

惠英,马永永,娄盼星,等.晴空区 FY-4A AGRI 资料同化对陕西一次强降水过程预报效果影响[J].陕西气象,2025(5):10-22.

文章编号:1006-4354(2025)05-0010-13

晴空区 FY-4A AGRI 资料同化对陕西一次强降水过程预报效果影响

惠英^{1,2},马永永^{1,2},娄盼星^{1,2},孙璐^{1,2},董妍^{1,2},姚景婷³

(1. 陕西省气象科学研究所,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 兰州大学大气科学学院,兰州 730000)

摘要:静止卫星具有可连续高频率观测的特点,被广泛应用于数值天气预报中,以获得更精细、更真实的数值模式初始条件。基于 WRF 框架的陕西省区域数值模式系统,针对 2022 年 7 月陕西一次强降水过程,利用三维变分直接同化方法,协同常规观测资料,同化风云四号 A 星所探测的两个水汽通道辐射率资料。通过设计三组对比试验:(1)不同化任何资料的控制试验(CTRL);(2)仅同化常规观测资料的试验(CONV);(3)同化常规观测与 AGRI 水汽通道的试验(AGRI),系统评估了晴空区 FY-4A 卫星两个水汽通道辐射资料同化对降水预报的改进效果。结果表明,经过一系列的质量控制和偏差订正,通道 9(10)同化前观测亮温和背景场亮温差值(observation minus background,简称 OMB)的平均值由 0.76(0.78)K 减小到 0.04(-0.02)K,同化后观测亮温和分析场亮温差值(observation minus analysis,简称 OMA)的平均值进一步缩小为 0.01(0.01)K;通道 9(10)同化前观测亮温和背景场场亮温差 OMB 标准差为 0.83(0.84)K,同化后观测亮温和分析场亮温差 OMA 的标准差为 0.43(0.49)K,说明同化 AGRI 水汽通道辐射资料改善了模式的初始场。通过协同同化 FY-4A AGRI 水汽通道辐射率资料与常规观测资料,显著改善了降水预报性能,常规观测资料通过调整风场优化了天气系统配置,使降水落区与实况更加接近,AGRI 水汽通道资料同化修正了中高层比湿场,使强降水中心的强度预报误差降低 20%。

关键词:晴空区;AGRI 资料同化;质量控制;强降水;预报效果影响

中图分类号:P435

文献标识码:A

初始场的准确性是影响短期数值天气预报准确率的重要因素^[1]。近些年数值预报准确率的提高离不开卫星资料同化技术的发展。资料同化是将观测到的资料信息和模式状态变量(背景场)融合的一种数据分析技术^[2],可在高分辨率数值模式的初始条件中加入更为丰富和真实的中小尺度天气信息,更加精准地刻画大气在初始时刻的运动状态^[3],从而改善背景场质量,生成统计最优的

分析场。资料同化因其在数值预报中的重要性已发展成一个独立的研究领域^[4]。

当前,对卫星辐射资料的同化可以分为两类,一类是低轨道、高水平分辨率、低时间分辨率的极轨气象卫星,另一类是高轨道、低水平分辨率、高时间分辨率的静止气象卫星。中国气象卫星风云四号 A 星(FY-4A)于 2016 年 12 月 11 日发射,并于 2018 年 5 月 1 日投入业务运行,位于静止轨

收稿日期:2024-04-18

作者简介:惠英(1976—),女,汉族,陕西长安人,博士,高工,主要从事数值天气预报。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021k-1);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0354)

道的 104.7°E 上空,是我国第二代静止气象卫星。先进的静止轨道辐射成像仪(AGRI)是风云四号静止气象卫星的四个主要载荷之一,主要用于对地表、大气和云目标进行高时空分辨率成像和分钟级的大范围监测。静止气象卫星具有覆盖范围广,可连续高频率观测的特点,被广泛应用于数值天气预报中,以获得更准确的数值模式初始条件。研究表明,静止卫星资料的同化可以显著提高湿度、温度及风场的分析和预报^[5-7],也可以提高台风路径及强度的数值预报效果^[8-11]。比如,日本静止卫星 Himawari 8 AHI(葵花 8 高级成像仪)晴空资料的同化有效修正了台风预报路径和台风核心区水汽和风场的预报^[11],且对对流层中高层的水汽预报效果有所改善^[12];我国的静止卫星 FY-4A AGRI 探测仪第 9 通道的水汽同化可以产生合理的水汽增量,提高了 WRF(weather research and forecasting model)的定量降水预报性能^[13]。在静止卫星的红外探测通道中,由于权重函数峰值高度不同,更关注峰值高度较高、偏差最小的水汽吸收通道辐射资料的同化^[5,7,13-17],达到改善模式分析和预报效果的目的。另外由于云参数的初始误差以及云对辐射过程的非线性影响造成的观测算子模拟误差偏大,并且误差呈非高斯分布给云区卫星红外资料直接同化带来困难^[18],因此会更多关注直接同化晴空条件下的红外辐射数据^[6,9,14,18-19]。

WRF 模式是美国环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction,简称 NCEP)、美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research,简称 NCAR)等机构研发的中尺度天气预报模式。WRF 模式因其可移植、易维护、可扩充和高效率等特点,已经成为多尺度区域天气预报的常用工具。中国许多业务单位基于 WRF 模式开发了适用于当地的短临预报系统,例如:北京市气象局的中尺度数值模式系统、上海台风所和上海高分辨率区域台风模式、浙江省气象局的浙江省快速更新同化系统。WRFDA(weather research and forecasting model's data assimilation)^[20]是 WRF 模式的资料同化系统,能同化多种常规和非常规观测资料,包括:地面、

探空、雷达、卫星等观测资料。卫星资料同化的方法有三维变分 3DVar(three dimensional variation),四维变分 4DVar(four dimensional variation)及集合三维变分混合同化^[6] hybrid-3DEnVar(hybrid three-dimensional variational data assimilation)方法。同化 AGRI 水汽通道资料可以直接改善对流层中高层湿度场的质量^[19],有助于提高强降水的预报准确率。为提高定量降水预报的准确率,利用 WRFDA V4.1 中搭建的 FY-4A 风云卫星资料数据接口,直接同化 AGRI 资料,选取 2022 年夏季陕西地区一次典型强降水个例进行模拟试验,分析同化 FY-4A AGRI 资料对强降水天气分析场和预报结果的影响。

1 资料和方法

1.1 资料情况

研究所用卫星资料为 AGRI 空间分辨率 4 km 的全圆盘 L1 级辐射率数据及 GEO(地理)定位数据。数据为 HDF5 格式,是 AGRI 0 级源包数据经过质量检验、地理定位、辐射定标处理后得到的预处理产品。由于本文仅同化 AGRI 晴空观测数据,因此利用 4 km 分辨率的 L2 级全圆盘云检测产品(cloud mask,简称 CLM)进行云检测,数据为 NETCDF 格式。AGRI 仪器拥有 14 个通道,其中包括 6 个可见光和近红外通道、2 个中波红外通道、2 个水汽通道、4 个长波红外通道。由于辐射传输模式对可见光及近红外波段模拟能力较差,故暂不考虑通道 1~7,AGRI 通道 8 和通道 11~14 的波峰所处高度距地表较近,在资料同化过程中易受到地表发射率和云的影响,亦不考虑。选取 AGRI 在水汽波段的两个红外通道 9、10,中心频率分别为 $6.25\ \mu\text{m}$ 、 $7.1\ \mu\text{m}$,权重函数分别在对流层上层、中层达到峰值^[13],主要获取 250 hPa、350 hPa 为中心的大气水汽信息,受地表发射率的影响较小^[9]。

