

辛渝,李曼,杜娟,等.新疆气象业务同化系统研发进展[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):133-143.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.01.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



新疆气象业务同化系统研发进展

辛渝¹,李曼¹,杜娟¹,刘军建¹,杨支中²,袁炳²,王云峰²

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 800002)

2.北京航天宏图信息技术股份有限公司,北京 100081)

摘要:概述了新疆近些年围绕资料同化开展的技术开发与针对新疆强降水天气过程所开展的多源资料同化应用试验和评估。FY2E 云导风、FY4A 温湿廓线和云导风、区域雷达资料的同化,以及晴空下高频段的 AMSU-A-NOAA-N15/18/N19、AMSU-A-NOAA-NB、ATMS_SNPP 资料的同化对业务模式预报均有正贡献。针对在业务中如何提高资料应用率以及当前发现但并未解决的物理不合理性问题,指出了新疆气象数值预报业务系统维护应有的常态化工作,以及业务技术开发和短临预报系统建设所缺少的其它科技支撑等。提出以资料同化为支点的科技研发方向,对提高新疆区域数值模式预报研发和应用具有一定参考意义。

关键词:业务同化系统研发;业务应用;新疆

中图分类号:P456.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)01-0133-11

新疆气象 9 km 水平分辨率的区域数值预报系统从考核期“准业务”试运行到 2015 年 12 月初,经过专家对系统的完整性与预报性能等多项指标考核评估,同意作为区域数值预报业务系统以来,数值预报研发大多停留在了 3 km 水平分辨率的业务运行流程的部署和物理参数化方案组合评估上。一部分基于过去的资料同化种类^[1,2]、业务解码软件和资料质控方式,对资料质控软件进行了升级。一部分按中国气象局每年的目标任务要求,推动着业务研发进程:(1)2016 年新疆在国内率先利用 FSO、OSSE、OSE 技术进行区域站遴选。(2)2017—2018 年开展 FY-4A 云导风和温湿廓线产品对新疆区域数值预报影响评估。(3)2017 年年底面向数值预报对象的新疆气象雷达专项中建设内容的确立。研发人员 2018 年联合 NCAR/MMM 卫星资料同化技术

专家,对卫星微波探测和图像资料在陆面上的同化技术研发开展了一些前瞻性工作,对雷达资料观测误差的初值定义以及基于个例对气候态的背景协方差误差的影响尺度也开展了一些探索性工作。同时,结合 WSM6 云微物理过程的 linearization 和相应的 adjoint 模式的研发,以及将其集成到 WRFDA-4DVAR 中所开展的检验,对 WRFDA-3DVAR 和 WRFDA-4DVAR 的技术特性与业务中的应用局限性等有了更新的认识。本文从新疆近年围绕资料同化所开展的多项技术研究中,摘取几个与当前业务应用结合比较紧密的技术开发进行应用效果评估,为今后通过更多的试验与更完备的论证手段,使新疆气象业务同化系统更加成熟奠定基础。

1 业务流程设计

先前的同化系统建立时,同化资料主要为来自 WMO GTS 系统稀疏的 in-situ 常规观测资料^[3]。在增加雷达资料径向风资料同化时,是按 10 km 分辨率进行平滑稀疏且雷达站附近 10 km 的资料也是剔除的,因此能够被同化的雷达径向风资料也是较少的。系统采取了简单的 1 日两次冷启、两次暖启的循

收稿日期:2019-04-11;修回日期:2020-05-24

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(IDM 2020005);中央级公益性科研院所基本业务费(IDM 2018010)

作者简介:辛渝(1969—),女,正高级工程师,主要从事数值模式研发、气候资源开发利用和气候可行性论证研究。E-mail: learnerxy@163.com

环方式,常规观测资料与雷达径向风资料是一次性进入同化系统,没有调整极小化过程中的背景协方差误差和影响尺度及对预报初值场的平衡性影响。对雷达资料同化前的质控技术和观测误差估计均缺乏定量评估。

而未来的业务同化系统,重在对各种资料进行同化前的质控方法或观测误差估计方法的业务实用性研发。对甚高分辨率预报系统的 spin-up 时间进行了初步评估,建立了如图 1、2 所示的以雷达资料同化为核心的逐 3 h 循环更新同化的新业务系统布局方案。即前两次循环时间间隔 6 h,仅在 9 km 分辨率区域同化微波探测资料、云导风资料、FY-4A 温湿廓线资料、常规 GTS 资料,预报时长 6 h,将第 3 次起报时刻作为业务预报的起始时间,在高分辨率区域(3 km)增加雷达径向风与反射率因子的同化,之后采取逐 3 h 循环更新。

2 资料应用软件升级

2.1 升级了 gts_decoder 常规观测资料解码模块

针对 FSO 检测出的 GTS 常规观测中的 GEO-AMV(卫星云导风)、airep(飞机观测)和 SATEM(大气厚度)资料对数值预报均是负贡献的结论,对这些资料质量进行了分析。发现 GTS 中的 GEO-AMV 资料多来自日本卫星红外水汽图像的反演,定标位置远离新疆及其上游区域,导致预报区域反演的卫星云导风风速的精度以及测风点的高度偏差较大,影响同化效果是一方面原因,另一方面原因是这类资料未做面向数值预报对象的观测误差分析,还存在

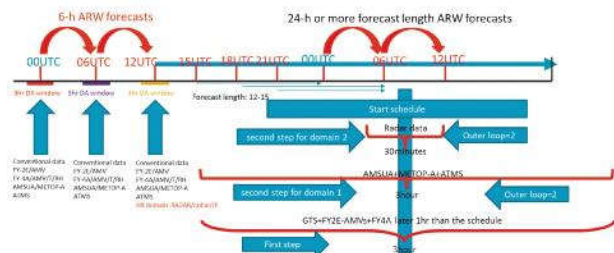


图 1 新同化系统暂定运行流程

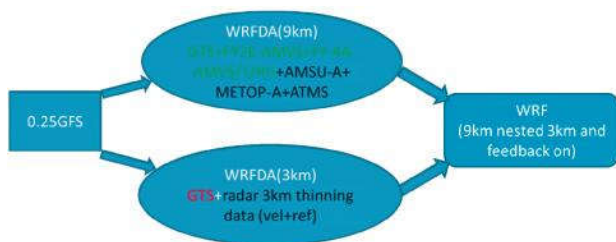


图 2 不同区域同化的资料类型与预报方式

有些航空公司上的飞机观测测风单位是英里的现象。自 2009 年以来,中国地面气象台站迁站颇多,观测地理信息也确有必要更新,2017 年对解码软件进行了升级。升级后的解码程序剔除了 GTS 中的 GEO-AMV 和 SATEM 资料,将飞机报文中的单位进行了一致性更换。虽然自 2019 年 11 月起,这类格式数据的下发已经退出历史舞台,改由从 CIMISS 数据库获取,但是对历史回算和研究还是有价值的。

