

马玉芬, 琚陈相, 艾力亚尔·艾海提, 等. FY-3C MWHS-Ⅱ辐射率在 RMAPS-CA 中的同化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(5): 28-37.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



FY-3C MWHS-Ⅱ辐射率在 RMAPS-CA 中的同化

马玉芬^{1,2,3,4}, 琚陈相^{1,2,3,4}, 艾力亚尔·艾海提^{1,2,3,4}, 刘军建^{1,2,3,4}, 买买提艾力·买买提依明^{1,2,3,4*}

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 中亚地区常规气象观测站点稀疏, 同化极轨卫星 FY-3C 上的Ⅱ型微波湿度探测器 (MWHS-Ⅱ) 辐射率资料可有效减小该地区数值预报初始场的不确定性。本研究首次在中亚快速更新多尺度资料分析和预报系统 RMAPS-CA 中同化了 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率, 评估了其同化效果。结果表明: (1) 单个时次冷启动的同化时间窗口内, 仅有 56% 的辐射率资料通过了质量控制并被 RMAPS-CA 同化。(2) 偏差订正整体减小了各水汽通道的背景场辐射亮温偏差, 最大减幅出现在通道 14, 达 0.5 K。通道 14 偏差订正前的观测辐射亮温和背景场辐射亮温间存在较大偏差, 是其同化应用中需要特别注意的。(3) FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化整体提高了 RMAPS-CA 系统对高空温度、位势高度、高空风速等的中短期预报准确率。同时, 使得 2 m 温度和 10 m 风速的预报准确率预报均方根误差分别平均减小了 0.2 K 和 2 m/s。其同化有效降低了小雨预报的漏报率和空报率, 小雨预报的 TS 评分提升了 16%。降低了中雨和大雨预报的漏报率, 3 个量级降水预报的 BIAS 评分分别提升了 18%、38% 和 36%。

关键词: FY-3C 卫星; 湿度传感器 MWHS-Ⅱ; 质量控制; 偏差订正; 同化效果评估

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2023)05-0028-10

近年来, 塔克拉玛干沙漠及其周围地区的暴雨变得比以往时期都频繁^[1]。由于特殊的地理位置、地表类型和土壤质地, 几小时内降雨量达数十毫米的局部强降水可能会在塔克拉玛干沙漠周边的天山和

昆仑山坡引发山洪或泥石流, 造成严重的人员伤亡和经济损失, 准确及时的天气预报至关重要。然而, 由于塔克拉玛干沙漠乃至整个中亚常规观测相对稀疏, 使得该地区数值天气预报的初始场具有极大的不确定性^[2-5], 因此须借助高分辨率的数值模式和全球均一分布的极轨卫星探测资料^[6-7]。

资料同化是高分辨率的数值模式获得最优初始场的重要手段, 除常规观测外, 卫星观测是目前广泛使用 2 个主要观测资料来源之一, 卫星辐射亮温和衍生产品构成了大多数业务中的全球 NWP 模式所积极同化的 90% 以上的观测数据^[8]。微波相比红外、可见光等卫星探测方式有能够穿透薄云的优点, 同化微波探测资料能明显改进数值预报模式初始场^[9]。

收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-05-02

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 (IDM2021003); 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2022D01A369); 科技创新团队 (天山创新团队) 项目 (2022TSYCTD0007); 新疆气象局引导性项目 (YD202302); 数值预报—卫星先行计划项目 (FY-APP); 沙漠所科技发展基金 (KJFZ202311)

作者简介: 马玉芬 (1981—), 女 (回族), 副研究员, 主要从事数值天气预报、中尺度数值模拟和资料同化工作。E-mail: mayf@idm.cn

通信作者: 买买提艾力·买买提依明 (1978—), 男, 研究员, 主要从事边界层气象研究。E-mail: ali@idm.cn

1998 年第一个搭载先进微波湿度计 AMSU-B 的极轨卫星 NOAA-15 发射升空, 微波湿度计资料开始应用于国内外的许多数值预报业务中心和研究机构。由于湿度变量是所有分析变量中具有最弱高斯型和最小均匀各向同性的背景误差分析变量, 同时大气中的水汽对温度和湿度相当敏感, 反馈过程的缓慢致使没有先进的分析方法能够提高处理湿度资料的能力, 缺乏绝对校准的湿度资料给处理观测偏差和模式偏差带来很大的困难, 这也成为确定全球的湿度分布和平衡水循环的主要问题之一^[10]。因此对水汽资料的分析和研究意义重大。一些研究表明, 中层水汽初值的不确定性可造成数值模式预报场显著的不确定性, 尤其是对短期预报^[11]。Geer^[12]、Singh 等^[13-14]、Otkin^[15]通过直接同化湿度探测通道数据, 发现能改进全球模式对流层中高层水汽分布、温度场以及风场的分析和预报。中国学者也对微波湿度计辐射率资料的直接同化进行了大量研究工作^[16-20], 进一步明确了同化微波湿度计资料对数值天气预报的积极作用。风云三号是我国第二代极轨气象卫星, FY-3C 上所搭载的新型微波湿度仪 MWHS-II 也广受关注。Lawrence 等^[21]在 ECMWF 中对微波湿度计资料进行了质量评价, 并试图将部分通道在 ECMWF 的系统中进行同化。然而, 目前 FY-3C/MWHS-II 微波湿度计资料在中亚区域的气象预报业务中还没有得到广泛地使用。FY-3C/MWHS-II 微波湿度计资料的有效利用对进一步改善中亚区域的数值预报效果具有重要意义。

然而, 怎样在数值天气预报中最有效地同化卫星微波湿度计的资料至今仍具有很大的挑战^[22], 主要包括对云和降水资料的检测、偏差订正以及对地面发射率的修正等^[23]。由于观测算子在云、降水粒子及性质复杂下垫面等因素影响下模拟辐射传输过程不准确, 以及资料的观测误差较大等原因, 实际同化应用时必须对微波探测资料加以认真筛选^[24]。