模式背景场资料来自于 NCEP(水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)全球预报系统 GFS(global forecast system)模式预报场。实况天气资料来源于 NCEP 全球资料同化系统 GDAS(global data assimilation system)的 0.25° 水平分辨率的再分析数据产品 FNL(Final),与 AGRI 资料协同同化

的常规地面、探空资料及实况降雨量均来自陕西天擎系统。

1.2 AGRI 资料的预处理及质量控制

预处理及质量控制流程包括:(1)仅留下 9~10 通道亮温;(2)使用 CLM 产品进行云检测,且剔除有云像元;(3)挑选所需关键区域的数据,AGRI 资料裁剪范围为 $0^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$;(4)由于卫星扫描时,靠近边缘的视场会存在变形,因此剔除卫星天顶角大于 60° 的观测点数据。

由于卫星的红外通道几乎不能穿透云层,只能探测到云顶的信息,辐射传输模式在有云区域模拟的亮温与实况亮温差距很大,故本研究中只同化了晴空区的亮温观测资料,云检测后仅保留 CLM 产品数值为 3 的完全晴空点。为了简化运算去除辐射数据观测误差的空间相关性,将稀疏

化半径设为 20 km,这与 Wu 等^[21]、Honda 等^[8]同化葵花 8 卫星 AHI 辐射率资料时的设置一致。水汽通道 9 和 10 的偏差及标准差相对较小,并且偏差随海陆差异不明显^[22],故更适合内陆区域数值模式系统。图 1a、图 1b 分别为 AGRI 通道 9、10 观测的亮温分布,红色色调是云区,蓝色色调是陆地(无云区),蓝色矩形指示的强云团就是影响本次降水过程的主要天气系统,绿色矩形指示的云团作为水汽储存池间接影响了本次降水过程,将在后文细致讨论。

由于通道 9 观测的峰值高度比通道 10 高,通道 9 探测的亮温普遍比通道 10 低,且云区和非云区的界限不是很明显,色调对比度不高,而通道 10 探测的陆面和云区对比度较高,能明显看出控制华南地区的大范围的副热带高压系统,以及副高外围的云区。经过质量控制后(图 1c、图 1d)剔

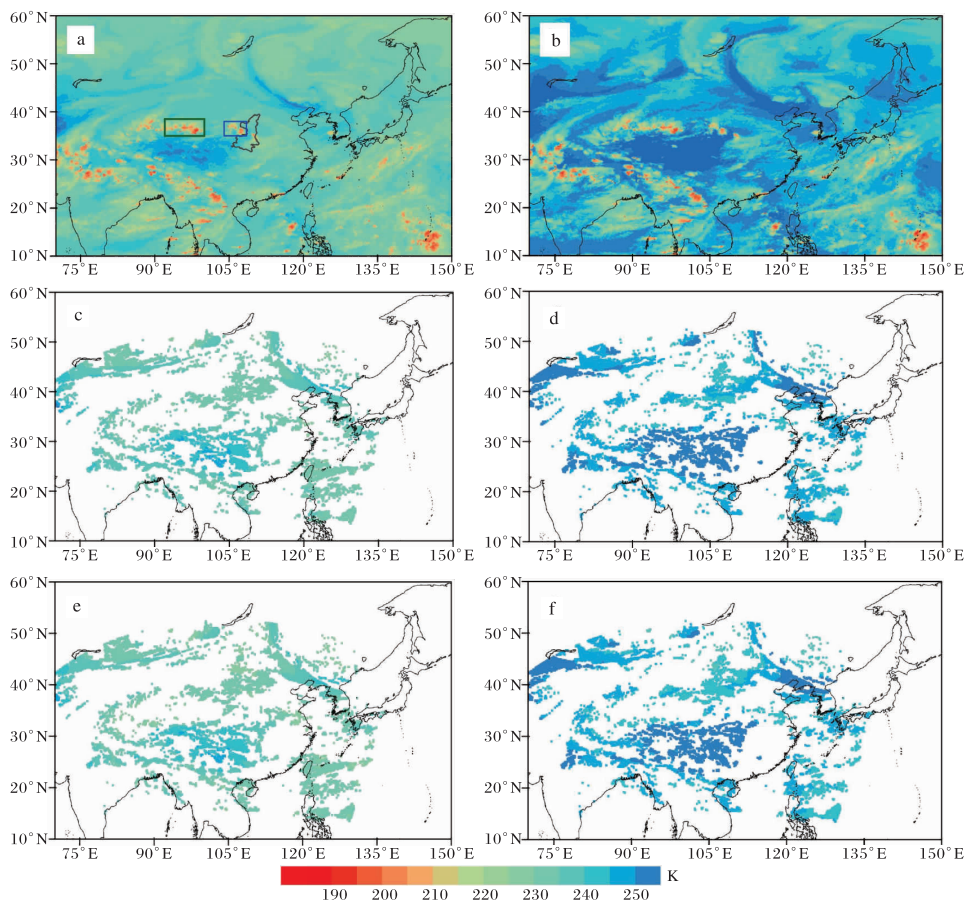


图1 2022-07-14T12(UTC)质控前的全天空观测亮温(单位为 K;a 通道 9,b 通道 10;a 中蓝色、红色矩形内的云系为直接和间接影响本次降水的重要云团)、质控后的观测亮温(单位为 K;c 通道 9,d 通道 10)和质控后的模拟亮温(单位为 K;e 通道 9,f 通道 10)(审图号:GS(2024)0650 号,下同)

除了云区的像素点,留下了偏蓝色调的无云区。相应的模式模拟亮温(图 1e、图 1f)与质控后的观测亮温基本一致,满足同化的要求。需要注意的是虽然在质控的过程中剔除了有云像元,仅仅留下无云区的观测亮温,但在关注区域的上下游还有很多可以同化的点,对未来天气预报和模式初始场的改善仍存在积极作用。

