

重庆数值预报后处理系统技术研究^①

高 松, 杜 钦, 吴 钲, 赵 磊, 高阳华

重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

摘要: 重庆风暴尺度快速更新同化预报系统(CQSSRAFS)是基于 ARPS 和 WRF 建立的数值预报业务系统. 本研究首先对该系统进行了简要介绍, 然后对其后处理模块的构建与相关技术方法进行阐述, 以 2014 年两次区域暴雨过程为例, 给出 3 种后处理模块—wrfpost(基于 NCL)、arpsplot(基于 ARPS)和 wrf2micaps 的运行流程、各类预报产品, 同时, 对中尺度预报、快速更新同化预报和 micaps 格式的数值预报产品进行解释与说明. 中尺度预报中特别是降水、温湿场、风场以及 T-lnP 图相关预报产品对短期预报具有较好的指导意义; 快速更新同化预报中生成的降水、雷达反射率、风切变和强对流指数等相关预报产品对短临预报有较好的参考价值. 此外, wrf2micaps 后处理模块生成的 micaps 格式产品为预报员的使用提供了方便, 也为模式检验和其他产品的开发提供了基础. 3 种数值预报后处理模块的构建为重庆数值预报业务的运行提供了有力保障, 后期需对其进行更多的优化测试, 以提高运行效率和丰富适合本地的产品种类.

关 键 词: 数值预报; CQSSRAFS; 后处理模块

中图分类号: TP316

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)11-0125-10

传统的天气预报以建立在大气定性理论、数理统计与预报员经验基础上的半经验方法为主, 然而, 随着大气科学理论、数值计算方法以及高性能计算机技术的不断发展, 现代天气预报方法已发展到以大气科学理论为基础, 综合现代科学技术的最新成果, 通过高性能计算平台的模拟计算得到预报结果的水平. 美国气象界联合研发了新一代非静力平衡、高分辨率、科研和业务预报统一的中尺度数值预报模式 WRF^[1], 其重点是解决 1~10 km, 60 h 时效预报问题, 目前已被广泛用于中小尺度风暴的分析和预报、台风的预报以及区域气候等领域. 国外很多学者利用 WRF 模式开展了数值模拟试验^[2-6], 结果表明: WRF 模式在天气要素预报(降水、温度、相对湿度等)、强对流天气系统预报(短时强降水、雷暴、大风、冰雹等)、陆面模式试验等方面均具有较好的性能, 同时该模式能嵌套耦合大气化学模块, 具有较好的空气质量预报能力^[7]. 此外, 国内许多专家也利用 WRF 模式对一些强降水过程进行高分辨率数值模拟, 并对暴雨的触发机制和中、小尺度对流系统三维结构的变化进行了详细的分析^[8-11], 也有部分学者结合多种常规资料对致洪暴雨对流域水文条件的影响和暴雨量推算进行了细致的探讨^[12-13].

国内一些省级气象部门已针对 WRF 模式开展了业务化试验和研究^[14-18], 建立了相应的区域数值预报系统, 但从目前情况来看, 对该模式的本地化解释与应用工作开展仍然较少. 重庆市位于青藏高原东部, 东亚季风气候突出, 受盆地效应和高原大地形共同影响, 中、小尺度灾害性天气频发, 局地性、突发性强, 常常造成城市洪涝、地质滑坡、房屋倒塌等自然灾害, 对人民的生命财产安全构成了严重威胁. 依靠传统

① 收稿日期: 2018-04-14

基金项目: 重庆市气象局业务技术攻关重点/团队-数值预报应用技术团队项目(YWGGTD-201715); 重庆市气象局重点建设项目(2012-2015); 重庆市气象局青年基金项目(QNJJ-201702).

作者简介: 高 松(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事数值天气预报研究.

预报方法,应用常规资料作天气分析显然已不能准确预报未来的天气变化,因此,应用和发展数值模式,建立适合本地天气、气候特点的数值预报系统是解决中、小尺度灾害性天气定点、定时、定量预报的重要途径.2012年9月,重庆市气象局与美国俄克拉荷马大学风暴分析与预测中心(CAPS)、中国科学院重庆绿色智能技术研究院(CIGIT)开展合作,基于 ARPS 和 WRF 模式建立了重庆风暴尺度快速更新同化预报系统(CQSSRAFS),同时,在局内的 SGI 超算节点上实现了该系统的中尺度数值预报部分的移植,该系统称为重庆中尺度数值预报系统(CQMFS).该系统的设置和功能以适应市气象台的业务需求为特点,重点解决精细化预报问题.根据不同模式后处理软件的特点,提供不同分辨率、不同格式的数值预报产品,为气象台的业务预报提供有力的参考依据.为此,本文旨在结合重庆市气象局的实际情况,介绍数值预报后处理系统相关的技术研究方法.

1 风暴尺度快速更新同化预报系统简介

Linux 一直是高性能计算机的主流操作系统,CQSSRAFS 的编译、运行皆在 CIGIT 提供的曙光大型集群系统中进行.该集群系统有 48 个计算节点,每个节点有两路 AMD Opteron6172 12 核处理器(每个节点有 24 个 CPU 核)和 64 G 内存(每个核 2 G 内存),总共计算能力为 75Tflops.该系统的中尺度预报每天启动 2 次(08,20 时),背景场采用分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的 GFS 资料,预报时效为 96h,ARPS (V5.3.2),WRF-ARW(V3.3.1)分别为资料同化和预报模块.模式区域设置主要包括:中心位置为 ($34.5^{\circ}\text{N},104.5^{\circ}\text{E}$),水平分辨率分别为 27/9/3 km,格点数为 $200\times 160,288\times 216,480\times 360$,垂直方向为 51 层(图 1).由表 1 可知,采用的物理过程主要包括:WSM6 微物理方案^[19]、BMJ 积云参数化方案、MYJ 边界层方案、Noah 陆面过程方案、RRTM 长波辐射、Goddard 短波辐射方案.3 km 快速更新同化预报以中尺度预报场为背景场,每天 08,11,14,17,20,23,02,05 时起报,预报时效为 24 h,使用 New Thompson 微物理方案,不使用积云参数化.中尺度预报(27/9/3 km)和 3 km 快速更新同化预报的具体流程如图 2 所示.数值模式产生的数据包括 wrfout 和 data2d(二维)数据,可通过 wrf-post(基于 NCL)、arpsplot(基于 ARPS)和 wrf2micaps 3 种后处理模块处理出图和数据,得到相应的数值预报产品,供预报员参考使用和气象服务产品的再开发.下面将具体介绍以上 3 种后处理模块的构建与相关技术方法.