首先, 卫星资料的同化要求利用 RTTOV 正演的辐射率和观测的残差满足均值为零的高斯分布。因此, 卫星资料偏差分析尤为必要。随着大气辐射物理过程研究的不断深入, 辐射传输模式考虑分物理过程越来越完善, 模拟精度也越来越高。Eyre 等^[25]提出利用辐射传输模式可以直接同化卫星辐射辐射亮温, 并利用变分同化成功地将星载大气垂直探测资料进行直接同化, 使卫星资料在数值模式中的应用进入一个新的阶段。为了实现卫星资料在数值模式中的直接同化, Weng 等^[26]对辐射传输模式 (Vector

Discrete -Ordnate Radiative Transfer Model, VDISORT) 进行研究和改进, 丁伟钰等^[27]利用快速辐射传输模式 (Radiative Transfer for TOVS, RTTOVS) 模拟 HIRS-3 红外辐射亮温, 发现不考虑有云的情况下模拟辐射亮温显著偏高。鉴于此, 本研究首先分析 FY-3C MWHS-II 观测辐射亮温偏差分布特征, 为下一步的业务同化工作做好准备。

其次, 为使卫星探测器观测到的辐射率和辐射亮温能够直接应用于数值天气预报模式中并且获得正效应, 需要将卫星观测和模拟辐射亮温偏差进行订正。Eyre^[28]在 McMillin 等^[29]的研究基础上, 对模拟的 TIROS 大气垂直探测仪 (TOVS) 资料进行偏差订正研究。由于受到卫星扫描角和气团的影响, 将卫星资料的偏差订正分为两步进行: 扫描偏差和气团偏差订正, 但是在提出的方案中没有考虑扫描偏差随纬度带的变化, 具有纬度依赖性。Harris 和 Kelly^[30]改进 Eyre 的订正方案^[28], 研究扫描偏差订正需要考虑纬度变化, 将地球进行纬度带划分, 并用模式背景场参数作为气团预报因子, 以消除辐射传输模式模拟的不准确所带来的系统偏差。之后, Harris 和 Kelly^[31]提出的静态离线偏差订正方法广泛地应用于卫星资料的偏差订正。本研究拟采用变分偏差订正方法对 FY-3C MWHS-II 辐射率资料进行偏差订正, 分析偏差订正前后各通道观测残差的概率密度分布变化。

针对 FY-3C/MWHS-2 的观测性能及其在不同 NWP 系统中的影响, 国内外学者已经开展了许多研究工作。Lu 等^[32]指出, FY-3C/MWHS-2 仪器总体上表现出良好的数据质量, 可以与其他具有 183 GHz 信道类似能力的仪器相媲美。Lawrence 等^[33]评估了 FY-3C/MWHS-2 的数据质量, 发现同化 118 和 183 GHz 通道的数据可以提高 ECMWF 系统中 12 h 短程预报和 2~4 d 风力预报的准确性。Carminati 等^[34]发现英国气象局全球数值天气预报系统中 FY-3C/MWHS-2 的全天辐射数据同化显著改善了短期预报效果。Lindskog 等^[35]提出, FY-3C/3D MWHS-2 填补了午夜和清晨北欧地区微波辐射数据的不足, 对预报质量产生了积极影响。

本研究在质量控制和偏差订正的基础上, 在 RMAPS-CA^[36]中同化了 FY-3C/MWHS-II 水汽通道辐射率资料, 并客观评估其同化对地面和高空多要素预报效果的影响。

1 资料和方法

1.1 RMAPS-CA 系统

据陈相等^[37]已具体介绍了 RMAPS-CA 的开发历程及预报性能评估结果,本研究所用 RMAPS-CA 的基本配置见表 1。RMAPS-CA 中使用的 WRFDA V4.1.2 同化系统采用了三维变分同化。

表 1 本研究所用 RMAPS-CA 参数配置

名称	已选方案
模式	ARW v4.1.3
初始和边界条件	GRAPES-GFS, 0.5°×0.5°
模拟时段	2022 年 5 月 1—31 日
初始时刻	每日 00、06、12、18 时 UTC
中心点	43.55°N, 87.85°E
格点数	712×532
格距	9 km
垂直层	50
顶层压力	10 hPa
时间步长	10 s
云微物理参数化方案	Thompson
长波辐射参数化方案	RRTMG scheme
短波辐射参数化方案	RRTMG scheme
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch
陆面过程参数化方案	Noah Land Surface Model

1.2 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率

FY-3C/MWHS-Ⅱ 包含了 15 个不同频率的通道,其中通道 11~15 主要探测对流层 300~700 hPa 的大气湿度信息,是本研究中分析和同化时所选择的通道。各水汽通道的中心频率、极化方式和水平分辨率见表 2。

表 2 FY-3C/MWHS-Ⅱ 各水汽通道窗区信息

通道号	中心频率/GHz	极化方式	水平分辨率/km
11	183.31±1.0	水平	16
12	183.31±1.8	水平	16
13	183.31±3.0	水平	16
14	183.31±4.5	水平	16
15	183.31±7.0	水平	16

1.3 同化实验

1.3.1 实验设计

对 FY-3C/MWHS-Ⅱ 的同化应用试验均在 RMAPS-CA 框架下开展,并在 RMAPS-CA 的同化模块 WRFDA (V4.0) 中使用了快速辐射传输模型

RTTOVS (v13.1)^[38]。同化实验仅在 9 km 分辨率的母网格区域内开展,同化试验生成的初始场为 RMAPS-CA 子网格提供边界条件。所有同化效果评估针对子网格区域展开。为评估 RMAPS-CA 中同化 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率的影响,进行了两组平行的数据同化和预报实验。第一组(命名为 RMAPS)为 RMAPS-CA 业务运行的结果。第二组(命名为 FY3C)实验在第一组实验中增加了 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率数据的同化,以产生可能优化的分析场和在时间维上积分后得到的预报场。同化实验时间段为 2022 年 5 月 1—31 日,于每日 0:00、6:00、12:00 和 18:00 UTC 冷启动。使用三维变分同化技术,同化时间窗口为±3 h。