1.3 偏差订正

变分同化要求观测误差和背景误差都符合无偏的高斯分布^[23],需要通过偏差订正达到该目的。偏差订正主要用来处理两个误差,一个是观测误差,一个是辐射传输模式带来的误差^[14],这里观测误差定为 1.5 K,若观测亮温和模拟亮温差值绝对值大于该阈值,则认为该值为异常值而剔除。通过比较观测背景差(OMB)和观测分析差(OMA)的概率密度分布情况可以诊断偏差订正的有效性^[12]。AGRI 的偏差订正采用变分偏差订正(VARBC)方法,公式如下。

$$\tilde{H}(x, \beta) = H(x) + \sum_{i=0}^N \beta_i p_i(x) \quad (1)$$

其中, $H(x)$ 、 $\tilde{H}(x, \beta)$ 分别是偏差订正前、后的观测算子, p_i 是预测因子, β_i 是相应的标量系数。图 2 显示了 OMB 和 OMA 的概率密度分布,通道 9 和 10 大多数像元的 OMB(图 2a 和图 2c)明显大于 0 K,说明背景场模拟亮温(brightness temperature, BT)与观测值偏差较大,背景 BT 比观测 BT 冷,OMB 为正偏差。图 2 中灰色阴影区覆盖了 TB 的误差在 ± 1.5 K 之内的像素点,经过偏差订正后(图 2c、图 2d)OMB 较为对称且集中分布在 0 K 左右,偏差明显减小,符合高斯分布,OMA 的概率密度函数分布更加对称地集中在 0 K 附近,误差减小。通道 9(10)经过偏差订正后,OMB 的平均值由 0.76(0.78) K 减小到 0.04(-0.02) K,OMA 的平均值为 0.01(0.01) K。通道 9(10)同化前 OMB 标准差为 0.83(0.84) K,同化后 OMA 的标准差为 0.43(0.49) K(图 2e、图 2f),更接近于 0 K,说明分析场通过减少背景场误差,与观测值匹配地更好,各通道的 OMA 和 OMB 诊断结果表明同化是有效的。

2 背景误差协方差矩阵及观测算子

2.1 背景误差协方差矩阵

背景误差协方差矩阵在资料同化系统中的作用至关重要,它控制着信息从观测位置向四周传播的方式,决定模式变量之间在动力上是否协调一致^[24]。利用 NMC(national meteorology center)方法中的 cv5 方案(流函数、非平衡势函数、非平衡温度、相对湿度、非平衡地面气压)统计 2022 年 6 月 1—30 日模式的背景误差协方差矩阵,其中流函数的水平相关特征尺度从近地层的 400 km 左右随高度减小到模式顶的约 100 km(图 3a),非平衡势函数的水平相关特征尺度从近地层的 460 km 随高度减小到模式顶的约 100 km(图 3b)。相比之下温度和湿度的水平变化更为局地,尺度更小,非平衡温度的水平相关特征尺度在第 5~10 层(距地 900~800 hPa 之间)为 60 多公里,之后随高度减小到模式顶约 5 km(图 3c),相对湿度的水平相关特征尺度从 55 km 随高度减小到 30 层(约 80 hPa)的 5 km,随后又快速增加到 80 km(图 3d)。

2.2 观测算子

观测算子是大气状态变量转换成仪器观测变量的重要途径,对于卫星资料同化来说,观测算子包括三个部分。

$$H = H_{RT} H_v H_h \quad (2)$$

其中, H 表示观测算子; H_{RT} 表示辐射传输模式(RTTOV12); H_v 和 H_h 分别代表模式空间向观测空间的垂直插值和水平插值。同化过程中,辐射传输模式利用插值得到的大气温度、湿度背景廓线,下垫面状态和云参量等来计算辐射强度。

晴空条件下,卫星所接收到的通道的辐射强度 L^{Cr} 的表示^[26]如下。

$$L^{Cr}(\nu, \theta) = \tau_s(\nu, \theta) \xi_s(\nu, \theta) B(\nu, T_s) + \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) d\tau + (1 - \xi_s(\nu, \theta)) \tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 \frac{B(\nu, T)}{\tau^2} d\tau \quad (3)$$

其中, ν 为频率(Hz); θ 为卫星天顶角,单位为 rad(弧度); $\tau_s(\nu, \theta)$ 为地面至外空间的透过率, τ 为各层至外空间的透过率, $\xi_s(\nu, \theta)$ 为地表发射率,单位均为无量纲百分比; T 为各层平均温度, T_s

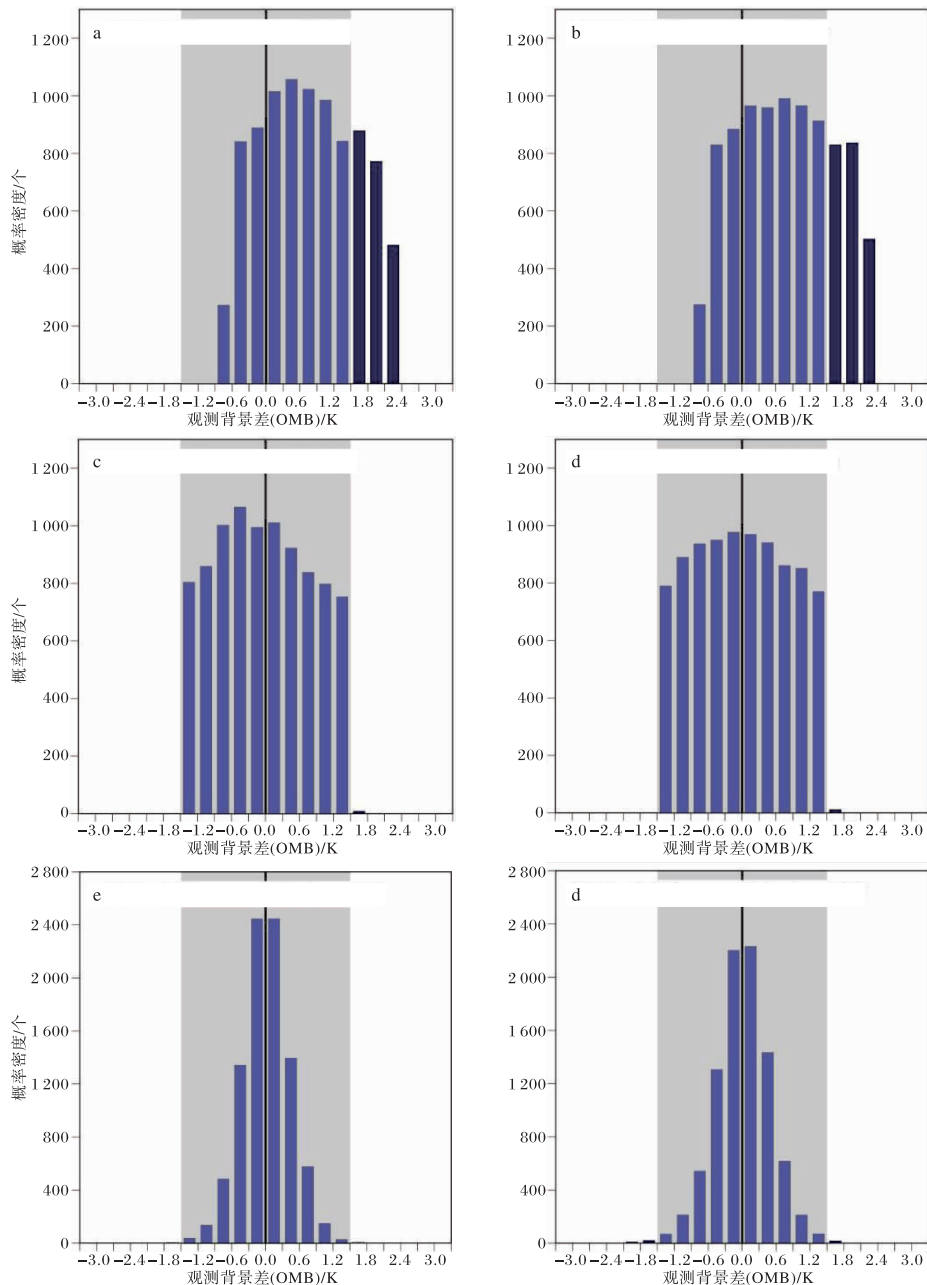


图2 AGRI 通道 9(a、c、e)和通道 10(b、d、f)亮温 OMB 和 OMA 的概率密度分布(a、b 为未进行偏差订正;c、d 为偏差订正后;e、f 为同时进行偏差订正和质量控制)(图中灰色阴影表示 ± 1.5 K 的概率密度分布区间)

