发布区域模式预报产品。2007 年模式进一步改进(李勇等,

* 中国气象局数值预报(GRAPES)发展专项和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002)共同资助
2014 年 6 月 12 日收稿; 2014 年 8 月 22 日收修定稿
第一作者: 毛冬艳, 主要从事强对流天气预报技术研究. Email: maody@cma.gov.cn

2008), 定版为 GRAPES_MESO V2.5, 并于 2008 年 4 月 7 日正式业务化。2009 年模式升级改进 V3.0 版本(彭新东等, 2010), 2010 年 3 月 23 日正式业务化。2013 年 6 月 4 日, GRAPES_MESO 进一步升级为 V3.3 版本。前期的批量试验显示, V3.3 版本业务平行试验总体表现优于业务运行模式, 降水是略有改进的, 尤其 48 h 空报改进明显。等压面高度场、温度场和风场预报均有不同程度的改进。对于 2013 年 4 月下旬至 5 月中旬我国南方 4 次大范围强降雨天气过程较 V3.0 版本有明显改进。

数值预报作为现代天气预报的基础, 其检验工作一直以来都受到广大气象学者的重视。对于数值模式的检验, 主要集中在两个方面, 一是针对模式产品的定量化统计检验, 另一个是以预报员思路为基础的主观天气学检验。对于前者, 目前已经开展了大量的针对模式基本要素以及降水预报等的检验(王雨, 2006; 尤凤春等, 2009; 许美玲等, 2002; 姜永强等, 2002; 陈敏等, 2003; 王雨等, 2010)。王雨等(2007; 2013)还从加密降水观测以及检验结果平均方案等多个角度, 对降水检验方案进行了深入的探讨和分析, 为降水检验的科学性和严谨性提供了参考。衡志炜等(2011)利用热带测雨卫星(TRMM)搭载的微波成像仪(TMI)资料, 对一次台风过程中 AREM 和 WRF 模式的水凝物模拟能力进行了检验。近些年来, 随着精细化预报的不断发展, 尺度分解技术(孔荣等, 2010)、基于目标的检验技术(刘凑华等, 2013)等新的检验技术和方法逐步发展起来。同时, 针对区域集合预报系统的检验(邓国等, 2010; 王晨稀等, 2007)也为其应用提供了有用的参考信息。对于模式的天气学检验, 主要是根据不同天气(如暴雨、强对流、台风、寒潮、沙尘暴以及雾霾等)发生发展的物理机制, 按照预报员实际业务中的预报思路, 从天气过程发生发展的环流形势、主要影响系统以及物理条件等方面, 主观分析和评估数值模式对不同天气过程的预报性能。针对 GRAPES_MESO 中尺度模式, 一些学者(叶成志等, 2006; 徐双柱等, 2007)分析了其对 2005 年长江流域重大灾害性降水天气过程的预报性能, 为更好地在业务中应用这些模式产品提供了参考。彭新东等(2010)针对冷锋暴雨和台风暴雨两种不同类型的南方暴雨过程, 进行了热力和动力检验, 特别对模式预报降水和降水系统的结构进行了深入分析, 初步验证了模式

对于这两次过程强对流降水系统的刻画能力。陈静等(2010)应用 T639 和 GRAPES_RUC 等模式诊断变量和概率预报产品, 对 2009 年“6·3”河南飚线天气过程进行了检验, 结果表明高分辨率模式对强对流天气的预报能力有了较大的提高。

中尺度数值模式由于高时空分辨率等特点, 其检验一直以来都在不断的研究和探讨之中(Christopher et al, 2000)。针对数值模式的天气学检验, 国外的模式研发人员和业务预报人员也开展了大量的工作。美国风暴预报中心 1996 年首次有组织地开展科研和业务人员共同参加的“冬季天气试验”, 试验内容之一就是研究针对冬季天气的更加系统科学地评估中尺度条件的方法。1998 年开始重点从冬季天气转移到对流天气。2000 年春季试验主要工作就是对于业务和试验的中尺度模式进行评估(John et al, 2003)。从 2003 年春季试验针对数值模式的主观检验来看, 基于强对流天气预报的水汽、不稳定、风切变和动力抬升条件, 预报员一方面需要提供模式对这些物理条件的预报评价以及信心, 另一方面需对过去一天的预报给出评价及检验结果。这种完全依靠预报员主观分析的检验, 虽然难免会存在一定的主观性, 但还是能够提供基于统计的定量化检验所不能提供的信息, 对于了解预报员的模式应用能力、进一步改进模式评估方法具有很好的参考意义(Kain et al, 2003)。近些年来, 随着数值模式的发展, 针对风暴尺度模式以及中尺度集合预报模式也开展了主观天气学检验(Aaron et al, 2013)。

本文主要针对 GRAPES_MESO V3.3 模式, 从天气学检验的角度, 对强对流天气发生发展的物理条件以及不同强天气过程进行检验, 分析模式对于强天气过程的刻画能力, 提高预报员对于 GRAPES_MESO 中尺度模式的综合分析和应用能力。

1 资料与方法

2010 年 3 月以来, 经过对 GRAPES_MESO V3.0 版本的业务化应用和检验, 发现其还存在一定的问题, 主要表现为计算不稳定、高原上 500 hPa 高度场误差偏大、预报降水量明显偏大, 以及同化有效性不高等。针对上述问题, 模式研发人员对其原因进行了深入分析, 针对每一个问题查找解决途径, 并基本解决了上述存在的问题。改进后的 GRAPES_