2.2 雷达径向风资料的质控算法升级

在过去对径向速度所做的去杂点、中滤波平滑、去折叠、用谱宽进行质控等常用方法基础上^[3-7],采用“局地标准偏差”法对一个体扫再做最后一次质控。局地标准偏差的计算,暂时以伊宁雷达站的信号处理器指标为例,以 1.5°仰角为基准,仰角 5.4°以下,按每 2 km 范围内的值计算。然后根据标准偏差的 PDF 分布中的各峰值“中心值”确定信号与噪音,同时去除了边界层内 0.5 m/s 以下的晴空散射回波。按 Keeler and Passarelli^[8]的方法重新估算了径向风和反射率资料的观测误差(用方差表示),以此作为观测误差的最小阈值参考。

对一个小谱宽、高信噪比的接收器而言,在忽略噪音功率假设下,反射率平均功率(P_r)的方差估计可近似用式(1)表示,径向风速(V_r)方差可近似用式(2)表示:

$$\text{Var}(P_r) = P_s^2 / M_i, \quad (1)$$

$$\text{Var}(v_r) = \frac{\lambda W}{8(\pi)^{\frac{1}{2}}} / MT_s. \quad (2)$$

式(1)~(2)中, P_s 代表反射率的信号功率, λ 为波长, W 为谱宽, T_s 为脉冲重复周期, M 为停留时间的样本总数。 M_i 是独立的信号样本数。对一个满足平方律和小谱宽的探测器而言, M_i 按(3)式计算:

$$M_i = 4\pi^{\frac{1}{2}} W T_d / \lambda. \quad (3)$$

鉴于需要考虑观测的代表性误差,在式(2)估算的径向风观测误差的基础上,预定义值比(2)式略大 0.3 m/s。而反射率因子的观测误差则在式(1)基础上,还需通过个例试验进一步放大调整。

3 雷达资料同化策略

3.1 增加雷达反射率因子的同化,且同化技术不同

老系统在粗细分辨率嵌套区域中仅同化雷达资料径向风,资料的稀疏距离一致。新系统在高分辨率中增加了反射率因子的同化,资料暂时按 3 km 水平距离进行稀疏,增加了 cloud 与 w 控制变量,采取

两次 **outer-loop**。鉴于反射率因子在转换成水物质及水汽廓线所带来的不确定性较大, 特别是有强对流天气发生时, 云中的雪花、冰/雹粒子、霰粒子在融化层融化时, 会使水汽的转换误差更大。再次, 距离雷达越远, 仰角越高, 径向风和反射率因子探测的误差也会越大^[7], 因此选择了 5.4° 以下低仰角资料进行同化, 近似按水平风对待。

3.2 雷达探测“非降水区”与 **var_scaling** 和 **length_scaling** 的确定

基于上述同化流程和同化策略, 用雷达资料对 2016 年 6 月 16—19 日发生在新疆的对流天气的雨带预报强度和持续期预报能力进行了性能检验。开展的组合试验有: (1) 鉴于 NMC 方法计算模式背景场误差协方差的时间间隔是 12 h, 开展调整径向风和反射率因子同化时的 **var_scaling** 和 **length_scaling** 试验。(2) 开展云内反射率因子同化的“非降水回波阈值”定义和观测误差的确定对雨带预报强度和持续期的多次试验, 并以此更新了雷达前处理软件中的反射率因子的观测误差定义 (10 dBZ), 比估算值明显偏大。同时, 为保障与 **wrfda** 内部对无降水区定义值的一致性, 更新了相应的输入输出接口。

4 探空湿度资料观测误差重置

结合本地 **FSO** 试验对探空湿度不同高度资料对预报的影响评估, 以及 **ECMWF** 对不同类型探空湿度资料的不确定性评估^[9], 依然通过对上述个例试验的同化诊断评估, 重置了探空湿度资料的观测误差, 不再使用 **obsproc** 模块自带的观测误差定义。重置后, 高层湿度资料的 **O-B** 已呈正态分布。

5 新技术的引进、研发与应用

5.1 有约束的云导风高度变分偏差的应用

卫星云导风, 国际上通常称为大气运动矢量 (**Atmosphere Motive Vector**, 简称 **AMV**, 下同), 国内通常称为云导风、云迹风或导风。卫星云导风最显著的问题是在反演示踪物时的定高不确定性, 特别是对半透明云(薄卷云)的高度指定比较困难, 需要根据数值预报场的温度和水汽垂直廓线, 计算来自不同高度密实云的辐射曲线才能得到。当数值预报场存在较大误差时, 根据数值预报计算得到的密实云辐射值与卫星实际观测到的辐射不匹配, 此时计算得到的云导风高度就不准确。这是目前云导风产品定高存在误差的主要来源之一。为此各业务中心在云导风资料同化前, 均要根据反演时的误差来源及

其偏差特征进行重新定高^[10-13]。目前, 新疆气象数值预报业务同化系统对不同卫星反演的导风资料高度重定义的技术, 参考的是中国气象局研发的 **GRAPES** 同化系统在同化云导风前的高度偏差一维变分偏差订正算法^[13], 制作了相应的软件。与它不同的是, 新疆在构建目标函数时, 略去了反演模式对“风点”环境温度的估计误差。主要是因为, 资料分析时段(2018 年 6 月)反演的 **FY-4A** 云导风产品上负载的温度资料随高度的变化递减不合理。随着反演算法的升级, 此目标函数还需相应调整。