1.3.2 辐射率资料预处理

在 MWHS-Ⅱ 辐射率同化实验中,仅选择了各水汽通道的晴空辐射数据进行同化。由于各种误差,需要对辐射观测进行一系列的质量控制。质量控制后保留了 3 776 个观测值中的 2 120 个,总观测量的约 56%用于数据同化。极轨卫星通常每天两次经过特定区域^[37],但由于 FY-3C/MWHS-Ⅱ 每次扫过同一地理位置的时间并不是固定的,且 RMAPS-CA 系统覆盖整个中亚,范围较大,所以在每天 4 次的冷启动分析时间窗口内,FY-3C 卫星可以每天超过 2 次为 RMAPS-CA 系统提供相对丰富的观测数据。

在质量控制后的卫星辐射观测中,偏差仍然不可避免,包括与同化系统相关的系统误差和与空气质量相关的误差。这些误差可能会因卫星仪器的扫描位置、地理参数、时间和空气质量而有所变化^[35]。它们通常是同化系统中的误差源。因此,应订正首次猜测的模拟亮温和卫星测量的亮温之间的偏差。本研究使用了变分偏差校正(VarBC)方案^[39]。相应的预测系数可以根据循环运行中的统计信息进行自适应更新和优化。在大多数全球模型中,变分方案首先用于直接同化卫星辐射。对于区域模型,由于在有限的时间和空间范围内数据覆盖不均匀,极轨卫星观测的数量在不同周期之间变化很大。在本研究中,通过开展为期一个月(31 d)的偏差订正实验以获得统计上更可靠的所有 MWHS-Ⅱ 辐射率的预测系数。这些初始偏差系数在同化 MWHS-Ⅱ 的下一个实验中通过循环分析进行动态调整。根据三维变分同化方法的公式,假设观测和背景中的系统误差是无偏的^[39],观测减去背景的辐射亮温偏差(OMB)应符合高斯分布。图 1 是偏差订正前后 FY-3C/MWHS-Ⅱ 所有水汽通道进行偏差订正(虚线)和无偏差订正

(实线)的偏差分布概率密度图。与无偏差校正的分析增量相比,有偏差校正的辐射亮温偏差概率密度呈现近似高斯分布,辐射亮温偏差概率密度平均值更接近于零。结果表明,通过偏差订正可以获得更好的偏差性能。

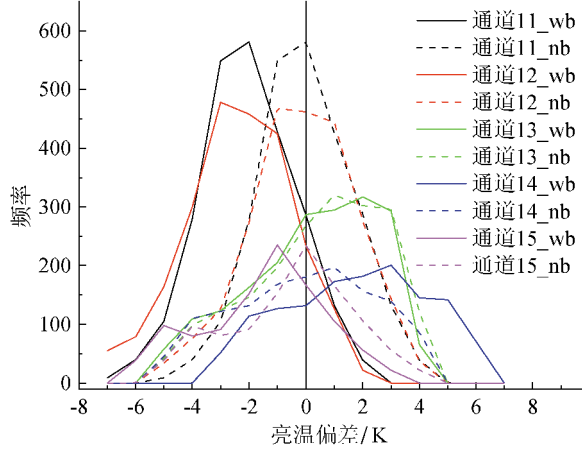


图 1 偏差订正前后各水汽通道的偏差概率密度 (图中 NB 和 WB 分别表示无偏差订正和有偏差订正;实线为偏差订正前的偏差概率密度,虚线为偏差订正后的偏差概率密度,不同颜色代表不同 FY-3C/MWHS-II 的不同微波通道;灰色点线为 $x=0$ 的参考线)

1.4 客观检验

为评估 FY-3C/MWHS-II 辐射率同化对 RMAPS-CA 系统预报效果的影响,比较了有无同化分析初始化的预报相对于观测的异同。在本研究中,用于验证的观测值主要来自国家地面自动气象站和探空廓线,这些数据首先通过一系列质量控制程序进行处理^[29]。超过 1 500 个地面站可以提供 2 m 高度的表面温度、湿度和 10 m 的风速及每小时的降雨量。对于相同时间点网格点中的值将与最近的观测值相匹配以进行比较。上层大气温度、湿度和廓线观测值每天在世界时 0:00、6:00、12:00 和 18:00 可用。本文涉及到的检验的量包括大气温度、高空温度、位势高度、2 m 温度、10 m 风速和降水。其中,平均误差(MB)和均方根误差(RMSE)可根据预报和观测值之间的差异计算。它们用于评估由于 MWHS-II 辐射数据的同化而导致的温度、湿度和风场的预报改善。降水预报性能检验主要计算其 TS 评分及 BIAS 评分。此客观检验中计算平均偏差(公式 1)、均方根误差(公式 2)、TS 评分(公式 3)及 BIAS 评分(公式 4)公式如下:

$$E_{MB} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_r - r_n), \quad (1)$$

$$E_{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_r - r_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

其中: r 和 n 分别表示预报和观测时间, f_r 和 r_n 分别表示预报和观测值。

$$S_{TS} = \frac{N_{yy}}{N_{yy} + N_{yn} + N_{ny}}, \quad (3)$$

$$S_{BIAS} = \frac{N_{yy} + N_{yn}}{N_{yy} + N_{ny}}. \quad (4)$$

其中: N_{yy} 为预报正确站(次)数, N_{ny} 为空报站(次)数, N_{yn} 为漏报站(次)数。

2 结果分析

2.1 分析增量统计

为了验证偏差校正的有效性,首先对比分析有无偏差订正背景场辐射亮温和分析场辐射亮温相对于分析场辐射亮温、观测辐射亮温的偏差。图 2 给出了 2022 年 5 月 29 日 00 时 FY-3C/MWHS-II 各水汽通道探测的背景场辐射亮温和分析场辐射亮温的偏差分布情况。无偏差订正时, FY-3C/MWHS-II 通道 11 和通道 12 的背景场辐射亮温平均偏差在 1~2 K,但在通道 13 和通道 14,辐射亮温偏差较大,均 > 4 K。有偏差订正时,各水汽通道的背景场辐射亮温偏差和分析场辐射亮温偏差均在 1 K 以内。偏差订正后,各水汽通道的分析场辐射亮温偏差整体 < 0.3 K。均