MESO V3.3 版本与 V3.0 相比,主要模式性能的差别如表 1。

表 1 GRAPES_MESO V3.3 与 V3.0 模式主要差别

Table 1 Main differences between GRAPES_MESO V3.3 and V3.0

项目	GRAPES_MESO V3.0	GRAPES_MESO V3.3
水平扩散	无	有
地形滤波	无	有
积云参数化	BMJ	新版
陆面参数化	MRF	改进版
微物理参数化	WSM6, 半层调用	新版, 整层调用
水汽平流方案	PRM	PRM 改进版

其中, BMJ (Betts-Miller-Janjic) 是一种湿对流调整积云参数化方案, 其本质是当模式大气出现饱和湿静力能不稳定时, 沿着湿绝热线调整温度和湿度廓线, 所以, 对流调整水热场参考廓线的选择是对流调整方案的重要内容。该方案有两个特点: 一是同时考虑了深、浅对流过程的影响作用; 二是采用虚湿绝热线(修正的湿绝热线)作为对流调整参考廓线。中期预报模式(Medium Range Forecast Model, MRF)是由 Hong 等(1996)发展的一种非局地闭合边界层参数化方案。MRF 参数化方案主要是在不稳定状态下计算反梯度热量通量和水汽通量, 在行星边界层中使用增强的垂直通量系数, 而行星边界层高度由一个临近理查森数决定。利用隐式局地方案处理垂直扩散项, 并且在自由大气中以局地理查森数为根据。WSM6 (Single-Moment 6-class) 是单参数微物理方案, 包含水汽、云水、雨水、云冰、雪和霰六种水物质。此方案是在 WSM5 的基础上增加了水物质霰以及相关的微物理过程发展而成的。这些过程的参数化方案大多数与 Lin 方案类似, 在计算增长和其他参数上有些差别。为了增加垂直廓线的精度, 在下降过程中会考虑凝结/融化过程。同时为了减少方案对模式时间步长的敏感性, 对微物理过程的计算顺序进行了最优选择。

本文用于检验的模式资料包括 2013 年 6 月以来正式业务化运行的 GRAPES_MESO V3.3 产品, 其中, 考虑模式产品的完整性, 物理条件的定量化检验时段为 8—10 月。同时, 也引用了国家气象中心业务上使用的其他模式产品, 包括欧洲中心、日本以及 T639 产品等。

为了能够对模式的中尺度特征进行检验评估, 除了常规观测资料外, 本文还使用了逐小时自动站加密雨量和雷达等高时空分辨率资料。

为了消除地形对分析结果的影响, 在定量检验过程中对各个物理量都进行了相应的剔除处理, 将地形较高而不能用于检验的格点进行了剔除。具体的处理方式为, 对于 850 hPa 露点温度、K 指数剔除海拔高度大于 1500 m 的格点, 对于抬升指数(简称 LI)、0~3 km 风切变剔除海拔高度大于 3000 m 的格点, 对于 500 hPa 露点温度、0~6 km 风切变剔除海拔高度大于 5000 m 的格点。此外, 需要说明的是, 目前定量检验的真值使用的是模式零场, 这种检验能够体现出模式的稳定性, 但不能够真实反映模式预报与实况的误差, 在今后的检验中将增加对模式零场与实况观测的检验。

2 强对流物理条件检验

对于强对流天气的短期潜势预报, 预报员一般是在天气形势分析的基础上, 结合物理参数进行预报区域上空大气温湿结构的综合分析, 从而判断是否有强对流, 以及可能有哪一类强对流天气发生。结合以往的研究成果(雷蕾等, 2011; 樊李苗等, 2013; 张一平等, 2014), 本文选取了 3 类物理条件共 6 个参数进行检验, 其中, 水汽条件包括 850 和 500 hPa 露点温度(以下简称 T_{d850} 和 T_{d500}), 稳定度条件包括 K 指数和 LI, 风切变条件包括 0~3 和 0~6 km 垂直风切变(以下简称为 0~3 km shear 和 0~6 km shear)。检验时段为 2013 年 8 月 1 日至 10 月 31 日。

为了能够提供更为全面的检验结果, 在检验时从以下几个方面进行了考虑: (1) 区域划分。除了对全国范围进行检验以外, 还根据不同区域的天气气候特点, 将全国划分为 9 个区域进行检验, 分别为东北、华北、江淮黄淮、江南、华南、西南、西北地区东部、西北地区西部和青藏高原(以下图中分别简称为 DB、HB、JHHH、JN、HN、XN、XBD、XBX 和 QZ-GY)(图 1); (2) 月份划分。除了对 8—10 月进行综合检验外, 考虑这 3 个月正处于季节转换期间, 因此, 针对每个月分别进行了检验; (3) 不同起报时间。针对 08 和 20 时起报的模式产品分别进行检验; (4) 不同预报时效。针对模式 12、24、36、48、60 和 72 h 时效的预报产品分别进行了检验; (5) 不同阈值。根据强对流天气发生发展的物理条件阈值特征, 在对不同物理参数进行综合检验的基础上, 针对预报员特别关注的阈值区间也进行了检验, 具体为: $T_{d850} \geq 12^\circ\text{C}$ 、

$T_{d500} \leq -40^{\circ}\text{C}$ 、 $K \geq 35^{\circ}\text{C}$ 、 $LI \leq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $0 \sim 3 \text{ km shear} \geq 13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0 \sim 6 \text{ km shear} \geq 27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

使用的检验统计量包括平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)(尤凤春等,2009;刘还珠等,1992),对每个格点的时间序列样本进行计算。计算公式如下:

$$\text{平均误差: } ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)$$

$$\text{平均绝对误差: } MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - o_i|$$

$$\text{均方根误差: } RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2 \right]^{1/2}$$