气压高度调整厚度的最大阈值则根据试验统计分析结果, 也以经验的方式确定。不采用目标函数最小值限制, 对气压调整幅度(调整厚度)从小到大逐渐放宽, 但控制在一定厚度内, 避免出现高低层遥匹配现象, 然后对所有被调整资料的气压调整量的 **RMSE** 进行考察。当最大允许厚度大于某一高度, 调整量的整体 **RMSE** 不再发生明显变化时, 则为经验统计的最大调整厚度及其调整量的 **RMSE**。以此作为实时业务中气压调整的约束范围。

5.2 云导风与 **FY-4A** 温湿廓线观测误差预定义方法

新疆以 **WRFDA** 作为业务同化系统。虽然该软件有同化云导风的观测算子, **FY-4A** 温湿廓线产品本身可直接当作常规探空观测资料进行同化, 但由于一直缺乏对我国卫星云导风资料在新疆及其上游区域的质量评估, 以及不了解 **FY-4A** 温湿廓线产品反演的质量, 故不能直接在业务中应用。比如, **WRFDA** 中云导风的观测误差采用的是美国空军业务系统对其它卫星云导风统计得到的, 不一定适合中国风云系列云导风。同理, 由卫星反演的温湿廓线产品的观测误差也不能直接用该软件内置的参数替代, 有必要采用合理的方法优化同化系统模块中的各项参数等基础性工作。

对于中国 **FY** 系列云导风和温湿廓线反演产品的观测误差估计, 在假设无系统性误差情况下, 参照一天两次的探空资料和 4 次高分辨率再分析资料, 也制作了观测误差统计软件, 能够提供这些反演产品与纬度和高度有关的偏差订正。其中, **FY-4A** 大气温度、湿度廓线与探空资料进行对比时, 在水平方向上限制了距离探空站距离的水平阈值 (16 km), 以探空站点为中心, 将其空间阈值范围内的 **FY-4A** 温度、湿度廓线所有像元点产品进行加权平均, 与对应站点做水平空间匹配。与再分析资料进行对比时, 水平方向上以 30 km 的距离为阈值。垂直方向上都

限定在距离探空最近的气压层上进行匹配。时间匹配的窗口均定在探空观测的 ± 30 min。FY系列云导风资料观测误差的统计原理与此相似,仅不同卫星反演产品像元取的图像块不同而已。

5.3 云导风资料质控技术不依赖于 WRFDA 的 obsproc 模块,质控后的数据接口直接接 WRFDA

obsproc 模块对云导风资料没有质控功能,稀疏化功能不完善。另外,由于 obsproc 模块对云导风资料的读入,需要的是导风点所在的绝对高度,内部通过简化的压高公式转换成气压“高度”,转换成 WRFDA 接口格式。而导风产品提供的是反演风点处的气压高度,无需单位转换。因此云导风资料不必依赖 obsproc 模块,直接输出成 WRFDA 接口格式,避免多次“高度换算”带来的误差。

同时,基于统计的 FY-4A 产品偏差的纬度和高度依赖性,以及基于 2018 年 1 月第 46 次 EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report 中对中国由红外云图反演的云导风算法所引起的系统性偏差的定量评估和确定的“黑名单”,在资料处理端以“保守”的方式加入了纬度和高度依赖性的资料使用控制^[9],即仅应用质控标识码在 85 以上、纬度高于 25°、高度在 400 hPa 以上的资料,以及纬度低于 25°的区域,质控标识码需达 90 以上的资料。

5.4 扩展了 WRFDA 同化荷载向量,增加了 FY-4A/FY-2H 产品的标识码

为了今后利用 FSO 技术定量区别 FY 系列产品对数值预报贡献的相对影响,以及便于 WRFDA 内部的不同资料的同化诊断分析,基于其它同类型资料的同化方法,对其赋予新的编码,扩展了同化资料类型的荷载向量,便于业务上区分哪类资料的相对贡献,以及对数据质量的监测应用评估和后续的质量控制研发。

5.5 Suomi_NPP_ATMS/NOAA-AMSU-A/METOP-1/2-AMSUA 在陆面上的云雨检测和观测误差的预定义

参照 NCEP 和 ECMWF 两大业务中心对 Suomi_NPP_ATMS(以下简称 ATMS,包括图 1、2 所示)、NOAA-15/18/19-AMSU-A、METOP-1/2-AMSU-A 这类微波温度资料应用的监测结果和观测误差评估结果^[15-20],以及陆面模式对发射率估计的不确定性来源^[20-21],同时考虑近些年来业务模式系统对于干旱区温度预报的均方根误差偏大^[22,23],从而会导致用预报偏差较大的地表温度和因复杂下垫

面发射率估算不确定性较大而使辐射传输模式误差更大等因素,除了按保守方式,选用较高频率通道的资料外,还替换了官方版本中关于上述资料应用方法^[15,17,18]与同化条件^[16,19,20]。

资料同化选取的通道如下:NOAA-15-AMSUA 选取 5~10 通道;NOAA-18-AMSU-A 选取 6~8 和 10~11 通道;NOAA-19-AMSU-A 选取 6~7 和 9~11 通道;METOP-1-AMSU-A 选取 6~11 通道;METOP-2-AMSU-A 选取 6 和 9~11 通道;ATMS 选取 7~12 通道。其中 AMSU-A 的 5~14 通道与 ATMS 上的 6~15 通道的微波温度探测的频率相似(表 1),仅是扫描宽度不同。各探测仪器的观测误差及各探测通道权重函数峰值所对应的高度表 1 所示,略去了区域模式 10 hPa 以上对应的探测通道。表 2 为 clear-sky 条件下,基于上述通道选择的微波温度探测资料在新疆区域业务同化系统中目前尚不被应用的限制性标准。