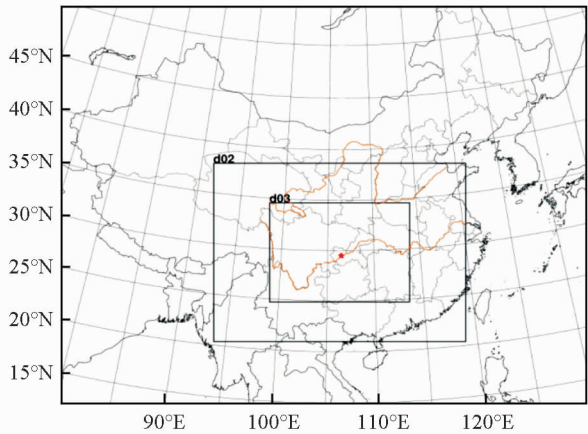


图 1 CQSSRAFS 系统预报嵌套区域图

表 1 CQSSRAFS 系统的物理参数设置

	27 km	9 km	3 km	3 km 同化区域
微物理方案	WSM6	WSM6	WSM6	New Thompson
长波辐射过程	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM
短波辐射过程	Goddard	Goddard	Goddard	Goddard
近地面层过程	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面过程	Noah	Noah	Noah	Noah
边界层过程	MYJ	MYJ	MYJ	MYJ
积云参数化	BMJ	BMJ	无	无

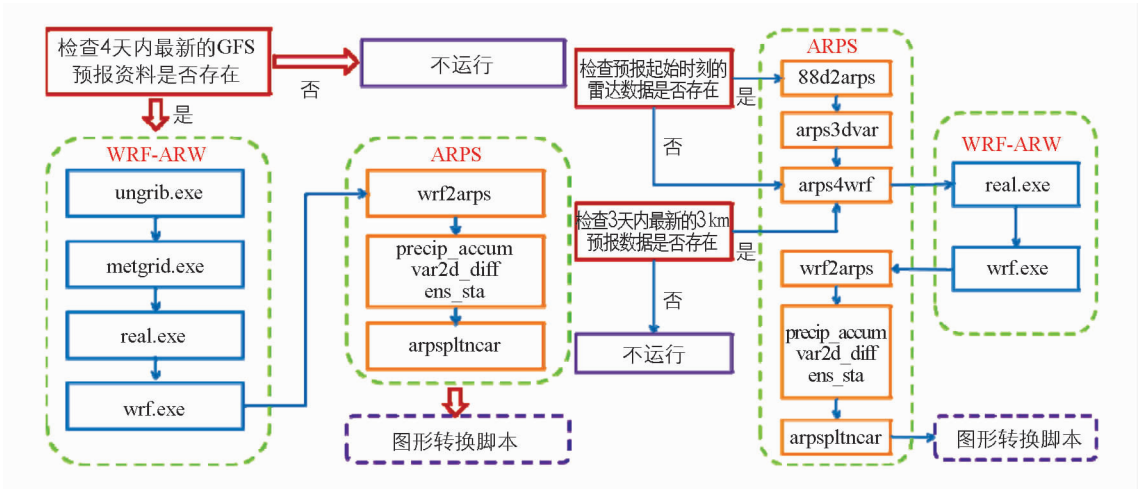


图 2 27/9/3 km 中尺度(左)和 3 km 风暴尺度(右)预报流程图

2 数值预报后处理系统的开发与研究

2.1 wrfpost 后处理模块的构建

要运用海量的数值模式数据对未来天气变化作出精准预报，就必须要对模式数据进行分析、加工、绘图，即数值模式后处理。WRF 模式输出资料的格式为 NetCDF 格式，目前能够处理此类数据的工具主要包括：NCL(the NCAR Command Language), RIP4 (Read/Interpolate/Plot), ARWpost (GrADS), VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers), IDV(Integrated Data Viewer)等。其中，NCL 的优势在于能够支持处理多种格式的数据，例如：NetCDF 3/4, GRIB 1/2, HDF 4/5, ASCII, binary 等。其内置多种科学计算函数和诊断变量的开源脚本，处理出的图像种类繁多、精美漂亮。相比之下，RIP4 和 ARWpost 虽有各自的优势，但仅能处理 NetCDF 数据，并且需要进行数据转换才能处理出图像产品。因此，我们在局内曙光服务器上成功安装了 NCL 绘图工具包，并利用 Linux Shell 和 Fortran 编程构建了 wrfpost 后处理模块，为预报员提供了多种常规和非常规的数值预报产品。wrfpost 后处理模块的运行流程如图 3 所示，同时，表 2 给出了 27/3km 区域主要输出的图形产品。

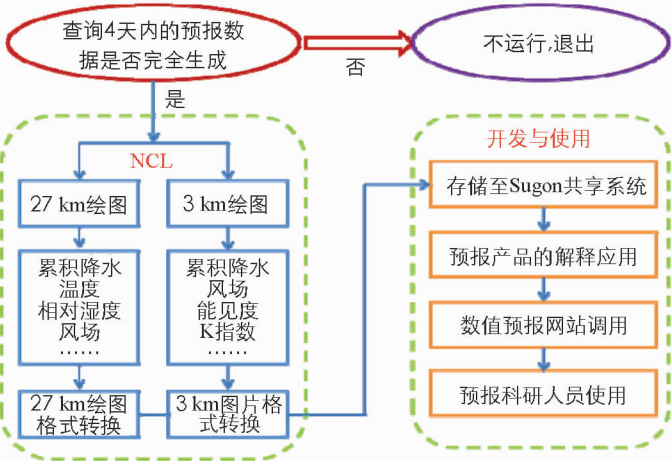


图 3 wrfpost 后处理模块运行流程图

表 2 CQMFS 系统的主要图形产品列表

累积降水(3,6,12,24 h)	自由对流高度(LFC)	24 h 变温	云水垂直剖面
站点时间变化图	Cape 值	T-lnP 图	雨水垂直剖面
温度和位势高度	Cin 值	假相当位温垂直剖面	雪水垂直剖面
相对湿度和风场	K 指数	边界层云底高度	冰水垂直剖面
地面风场	地面温度	能见度	软雹垂直剖面
抬升凝结高度(LCL)	3 h 变温	云顶亮温	云中水物质垂直剖面