为地表温度,单位均为 K; $B(\nu, T)$ 为频率为 ν ,温度为 T 时的 Planck 函数,表示单位时间内从单位表面积和单位立体角内以单位频率间隔辐射出的能量,单位为 $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{Hz})$ 。公式第一项是地表发射的辐射,第二项是大气发射的辐射,第三项是地表反射的大气向下辐射,温度廓线的信息包含在 Planck 函数中,气体的密度廓线(如水

汽)则与透射率 τ 有关,构成了卫星辐射资料同化的基础理论,从而对模式的背景廓线进行同化更新。

3 试验设计

数值模拟试验设置为双层嵌套,具体如图 4 所示。中心经纬度 37.0°N 、 105.0°E ;外层格点数 649×541 ,水平分辨率 9 km;内层格点数 672×675 ,

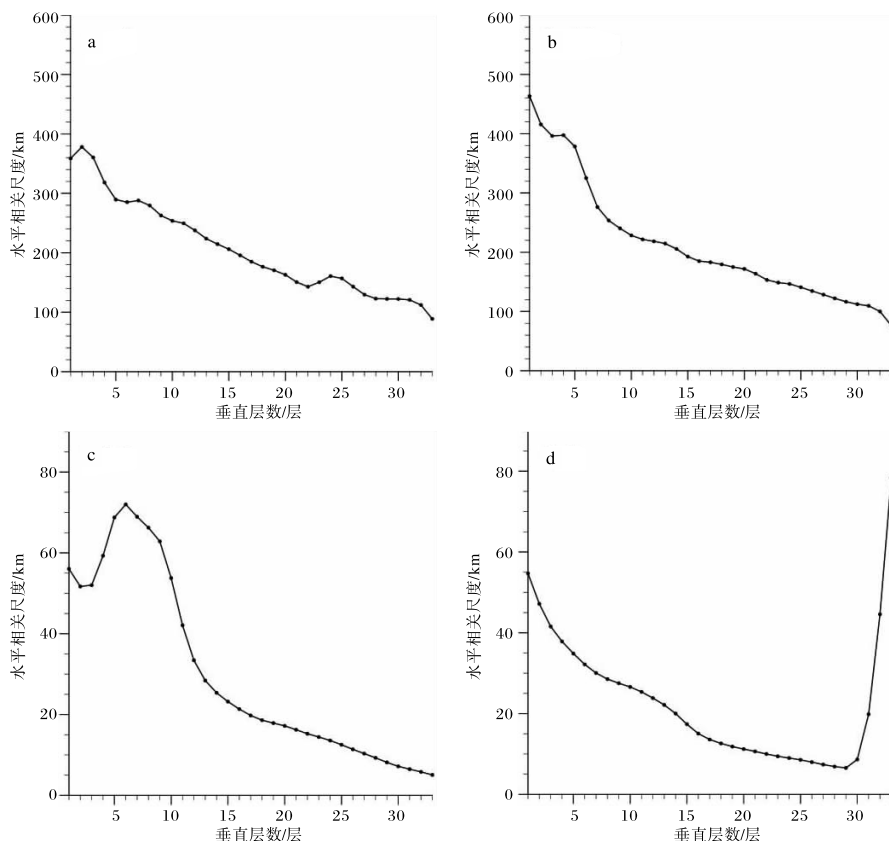


图3 水平相关尺度随模式垂直层数(高度)的变化(a 流函数;b 非平衡势函数;
c 非平衡温度;d 相对湿度)

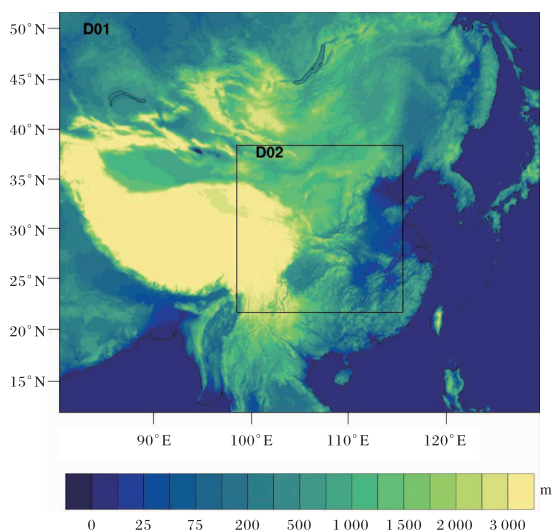


图4 WRF 4.1 区域设置及高程分布

水平分辨率 3 km;垂直层数 34 层,模式顶为 50 hPa。数值模式系统和同化系统分别是 WRF V4.1 和 WRFDA V4.1 的三维变分同化系统。采用的物理参数化方案:RRTMG 短波和长波辐射方案^[25]、Tiedtke 积云参数化方案^[26]、Thompson

微物理方案^[27]和 MYJ 边界层参数化方案^[28]。

为了评估 FY-4A AGRI 资料同化对强降水的预报效果,设计了 3 组对比试验。一是不同同化任何观测资料的控制试验(CTRL),二是仅同化常规地面和探空观测资料的对比试验(CONV),三是同时同化常规观测资料和 AGRI 资料的对比试验(AGRI)。同化 AGRI 资料需要剔除有云的像元,因此选择个例时要避开秋季连阴雨时段,本文选择 7 月的一次短时对流性降水过程进行模拟研究。通道 13(11.5~12.5 μm)的权重函数峰值高度接近于地表,主要用于探测地表及云的信息,能够很好地区分云和地表,主要用来进行云检测,图 5a 表示本次模拟试验中的晴空区资料情况(图中绿色圆点)。图 5b 是同化的 2 800 多个地面观测站点分布情况,可以看出陕西省加入了考核站的数据,站点明显比其他省份稠密。图 5c 是参加同化的全国探空资料的分布情况。