表 1 区域模式应用的 AMSU-A 与 ATMS 温度探测仪观测误差与权重函数峰值高度

AMSU-A 通道	频率 /GHz	AMSU-A 观 测误差/K	ATMS 观 测误差/K	权重函数峰 值高度/hPa
1	23.8	2.50	5.00	地面
2	31.4	2.00	5.00	地面
3	50.3	2.00	5.00	地面
	51.76		3.00	950
4	52.8	0.55	0.55	850
5	53.596 $\pm$ 0.115	0.30	0.40	700
6	54.4	0.23	0.40	400
7	54.94	0.23	0.40	250
8	55.5	0.25	0.40	200
9	57.29	0.25	0.40	100
10	57.29 $\pm$ 0.217	0.35	0.45	50
11	57.29 $\pm$ 0.322 $\pm$ 0.048	0.40	0.45	25
12	57.29 $\pm$ 0.322 $\pm$ 0.022	0.55	0.55	10
15	89.0	3.00		地面

注:“ $\pm$ ”表示距离中心频率的变化范围

表 2 中云中液态水 CLW 的计算,采用 Weng F 算法^[24],但该算法只适于预报区域内海上的云检测。C 的计算:则在 Weng F^[24]算法基础上,利用 NOAA 系列以及 METOP 系列通道 4 上观测的亮温与 CRTM 方案模拟的亮温差经验公式对海洋与陆地上的云分别进行判别^[7]。当 $C>0.5$ 时,表明受云污

表2 基于通道选择的温度探测仪尚不被新疆气象局业务同化系统同化的判识标准

判识标准	AMSU-A	ATMS
窗区通道距平检测	$ (obs-FG)_{50.3GHz} > 3\text{ K}$, 通道 6~7 不同化, 通道 8 在热带不同化	$ (obs-FG)_{50.3GHz} > 5\text{ K}$, 通道 7~8 不同化
云水路径(CLW)检验	$CLW > 0.3\text{ kg/m}^2$ 通道 6 不同化	$CLW > 0.12\text{ kg/m}^2$, 通道 7 不同化; $> 0.15\text{ kg/m}^2$, 通道 8 不同化
云检测	$ (obs-FG)_{52.8GHz} > 0.7\text{ K}$ 或 $C > 0.5$, 通道 6~7 不同化, 或在无雪的表面, $ (BT_{89.0GHz} - BT_{23.6GHz}) > 3\text{ K}$ 时, 通道 6~7 不同化	$ (obs-FG)_{52.8GHz} > 0.7\text{ K}$, 或在无雪的表面, $ (BT_{89.0GHz} - BT_{23.6GHz}) > 5\text{ K}$ 时, 通道 7~8 不同化
降水检测	$P > 1$ 时, 通道 6 不同化	
地形限制	高于 1500 m 的地形, 通道 6 不同化	高于 1 500 m 的地形, 通道 7 不同化
纬度限制	有云时, 纬度低于 30° 区域, 通道 7~8 不同化	有云时, 纬度低于 30° 区域, 通道 8~9 不同化
陆地上积雪温度限制	雪面上模式预报的地面温度低于 278 K 时, 通道 6~7 不同化	雪面上模式预报的地面温度低于 278 K 时, 通道 7~8 不同化
陆地上冰面温度限制	冰面上模式预报的地面温度低于 271.45 K 时, 通道 6~7 不同化	冰面上模式预报的地面温度低于 271.45 K 时, 通道 7~8 不同化
	1~5 通道不选择	1~6 通道不选择

染, 云区资料不用。P 的计算, 即降水检测, 则利用通道 6 上观测的亮温与 CRTM 方案模拟的亮温差的经验公式对陆地上和洋面上的降水分别进行判识^[17, 25]。当 $P > 1$ 时, 表明 AMSU-A/METOP-A 受降水污染, 降水区资料不用。上述资料的选用并不在官方版本中, 均为本地新增的应用控制。

辐射率观测值与模拟值的差 (OMB) 大于预定义观测误差的上限^[19]或 > 3 倍的观测误差, 相应的通道也不同化。

6 新技术或新资料应用检验评估结论

文中用到的检验站点均指新疆区域内的 104 站, 而非以往的模式划分所在区域内的所有站点用来检验^[2, 21-22]。

6.1 同化 FY-4A 反演产品对老预报系统的影响

2018 年委托北京航天宏图信息技术股份有限公司, 基于老系统的同化流程, 在不做雷达资料同化情况下, 对 2018 年 6 月 1—30 日进行了如表 3 所示的对比试验, 并重点分析了 FY4A 产品对 2018 年 6 月 4—6 日、2018 年 6 月 14—18 日、2018 年 6 月 27—29 日的降水天气过程的影响。预报场为同期的 FNL 资料。由于试验期 FY-4A 云导风资料质量标识码高于 WMO 业务规范的 80 才能使用的数量极少, 在此降低了资料应用标准, 质量标识码 > 70 的即用于评估。此试验组检验 24 h 降水的预报能力。为便于 24 h 累积降水量评分的比较, 00UTC 与 12UTC 冷启动的预报时长为 24 h, 06UTC 与 18UTC 暖启动

的预报时长为 30 h, 积分时步 30 s。粗分辨率嵌套同时运行, 防止细分辨率的倾向变化自由度太大。

表3 基于 FY-4A 产品对预报影响的评估试验名称及同化资料

试验名称	所用资料
CYCLE_GTS	常规观测
CYCLE_GTS+AMV	常规观测与 FY-4A 导风资料
CYCLE_GTS+AVPT	常规观测与 FY-4A 温度廓线资料
CYCLE_GTS+AVPQ	常规观测与 FY-4A 湿度廓线资料
CYCLE_GTS+AMV+AVP	常规观测、FY-4A 导风及温湿廓线资料

从对这 3 场连续几天降水天气过程预报效果的定性评估来看, 湿度廓线资料的同化对降水预报强度的增加起到主要贡献作用。在常规观测偏少的暖启动时次, 增加 FY-4A 湿度资料同化后, 降水预报效果有较大幅度的正效果。

从批量对比试验来看:

(1) 冷启时, 在弱降水及强降水等级中, 同化湿度廓线资料和同时同化风温湿廓线资料, 均有正效果。但各方案对降水空、漏报和降水落区方面仍然都不够理想。暖启时, 有 FY-4A 资料的同化, 微量、小量、大量等级评分高于仅有 GTS 资料的同化, 中量及暴量降水没有明显正效果。