式中, f 表示模式预报场, o 表示模式零场, i 是时间维度。

2.1 水汽条件检验结果分析

对于 T_{d850} 12 h 时效预报的检验,总体而言,8—10月,东北地区南部、华北大部、江淮黄淮和江南北部等地平均绝对误差相对较大,为 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ (图 2a);从不同月份的检验(图略)来看,随着月份的演变,全国大部地区的误差呈增大的趋势,其中江淮黄淮地区的误差增长最为显著,10月达 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$,局地超过 4°C ;对 $T_{d850} \geq 12^{\circ}\text{C}$ 的检验结果(图 2b)表明,在我国中东部大部分地区,模式对该阈值区间的 850 hPa 露点温度预报好于不分阈值的预报,大部地区的误差 $< 2^{\circ}\text{C}$,表明该模式对于达到强对流天气预报所关注的低层水汽条件的预报具有较好的参考价值。对于不同区域、不同预报时效(图 2c)的检验结果表明,随着预报时效的延长,各地区的误差都呈增加趋势,其中华南和西南地区的误差较小,到 72 h 时效误差基本在 2.5°C 以下,江淮黄淮地区误差相对较大,该区域 12 h 时效的误差与华南地区 72 h 的误差基本相当。从不同起报时间来看(图略),对于西北地区东部,08 时起报的误差要明显大于 20 时起报的误差,全国其他地区的差异则不明显。

对于 T_{d500} 的检验(图略),总体而言,误差大于 T_{d850} ,8—10月,误差分布呈现明显的区域特征,即北方地区的误差明显高于南方地区, 35°N 以北的误差一般 $> 3.5^{\circ}\text{C}$,局地达到 4.0°C , 35°N 以南误差相对较小,两广南部和云南南部最小为 $2.0 \sim 2.5^{\circ}\text{C}$;从不同月份的检验来看,随着月份的演变,北方地区的误差呈现递减趋势,10月误差最小,这与 T_{d850} 的误差变化趋势正好相反,南方地区变化不大;对

$T_{d500} \leq -40^{\circ}\text{C}$ 的检验结果表明,与综合检验相一致,误差大值区主要位于北方地区,部分地区达 5°C 以上,业务中使用该参数判断北方地区对流层中层干时应注意。不同区域的检验结果表明,随着预报时效的延长,各地区的误差都呈增加趋势,误差较小的区域为西南地区,较大的区域为华北和东北地区,误差随预报时效增加的幅度略大于 T_{d850} 的变化。从不同起报时间来看,北方部分地区 08 时起报的误差要略大于 20 时起报的误差,全国其他地区的差异则不明显。

2.2 稳定度条件检验结果分析

LI 是表示条件性稳定度的一个指数,定义为平均气块从修正的低层 900 m 高度沿干绝热线上升,到达凝结高度后再沿湿绝热线上升至 500 hPa 时所具有的温度与 500 hPa 等压面的环境温度的差值。当 $LI < 0^{\circ}\text{C}$ 时,大气层结不稳定,且负值越大,不稳定程度越大;反之,则表示大气是稳定的(刘健文等,2005)。对于 LI 的检验,总体而言(图 3a),8—10月,西北地区东部、华北大部和黄淮西部等地误差相对较大,一般达到或超过 6°C ;从不同月份的检验(图略)来看,随着月份的演变,全国各地区的误差都呈增加趋势,其中,山西、陕西和河南三省交界处误差可达 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$;对 $LI \leq 0^{\circ}\text{C}$ (图 3b)的检验结果表明,该阈值区间的误差小于综合检验,特别是上述误差大值区,误差平均为 4°C 左右。不同区域(图 3c)的检验同上述水汽条件的检验结果不同,各地区的误差随预报时效变化较为平缓,东北地区误差相对最小,为 4°C 左右,西北地区东部误差相对最大,约为 7.5°C 。从不同起报时间来看(图略),全国大部分地区 08 时起报的误差明显小于 20 时起报的误差,尤以西北地区东部、华北大部和黄淮西部等地最为显著。

对于 K 指数的检验(图略),总体而言,8—10月,江南北部及其以北大部地区误差较大,为 $4 \sim 6^{\circ}\text{C}$;从不同月份的检验来看, $\geq 4^{\circ}\text{C}$ 的误差大值区有向南北方向发展的趋势,即东北地区、江南大部 9、10月的误差明显大于 8月,其他地区误差变化不明显;不同阈值的检验结果表明,模式对 K 指数 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的预报效果较好,中东部大部地区误差 $< 3^{\circ}\text{C}$,具有较好的参考价值。不同区域的检验结果表明随着预报时效的延长,各地区的误差呈递增趋势,其中西南和华南地区误差相对最小,华北、江淮黄淮等地