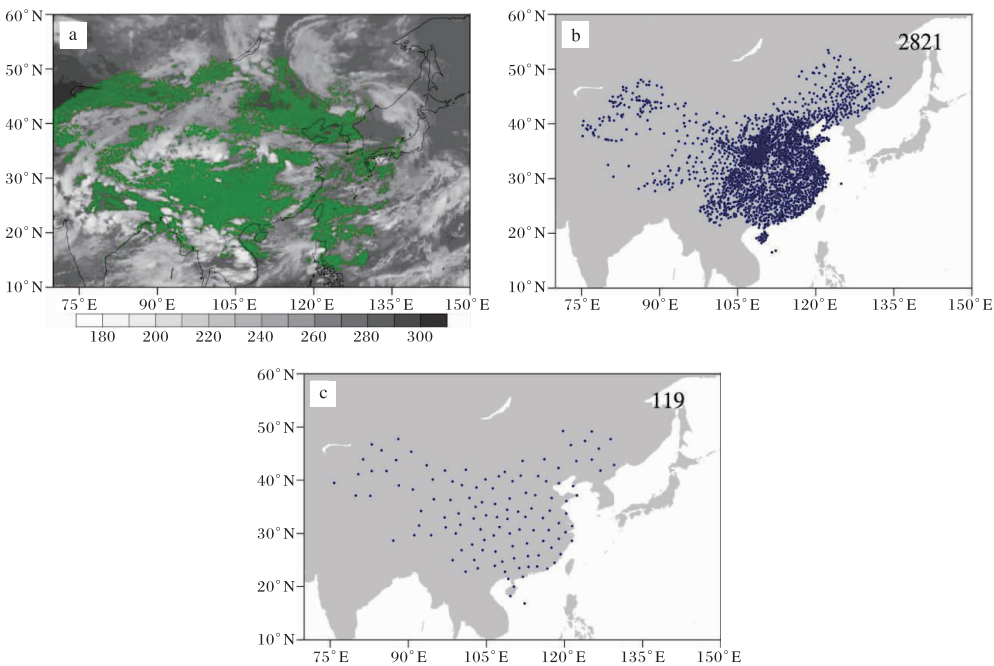


图5 2022-07-14T12(UTC)WRF 4.1 模拟试验所用的同化资料分布(a AGRI 观测的第 13 通道亮温(K)及 CLM 云掩码为晴空点(绿点);b 地面观测站点;c 高空探测站点(b、c 图右上角数字为同化的总站点数))

4 天气形势分析

2022 年 7 月 14—15 日,受短波槽、低涡、低层切变线、西太平洋副热带高压等天气系统的共同影响,陕西中北部地区出现暴雨、局地大暴雨天气。7 月 14 日 12 时(UTC,下同)500 hPa 天气图(图 6a)上,西太平洋副热带高压 588 dagpm 线西伸脊点到达 105°E 附近,588 dagpm 线和 584 dagpm 线之间的偏南风将西太平洋上空的暖湿水汽源源不断

地向内陆输送,形成了一条沿副高外围的显著水汽输送通道,比湿达 8 g/kg。巴尔喀什湖和贝加尔湖之间的西西伯利亚地区存在一较强的气旋系统,气旋后部的偏北气流为降水过程提供了强干冷空气。700 hPa 上(图 6b)在陕西关中至陕北一带存在东西向的切变线,北支是东北冷涡回流的偏东风冷空气,南支为副高带来的偏南风暖湿气流,700 hPa 上比湿达到了 14 g/kg,为本次降水

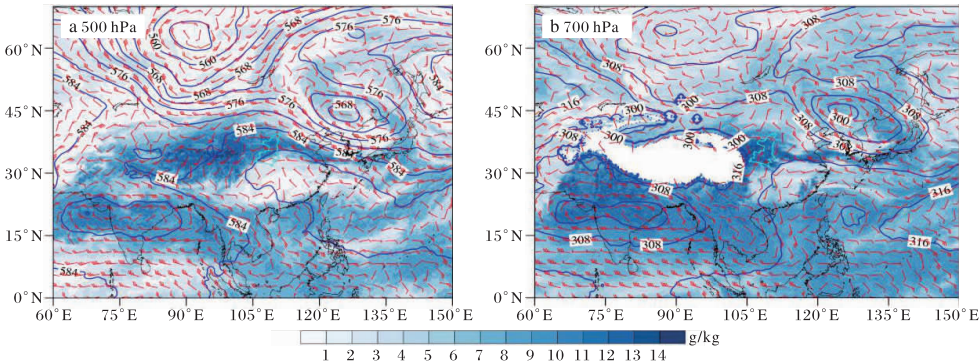


图 6 2022-07-14T12(UTC)天气图(a 700 hPa;b 500 hPa)(蓝色阴影表示比湿;红色风羽表示风;蓝色实线表示位势高度,单位为 dagpm;图中淡蓝色线条代表陕西地图轮廓,审图号:GS(2024)0650 号,下同;空白区域代表地形高度高于 700 hPa 等压面高度,资料缺失)

过程提供了丰沛的暖湿水汽条件。冷暖空气在 30°N 到 40°N 之间的中纬度地区交汇,产生大范围的云雨区,并向东发展移动,在 500 hPa 和 700 hPa 均表现为一个东西向的气流辐合区或切变线,为本次降水过程提供了动力条件,分别对应着云图上(图 1a)的绿色方框中的云带和蓝色方框中的云团。

5 结果分析

5.1 850 hPa 模式分析场相对于背景场的改变量

利用模式分析场相对于背景场的改变量(分析增量)能够诊断观测资料同化对背景场的影响程度,从而分析出同化常规资料和 AGRI 资料是如何提高降水预报准确率的。从 850 hPa 水汽通量和风场分析增量分布来看,AGRI 试验(图 7b)和 CONV 试验(图 7a)对背景场的改变主要集中在

在陆地(陆面)高空资料分布的区域,改变最显著的区域位于图 6 中东北冷涡与西北太平洋副热带高压之间的过渡带,这里气象要素变化剧烈,同化后的改变量也大。CONV 试验(图 7a)和 AGRI 试验(图 7b)中水汽通量和风场的分析增量分布非常相似,且两者显著增加或减少的分布区域相一致。AGRI 试验与 CONV 试验水汽通量和风场分析增量差值(图 7d)可以评价 AGRI 资料在同化试验中的作用。可以看出,两个试验的差值较 CONV 试验分析增量小一个数量级,说明 AGRI 资料的加入较常规观测资料同化对背景场的影响要小,分析增量的变化主要是由常规观测资料同化引起。图中风速增量的大值区对应着水汽通量增量的大值区,风场的改变调整了水汽的分布。在 CONV