(2) 对于 24 h 累积降水量为 6 mm 以下的降水过程, 同时同化 FY4-A 风温湿资料或仅同化 FY4

湿度廓线资料时,呈现较明显正效果,其中,仅同化FY4湿度廓线资料时效果最优。

(3)对于24 h累积降水量为12~24 mm和>24 mm的降水,同时同化FY4风温湿资料时,有明显正效果,或相对于仅同化GTS资料而言,至少呈现中性。

(4)对于24 h累积降水量在6~12 mm的降水而言,FY4-A风温湿资料任何一种或组合同化皆不能产生正效果,但呈中性。

6.2 新技术新资料对高分辨率业务系统的预报能力评估

新系统模式物理的主要配置方案暂定为:垂直50层,按WRF/REAL内部的缺省插值算法设置,顶高10 hPa,两层区域按9 km与3 km嵌套进行。其中,3 km水平分辨率涵盖全疆,且包含了新疆西部的所有山区,考虑了地形对新疆西边界的完整影响。最外层积云对流方案为Kain-Fritsch,内层无。内外层的云微物理为WSM6,边界层为ACM2,陆面为Noah方案,地表采用USGS24类分类,长、短波辐射均为RRTMG。

基于图1、2所示的同化与预报流程(试验时预报时长取30 h),针对新疆2016年6月16—6月19日和2016年7月5—10日的历史罕见强降水天气过程开展的对比试验及所用到的资料如表4所示。背景场为0.25° NCEP预报场(注:非“零”时刻分析场)。上述微波温度探测资料同化前,均按120 km稀疏,U、V、T的方差加倍,P、Q的方差不变,各控制变量的长度均为0.25。雷达资料同化时,U、V的方差加倍,T、P、Q的方差是原统计的1.5倍,各控制变量的长度均为0.15。微波温度偏差订正系数由内部变分同化和大气模式状态估计,即VarBC^[21-22]。将当前循环同化中估计的偏差订正系数作为下一次同化循环的背景场。FY-2E云导风只用产品标识码>85的资料。图3给出了以12UTC启报为例,上述微波温度资料经过前述质控后的空间分布。可见,除了天山山区、青藏高原、内陆复杂下垫面外,资料应用量远高于常规观测资料的分布。

此试验检验模式对逐6 h累积降水量的预报能力,采用的检验标准是从新疆气象局12 h累积降水量标准衍生出来的^[27]。用NCAR/RAL和NOAA共同研发的MET 8.1进行检验,检验的等级划分标准如下:≥0.1 mm, ≥1.5 mm, ≥2.5 mm, ≥3.8 mm, ≥5.0 mm, ≥7.5 mm, ≥10.0 mm, ≥20.0 mm, ≥40.0 mm。这也是新系统相对于老系统的检验目标与检验对象

表4 多源资料同化对预报影响的评估试验名称及所同化的资料

试验名称	所用资料
noda	无任何资料
amsua_fy2	常规观测 + ATMS + NOAA -15/18/19 - AMSU-A + METOP-1/2 - AMSU-A + FY2E - 云导风 + 雷达径向风 + 雷达反射率
eamv_conv_radar	常规观测 + ATMS + NOAA -15/18/19 - AMSU-A + METOP-1/2 - AMSU-A
amsua_conv	常规观测 + ATMS + NOAA -15/18/19 - AMSU-A + METOP-1/2 - AMSU-A + FY2E - 云导风
amsua_fy2eamv_conv	常规观测 + ATMS + NOAA -15/18/19 - AMSU-A + METOP-1/2 - AMSU-A + FY2E - 云导风
conv_fy2eamv	常规观测 + FY2E - 云导风
conv_radar	常规观测 + 雷达径向风 + 雷达反射率

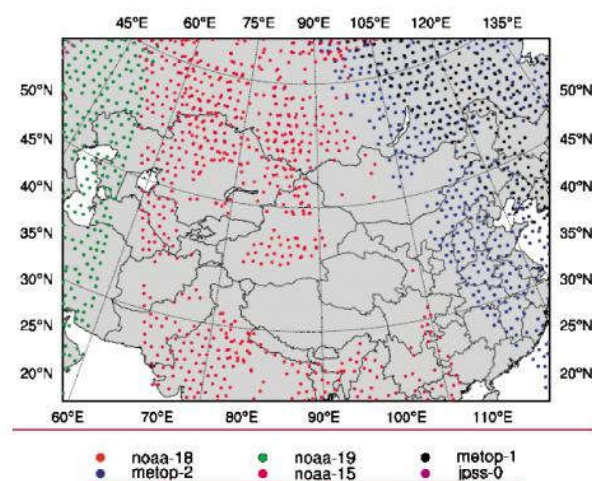


图3 以12UTC预报时刻为例,400 hPa高度上微波温度探测资料的应用分布

的明显不同之处,以便突出模式对新疆本地降水影响的客观评估。

由于粗分辨率同化的资料类型与同化量显著不同,造成两种分辨率的降水预报效果差异极大。特别是在循环同化中,细分辨率可用到的资料仅为稀疏的地面站点和雷达站附近的资料。每次起报的循环同化,除前6~9 h,细分辨率小量级的降水优于粗分辨率外,其余都表现为粗分辨率降水预报效果明显优于细分辨率。两种分辨率的降水预报性能在时效上刚好形成互补。上述2个试验阶段以12时UTC为有效起报时次的不同方案同化效果降水评分对比见图4。15、18、21时UTC循环同化降水预报效果归纳如下:

(1)甚高分辨率区域中的雷达资料同化能改进0~9 h预报降水,且3 h循环更新同化大多数情况下

能改进降水预报效果或呈中性。图 5 为有、无资料同化对模式积分过程中变压倾向变化的影响对比。可见,无论是在粗分辨率中增加常规观测资料,还是在细分辨率中增加常规观测与雷达资料的连续同化,有资料同化都会延长模式积分过程中变压变率的稳定时间,大约需 6 h,气压变率才相对稳定,这也是为什么在增加资料同化时的前几个小时,预报效果难以提高的原因之一。从与粗分辨率中仅同化常规观测资料的一次同化时的气压变率相比来看,细分辨率采用雷达资料的连续同化,可以有效地降低噪音,剔除一些“坏”资料,系统能较快地稳定下来。业务中今后可尝试采用更多的连续同化,相当于在同化系统内部进行连续质控来提高资料应用率,同时也可降低模式的 spin up 时间。