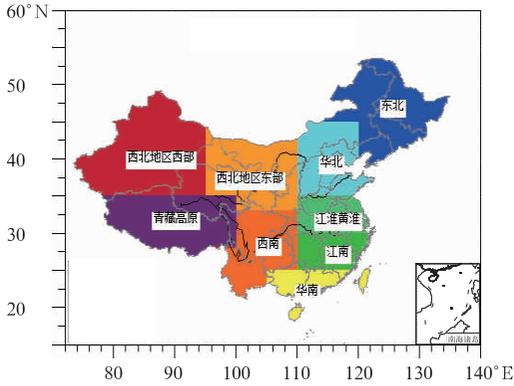


图 1 全国中分析区划图

Fig. 1 Areas for national mesoscale weather analysis

误差相对最大。从不同起报时间来看,江淮黄淮和江南东北部等地 08 时起报的误差略大于 20 时起报的误差,全国大部分地区误差分布的形态差异较小。

2.3 垂直风切变条件检验结果分析

对于 0~3 km shear 的检验,总体而言(图 4a),8—10 月,除四川、广西等局部地区以外,全国大部误差相当,一般为 2~3 m·s⁻¹;从不同月份的检验(图略)来看,随着月份的演变,全国大部分地区误差呈递减趋势,8 月误差最大,其中四川、江南西部、华南西部等地误差达 3~4 m·s⁻¹;不同阈值(图 4b)的检验结果表明,北方大部分地区对 0~3 km shear ≥13.5 m·s⁻¹ 的预报效果较好,具有较好的参考价

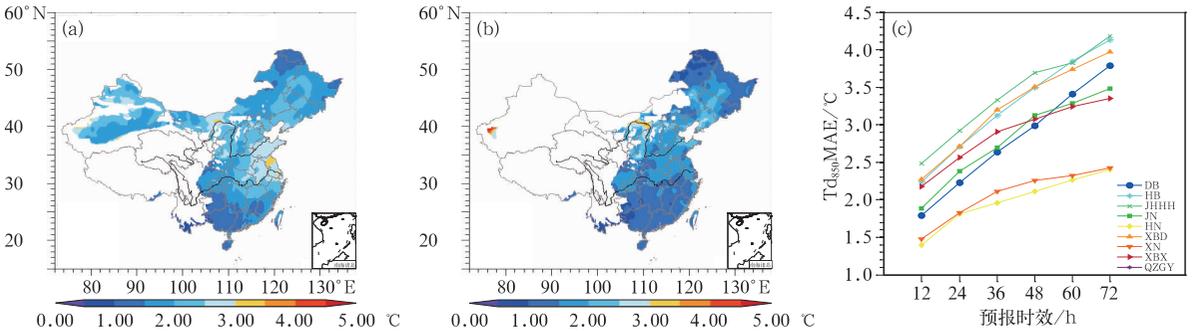


图 2 T_{d850} MAE 分布

(a)8—10 月 12 h 预报时效 MAE 分布, (b)≥12℃ 的 MAE 分布, (c)不同区域、不同预报时效 MAE 演变

Fig. 2 Distribution of T_{d850} MAE for (a) 12 h forecast from August to October, (b) ≥12°C and (c) evolution of different areas and forecast valid time

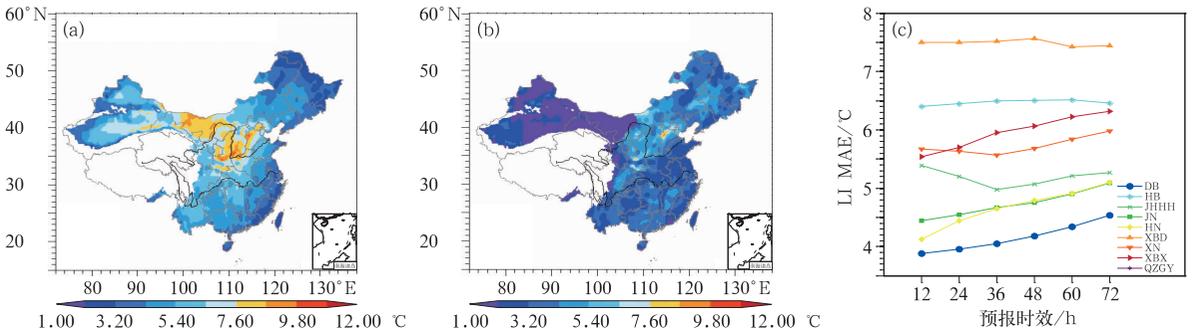


图 3 LI MAE 分布

(a)8—10 月 12 h 预报时效 MAE 分布, (b)≤0℃ 的 MAE 分布,

(c)不同区域、不同预报时效 MAE 演变

Fig. 3 Distribution of LI MAE for (a) 12 h forecast from August to October,

(b) ≤0°C and (c) evolution of different areas and forecast valid time

值,南方则误差较大。不同区域(图 4c)的检验结果表明,随着预报时效的延长,各地区的误差呈递增趋势,其中西北地区东部误差相对最小,东北地区误差

增长最快。从不同起报时间来看(图略),全国大部分地区 08 时起报的误差和 20 时起报的误差差异不大。

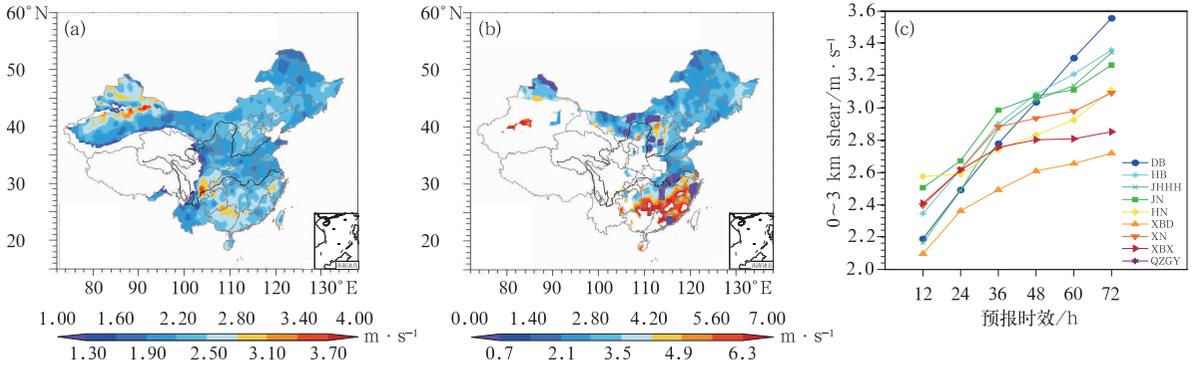


图4 0~3 km shear MAE 分布

(a)8—10月12 h 预报时效 MAE 分布, (b)≥13.5 m·s⁻¹ 的 MAE 分布, (c)不同区域、不同预报时效 MAE 演变

Fig. 4 Distribution of 0-3 km shear MAE for (a) 12 h forecast from August to October, (b) ≥13.5 m·s⁻¹ and (c) evolution of different areas and forecast valid time