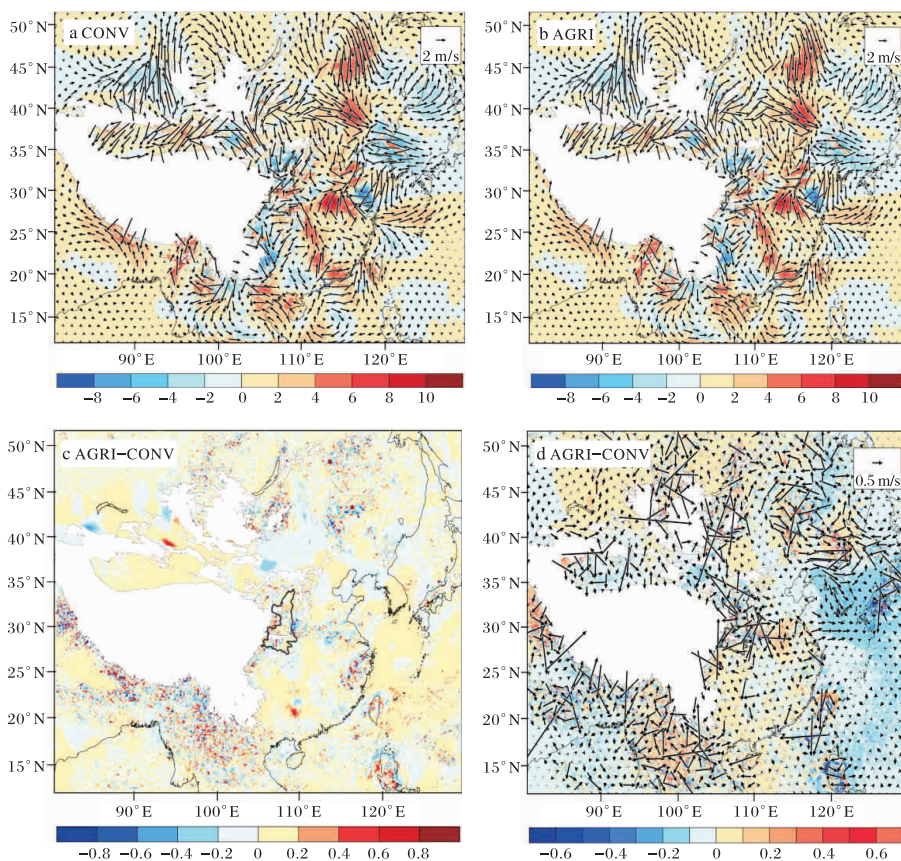


图 7 2022-07-14T12(UTC)850 hPa CONV 试验水汽通量(色斑,单位为 $10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和风场(单位为 m s^{-1})的分析增量(a),AGRI 试验水汽通量(色斑,单位为 $10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和风场(单位为 m s^{-1})的分析增量(b),AGRI 与 CONV 试验 850 hPa 初始场比湿(色斑,单位为 $10^{-4} \text{ kg kg}^{-1}$)的差值(c),AGRI 和 CONV 试验 850 hPa 初始场温度(色斑,单位为 K)和 wind 场(单位为 m s^{-1})的差异(d)(图中空白区域代表地形高度高于 850 hPa 等压面高度,资料缺测)

试验和 AGRI 试验中,陕北出现偏北风增量,降水系统向南推进,加之陕西以南出现了偏东南水汽输送通道(图中绿色箭头),因此关中北部和陕北南部水汽辐合增加,降水量增大。

850 hPa 比湿(温度)AGRI 试验与 CONV 试验的差值图 7c(图 7d)主要集中在 $-0.08 \sim 0.08 \text{ g/kg}$ ($-0.2 \sim 0.2 \text{ K}$) 之间,比湿(温度)数值变化较小,但 AGRI 试验中比湿(温度)的差值在关中地区改变明显,同化效果显著。同化 AGRI 资料,关中地区出现了增湿区和弱的降温区,有助于水汽凝结成降水。

图 7d 上黄海区域有大范围 850 hPa 温度负差值显著区,AGRI 资料同化弥补了海洋上资料不足的缺陷。从风速的差值也可以看出,AGRI 试验较 CONV 试验也调整了风场,但是幅度不大,大多数区域小于 0.5 m/s 。AGRI 资料同化

直接影响模式的温湿廓线,特别是湿度廓线,进而通过变量之间背景误差协方差关系调整得到风场的变化。比湿变化的局地性可以反映 AGRI 观测资料稠密的优点,表现在降水落区和强度上也具有一定的精细化特征。

5.2 500 hPa 模式分析场相对于背景场的改变量

500 hPa 上 CONV 试验(图 8a)和 AGRI 试验(图 8b)水汽通量和风场的分析增量分布相似。在引发此次陕西中北部降雨的上游区域,CONV 试验和 AGRI 试验均模拟出相较于背景场更为明显的两个偏西水汽输送大值区(绿色矩形区),形成一个自西向东的水汽输送通道,使陕西中部水汽通量显著增加,有利于产生大降水。500 hPa 陕西以西两个试验均为偏西风分析增量,上游的天气系统比控制试验向东传播得更快,降水落区向东调整,加之 850 hPa 陕北的偏北风分

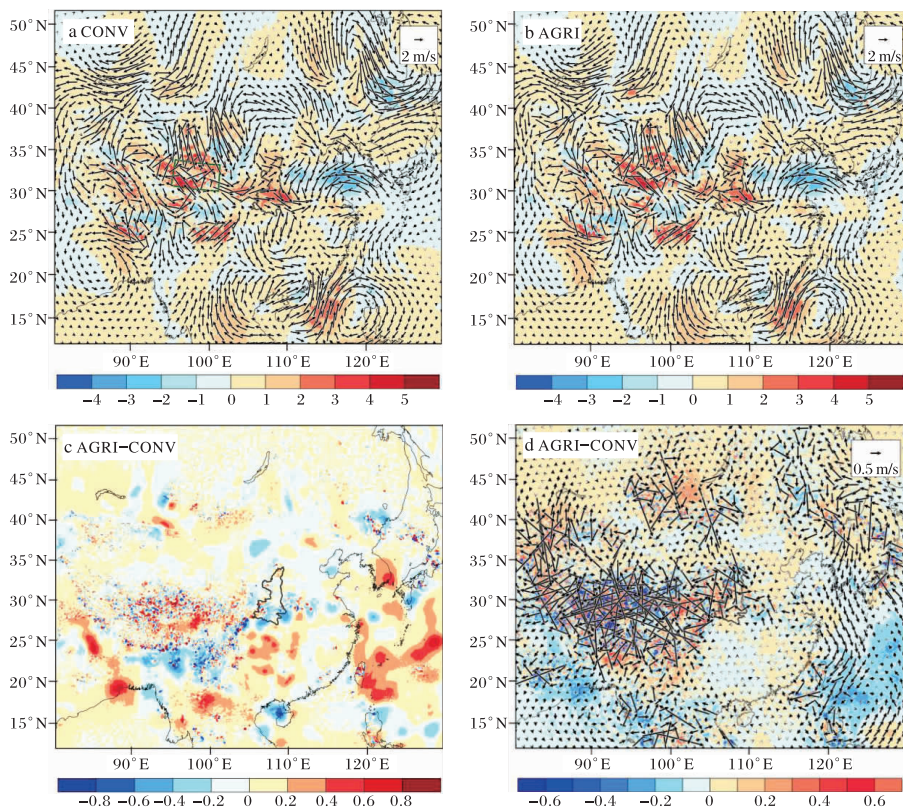


图 8 2022 年 7 月 14 日 12 时(UTC)500 hPa CONV 试验水汽通量(色斑,单位为 $10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和风场(单位为 m s^{-1})的分析增量(a),AGRI 试验水汽通量(色斑,单位为 $10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和风场(单位为 m s^{-1})的分析增量(b),AGRI 与 CONV 试验 500 hPa 初始场比湿(色斑,单位为 $10^{-4} \text{ kg kg}^{-1}$)的差值(c),AGRI 和 CONV 试验 500 hPa 初始场温度(色斑,单位为 K)和风场(单位为 m s^{-1})的差异(d)

析增量,引起降水落区东移南压,与实况降水落区更为吻合。

同化 AGRI 资料能引起中高层气象要素的改变,特别是比湿的改变。两个试验在 500 hPa 上比湿分析增量的差值与 850 hPa 相比范围更大一些,这是由于 500hPa 更加接近于两个水汽通道的峰值高度,故同化效果更明显。AGRI 试验相对于 CONV 试验来说,在陕西中北部(即主要降水区)比湿是增加的,但在秦岭以南比湿以减少为主,与实况降水量在陕南较弱一致,说明 AGRI 资料同化优化了初始场比湿的分布。