数值模式产品生成之后, 如何对模式预报产品进行解释与应用至关重要. 以 2014 年 9 月 1 日发生在渝东北的一次暴雨过程为例, 此次过程降水集中, 持续时间较长, 造成的经济损失较为严重. 对比预报(图 4a~4c)和实况(图 4d)降水分布可知: CQMFS 对本次过程预报效果较好, 可提前 48h 预报此次降水, 且连续两天在渝东北预报出暴雨量级以上降水, 但降水范围和量级较实况偏小. 图 5a 为开县站的降水、相对湿度的时间演变图. 从图中可以看出, 相对湿度由 8 月 31 日 20 时开始逐渐增大, 90% 以上的高湿层达 500 hPa 左右, 垂直速度也较强. 此外, 由 9 月 1 日 14 时的单站探空(T-lnP)图也可看出, 不稳定层结深厚, 对流有效位能(CAPE)达到 2054 J/kg, 非常有利于触发对流性天气(图 5b).

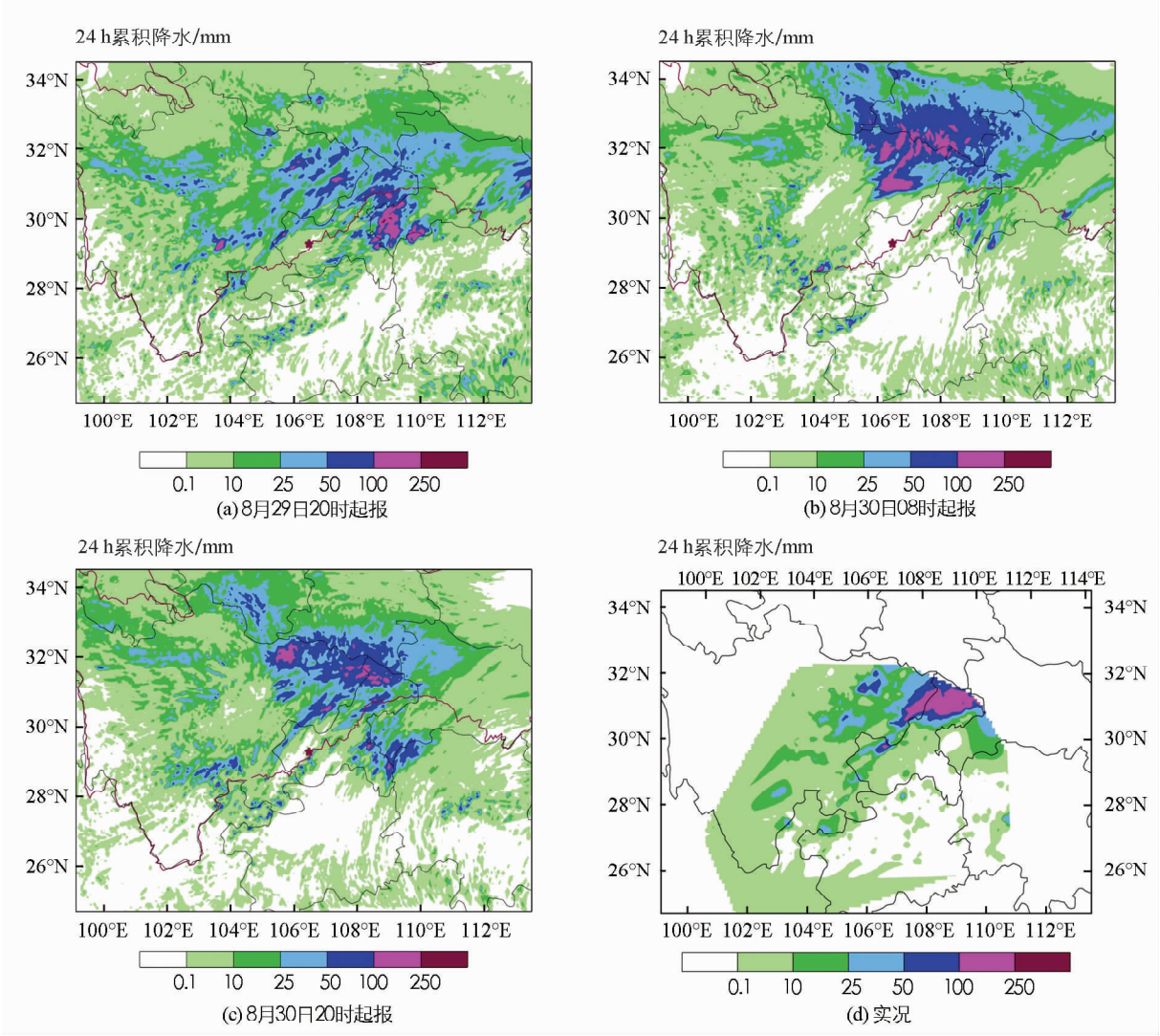


图 4 8 月 31 日 20 时—9 月 1 日 20 时的 24 h 累积降水

针对强天气预报方面, 根据 LYNN 等^[20] 的研究, 雷电潜势指数 LPI 是一种可以表征对流风暴产生和发展潜势的指数, 由模式输出的垂直速度和微物理变量进行体积分运算而得到, 该指数对短时预报有一定的参考意义. 根据多次个例分析试验, 该指数适合用于模式分辨率为 1~4 km. 计算公式如下:

$$LPI = \frac{1}{V} \iiint \epsilon \omega^2 dx dy dz$$
$$\epsilon = 2 (Q_s Q_l)^{0.5} / (Q_i + Q_l)$$

$$Q_i = q_g [((q_s q_g)^{0.5} / (q_s + q_g)) + ((q_l q_g)^{0.5} / (q_l + q_g))]$$

式中: V 为模式体积分; ω 为垂直速度, 单位: m/s; Q_l 为液态水总含量; q_s, q_g, q_i 分别为雪水、软雹、冰水混合比, 单位: kg/kg, 积分高度为 0℃ 到 -20℃ 层. 对此公式进行编程, 并将其运用到 NCL 绘图中. 由

图 6 可以看出, 雷电潜势指数的大值分布区与实况降水的位置较为一致. 可见, 该参数的应用对强对流天气的预判有一定的指示意义.