对于0~6 km shear 的检验(图略),总体而言,8—10月,与0~3 km 风切变具有明显不同的分布特征,达到或超过3 m·s⁻¹ 的误差主要分布在我国南方和西部地区,其他地区误差多小于3 m·s⁻¹;从不同月份的检验来看,随着月份的演变,全国大部分地区(尤其是江淮黄淮地区)误差呈递减趋势,西南地区误差变化不大;不同阈值的检验结果表明,模式对东北、华北等地的误差局地性比较强,华北以南大部地区满足阈值条件的样本数非常少,因此,检验结果不具有代表性。不同区域的检验结果表明随着预报时效的延长,各地区的误差呈增加趋势,其中东北地区起始误差较小,但增长较快,青藏高原误差相对最小,增长最慢,但是其代表性值得商榷。从不同

起报时间来看,西南地区和华南地区的误差受起报时间的影响不大,而全国其他地区,尤其是江淮黄淮等地08时起报的误差略小于20时起报的误差。

表2给出了对于水汽、稳定度以及风切变条件共6个参数的平均误差和均方根误差检验结果,可见,对于对流层中低层的露点温度、K 指数以及垂直风切变,平均误差都比较小,且没有表现出较为一致的正或负偏差,也就是说系统性误差不明显。相对而言,均方根误差则比较大,说明这几个参数主要以非系统性的随机误差为主。LI 与其他参数表现不尽相同,其平均误差均为明显的负值,即预报值明显小于模式分析值,且平均误差与均方根误差基本相当,表明抬升指数以系统性误差为主。

表2 GRAPES_MESO V3.3 物理参数检验结果

Table 2 Verification of physical parameters for GRAPES_MESO V3.3

区域	T _{d850} /°C		T _{d500} /°C		LI/°C		K 指数/°C		0~3 km shear/ m·s ⁻¹		0~6 km shear/ m·s ⁻¹	
	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
东北	0.21	2.42	0.58	4.87	-3.38	4.76	0.19	5.15	-0.33	2.85	-0.28	3.31
华北	-0.11	2.96	0.28	5.25	-6.2	7.57	0.5	5.74	0.01	3.03	0.2	3.29
江淮黄淮	0.2	3.46	-0.44	4.41	-4.98	6.8	-0.04	6.17	0.04	2.81	0.43	3.2
江南	-0.08	2.69	0.02	4.18	-4.02	5.78	-0.03	5.32	-0.33	3.24	0.58	3.54
华南	-0.27	1.93	0.27	3.83	-3.62	5.26	-0.68	4.3	-0.52	3.27	0.31	3.58
西北东部	-0.44	2.92	0.13	4.95	-7.36	8.87	0.52	5.45	0.1	2.72	0.75	3.56
西南	-0.25	2.04	0.27	4.14	-5.47	7.43	-0.27	4.58	0.22	3.06	0.86	3.82
西北西部	—	—	0.22	4.97	-4.67	6.67	-1.12	5.49	0.23	3.14	0.4	3.83
青藏高原	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.4	2.91

3 主要天气过程检验

为了了解 GRAPES-MESO 对降水的预报性

能,对2013年7月1日至9月30日的降水预报进行了检验(图5),结果表明,模式对24 h 小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨降水预报的 TS 评分分别为0.584、0.289、0.167、0.074 和 0.026,48 h 各量级

的评分均略低于 24 h。可见,模式能够较好地预报各量级的降水。

为进一步检验模式对于强天气过程的预报能力,本文选取了 2013 年四川盆地强降水(过程时间分别为 6 月 18—22 日、6 月 29 日至 7 月 2 日和 7 月 7—12 日)、东北地区强降水(过程时间分别为 7 月 8—9 日、8 月 4—5 日和 8 月 15—17 日)、台风强降水(3 个影响台风分别为 1311 号台风尤特、1323 台风菲特和 1330 号台风海燕)以及华北雷暴大风和冰雹(过程时间分别为 7 月 31 日、8 月 4 日和 8 月 11 日午后至傍晚)共 12 次天气过程,对降水预报、主要影响系统、物理条件等进行检验,对部分过程的小时降水量和雷达回波等也进行了检验,从而揭示模式对于发生在一定区域的某种类型强天气过程的预报能力。结果表明,(1)模式对强降水具有一定的预报能力,但预报性能不够稳定,对于水汽、能量等物理条件一般较实况略偏强,对于高原东移的系统在强度和位置上存在一定偏差;(2)对于台风降水强度预报较好,但落区具有一定偏差,对于盛夏伴随西南季风的台风强降水预报偏差较大,这也是其他模式预报的不足之处;(3)模式能较好地反映华北风雹天气的环境场,对于雷达回波预报明显偏弱,不能较好地反映中尺度系统的发生发展及其演变过程。