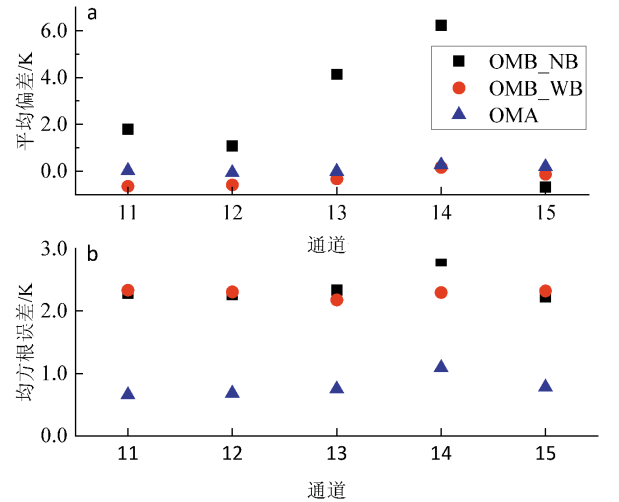


图 2 2022 年 5 月 29 日 00 时 FY-3C/MWHS-II 各通道背景场增量和分析场增量

(a 为平均偏差, b 为均方根误差; 黑色实心正方形表示偏差订正前观测亮温减去背景场亮温的偏差, 即图中的 OMB_NB; 红色实心圆形为偏差订正后观测亮温减去背景场亮温的偏差, 即图中的 OMB_WB; 蓝色实心三角形表示观测亮温减去分析场亮温的偏差, 即图中的 OMA)

方根误差在订正前后分别在 2.2~2.3 和 2.2~2.7 K, 在通道 14 减幅最大, 约为 0.3 K。偏差订正后, 分析场辐射亮温均方根误差在 0.6~1.4 K, 均方根误差在 11 通道最小, 15 通道最大。

偏差订正对背景场辐射亮温偏差影响明显。偏差订正前, RMAPS-CA 背景场亮温在通道 11~14 均整体高于 FY-3C/MWHS-Ⅱ 观测亮温, 在通道 15 前者略低。偏差订正后, RMAPS-CA 背景场亮温在通道 11~13、15 均整体高于 FY-3C/MWHS-Ⅱ 观测亮温, 在通道 14 前者略低。偏差订正显著减小了 FY-3C/MWHS-Ⅱ 各水汽通道的背景场辐射亮温平均偏差的绝对值, 在通道 14 的减小幅度最大, 从 6.83 K 减小到了 2.30 K。偏差订正也减小了各通道均方根误差, 在通道 13 的减小幅度最大, 平均偏差绝对值从 4.13 K 减小到了 0.14 K。偏差订正后, 各通道分析场亮温平均偏差绝对值均小于 0.3 K, 均方根误差均 < 1.2 K。

图 3 给出了 2022 年 5 月 1 日 00 时—31 日 18 时 FY-3C/MWHS-Ⅱ 各水汽通道偏差订正前后背景

场亮温和分析场亮温的平均偏差和均方根误差随时间的变化情况。偏差订正前, 通道 11~15 的背景场辐射亮温偏差分别在 0~2、0~2、3~5、5~7 和 -2~0 K, 其中通道 11~14 对应的 RMAPS-CA 系统的背景场辐射亮温整体高于观测辐射亮温, 通道 15 反之。偏差订正显著减小了各水汽通道的背景场辐射亮温偏差。偏差订正后, 通道 11~15 的背景场辐射亮温偏差均在 -1~1 K, 而分析场辐射亮温偏差均接近 0 K。另外, 偏差订正整体减小了通道 11~15 背景场辐射亮温均方根误差, 对通道 14 的减小幅度最大。偏差订正前, 通道 14 的背景场辐射亮温均方根误差在 2~3 K, 其余通道的背景场辐射亮温均方根误差均在 2~2.5 K。偏差订正后, 通道 14 的背景场辐射亮温均方根误差在 2~2.5 K, 而其余通道的背景场辐射亮温均方根误差与偏差订正前变化不大, 仍在 2~2.5 K。偏差订正后, 通道 12 的分析场辐射亮温均方根误差均在 2~2.5 K, 其余通道整体在 0.5~1 K。