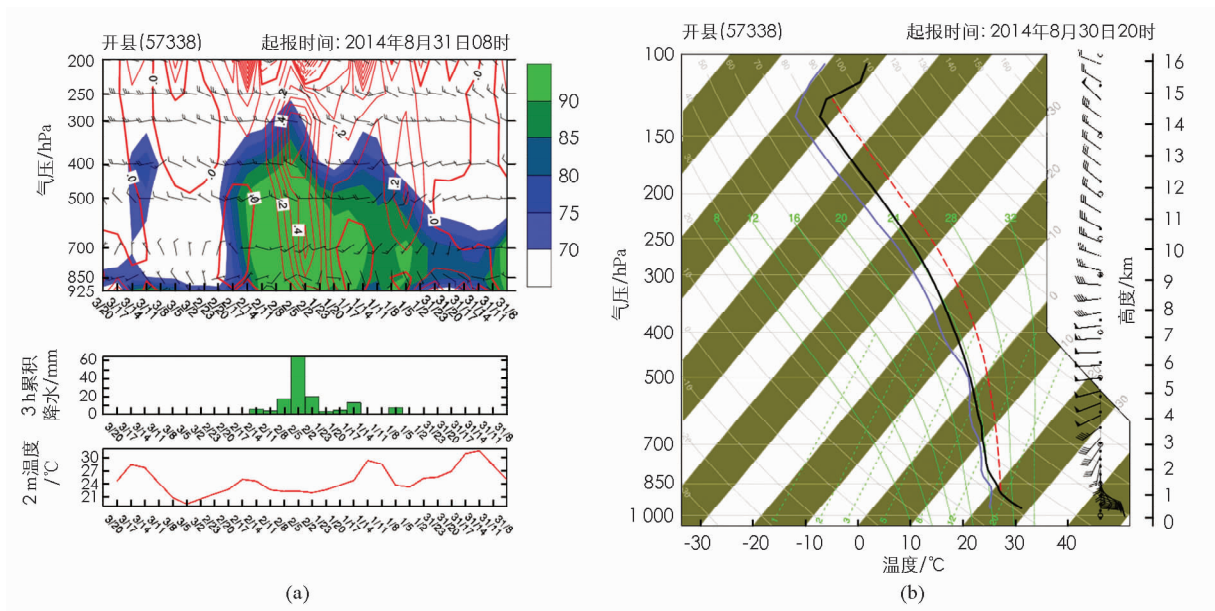


图 5 开县站的降水、温度和相对湿度时间演变(a)和 9 月 1 日 14 时的 T-lnP 分布图(b)

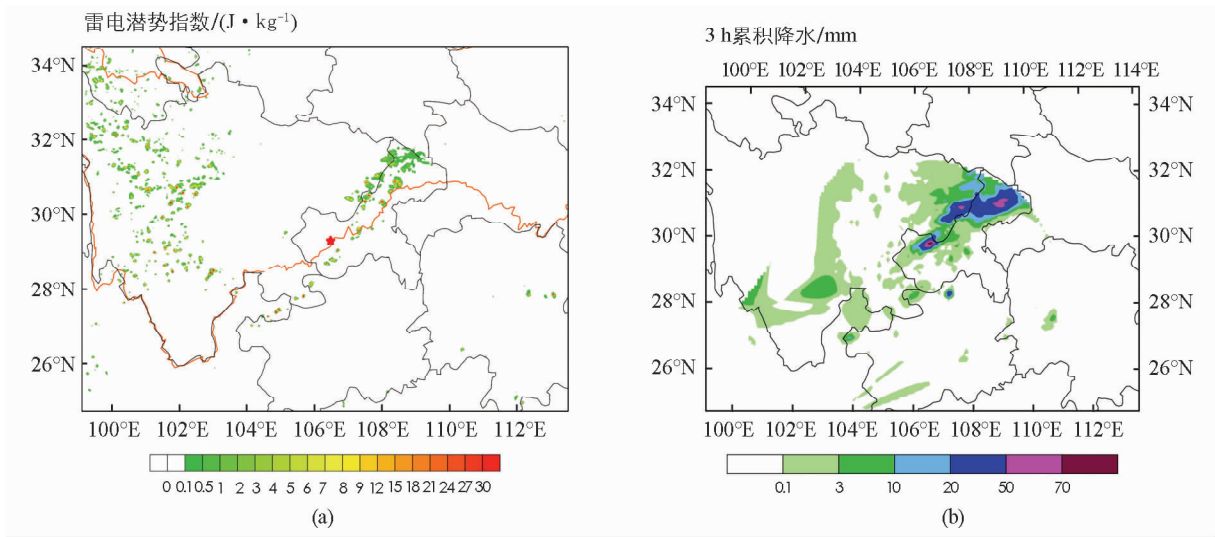


图 6 9 月 1 日 17 时的雷电潜势指数预报(a)和 3h 实况累积降水(b)

CQMFS 采用的微物理方案是 WSM6 方案, 其中包含云水、云冰、雨水、雪花、霰粒等 5 种云中水物质和水汽. 对云中各水物质过模式中心作剖面分析(图 7), 能为预报员提供云的发展高度和云中各水物质的垂直分布情况. 针对不同水物质的含量、高度、宽度以及温度的分布状况, 可大致分析出产生降水的云团性质, 有助于预报员判断对流系统的发展强度及可能造成的灾害性天气类型.