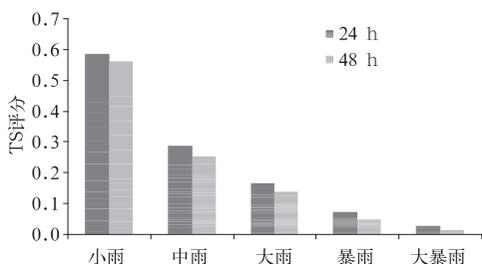


图 5 2013 年 7 月 1 日至 9 月 30 日 GRAPES_MESO 降水预报 TS 评分

Fig. 5 Threat score of rainfall forecast for GRAPES_MESO V3.3 from 1 July to 30 September 2013

下面以 1330 号台风海燕造成的强降雨以及华北一次雷暴大风和冰雹过程为例进行天气学检验分析。

3.1 1330 号台风海燕强降雨检验

1330 号台风海燕 2013 年 11 月 4 日在西北太平洋生成,“海燕”横穿菲律宾中部地区后,11 日 05 时在越南北部广宁省沿海登陆,登陆时最大风力达

13 级($38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),09 时进入我国广西区境内,10 时在广西北明县减弱为强热带风暴级,20 时在南宁市减弱为热带低压。“海燕”具有影响时间晚、强度高、风雨大等特点,是 1951 年以来 11 月后影响广西的热带气旋中风雨影响最大的热带气旋(赖芬芬等, 2014)。

从“海燕”进入广西境内之前的环流形势对比检验来看,11 月 11 日 08 时,高空 500 hPa 环流形势预报与实况基本一致(图 6a),副热带高压位置和强度与实况基本吻合,“海燕”位于中南半岛东北部,其中

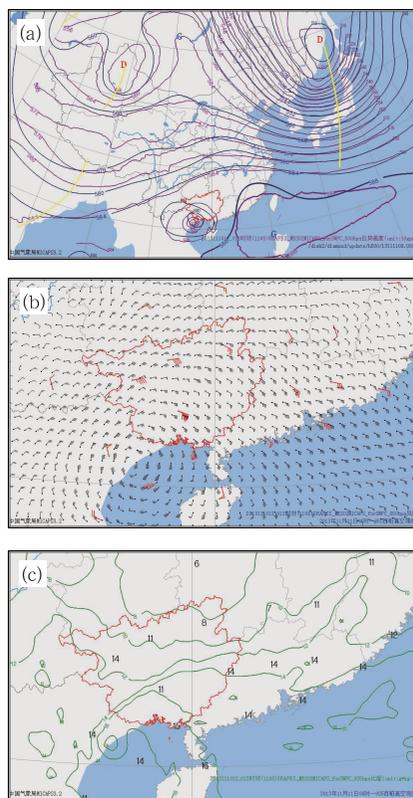


图 6 2013 年 11 月 10 日 20 时 12 h 预报检验 (a)500 hPa 高度场(蓝色等值线为预报员主观分析场,紫色为模式预报场),(b)850 hPa 风场(红色为实况观测,黑色为模式预报场),(c)925 hPa 比湿(数字为根据高空观测计算的实况,线条为模式预报场)(红色曲线为广西区边界线)

Fig. 6 Verification for 12 h forecast at 20:00 BT 10 November 2013

- (a) 500 hPa height (blue line: subjective analysis by forecaster, purple line: model forecast), (b) 850 hPa wind (red: observation, black: model forecast), (c) 925 hPa specific humidity (number: calculation from observation, line: model forecast) (red curve for boundary of Guangxi region)

心位置及强度与实况基本一致。从 850 hPa 风场预报来看(图 6b),低层环流中心与 500 hPa 中心基本重合,最大风速约为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,预报场略偏强,这也可能与实况观测较稀疏、且海上缺少观测有关。

此次强降水主要是台风本体降水造成的,因此,对流层中低层水汽的分布、输送及其辐合上升是做好降水预报的关键。从 11 日 08 时 925 hPa 比湿分布来看(图 6c),实况显示广西南部、西部、广东中南部比湿均达到或超过 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,预报场与实况总体分布相当,仅在广西西部和广东中部预报略偏弱。从水汽通量散度来看(图略),925 hPa 水汽辐合区主要位于广西大部 and 广东西南部,辐合中心位于广西南部,模式预报场与实况基本一致。850 hPa 的水汽分布及其辐合上升与 925 hPa 基本一致,模式都表现为较好的预报性能。

从 11 月 11 日 08 时至 12 日 07 时降雨量分布来看,大雨及以上量级降水主要分布在广西及湖南、江西等地,其中,广西中南部、广西西南部的部分地区达到大暴雨,最强降水达 221 mm。对比模式预报结果,可见强降水预报落区与实况基本一致,但

100 mm 以上的强降水落区略有偏差,同时强度比实况略偏强。模式对于 11 月华南出现的台风极端降水表现出很好的预报性能。对比 EC 和日本模式的降水预报,可见 EC 对此次过程预报也比较好,不足之处是漏报了台风倒槽中的暴雨区,对于广西、广东的强降水落区和强度略有偏差。日本预报则明显偏弱,对于广西大暴雨以上量级的降水基本没有预报出来(图略)(刘一,2014)。

