

葵花8号 AHI晴空水汽辐射率资料同化对北上台风“巴威”的降水预报影响研究

董琪如¹, 刘丽丽^{1*}, 潘晓², 邱晓滨¹, 李得勤², 杨旭³

(1. 天津市海洋气象重点实验室 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 2. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 3. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 为提升北上台风强降水的精细化预报水平, 针对2020年8月的北上台风“巴威”, 利用3 km分辨率的天气预报模式(WRF)及其三维变分同化(3D-Var)系统, 研究静止气象卫星葵花8号成像仪(AHI)的3条水汽通道晴空辐射率资料不同同化频次对此次北上台风降水预报的影响, 并分析了1 h循环同化试验改善强降水的动力和热力原因。研究表明: 循环同化AHI晴空水汽辐射率资料对台风中心最低气压及中心最大风速的前12 h预报均有改进作用; 同化频次增加至1 h, 台风中心最大风速预报改进明显。经技巧评分、公平技巧评分、真实技巧评分及命中率多种客观统计检验指标证实, 同化AHI晴空水汽辐射率资料的试验对预报时效和降水阈值均有较好的预报技巧, 且1 h循环同化试验对前24 h强降水预报优势最显著。循环同化AHI晴空水汽辐射率资料能改善对流层中上层的暖湿条件, 1 h循环同化较3 h循环同化增强了低空急流及上升运动, 进而提升了模式强降水预报能力。

关键词: AHI晴空水汽辐射率; 北上台风; 葵花8号静止气象卫星; 降水预报; 台风“巴威”

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)03-0076-16

0 引言

台风易引发暴雨, 从而造成较为严重的洪涝灾害, 危害着人民生命财产安全^[1-4]。由于受副热带高压(以下简称副高)、西风带冷槽等多个系统影响, 北上台风降雨的形成机制复杂, 故有众多专家学者对北上台风引发暴雨的原因及其变化特征开展了广泛研究^[5-8], 但强降水的精细化预报仍是北上台风降水预报中的难点问题。

数值模式是台风降水精细化预报的重要工具。近年来, 新一代地球静止气象卫星发射, 其在光谱波段的时间及空间分辨率较之前的气象卫星提高很多。特别是中国发射的FY-4系列卫星^[9]、日本气

象厅的葵花8号静止卫星(Himawari-8)^[10]和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的地球静止环境业务卫星(Geostationary Operational Environmental Satellite, GOES)^[11]等, 已在区域数值模式领域开展了大量同化研究^[12]。国内外气象专家已针对上述卫星辐射率资料在数值模式中的同化应用开展了大量研究, 包括提升FY-4A多通道扫描成像辐射计(Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI)资料在天气预报模式资料同化系统(Weather Research & Forecasting Data Assimilation, WRFDA)中的应用效率^[13], 开展不同天气类型(强对流、台风)的卫星辐射率资料同化预报研究。试验结果显示, 同化

收稿日期: 2024-05-04。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3007700); 国家自然科学基金项目(42105009); 天津市自然科学基金项目(20JCYBJC00780); 天津市气象局项目(202305ybxm01、202536ybxm25); 天津市海洋气象重点实验室开放基金项目(2023TKLOM02)。

作者简介: 董琪如(1992-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事台风及灾害性天气数值预报研究。E-mail: dongqiru77@163.com

*通信作者: 刘丽丽(1983-), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事海洋气象机理研究。E-mail: lililiuwuwu@126.com

GOES 辐射率资料、葵花8号静止卫星高级成像仪 (Advanced Himawari Imager, AHI) 辐射率资料对强对流、台风预报均有正效果^[14-15]。

准确的数值天气预报要求同化观测资料后的模式初始场尽可能接近大气真实状况,而质量控制(质控)是确保正确可信的观测资料输入天气预报等应用系统的前提^[16-17]。云对卫星资料的红外辐射率影响巨大,在中对流层长波波段(15 μm)的大气温度探测通道,云对大气温度廓线的影响可能会达到十几 K,导致红外资料被云“污染”^[18]。若直接同化受云层影响的卫星辐射率资料,将会降低初始场质量,进而影响数值预报效果。因此,云检测是卫星辐射率资料质控的重要部分。通过云检测技术识别云层覆盖区域,再利用剔除或修正等手段去除云“污染”影响,可以保障卫星辐射率资料的准确性。当前已有不少专家学者采用云“依赖”的观测误差模型修正云“污染”的辐射率资料,修正模拟后的全空 AHI 辐亮度与观测值拟合较好,能改善云量和云高分析^[12],但其使用的观测误差模型需要大量的计算资源支持,模型中包含高度非线性过程^[19],且模拟结果还可能受到参数化方案的影响^[20]。因此卫星辐射率资料同化中去除云“污染”影响最有效的方法之一是剔除云区覆盖的辐射率资料但保留晴空辐射率资料^[21]。