5.3 不同同化试验降水预报效果分析

同化卫星数据,可以改变大尺度的位势高度场和风场,从而改变降水落区和强度分布,有效降低误报率^[13]。图 9 比较了 2022 年 7 月 15 日 12 时

(UTC)实况降水量(图 9a)和三个试验(图 9b、9c、9d)的 24 小时累积降水量,三个试验均于 2022 年 7 月 14 日 12 时起报。从降水量实况来看,固原南部到延安一线,分布着三个强降水中心,降水量最大值在甘肃省庆阳市庆城县(36.14°N、107.63°E)为 373.2 mm。CTRL 试验中,降水落区重心明显偏西、偏北(图 9b),且最大降水量(218.8 mm)也远低于实况值。CONV 试验同化了常规地面和高空观测资料,较为准确地预报出了降水落区(图 9c),预报结果与观测更为相似,且模式最大降水量提升至 278.0 mm,更加逼近观测值。较好的 CONV 试验同化效果得益于高空风场资料的同化,它优化了风场辐合区的位置,提升了降水落区的准确性。AGRI 资料的同化进一步改善了湿度场和最大降水量,较前两个同化试验均有提升,达到 293.6 mm(图 9d)。

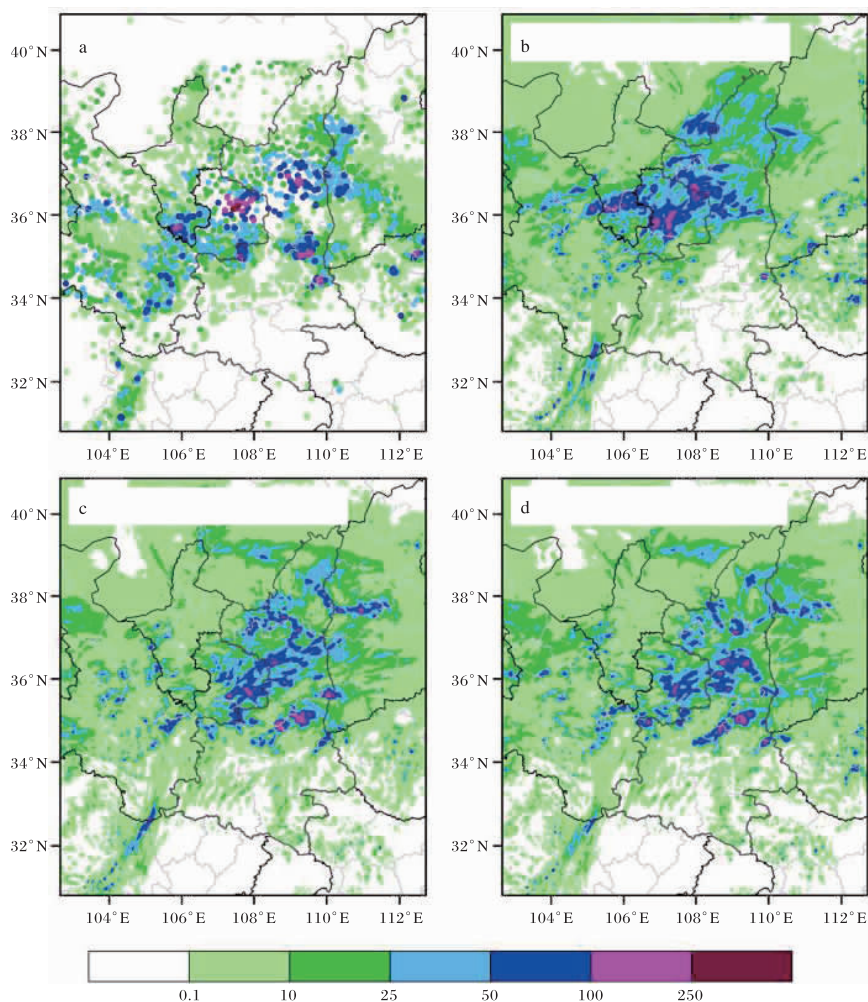


图 9 2022 年 7 月 15 日 12 时(UTC)24 h 累积降水量(单位为 mm)实况观测(a)、CTRL 试验(b)、CONV 试验(c)、AGRI 试验(d)

CONV 和 AGRI 试验的降水空间分布总体相似,但与 CTRL 试验相比,AGRI 试验显著改善了 38°N 以北区域的降水空报现象。实况降水图上三个强降水中心之间清晰地呈现出弱降水过渡带,并且弱降水过渡带中还存在无降水区域。虽然 AGRI 试验仍对这个无降水区的模拟不足,但是成功预报了弱降水过渡带,相比 CONV 试验在主要强降水区的空间精细化程度更高,并且成功修正了 CONV 试验在韩城地区的暴雨空报问题。结果表明,AGRI 辐射资料的同化能有效优化降水系统的空间配置和强度特征,显著提升局地降水分布的精细化预报能力,特别是对降水强度误

差的改进效果显著。

从图 10 的 TS 评分可见,AGRI 资料同化后, $\geq 0.1 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 量级降水的预报技巧明显提升,其 BIAS 评分与 CONV 试验相当,同时空报率和漏报率均有所降低,而 $10 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 以上量级的降水预报效果优劣较复杂。这一改进源于 AGRI 资料同化前严格的质量控制流程和云检测算法,云雨区的辐射率资料被过滤,仅保留晴空区的高质量观测数据。这种选择性同化机制不仅直接改善了晴空区及其周围小雨量级降水的晴雨预报准确率,还通过调整大尺度环流场,间接提升了强降水系统的预报效果。

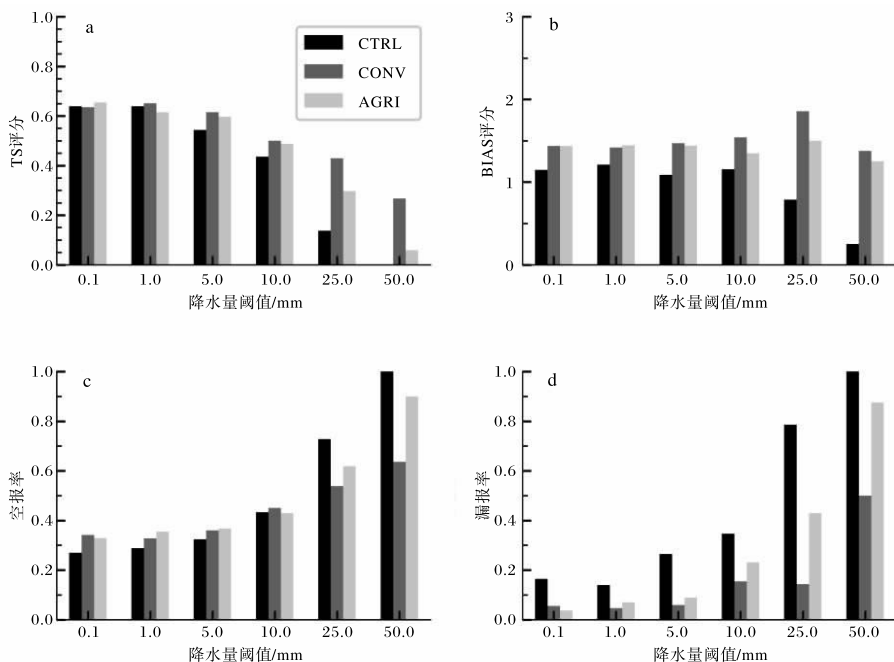


图 10 三种试验设计对不同阈值 24 h 降水量预报的 TS 评分(a)、BIAS 评分(b)、空报率(c)、漏报率(d)