在降水总量预报较为准确的前提下,选取强降水中心的 59238 站进一步分析了逐小时降水演变和雷达回波的分布。从逐小时降水演变(图 7a)可见,降水主要集中在 11 日 09—18 时,小时雨强以 20~30 mm 为主,从预报场可见,强降水主要时段较实况偏晚,小时雨强与实况基本相当。从 11 日 08 时雷达回波分布(图 7b 和 7c)来看,降水回波主要分布在广西境内,强度以 30~40 dBz 为主,局地超过 40 dBz,这与小时降水强度一般小于 30 mm 是一致的。对应的雷达回波预报场的形态与实况基本一致,但强度偏弱 5~10 dBz。在实际业务中,可以参考雷达回波分析预报降水的分布特征及其性质。

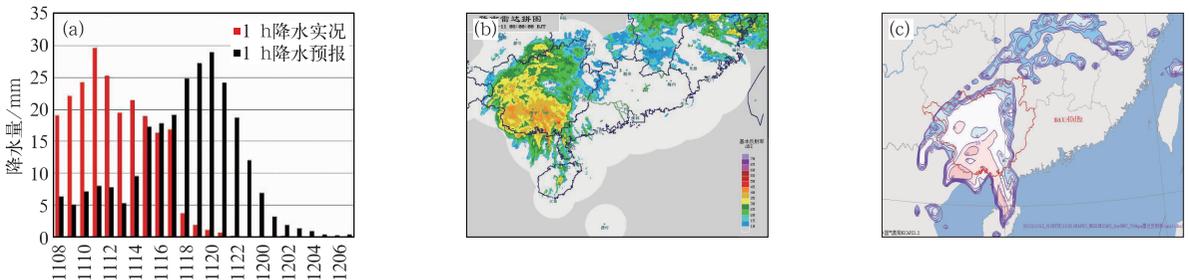


图7 2013年11月11日08至12日07时逐小时预报与实况对比(a),11日08时雷达回波实况(b)和10日20时12h预报雷达反射率预报(c)

Fig. 7 (a) Comparison of hourly precipitation between forecast and observation from 08:00 BT 11 to 07:00 BT 12 November, (b) radar reflectivity at 08:00 BT 11 November, (c) 12 h forecast radar reflectivity at 20:00 BT 10 November 2013

3.2 华北雷暴大风和冰雹过程检验

受高空冷涡影响,2013年7月31日午后到傍晚,华北大部出现了雷暴大风和冰雹天气过程,山西中北部、河北西北部等地出现8~10级雷暴大风,局地风力可达11级以上,局部地区并伴有冰雹,最大冰雹直径约40 mm。

从模式雷达回波预报场与实况的对比(图略)可见,逐小时雷达回波预报能较好地反映此次强对流过程的发生发展,但回波强度明显偏弱,且回波位置

偏北。

从主要影响系统的对比分析(图8)可见,模式较为准确地预报了高空冷涡及低层切变线的位置及其演变。从对流发展强盛阶段的高低空影响系统配置来看,31日17时,蒙古国到河套地区为一高空冷温度槽,配合低层850 hPa为从河套地区向东北方向伸展的温度脊,这种对流层中低层的温度配置加大了大气的不稳定层结,有利于不稳定能量的累积,为强对流天气的发生发展提供了有利条件。同时,500 hPa上河北西北部为一明显的相对湿度小值

区,上干、下湿的对流性不稳定层结有利于形成雷暴大风(朱乾根等,2007)。与 20 时实况的对比分析表明,冷槽、暖脊位置略偏北,这与雷达回波预报位置偏北是一致的。可见,模式能够较好地反映盛夏华北雷暴大风和冰雹天气发生发展的环境条件,并且由于其高时空分辨率的特点,能为实际业务提供有益的参考。

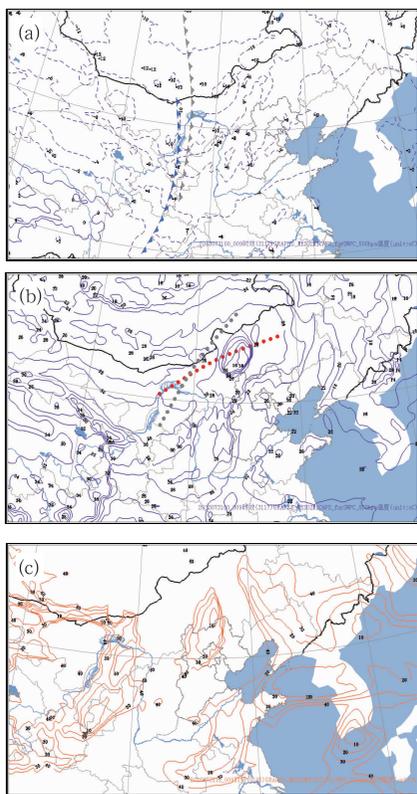


图 8 2013 年 7 月 31 日 08 时 9 h 预报与 20 时实况对比

(a)500 hPa 温度场和冷槽(蓝色为实况,灰色为预报), (b)850 hPa 温度场和暖脊(红色为实况,灰色为预报), (c)500 hPa 相对湿度

Fig. 8 Comparison of 9 h forecast at 08:00 BT

and observation at 20:00 BT 31 July 2013

(a) 500 hPa temperature and cold trough

(blue: observation, gray: model forecast),

(b) 850 hPa temperature and warm ridge

(red: observation, gray: model forecast)

and (c) 500 hPa relative humidity

强天气过程的天气学检验分析,初步得到以下结论:

(1) 2013 年 8—10 月,水汽、稳定度以及垂直风切变三类物理条件中,除了抬升指数外,其他物理参数平均误差都比较小,模式对于强对流天气预报关注的、达到一定阈值条件的物理参数的预报效果较好,对业务具有较好的参考价值。