2.2 同化效果评估

为研究 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射数据对 RMAPS-

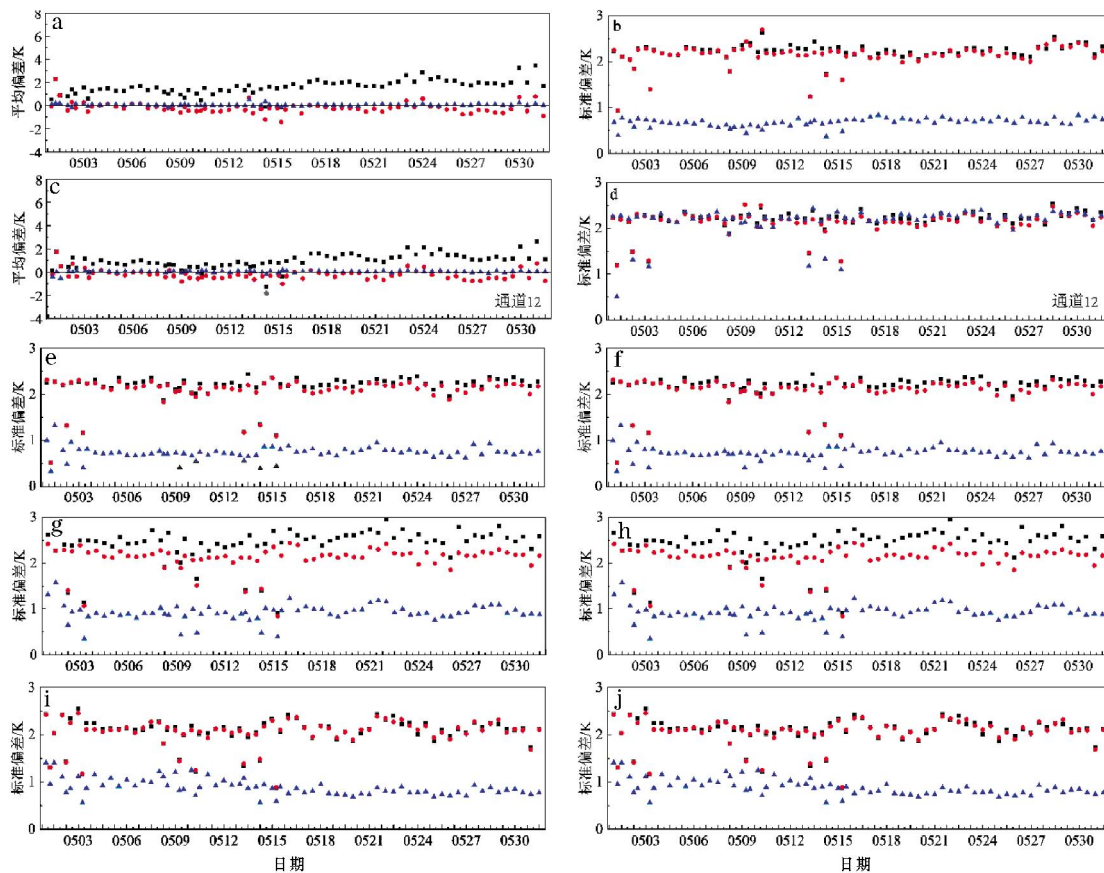


图 3 2022 年 5 月 1—31 日 FY-3C/MWHS-Ⅱ 各通道偏差订正前后观测场亮温减去背景场亮温的偏差(图中的 OMB_NB 和 OMB_WB)及偏差订正后观测场亮温减去分析场亮温偏差(图中的 OMA)随时间的变化(a、b 为通道 11 偏差, c、d 为通道 12 偏差, e、f 为通道 13 偏差, g、h 为通道 14 偏差, i、j 为通道 15 偏差;横轴为日期, 前两位数为月份, 后两位数为日期)

CA 系统中短期预报的影响, 对有无同化的 24 h 预报结果比较, 并根据观测结果进行评估。图 4 给出了 2022 年 5 月 1—31 日有无 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射数据两组实验共 124 个预报场中高空温度、位势高度和高空风速平均偏差和均方根误差的平均值。同化 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射数据后, 温度平均偏差和均方根误差较同化前在各个预报时次均整体减小, 仅在积分 24 h 后的 800 hPa 以下的低层略有增大。同化后, 位势高度预报偏差和均方根误差在预报开始时(00 时)的 500 hPa 以下的低层明显增大, 在其他各个时次各个高度层均整体减小。同化使得位势高度场在低层的偏差显著增大的现象也曾在同化其他星载微波湿度计和红外高光谱辐射率资料时出现过, 原因不明^[40-41]。同化后, 高空风速预报偏差和均方根误差在各个预报时次各个气压层均整体减小。

FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射数据的同化可以有效改善 RMAPS-CA 系统对高空温度、位势高度和高空风速的短期预报效果。

图 5 为 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化前后各预报时效的 2 m 温度和 10 m 风速的预报偏差和均方根误差。FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化对 24 h 内 2 m 温度和 10 m 风速的预报均有明显的改善效果。同化前后, 2 m 温度预报的平均偏差和均方根均随积分时长的延长而增大。同化前后, 预报 2 m 温度均整体高于观测值, 2 m 温度预报的平均偏差均为正值, 偏差分别在 0.6~3.3 和 0.6~3.5 K, 偏差平均值分别为 1.78 和 1.81 K, 偏差平均减幅为 0.04 K。同化前后, 2 m 温度预报的均方根误差分别在 2.8~4.4 和 1.8~2.7 K, 2 m 温度预报的均方根误差分别为 2.3 和 2.1 K, 减幅大值均可达 0.5 K 左右, 减幅平均值