(2)clear-sky 条件下的微波温度资料同化能改进起报时刻起 6~18 h 以内的降水预报水平,且更有利于强降水的落区预报。

(3)有约束的 FY2E 导风资料的同化,能明显改进降水预报效果,至少呈中性,连续试验中未发现负

效果。

(4)从逐个个例 3 h 间隔的暖启循环时刻对 9 km 与 3 km 预报能力的对比来看,前两次的循环同化,3 km 水平分辨率的降水优于 9 km 水平分辨率,之后变为中性,第 4 次转为负效果。这主要与雷达资料反映的局地性天气过强,相对于给定的中尺度边界条件而言,也是“噪音”有关。同时,连续循环,累积的误差也会增大,致使破坏原有平衡性,使其偏离背景场越来越大。

(5)当降水区域相对较小时,9 km 水平分辨率与 3 km 预报性能多差异不大,甚高水平分辨率循环同化的优越性并没有足以体现。既与雷达资料在局地小尺度系统中未充分发挥出作用有关,也与发生局地强降水前,同化时刻,天气系统在测站移动前方并没有雷达资料覆盖有关,更与物理过程是否能正确描述甚高分辨率有关。这是因为 3 km 水平分辨率位于中尺度模式 1~4 km 的灰色尺度带上,目前的中尺度水平还难以很好地处理湿对流过程。采取简单地关闭积云对流参数化方案,忽视次网格对

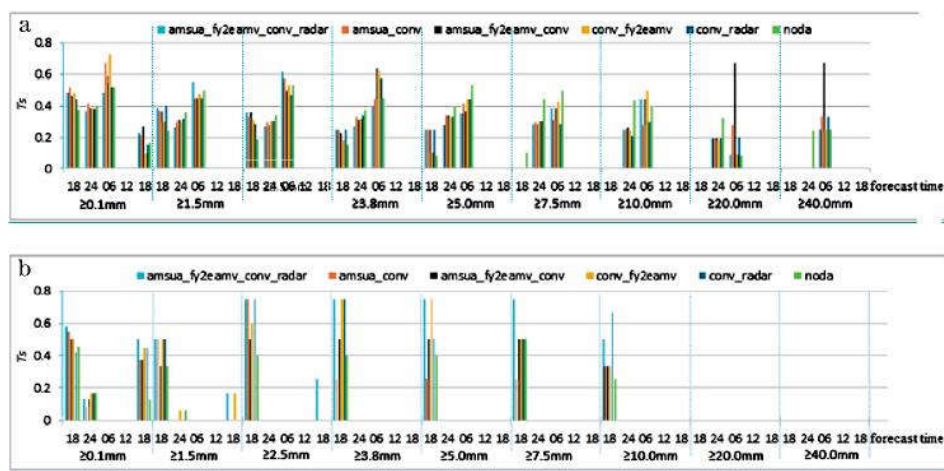


图 4 以 12UTC 启报为例,不同方案对 2016 年 6 月 16—6 月 19 日及 2016 年 7 月 5 日—7 月 10 日期间发生在新疆的极端降水天气过程的预报降水性能 TS 评分对比

(a 为水平分辨率 9 km, b 为 3 km)

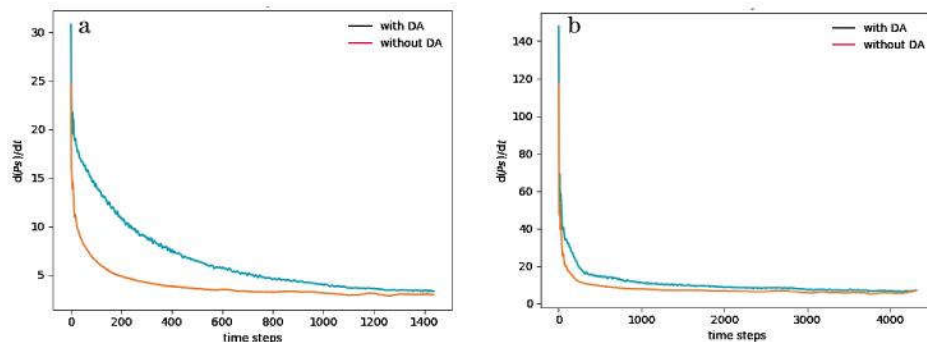


图 5 9 km 区域有无资料同化(a)与 3 km 区域有无资料同化(b)时的变压对比

流过程,完全采用显示云微物理方案描述是欠妥的。在甚高分辨率上开展这种允许对流(convection-permitting)机制的科学研究,是一项长期的国际难点和热点问题。

7 业务系统建设中的不足

上述技术研发,主要是从资料应用方面开展了一些工作,改进了预报能力,但还比较落后,特别是在同化技术方面。

7.1 常规探测资料应用水平不高

长期以来,新疆对常规资料的应用挖掘不够。比如,在WMO-GTS常规观测资料的应用中,对各类型观测资料的观测误差一直采用WRFDA自带的美国空军业务预报系统预定义的观测误差,没有按欧美、法国、日本等业务中心的做法对预定义的观测误差进行评估,也没有参照业务预报系统进行本地化的inflation订正^[9,28]。另外,探空湿度资料的观测偏差并未按源由进行分类,增加到质控系统中,前处理还需要综合国际国内业务中心的做法进行升级^[9]。

7.2 雷达资料前处理依旧是弱项,缺乏反射率因子同化的前沿性开发

截至目前,对雷达资料面向数值预报对象的观测误差统计结果及观测误差的预定义等前处理,仅按伊宁站雷达资料为参考,而应用在所有雷达上的,严格来讲,需要根据硬件水平区分定义,且每一个高度角的观测误差的定义以及距离雷达站的误差均应分别按维数统计^[7]。再次,在数值预报应用中,至少还需要参考背景场采取连续订正技术^[29],提高资料利用率。