2.2 arpsplot 后处理模块的构建

该模块主要基于 ARPS 模式中自带的后处理模块进行数据处理和绘图. ARPS 模式中的可执行程序 wrf2arps_mpi 能够直接读取 WRF 的模式输出文件 wrfout, 其可以生成 data2d(二维)数据和用于 arpsplot 绘图的数据文件(ar *). 绘图的可执行程序为 arpspltnicar 和 arpspltnicar_mpi, 其能够直接读取 wrf2arps 生成的 ar * 文件, 绘图生成 gmeta 格式的文件, 然后通过 split-gmeta 脚本对 gmeta 格式的文件进行图片转换, 生成 gif 格式的图片 and 动画. 以 3 km 风暴尺度预报为例, 具体的运行流程如图 8 所示, 该系统输出的主要图形产品包括: 降水、2 m 温度、雷达反射率、强对流指数(CAPE、K 指数、SI 指数)等.

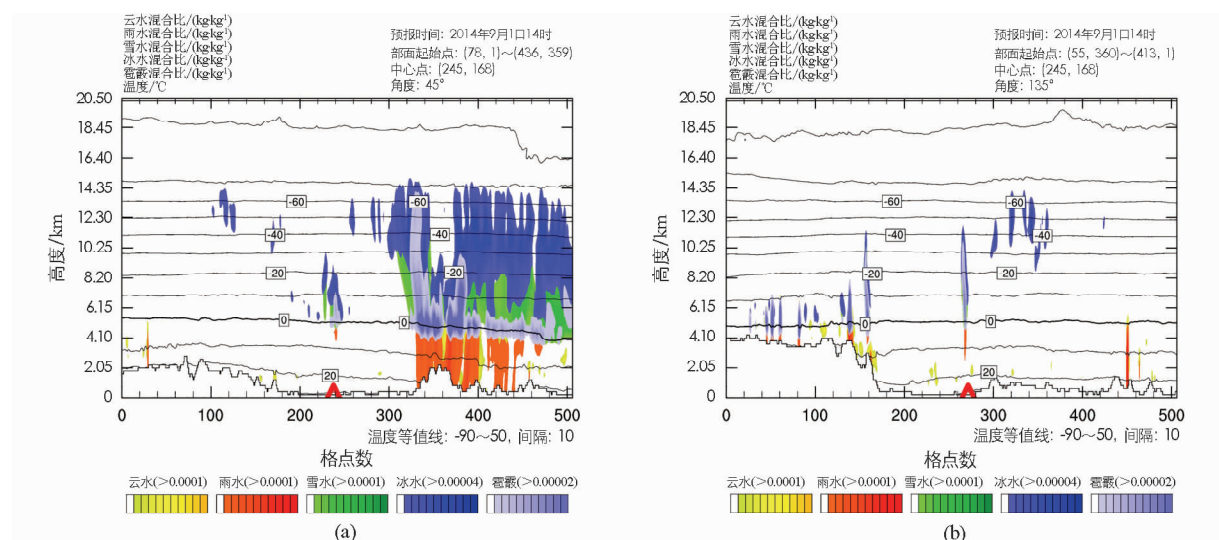


图 7 9 月 1 日 14 时的西南-东北和西北-东南向的云中水物质剖面分布(8 月 30 日 20 时起报)

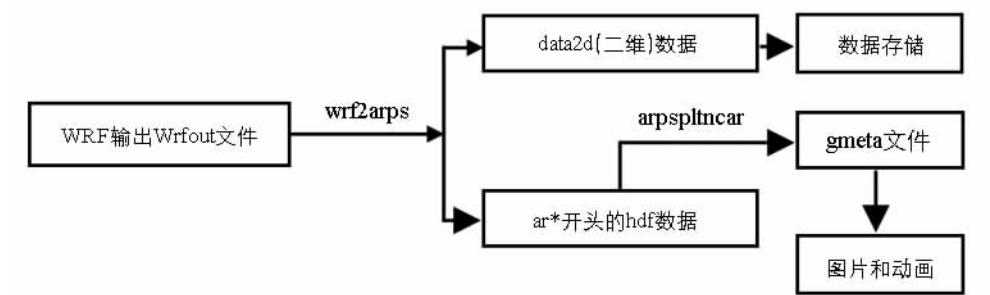


图 8 arpsplot 后处理模块运行流程图

由于 3 km 风暴尺度预报采用中尺度预报为背景场，并在预报初始时刻同化雷达观测资料，因此对于短时预报具有较好的参考价值. 仍以 2014 年 9 月 1 日的暴雨过程为例，由 9 月 1 日 14 时的实况与预报(1 日 11 时起报)3h 累积降水(图 9)可知，渝东北的雨带走势、落区和降水强度与实况基本一致，只是在强降水雨带略偏南，说明提前 3h 的快速更新同化预报对短时预报效果较好. 由 1 日 13 时的雷达最大组合反射率和地表上 0~1 km 的风切变分布来看(图 10a—b)，渝东北地区的最强回波值达 45 dBZ 以上，风场切变也较强，同时，700 hPa 的水汽非常充沛，配合近地面风场为较强的气旋式辐合，动力条件较好(图 10c—d). 从热力条件来看(图 10e—f)，渝东北地区的 K 指数值达 35 以上，假相当位温分布的梯度较大，冷暖空气交汇，有锋区活动存在. 可见，从动力、热力和水汽条件的预报来看，前面所述的数值预报产品对此次短时强降水的预报具有较好的参考意义. 此外，还有诸多数值预报产品可供参考使用，这里不再一一赘述.