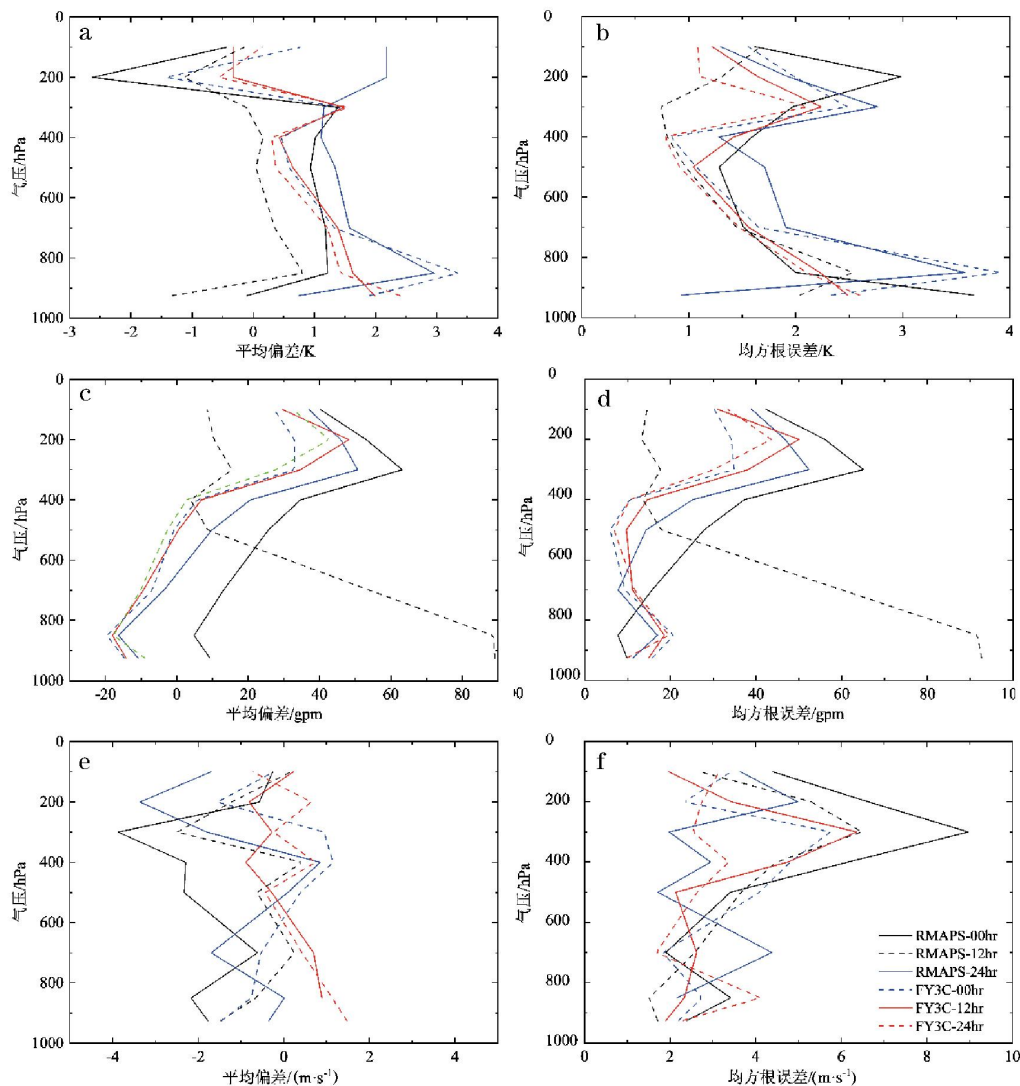


图 4 同化前后高空温度(a、b)、位势高度(c、d)和高空风速(e、f)的平均偏差(a、c、e)和均方根误差(b、d、f) (黑色实线、蓝色实线、红色实线分别为没有同化 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率资料的 RMAPS-CA 在 0、12 和 24 时积分时刻的预报偏差; 黑色虚线、蓝色虚线、红色虚线分别为 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化后预报时效分别为 0、12 和 24 时的预报偏差)

为 0.2 K。同化前后, 10 m 风速预报的平均偏差随着预报时效的延长而增大, 均方根误差随时间的变化并非单调递增, 且同化前后均方根误差极大值均出现在初始时刻。10 m 风速预报的平均偏差在同化前后分别在偏差分别在 0.6~3.3 和 0.6~3.5 m/s, 偏差平均值为 1.8 m/s 左右, 偏差平均减幅为 0.04 m/s。同化前后, 10 m 风速预报的均方根误差分别在 2.5~4.2 和 2.6~4.4 m/s, 均方根误差平均值分别为 0.1 和 2.1 m/s, 平均减幅为 2.0 m/s。FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化整体提高了 2 m 温度和 10 m 风速的预报准确率。

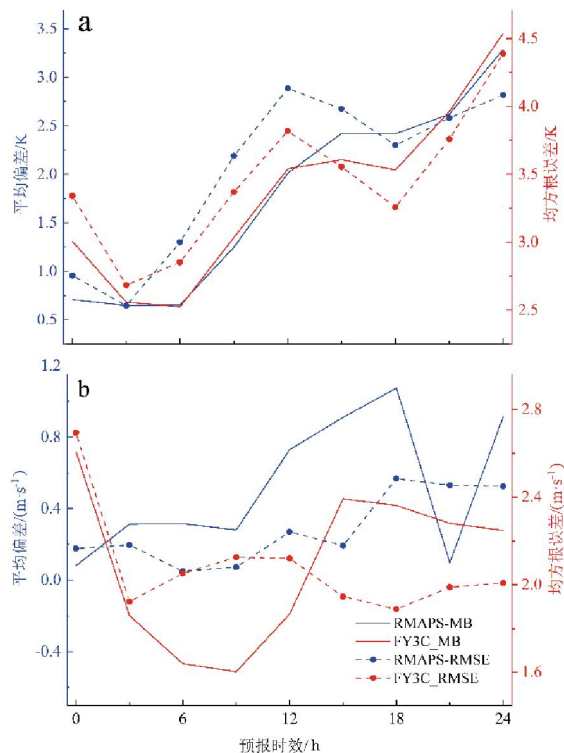


图5 同化前后各预报时长 2 m 温度和 10 m 风速的预报平均偏差(MB)和均方根误差(RMSE)

(a 为 2 m 温度, b 为 10 m 风速; 蓝色实线和虚线分别为 FY-3C/MWHS-整辐射率同化前后的平均预报偏差; 红色实线和虚线分别为 FY-3C/MWHS-整辐射率同化前后要素预报的均方根误差)

图 6 给出了同化前后晴雨(0.1 mm)预报、中雨(6.1 mm)预报和大雨(12.1 mm)预报的 TS 评分(图 6a)和 BIAS 评分(图 6b)。FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化整体提高了各个量级降水预报的准确率。同化 FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率前, RMAPS-CA 预报晴雨、中雨、大雨的 TS 评分平均值分别为 0.25、0.04 和 0, 同化后, 分别为 0.41、0.04 和 0, 将小雨预报的 TS 评分提高了 16%。同化前, RMAPS-CA 预报晴雨、中

雨、大雨的 BIAS 评分平均值分别为 0.60、0.19 和 0.08, 同化后, 分别为 0.78、0.57 和 0.44, 有效降低了小雨预报的漏报率和空报率, 降低了中雨和大雨预报的漏报率, 3 个量级降水预报的 BIAS 评分分别提升了 18%、38% 和 36%, 改善效果非常明显。

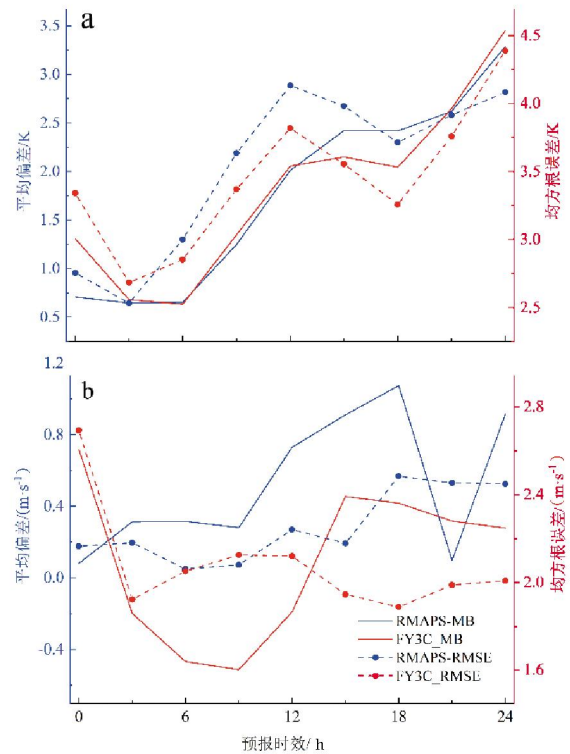


图6 同化前后降水预报的 TS 评分(a)和 BIAS 评分(b)