在同化技术方面,还需研发非对角观测误差协方差矩阵,既要稠密观测资料中提取小尺度信息,又要保障不损失天气尺度信息,或者在资料的薄化方面,进一步开展观测资料代表性、观测算子优化和仪器误差的研究,估计出最佳的观测误差协方差^[30,31]。

雷达资料高频循环同化易引入“噪音”,造成累积误差增大,不仅造成初值场越来越偏离背景场,而且还会延长模式的spin-up时间。因此,还需在大尺度动力约束或多种背景场的融合方面开展相应的应对策略研发。在反射率因子的间接同化方面,仍以科研为主,大尺度凝结和对流过程还需在湿度相关变量的切线和伴随以及湿度控制变量方面开展大量探索工作。在业务中,也可采用中国气象局数值预报中心研发的、由反射率反演成相对湿度,然后再同化的相对成熟做法进行替代。

7.3 FY产品的同化技术仍需开发

中国在FY系列导风反演算法方面,业务上相对成熟,应及时纳入业务系统中。随着业务中反演算法的升级,本地应及时利用已开发的业务软件,更新导风的观测误差,将现行技术应用在业务中。目前,FY-4A温湿廓线产品的制作还在业务升级中,需与产品研发单位保持沟通,利用已开发的资料前处理软件,及时开展业务应用试验或同化方法探索。目前在同化前尚缺乏这类资料水平与垂直方向的观测误差不相关的研究。由于产品反演算法的精度主要受陆地与水面地表发射率的影响,可以利用这一特性,设计开发出资料在陆面与水域上的观测误差统计软件或给出其特征,便于今后在业务应用时,精准化调整相关误差。

7.4 微波资料同化技术在陆面上的应用研发

目前,在区域模式中,all-sky下微波温度资料同化对数值预报的影响优于clear-sky下的同化的结论还具有不确定性^[32]。因此,当前业务中提高clear-sky下的微波温度探测资料的应用水平还是首要的。对于这些资料的使用,除仍需实时关注全球的监测评价,保持基本信息的更新外,云雨区的检测技术最好还能结合MODIS和VIIR产品^[33]或FY监测资料进行研发,进一步防止同化前微波温度资料被云雨区污染。同时,现在开发的微波资料应用是否适于中国的微波资料,还有待验证。

与雷达资料同化类似,观测误差相关性及其模式与观测值间偏差的非高斯分布方面的问题还没有量化开展^[34],仅通过薄化处理人为丢弃资料,而不区分好坏。另外,目前的试验是基于锋面强降水过程进行的,对12 h以上的降水过程的预报有正效应。但并未对冬季长期受高压控制的冷空气爆发的天气过程进行敏感性试验,业务研发仍需考虑季节的适用性。再次,由于辐射传输模式对干旱区的发射率计算不准和模式对干旱区地表温度预报偏差大,造成该类型在对流层中层以下的资料并没有得到充分应用,今后需在提供物理模式预报准确的前提下,开发低频率资料的利用率。

在区域模式中进行微波资料同化,还面对着适应于区域模式同化系统的观测偏差订正(Bias correction)方法并没有建立起来的国际挑战,尽管VarBC(Variational bias correction,变分偏差订正)方法在全球资料同化系统能够广泛应用。这主要是因为区域模式中反映的气象特征不足以代表辐射率偏差的空间变化趋势。极轨卫星覆盖不均匀,受卫星过

境时间的影响,对特定预报区域而言,同化窗口内资料量变率大。因此仅仅靠区域模式有限的样本估计的偏差订正系数不可能像全球模式那样合理。区域模式通常关注对流层以下的天气事件,为节省计算成本,模式顶高通常低于全球模式,也使高层的卫星资料不像全球模式那样得到应用。在区域模式中模拟辐射率时,这些限制也都会引起额外偏差。目前日本和美国的区域业务模式中,偏差订正系数是根据全球模式的估计值外插推算出来的,取得了很好的效果^[18,35],可以借鉴引用。

7.5 模式检验技术还不完善

目前,预报检验还是仅限于利用常规要素,采用传统方法进行的,缺乏物理诊断,不利于高分辨率模式物理不确定性、观测不确定性和同化效果等的诊断分析。同时,当前的预报检验也仅针对区域模式的预报结果进行的,缺乏对自身依赖的预报背景场的检验评估。无法定量回答区域模式是否优于全球背景场的预报;其次,检验的时间分辨率也低,还不能满足短临预报系统的检验需要。

参考文献:

- [1] 辛渝,陈洪武.XJROC/CALMET及CALMET不同参数调整对达坂城一小草湖区风场预报影响[J].高原气象,2014(33):1674-1686.
- [2] 马秀梅,欧登格力,辛渝,等.C波段雷达在新疆区域数值预报系统中的应用初探[J].沙漠绿洲气象,2015,9(6):19-26.
- [3] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo Dongjun. The WSR-88D rainfall algorithm [J]. Weather Forecasting. 1998, 13(6):377-395.
- [4] Harrison D I, Driscoll S L, Kitchen M, et al. Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques [J]. Meteorol Appl, 2000, 7(2): 135-144.
- [5] James C N, Houze R A. A real-time four-dimensional Doppler dealiasing scheme [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2001, 18(10): 1674-1683.
- [6] Steiner M, Smith J A. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitation echoes in radar data [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2002, 19(5): 673-686.
- [7] Alberoni P P, Ducrocq V, Gregoric G, et al. European Commission, Directorate-General for Research [M]. Brussels, 2003.
- [8] Keeler R J, Passarelli R E. Signal processing for atmospheric radars. Technical Note NCAR/TN-331+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder CO, USA, 1989:36-37.
- [9] Ingleby Bruce. An assessment of different radiosonde types 2015/2016[R]. Technical Memorandum, 2017, 807:12-13.
- [10] Bormann Niels, Angeles Hernandez - Carrascal. Atmospheric Motion Vectors from Model Simulations. Part I: Methods and Characterization as Single-Level Estimates of Wind[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014(53(1)):47-64.
- [11] Angeles Hernandez - Carrascal, Bormann Niels. Atmospheric Motion Vectors from Model Simulations. Part II: Interpretation as Spatial and Vertical Averages of Wind and Role of Clouds [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(1):65-82.
- [12] Salonen Kirsti, Cotton James, Bormann Niels. et al. Characterizing AMV Height-Assignment Error by Comparing Best-Fit Pressure Statistics from the Met Office and ECMWF Data Assimilation Systems[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(1): 225-242.
- [13] 薛祺彬,龚建东,薛纪善,等.FY-2E卫星云导风定高误差及在同化中的应用[J].应用气象学报,2011,22(6):681-690.
- [14] Lean K, Bormann N. Indian Ocean AMVs: Moving to Meteosat-8 and assessing alternative options [R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No. 46, 2018:23.
- [15] Collard Andrew, Derber John, LING Yangrong, et al. Evaluation and Assimilation of ATMS and CrIS at NCEP [M]. JCSDA Colloquium, 2018.
- [16] Bormann N, Fouilloux A, Bell W, et al. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system[J]. J. Geophys. Res. Atmos. 2013, 118(12):12970-12980.
- [17] HU Ming, ZHOU Chunhua, SHAO Hui, et al. Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) Advanced User's Guide. NOAA Developmental Testbed Center, 2016:66-67.
- [18] LIN Haidao, Weygandt Stephen S, Benjamin Tanley G, et al. Satellite Radiance Data Assimilation within the Hourly Updated Rapid Refresh [J]. WEATHER AND FORECASTING. 2017, 32(8):1273-1287.
- [19] Bormann Niels, Lupu Cristina, Geer Alan, et al. Assessment of the forecast impact of surface-sensitive microwave radiances over land and sea-ice[R]. Technical Memorandum, 2017, 804:2-5.
- [20] Karbou Fatima, Gerard Elisabeth, Rabier Florence. Global 4DVAR Assimilation and Forecast Experiments Using AMSU Observations over Land. Part I: Impacts of Various Land Surface Emissivity Parameterizations [J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 5-19.
- [21] 李曼,杜娟,辛渝,等.2016年乌鲁木齐区域数值天气预报

- 报系统预报性能客观检验[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(5):46-52.
- [22] 杜娟,李曼,辛渝,等.2017年乌鲁木齐区域数值预报业务系统预报性能检验和评估[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(6):49-57.
- [23] Grody N, ZHAO J, Ferraro R, et al. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit[J]. J. Geophys. Res. 2001, 106(2): 2943-2953.
- [24] WENG F, ZHAO I, Ferraro R R, et al. Advanced Microwave Sounding Unit cloud and precipitation algorithms[J]. Radio Sci., 2003, 38(6): 8086-8096.
- [25] Dee D P. Bias and data assimilation [J]. Quart J Roy Meteor Soc[J]. 2005, 131(10): 3323-3343.
- [26] Auligne T, McNally A, Dee D. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system [J]. Quart J Roy Meteor Soc., 2007, 133(5): 631-642.
- [27] 肖开提·多莱特.新疆降水量级标准的划分[J].新疆气象,2005(28):7-8.
- [28] Bruce Ingleby, Lars Isaksen, Tomas Kral, et al. Improved use of atmospheric in situ data [R]. ECMWF Newsletter No. 155-Spring.2018: 20-25.
- [29] Bratseth A M. Statistical interpolation by means of successive corrections[J]. Tellus, 1986, 38(5): 439-447.
- [30] Waller J A, Simonin D, Dance S L, et al. Diagnosing Observation Error Correlations for Doppler Radar Radial Winds in the Met Office UKV Model Using Observation-Minus-Background and Observation-Minus-Analysis Statistics[J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(10): 3533-3551.
- [31] Choi Yonghan, Cha Dong-Hyun, Kim Joowan. Tuning of length-scale and observation-error for radar data assimilation using four dimensional variational (4D-Var) method [J]. Atmospheric Science Letter, 2017, 18(7): 441-448.
- [32] Geer A J, Baordo F, Bormann N, et al. The growing impact of satellite observations sensitive to humidity, cloud and precipitation [J]. Quart J Roy Meteor Soc., 2017, 143(10): 3189-3206.
- [33] HAN Hyojin, LI Jun, Goldberg Mitch, et al. Microwave Sounder Cloud Detection Using a Collocated High-Resolution Imager and Its Impact on Radiance Assimilation in Tropical Cyclone Forecasts [J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(10): 3937-3959.
- [34] Mattern Jann Paul, Edwards Christopher A, Moore Andrew M. Improving Variational Data Assimilation through Background and Observation Error Adjustments [J]. Monthly Weather Review, 2018, 146(2): 485-501.
- [35] Kazumori Masahiro. Satellite Radiance Assimilation in the JMA Operational Mesoscale 4DVAR System [J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(3): 1361-1381.

The Development of Xinjiang Meteorology in Exploiting Data Assimilation Operational System

XIN Yu¹, LI Man¹, DU Juan¹, LIU Junjian¹, YANG Zhizhong², YUAN Bing², WANG Yunfeng²

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;

2. Beijing Piesat Information Technology Co. Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract This article outlined the technical developments on data assimilation and multiple source data assimilation application test and evaluation of heavy rainfall process in Xinjiang in recent years. The results showed that the application of multiple source data assimilation tends to be positive to the NWP forecast on the basis of right data usage, including the data of FY2E-AMV, FY4A-AMV, FY4A-temperature and -moisture retrievals, radar data, high frequencies AMSU-A-NOAA-N/5/18, AMSU-A-NOAA-19, METOP-A, ATMS data assimilation under the clear sky condition. It also presents the general idea of the routine tasks and the requirements of science and technology support in enhancing data assimilation application abilities and building nowcasting convection-permitting system with respect to how to explore data effectively and the unreasonable physics configuration or any unreasonable physics scheme issue is still unresolved. The orientation of data assimilation technique exploration is meaningful for Xinjiang NWP in promoting transform from research to operation effectively.

Key words operation data assimilation system exploration; operational application; Xinjiang Meteorological Bureau