6 结论和讨论

(1) 本文基于 WRF 框架的区域高分辨率模式对 FY-4A AGRI 两个水汽通道的晴空辐射率资料进行同化,并与不同化资料的 CTRL 试验及仅同化常规观测的 CONV 试验对比,旨在分析 AGRI 资料同化对陕西中北部一次大范围强降水天气的同化预报效果。采用 WRFDA 3DVar 方法在 $9 \text{ km}/3 \text{ km}$ 的嵌套网格配置中进行同化,发现加入 AGRI 资料后,分析场 OMA 的值更接近

于 0 K,与观测场匹配得更好,提高了模式初始场的精准度。

(2) 对比分析增量场发现,AGRI 资料对背景场风场的调整幅度小于常规观测资料对风场的显著修正,但是 AGRI 资料的同化对比湿场的调整较明显且精细。常规观测资料通过调整天气系统位置改善了降水落区预报,而 AGRI 资料则主要通过湿度场调整优化降水强度。

(3) 同化 AGRI 水汽通道资料有助于调整预

报降水的强度,能够更加精细地体现出局地的降水量级分布特征,修正了部分暴雨空报现象,并且提高了小雨量级的降水评分,AGRI 资料的同化进一步改善了最大降水强度的量级,比其他两个试验更接近观测值。

(4)AGRI 资料同化技术存在较大的提升空间。当前仅同化晴空区辐射数据就损失了较多有用信息,而全天空的同化方法^[8,29-30]可以吸收更多云雨区的观测数据,提高卫星观测数据利用率;采用更先进的同化方法,如 4DVar 和 hybrid-4DEnVar,能够同化更高时间分辨率的卫星观测资料,使云和降水的发展变化更加符合实际,这将成为日后研究的重点方向。

参考文献:

- [1] WANG S, QIN Z, TANG F. Comparative analysis of the observation bias and error characteristics of AGRI and AHI data for land areas in East Asia[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1477.
- [2] KALNAY E. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [3] 陈敏,范水勇,仲跻芹,等. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验[J]. *气象学报*, 2010, 68(4): 450-463.
- [4] POLI P. Assimilation of satellite observations of the atmosphere [J]. *Comptes Rendus. Geoscience*, 2010, 342(4): 357-369.
- [5] SZYNDEL M D E, KELLY G, THÉPAUT J N. Evaluation of potential benefit of assimilation of SEVIRI water vapour radiance data from Meteosat-8 into global numerical weather prediction analyses [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2005, 6(2): 105-111.
- [6] YANG C, LIU Z, GAO F, et al. Impact of assimilating GOES imager clear-sky radiance with a rapid refresh assimilation system for convection-permitting forecast over Mexico[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(10): 5472-5490.
- [7] WANG Y, LIU Z, YANG S, et al. Added value of assimilating Himawari-8 AHI water vapor radiances on analyses and forecasts for “7.19” severe storm over North China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(7): 3374-3394.
- [8] HONDA T, MIYOSHI T, LIEN G, et al. Assimilating all-sky Himawari-8 satellite infrared radiances: a case of Typhoon Soudelor (2015) [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(1): 213-229.
- [9] SHU A, SHEN F, JIANG L, et al. Assimilation of clear-sky FY-4A AGRI radiances within the WRFDA system for the prediction of a landfalling Typhoon Hagupit (2020) [J]. *Atmospheric Research*, 2023, 283: 106556.
- [10] ZHANG X, XU D, LIU R, et al. Impacts of FY-4A AGRI radiance data assimilation on the forecast of the Super Typhoon “In-Fa” (2021) [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4718.
- [11] SHEN F, SHU A, LI H, et al. Assimilation of Himawari-8 imager radiance data with the WRF-3DVAR system for the prediction of Typhoon Soudelor [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(5): 1569-1582.
- [12] MA Z, MADDY E S, ZHANG B, et al. Impact assessment of Himawari-8 AHI data assimilation in NCEP GDAS/GFS with GSI [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(4): 797-815.
- [13] NIU Z, ZHANG L, DONG P, et al. Effects of direct assimilation of FY-4A AGRI water vapor channels on the Meiyu heavy-rainfall quantitative precipitation forecasts [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3484.
- [14] JONES T A, WANG X, SKINNER P, et al. Assimilation of GOES-13 imager clear-sky water vapor (6.5 μm) radiances into a warn-on-forecast system [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(4): 1077-1107.
- [15] LEE J, LI J, LI Z, et al. ABI water vapor radiance assimilation in a regional NWP model by accounting for the surface impact [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(9): 1652-1666.
- [16] OTKIN J A. Assimilation of water vapor sensitive infrared brightness temperature observations during a high impact weather event [J]. *Journal of Ge-*

- ophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D19):D19203.
- [17] 许冬梅,沈菲菲,李泓,等. 新一代静止气象卫星葵花8号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报,2022,44(3):40-52.
- [18] 丁伟钰,王洪,和杰. 有云环境下卫星红外波段亮温资料直接同化的进展及挑战[J]. 大气科学,2023,47(5):1654-1664.
- [19] XU L,CHENG W,DENG Z,et al. Assimilation of the FY-4A AGRI clear-sky radiance data in a regional numerical model and its impact on the forecast of the “21 · 7” Henan extremely persistent heavy rainfall[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2023, 40(5):920-936.
- [20] BARKER D,HUANG X,LIU Z,et al. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRF-DA[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2012,93(6):831-843.
- [21] WU Y,LIU Z,LI D. Improving forecasts of a record-breaking rainstorm in Guangzhou by assimilating every 10-min AHI radiances with WRF 4DVAR[J]. Atmospheric Research, 2020, 239: 104912.
- [22] 耿晓雯,闵锦忠,杨春,等. FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验[J]. 大气科学,2020,44(4): 679-694.
- [23] DEE D P. Bias and data assimilation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(613): 3323-3343.
- [24] 薛纪善,陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社,2008: 19-30.
- [25] IACONO M J,DELAMERE J S,MLAWER E J,et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D13):D13103.
- [26] TIEDTKE M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models[J]. Monthly Weather Review,1989,117(8):1779-1800.
- [27] THOMPSON G,FIELD P R,RASMUSSEN R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(12): 5095-5115.
- [28] JANJIC Z I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Monthly Weather Review,1994,122(5): 927-945.
- [29] ZHANG F,MINAMIDE M,CLOTHIAUX E E. Potential impacts of assimilating all-sky infrared satellite radiances from GOES-R on convection-permitting analysis and prediction of tropical cyclones[J]. Geophysical Research Letters,2016, 43(6): 2954-2963.
- [30] XU D,LIU Z,FAN S, et al. Assimilating all-sky infrared radiances from Himawari-8 using the 3DVAR method for the prediction of a severe storm over North China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 661-676.