(2) 8—10 月期间,预报准确率随着季节的转化呈现出明显不同的特征。

(3) 模式对于东北和四川盆地强降水、台风强降水以及华北雷暴大风和冰雹等强天气过程具有一定的预报能力,但在模式的稳定性、复杂地形条件下的强降水、高原系统的东移演变以及物理条件的准确性等方面还有待于进一步提高。

(4) 模式提供的小时降水量、雷达回波等高时空分辨率的产品能够在一定程度上较好地描述过程的发生发展,在过程预报较为准确的前提下,能够为业务提供更为精细的参考。

本文仅针对升级后的 GRAPES_MESO V3.3 进行了初步检验,还有很多不完善之处,如受资料限制,仅针对 8—10 月的模式产品进行了检验,其代表性有待商榷;对于定量化检验,考虑模式分辨率的特征,使用模式零场进行检验,而没有对零场本身可能存在的误差进行全面的分析;在强天气过程检验方面,对天气系统及其三维结构的分析方面还比较粗浅等。今后还有待于进行更为全面细致的检验,从而为实际业务提供模式应用方面的参考。

致谢:本文得到中国气象局数值预报中心陈德辉研究员的悉心指导,在此深表感谢!

参考文献

- 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究. 科学通报, 53(20): 2396-2407.
- 陈静,佟华,徐枝芳,等. 2010. NMC 强天模式诊断变量和概率预报产品及初步应用检验. 气象, 36(12): 41-49.
- 陈敏,王迎春,仲跻芹,等. 2003. 北京地区中尺度数值业务预报的客观检验. 应用气象学报, 14(5): 522-532.
- 邓国,龚建东,邓莲堂,等. 2010. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. 应用气象学报, 21(5): 513-523.
- 樊李苗,俞小鼎. 2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 32(1): 156-165.
- 衡志伟,宇如聪,傅云飞,等. 2011. 基于 TMI 产品资料对数值模式水凝物模拟能力的检验分析. 大气科学, 35(3): 506-518.
- 姜永强,张维桓,周祖刚,等. 2002. 中尺度暴雨模式 MRM1 简介及预报效果检验. 解放军理工大学学报, 3(1): 1-7.

4 结论与讨论

通过上述 GRAPES_MESO V3.3 模式产品对

- 孔荣,王建捷,梁丰,等. 2010. 尺度分解技术在定量降水临近预报检验中的应用. *应用气象学报*, 21(5):535-544.
- 雷蕾,孙继松,魏东. 2011. 利用探空资料甄别夏季强对流的天气类别. *气象*, 37(2):136-141.
- 李勇,王雨. 2008. 2007 年夏季 GRAPESM ESO 15 及 30 km 模式对比检验. *气象*, 34(10):81-89.
- 赖芬芬,何立富. 2014. 2013 年 11 月大气环流和天气分析. *气象*, 40(2):253-260.
- 刘凑华,牛若芸. 2013. 基于目标的降水检验方法及应用. *气象*, 39(6):681-690.
- 刘还珠,张绍晴. 1992. 第四讲中期数值预报的统计检验分析. *气象*, 18(9):50-54.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京:气象出版社,82.
- 刘一. 2014. 2013 年 9—11 月 T639、ECMWF 及日本模式中中期预报性能检验. *气象*, 40(2):247-252.
- 彭新东,常燕,王式功. 2010. GRAPES 模式对 2008 年两次强降水过程的数值预报检验. *高原气象*, 29(2):321-330.
- 彭新东,李兴良. 2010. 多尺度大气数值预报的技术进展. *应用气象学报*, 21(2):129-138.
- 王晨稀,姚建群,梁旭东. 2007. 上海区域降水集合预报系统的建立与运行结果的检验. *应用气象学报*, 18(2):173-180.
- 王雨. 2006. 2004 年主汛期各数值预报模式定量降水预报评估. *应用气象学报*, 17(3):316-324.
- 王雨,公颖,陈法敬,等. 2013. 区域业务模式 6h 降水预报检验方案比较. *应用气象学报*, 24(2):171-178.
- 王雨,李莉. 2010. GRAPES-MESO V3.0 模式预报效果检验. *应用气象学报*, 21(5):524-534.
- 王雨,闫之辉. 2007. 降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析. *气象*, 33(12):53-61.
- 许美玲,孙绩华. 2002. MM5 中尺度非静力模式对云南省降水预报检验. *气象*, 28(12):24-26.
- 徐双柱,张兵,湛伟. 2007. GRAPES 模式对长江流域天气预报的检验分析. *气象*, 33(11):66-71.
- 叶成志,欧阳里程,李象玉,等. 2006. GRAPES 中尺度模式对 2005 年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析. *热带气象学报*, 22(4):393-399.
- 尤凤春,魏东,王雨. 2009. 北京奥运期间多模式降水检验及集成试验. *气象*, 35(11):3-8.
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等. 2014. 2012 年早春河南一次高架雷暴天气成因分析. *气象*, 40(1):48-58.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,449.
- Aaron J, Wang Xuguang. 2013. Objective-based evaluation of a storm-scale ensemble during the 2009 NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment. *Mon Wea Rev*, 141:1079-1098.
- Christopher D, Carr F. 2000. Summary of the 1998 workshop on mesoscale model verification. *Bull Amer Meteor Soc*, 81:809-819.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Wea Rev*, 124:2322-2339.
- John S K, Paul R J, Steven J W, et al. 2003. Collaboration between forecasters and research scientists at the NSSL and SPC, 12: 1797-1806.
- Kain J S, Baldwin M E, Janish P R, et al. 2003. Subjective verification of numerical models as a component of a broader interaction between research and operations. *Wea Forecasting*, 18: 847-860.