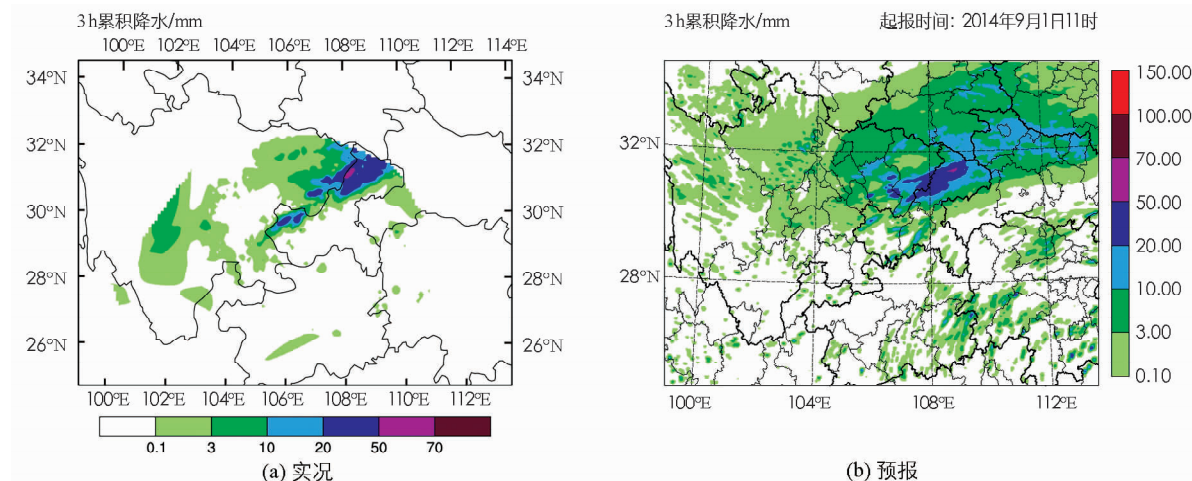


图 9 9 月 1 日 14 时 3h 累积降水图

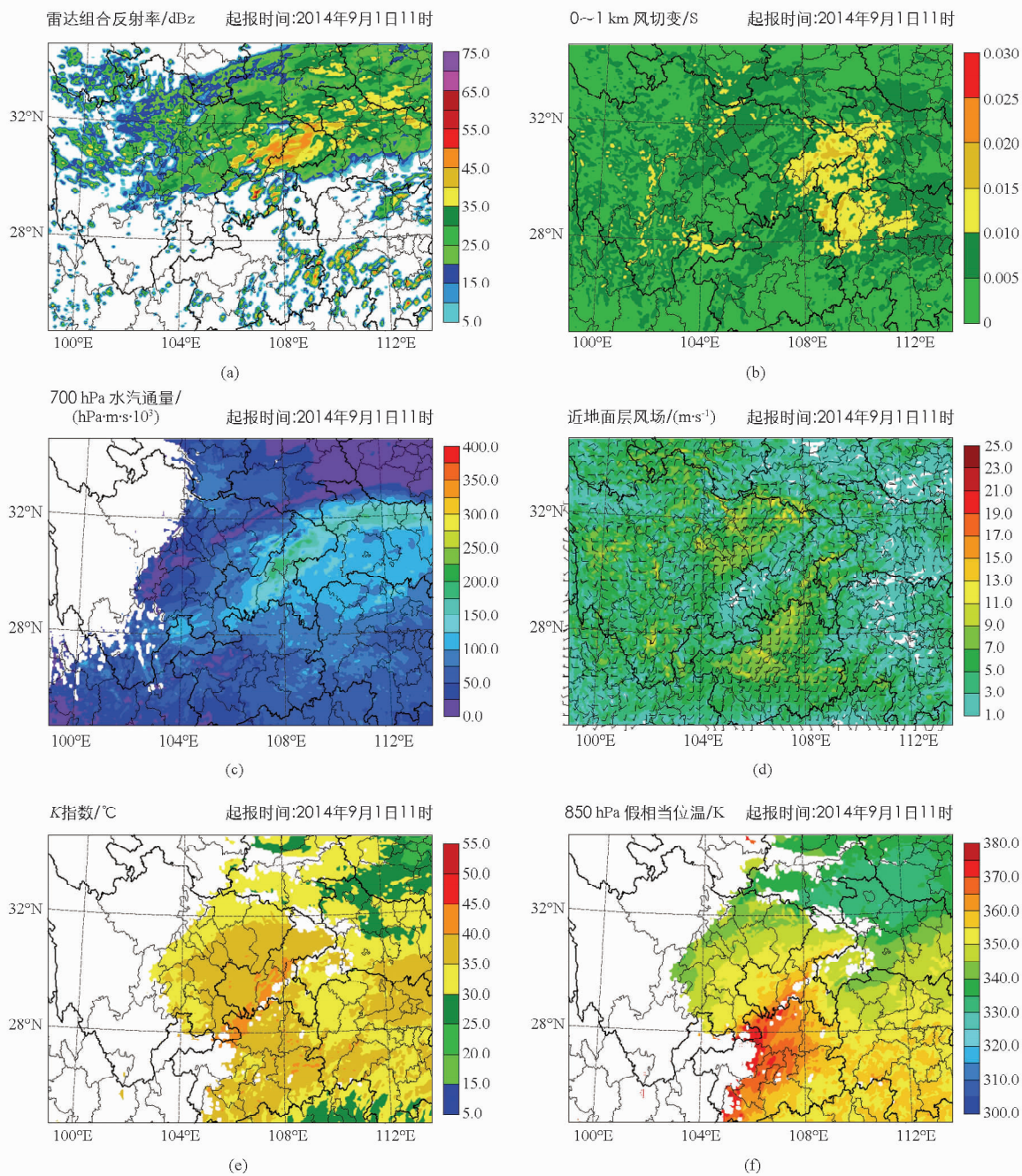


图 10 9 月 1 日 13 时的雷达最大组合反射率(a)、地表以上 0~1 km 的风切变(b)、700 hPa 水汽通量(c)、近地面层风场分布(d)、K 指数(e)和 850 hPa 假相当位温预报(f)