(蓝色实心柱体和红色空心柱体分别代表同化 FY-3C/MWHS-水汽通道辐射率前后的降水预报评分)

3 结论

FY-3C 卫星搭载微波湿度传感器 MWHS-Ⅱ 水汽探测通道辐射率能够为中亚探空稀疏区数值天气预报系统 RMAPS-CA 提供丰富的大气探测信息, 可减小该地区数值预报系统初始场的不确定性。本研究首次实现了 FY-3C/MWHS-Ⅱ 水汽探测通道辐射率在 RMAPS-CA 中的同化, 开展了 2021 年 5 月 1—31 日逐 6 h 冷启动的资料同化试验, 预报时效 24 h。以地基常规观测为真值, 客观评估了其同化效果。得出以下结论:

(1) 偏差订正前, RMAPS-CA 背景场亮温在通道 11~14 整体高于 FY-3C/MWHS-Ⅱ 观测亮温, 仅在通道 15 略低于观测亮温。经过一系列的质量控制和偏差订正后, 约有 56% 的辐射率资料被 RMAPS-CA 同化, 且背景场和观测场间的亮温偏差大幅减

小,偏差值更加接近于 0,说明 FY-3C/MWHS-Ⅱ 能够在 RMAPS-CA 中取得良好的同化分析效果。

(2)FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率的同化整体提高了 RMAPS-CA 系统对高空温度、位势高度、风速等高空要素的中短期预报准确率,仅使得预报初始时刻位势高度预报偏差增大。

(3)FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率的同化提高了 RMAPS-CA 系统对 2 m 温度和 10 m 风速的预报准确率。在 0~24 h 预报时效内,均方根误差的减幅平均值为分别为 0.2 K 和 2 m/s。

(4)FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率同化有效降低了小雨预报的漏报率和空报率,小雨预报的 TS 评分提升了 16%。其同化降低了中雨和大雨预报的漏报率,3 个量级降水预报的 BIAS 评分分别提升了 18%、38%和 36%。

本研究以常规观测为真值进行偏差分析和同化效果评估,上述结论的客观性取决于观测数据的准确性和验证方法。首先,观测值的空间分布也是直接影响结果评估的一个重要因素。第二,该实验研究的时间对象是 5 月,在后续研究工作中,可考虑扩展到其它季节,使得结论更具有普适性和代表性。第三,FY-3C/MWHS-Ⅱ 辐射率的同化使得预报初始时刻位势高度预报偏差增大,其原因有待于进一步深入探究。另外,今后将继续开展受云影响的 FY3C/MWHS-Ⅱ 辐射率的质量控制技术及其在区域数值天气预报系统中的应用评估等研究工作。

参考文献:

- [1] 吕新生,周雅蔓,余行杰,等.1961—2019 年新疆暴雨山洪灾害损失的时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(4):42-49.
- [2] 杜娟,于晓晶,辛渝,等.乌鲁木齐区域数值预报业务系统降水预报检验与评估分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):31-40.
- [3] 李曼,杜娟,辛渝,等.2016 年乌鲁木齐区域数值天气预报系统预报性能客观检验[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(5):46-52.
- [4] 李曼,琚陈相,辛渝,等.2016 年夏季 DOGRAFS 系统站点 24h 降水量级预报检验[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(2):15-21.
- [5] 马玉芬,辛渝,李曼,等.GTS 同化对 DOGRAFS 预报新疆区域一次特大暴雪的影响[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):24-30.
- [6] SMITH W L,吕月华.卫星探测的大气资料对改进天气预报是渺茫的或是起关键作用[J].气象科技,1992,20(4):7-17.
- [7] BAUER P,OHNING G,KUMMEROW C,et al. Assimilating

- Satellite Observations of Clouds and Precipitation into NWP Models [J].Bulletin of the American Meteorological Society,2011,92(6):25-28.
- [8] 薛纪善.气象卫星资料同化的科学问题与前景[J].气象学报,2009,67(6):903-911.
- [9] 杨寅,韩威,董佩明.AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述[J].气象,2011,37(11):1395-1401.
- [10] 曲美慧.ATOVS 微波湿度计 MHS 资料在 GRAPES-GFS 模式中的同化应用技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [11] 徐幼平,姜洪峰,李鲲,等.初值不确定性对暴雨数值预报影响的初步研究[J].暴雨灾害,2007,26(1):21-28.
- [12] GEER A J. All-sky assimilation: Better snow-scattering radiative transfer and addition of SSMIS humidity sounding channels. Technical Report 706 [R].ECMWF, 2016.
- [13] SINGH R,PAL P K,JOSHI P C. Assimilation of Kalpana very high resolution radiometer water vapor channel radiances into a mesoscale model [J]. Journal of Geophysical Research,2010,115(D18):D18124.
- [14] SINGH R,KISHTAWAL C M,PAL P K.A comparison of the performance of Kalpana and HIRS water vapor radiances in the WRF 3D-Var assimilation system for mesoscale weather predictions [J]. Journal of Geophysical Research,2011,116(D8):D08113.
- [15] OTKIN J A. Clear and cloudy sky infrared brightness temperature assimilation using an ensemble Kalman filter [J]. Journal of Geophysical Research,2010,115(D19):D19207.
- [16] 张利红,沈桐立,王洪利.AMSU 资料变分同化及在暴雨数值模拟中的应用研究[J].高原气象,2007,26(5):1004-1012.
- [17] 任强,董佩明,薛纪善.台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验[J].应用气象学报,2009,20(2):137-146.
- [18] 陆其峰,张文江,张鹏,等.基于区域 ATOVS 数据同化的 2008 中国南方低温雨雪冰冻灾害的暴雪监测研究[J].中国科学:地球科学,2010,53(8):1216-1228.
- [19] 张旭煜,朱克云,张杰,等.FY-3A 卫星 MWHS 资料同化及四川盆地暴雨数值模拟分析[J].成都信息工程学院学报,2013,28(3):258-266.
- [20] 董佩明,刘健文,刘桂青,等.ATMS 卫星资料的同化应用及与 AMSUA/MHS 的比较研究[J].热带气象学报,2014,30(4):623-632.
- [21] LAWRENCE H ,BORMANN N ,GEER A J ,et al. Evaluation and assimilation of the microwave sounder MWHS-2 Onboard FY-3C in the ECMWF numerical weather prediction system [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6):3333-