2.3 wrf2micaps 后处理模块的构建

由于多数气象观测资料可用 micaps 软件打开查看, 为方便预报员对比查看实况与预报, 我们将国家气象中心邓莲堂研发的 wrfcnv 后处理包本地化修改, 将 WRF 模式的输出数据转换成 micaps 格式, 建立起适用于 CQMFS 和 CQSSRAFS 系统的 wrf2micaps 后处理模块。经过不断开发和改进, 目前该后处理模块能稳定地业务运行, 主要提供 micaps 的 4 类格式(等值线)、11 类格式(流线)和 5 类格式预报产品, 具体运行流程如图 11 所示。其中, 4 类格式预报产品包括: 高度场、相对湿度场、温度场、露点温度、经向风、纬向风、垂直风、2 m 温度、2 m 相对湿度、10 m 纬向风、10 m 经向风、海平面气压、地表温度、土壤湿度、

土壤温度、水平能见度、1h 累积降水、3 h 累积降水、6 h 累积降水、12 h 累积降水、24 h 累积降水；11 类格式预报产品主要是风场和 10 m 风；5 类格式的预报产品有 T-lnP 探空曲线。类似的，以 2014 年 9 月 17 日暴雨过程为例，给出该过程 27 km 和 3 km 预报的部分 micaps 格式的图片产品，如图 12—13 所示。另外一些诊断产品，如涡度、散度、cape 值等均可以由后处理模块诊断输出，但根据预报员的使用习惯和数据传输效率未输出此类产品。此外，经过处理后的 micaps 格式的预报产品也方便预报人员进行数值预报检验和后期的再分析开发。

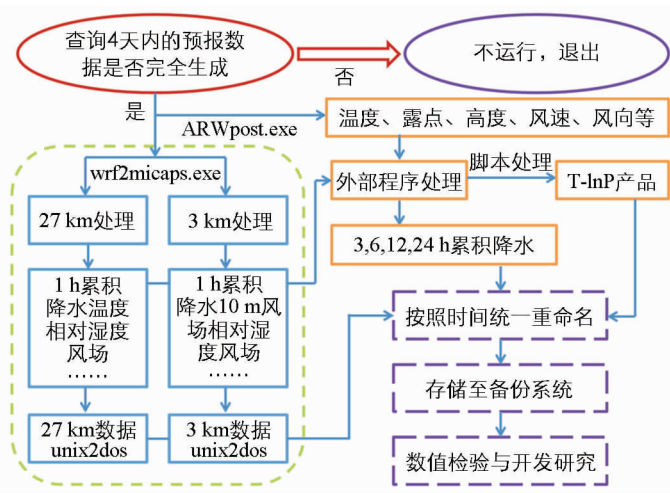
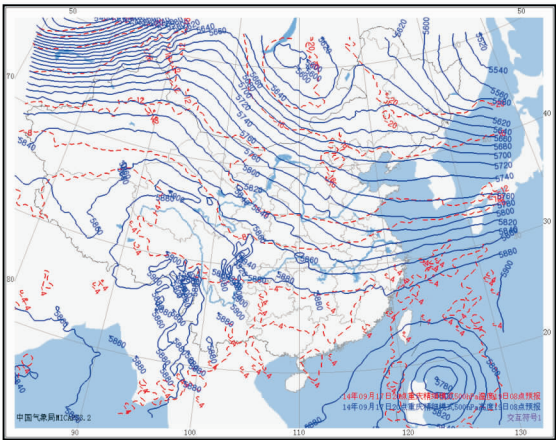
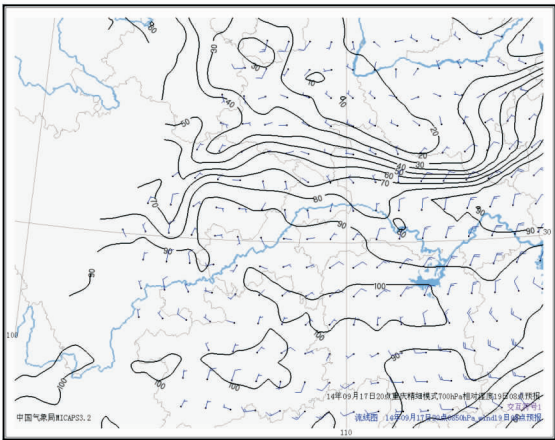


图 11 wrf2micaps 后处理模块运行流程图

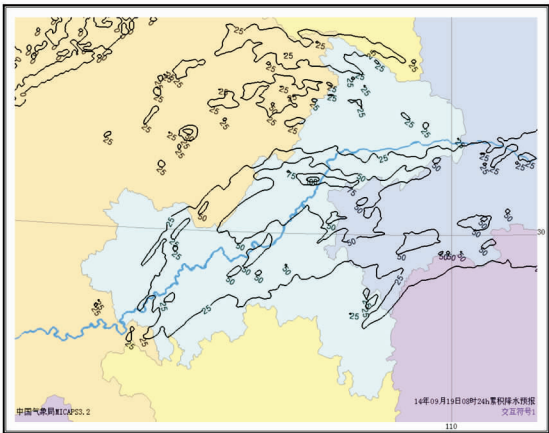


(a) 500 hPa 高度(蓝线)和温度场(红虚线)

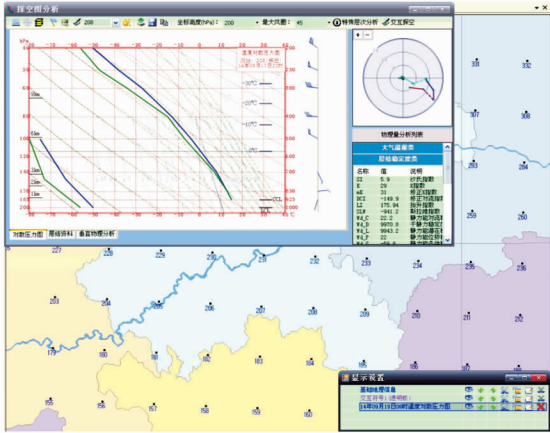


(b) 700 hPa 相对湿度和 850 hPa 风场

图 12 9 月 19 日 08 时的 27 km 区域预报(9 月 17 日 20 时起报)



(a) 24 h 累积降水



(b) 格点 T-lnP 图

图 13 9 月 19 日 08 时的 3 km 区域预报(9 月 17 日 20 时起报)