- 3349.
- [22] 邓永辉.数值天气预报中卫星资料同化应用现状及发展[J].才智,2013(34):280-280.
- [23] 董佩明,薛纪善,黄兵,等.数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J].气象科技,2008,36(1):1-7.
- [24] 杨寅,韩威,董佩明.AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述[J].气象,2011,37(11):1395-1401.
- [25] EYRE J R, KELLY G A, MCNALLY A P, et al. Assimilation of TOVS radiance information through one dimensional variational analysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119(514):1427-1463.
- [26] WENG F, LIU Q. Satellite Data Assimilation in Numerical Weather Prediction Models. Part I: Forward Radiative Transfer and Jacobian Modeling in Cloudy Atmospheres[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(21):2633-2646.
- [27] 丁伟钰,万齐林,张诚忠,等.有云条件下 HIRS/3 资料的同化及其对“珍珠”台风的影响[J].气象学报,2010,68(1):72-80.
- [28] EYRE J R. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures[C/OL]. Technical Memorandum, ECMWF, 1992. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/74432-bias-correction-scheme-simulated-tovs-brightness-temperatures>.
- [29] MCMILLIN L, ZHAO J, RAJA M, et al. Radiosonde humidity corrections and potential Atmospheric Infrared Sounder moisture accuracy[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007.
- [30] 潘火平.基于辐射亮温观测数据一维变分同化的微波发射率估算研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [31] LU Q, LAWRENCE H, BORMANN N, et al. An evaluation of FY-3C satellite data quality at ECMWF and the Met Office; ECMWF: Reading, UK, 2015, 767.
- [32] LAWRENCE H, BORMANN N, Geer A, et al. Evaluation and Assimilation of the Microwave Sounder MWHS - 2 Onboard FY-3C in the ECMWF Numerical Weather Prediction System [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6):3333-3349.
- [33] CARMINATI F, MIGLIORINI S. All-sky data assimilation of MWTS-2 and MWHS-2 in the Met Office global NWP system [J]. Advances in Atmospheric Science, 2021, 38(8):1682-1694.
- [34] LINDSKOG M, DYBBROE A, Randriamampianina R. Use of microwave radiances from Metop-C and Fengyun-3 C/D satellites for a northern European limited-area data assimilation system[J]. Advances in Atmospheric Science, 2021, 38(8):1415-1428.
- [35] 据陈相,杜娟,李火青,等.RMAPS-CA 在新疆区域预报效果对比检验与评估[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(3):68-77.
- [36] 据陈相,刘军建,李曼,等.乌鲁木齐区域高分辨率数值预报系统 V2.0 预报性能客观检验[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):38-46.
- [37] SAUNDERS R, MATRICARDI M, BRUNEL P. A fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations-RTTOV-5[C]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: Reading, UK, 1999.
- [38] XIE Y, MAO L, CHEN M, et al. Evaluation and assimilation of FY-3C/D MWHS-II radiances in the RMAPS-CA[J]. Remote Sensing, 2022, 14(275):1-19.
- [39] HARRIS B, KELLY G. A satellite radiance bias correction scheme for data assimilation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, 127(574):1453-1468.
- [40] MA Y, MAMTIMIN A, ZHANG G. Observation error diagnostics and applicability evaluation of MHS brightness temperatures in RMAPS-CA [J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(15):5626-5647.
- [41] 马玉芬,李如琦,张萌,等.AIRS 辐射亮温在中亚地区的偏差分析及适用性[J].干旱区研究,2021,38(1):12-21.

Assimilation of FY-3C MWHS-Ⅱ Radiance in RMAPS-CA

MA Yufen^{1,2,3,4}, JU Chenxiang^{1,2,3,4}, Aliyaer Aihaiti^{1,2,3,4}, LIU Junjian^{1,2,3,4}, Ali Mamtimin^{1,2,3,4}

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

2. National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang, Urumqi 830002, China;

3. Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

4. Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, China)

Abstract Conventional meteorological observations are sparse in Central Asia. Assimilation of radiance data from the microwave humidity detector(MWHS-Ⅱ) on the polar orbiting satellite FY-3C can effectively reduce the uncertainty of initial field of numerical prediction in this region. With a series steps of quality control and variational bias correction (VarBC), FY-3C/MWHS-Ⅱ radiance are assimilated to the rapid cycle and multi-scale analysis and prediction system for Center Asia (RMAPS-CA) for the first time, and its assimilation impact upon forecast precision was then further evaluated. It shows that: (1) Approximately 56% radiance data has been assimilated by RMAPS-CA. (2) Both mean bias (MB) and root mean squared error (RMSE) of the background brightness temperature were reduced by VarBC for majority humidity channels, with the maximum reduction of RMSE 0.5 K at channel 14. The brightness temperature bias at channel 14 between measurements and analysis are relative larger than that at other channels, which worth special attention in assimilation experiments or operationally run. (3) Assimilation of FY-3C/MWHS-Ⅱ radiance are capable of uplifting the prediction precision level of air temperature, geopotential height and wind speed in majority atmosphere layers. Meanwhile, the assimilation also improves the forecasting precision of air temperature at altitude 2 m and wind speed at 10 m with RMSE reduction 0.2 K and 2 m/s respectively. In addition, the assimilation effectively reduced the wrongly forecast rate of light rain with precipitation column greater than 0.1 mm per 24 hours, and the threat score of light rain has increased with an amplitude of 16%, which is rather preferable. It reduced the miss-hunted rate of moderate rain with 24-hour accumulated rain-column over 6.1 mm and heavy rain over 12.1 mm, with the bias score of them increased by 18%, 38% and 36%, respectively.

Key words FY-3C; microwave humidity detector; MWHS-Ⅱ; quality control; bias correction; assimilation influence evaluation