3 总结与讨论

本文首先介绍了重庆风暴尺度快速更新同化预报系统(CQSSRAFS)，包括运行环境、系统流程、参数

设置等. 然后着重对数值模式后处理模块的构建与相关技术方法进行阐述, 分别给出 3 种后处理模块—wrfpost(基于 NCL)、arpsplot(基于 ARPS)和 wrf2micaps 的运行流程、编译环境和预报产品种类, 同时, 以 2014 年 9 月 1 日和 9 月 17 日发生在重庆东北部和中部的两次区域性暴雨过程为例, 对中尺度数值预报、快速更新同化预报和 micaps 格式的数值预报产品进行解释说明. 从与观测降水的对比分析来看, 中尺度预报中特别是降水、温湿场、风场以及 T-lnP 图相关的预报产品对短期预报(1~2 d)具有一定的指导意义. 快速更新同化预报中由 arpsplot 后处理模块生成的降水、雷达回波、风切变和强对流指数相关的预报产品为短临预报提供了有效的参考依据. 此外, wrf2micaps 后处理模块的构建丰富了预报产品类型, 其生成的多类格式的 micaps 产品为预报员的使用提供了方便, 也为数值模式检验和其他服务产品的开发提供了基础. 目前, 3 种后处理模块均能稳定的业务运行, 但是在脚本运行过程中会出现耗时过长的问题, 后期需对耗时过多的过程(如图片格式转换、数据存储)进行分析, 并对运行脚本进行并行优化处理, 进一步提高后处理模块运行的效率.

参考文献:

- [1] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景 [J]. 气象, 2004, 30(12): 27—31.
- [2] BUKOVSKY M S, KAROLYD J. Precipitation Simulations Using WRF as a Nested Regional Climate Model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(10): 2152—2159.
- [3] FLESCH T K, REUTER G W. WRF Model Simulation of Two Alberta Flooding Events and the Impact of Topography [J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(2): 695—708.
- [4] KONG F Y, DROEGEMEIER K K, HICKMON N L. Multiresolution Ensemble Forecasts of an Observed Tornadoic Thunderstorm System. Part II: Storm-Scale Experiments [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(3): 759—782.
- [5] DEL GENIO A D, WU J B, CHEN Y H, et al. Characteristics of Mesoscale Organization in WRF Simulations of Convection during TWP-ICE [J]. Journal of Climate, 2012, 25(17): 5666—5688.
- [6] DEPPE A J, GALLUS W A J, TAKLE E S. A WRF Ensemble for Improved Wind Speed Forecasts at Turbine Height [J]. Weather and Forecasting, 2013, 28(1): 212—228.
- [7] ROGERS R E, DENG A J, STAUFFER D R. Application of the Weather Research and Forecasting Model for Air Quality Modeling in the San Francisco Bay Area [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(9): 1953—1973.
- [8] 高 松. 一次南方暴雨过程的中尺度对流系统发展演变机制研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [9] 刘 毅, 廖芷仪, 张亚萍, 等. 重庆地区“5.30”暴雨过程的数值模拟和诊断分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(9): 32—39.
- [10] 陈贵川, 吴 钲, 湛 芸, 等. 中低层增温对强降水中涡旋形成的敏感性研究 [J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1498—1511.
- [11] 张旭煜, 朱克云, 李 哲, 等. 特殊地形下对 WRF 模式积云参数化的研究应用 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 86—95.
- [12] 青吉铭, 何 军, 李 强. 一次致洪大暴雨对长江两个子流域的影响分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 105—113.
- [13] 郭 渠, 李 瑞, 孙 佳, 等. 重庆市主城区设计暴雨量推算探讨 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 170—177.
- [14] 王晓峰, 王 平, 张 蕾, 等. 上海“7·31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究 [J]. 高原气象, 2015, 34(1): 124—136.
- [15] 段 旭, 王 曼, 陈新梅, 等. 中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验 [J]. 气象, 2011, 37(1): 39—47.
- [16] 袁卫花, 赵玉娟, 孟冬梅, 等. 天津市中尺度数值预报业务系统的设计与实现 [J]. 气象科技, 2011, 39(6): 828—833.

- [17] 范水勇, 郭永润, 陈 敏, 等. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用 [J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1181—1188.
- [18] 张利红, 吕 爽, 何光碧. 西南区域中心数值预报系统 WRF_RUC 简介及业务流程优化 [J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(4): 31—34.
- [19] JANKOV I, GRASSO L D, SENGUPTA M, et al. An evaluation of Five ARW-WRF Microphysics Schemes using synthetic GOES imagery for an atmospheric river event affecting the California Coast [J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 618—633.
- [20] LYNN B, YAIR Y. Prediction of Lightning Flash Density with the WRF Model [J]. Advances in Geosciences, 2010, 23: 11—16.

Technical Research on Chongqing Numerical Forecast Post-Processing System

GAO Song, DU Qin,
WU Zheng, ZHAO Lei, GAO Yang-hua

Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China

Abstract: Chongqing Storm Scale Rapid Assimilation Forecast System (CQSSRAFS) is a numerical forecast system, based on ARPS and WRF. Firstly, the numerical system was briefly introduced, then we elaborated the construction of the subsequent post-processing module and relevant technical methods. Taking two regional rainstorms in 2014 for example, three kinds of post-processing module wrfpost (based on NCL), arpsplot (based on ARPS) and wrf2micaps were represented. Meanwhile, we illustrated the numerical prediction products generated from mesoscale forecast and rapid assimilation forecast sufficiently. Also, the micaps format products were shown. In the mesoscale forecast, especially precipitation, temperature and humidity field, wind field and T-lnP figure have good guidance significance for short-range forecast. It has good reference value for the forecast products such as precipitation, radar reflectivity, wind shear and severe convection index generated from the rapid assimilation forecast. Moreover, the micaps format products generated from wrf2micaps post-processing module is convenient for forecaster, and also provides basis for model evaluation and the development of other products. The construction of three numerical prediction post-processing modules provides a strong guarantee for the operation of Chongqing numerical forecast. In the later stage, more optimization tests should be carried out to improve the operation efficiency and enrich the forecast products.

Key words: numerical forecast; CQSSRAFS; post-processing module

责任编辑 包 颖