鉴于 Himawari-8 卫星搭载的 AHI 能提供连续空间和时间的分辨率观测^[10],目前,基于 AHI 晴空辐射率资料的同化研究已在暴雨及台风预报方面开展较多。相关试验结果均表明,同化 AHI 晴空水汽辐射率资料能有效改进降水预报^[21-22],同时对台风中心气压及近中心最大风速预报也有所改进^[23]。以上研究均基于 1 h 循环同化 AHI 晴空辐射率资料,开展对暴雨及近海台风的预报效果研究。但针对 AHI 晴空水汽辐射率资料同化频次对北上台风引发降水预报能力的影响,以及对热动力场、水汽条件等方面具体作用的研究还较少。

因此,本文以 2020 年第 8 号北上台风“巴威”为例,基于不同同化时间间隔,在高分辨率数值模式 WRFDA 中同化葵花8号卫星 AHI 晴空水汽辐射率资料,分析北上台风强度预报效果,重点评估不同同化频次下模式对北上台风引发的降水的预报能力,并通过动力场、热力场及水汽条件等方面分析

具体作用,从而考察不同同化频次对此次北上台风预报的影响。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所使用的资料包括 AHI 辐射率资料、常规观测资料、再分析资料及全球预报数据资料,资料选取时段为模式模拟时间范围内的数据。

1.1.1 AHI 辐射率资料

葵花8号静止气象卫星在赤道、140°E 上空观测地球,东西跨度为 80°E~160°W、南北跨度为 60°N~60°S,其上搭载的高像素红外线成像仪 AHI 每 10 min 提供一次全磁盘图像。AHI 具有 16 个观测通道,即 3 个可见光、3 个近红外和 10 个红外波段。可见光和近红外通道的空间分辨率为 0.5 km 和 1 km,红外通道的空间分辨率为 2 km (见表 1)。

表 1 葵花8号 AHI 资料规格

Tab.1 Specifications of the Himawari-8 AHI data

通道	波段类别	中心波长/ μm	分辨率/km
1	可见光	0.47	1
2	可见光	0.51	1
3	可见光	0.64	0.5
4	近红外	0.86	1
5	近红外	1.60	2
6	近红外	2.30	2
7	红外	3.90	2
8	红外	6.20	2
9	红外	6.90	2
10	红外	7.30	2
11	红外	8.60	2
12	红外	9.60	2
13	红外	10.40	2
14	红外	11.20	2
15	红外	12.30	2
16	红外	13.30	2

葵花 AHI 的 8、9、10 水汽通道权重函数峰值均位于对流层中上层位置,其权重函数峰值随高度递减,能减少地面辐射带来的影响,可用于探测对流层中高层的水汽信息^[23]。

1.1.2 其他资料

资料选取范围为模式模拟区域内的所有数据。海洋上的降水量选用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)的 ERA5 再分析资料进行对照,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 1 h。利用美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报数据(Global Forecast System, GFS)资料驱动数值模式开展预报,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,时间分辨率为 6 h。

常规观测资料为气象大数据云平台“天擎”提供的各类气象资料(包括地面站、探空、飞机报、浮标及船舶)中的温度、气压、风向、风速、湿度及降水,时间分辨率为 1 h。图 1 展示了模拟内层(3 km)同化的常规观测资料分布。

1.2 云检测方法

为去除云“污染”的 AHI 辐射率资料同化造成的误差影响,本文在同化 AHI 水汽辐射率资料前首

先开展云检测,以剔除云区的 AHI 水汽辐射率资料。本文利用美国威斯康星大学联合开发的静止卫星云算法处理系统(Geostationary Cloud Algorithm Testbed, GEOCAT)开展云检测^[22,24]。该系统利用云和晴空区域在辐射特征上的差异,采用阈值法处理 AHI 辐射率资料,利用红外及可见光通道进行云检测。GEOCAT 系统会根据识别情况给出云区、可能有云、可能晴空和晴空 4 种天空状况,本研究将同化检测为晴空区域内的 AHI 水汽辐射率资料。

1.3 数值模式与同化试验

1.3.1 数值模式及同化方法

本文基于 WRF 模式及 WRFDA 同化系统开展对北上台风“巴威”的同化预报。WRFDA 为 WRF 模式的资料同化系统,包括三维变分(Three-Dimensional Variational assimilation, 3D-Var)、四维变分(four dimensional variational, 4D-Var)、集合—变分混合等同化技术^[25]。本文选择 3D-Var 方法同化 AHI 晴空水汽辐射率资料及常规资料。该同化方法可以在某一分析时刻,通过迭代的方法极小化目标函数来获取真实大气状态的最优估计值,即同化所得的分析场 x 。三维变分可以归结为目标函数的极小化问题^[26-27],方程为:

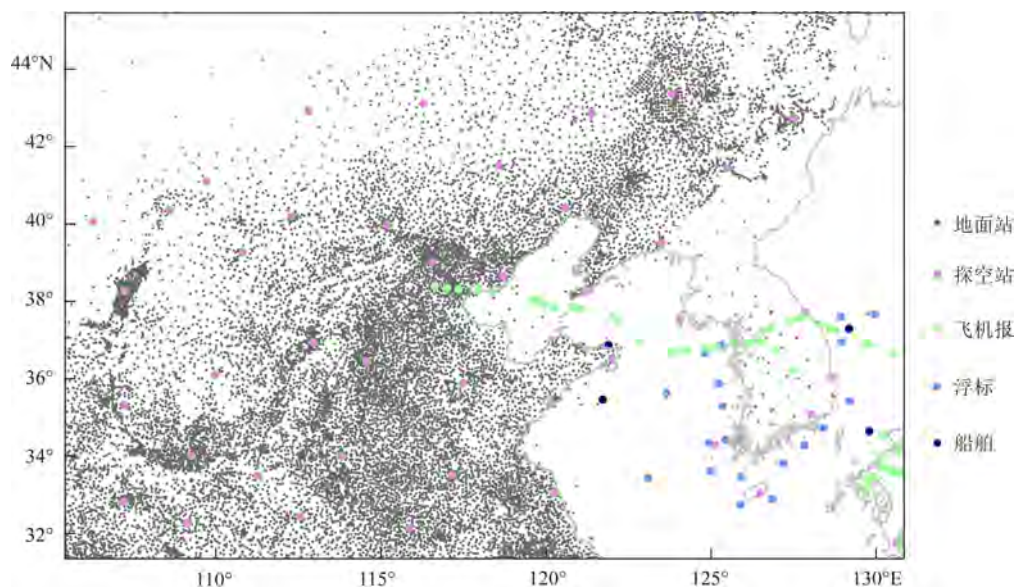


图1 模拟内层(3 km)常规观测资料分布

Fig.1 Distribution of conventional observation stations in the inner model domain

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + \frac{1}{2} (y - H(x))^T R^{-1} (y - H(x)) \quad (1)$$

式中: x 为分析场; x^b 是背景场; y 是观测场; H 是模式场映射到观测场的非线性观测因子; R 为观测场误差协方差矩阵; B 为背景场误差协方差矩阵。

1.3.2 偏差订正

在直接同化卫星辐射率资料的过程中,会产生来自于各方面(卫星观测数据、同化系统及模式本身等)的误差,使得卫星观测与背景场存在一定偏差,影响数值天气预报结果的准确性,因此减小二者系统性偏差的订正技术是同化的重要环节之一^[13,28]。本研究采用WRFDA同化系统的变分偏差订正(Variational Bias Correction, VarBC)方案对AHI晴空辐射率资料开展偏差订正,使得该资料以无偏形式进入同化系统。该方案选择预报因子的线性组合表示偏差,方程为:

$$\tilde{H}(x, \beta) = H(x) + \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_p} \beta_i p_i \quad (2)$$

式中: $\tilde{H}(x, \beta)$ 为偏差订正后的观测算子; $H(x)$ 为偏差订正前的观测算子; x 为背景场; β_0 为偏差的常数项; β_i 和 p_i 是第 i 个偏差订正系数和预报因子; N_p 为预报因子个数。这种偏差订正方法可以在每个同化时刻不断更新订正系数,以适应当前天气状况^[29]。

1.3.3 试验方案设计

利用两重嵌套方案对北上台风“巴威”开展模拟预报研究。模拟区域中心为40°N、117°E,水平方向格点数分别为441×401、796×520,水平分辨率为9 km和3 km,垂直方向为51层。系统采用的物理参数化方案为:新的Thompson微物理方案、Eta

相似理论近地面层方案、Noah陆面方案、Eta TKE行星边界层方案、New Grell积云参数化方案(d02区无积云参数化方案)、快速辐射传输模型(Rapid Radiative Transfer Model, RRTM)方案和Dudhia短波辐射方案。模式采用GFS资料作为背景场,模式分析时刻均为2020年8月26日06时(世界时,下同),预报时效为36 h。具体同化试验设计方案见表2。两层模拟区域均进行了常规观测资料同化,资料来自国家气象站、探空、船舶、浮标及飞机报等。除控制试验ctl外,其余试验还同化了AHI晴空水汽辐射率资料。

循环同化试验cycle_3h及cycle_hourly的流程见图2,两项试验均在25日18时冷启动持续运行至26日00时,此后分别按照逐3 h、1 h的频次循环同化观测资料至26日06时,随后开展36 h预报。本次试验重点分析3 km高分辨率的d02区域的结果。

1.4 预报效果评估方法

本文将对同化AHI辐射率资料的效果开展检验,使用的检验指标分别为平均偏差(MEAN)、标准差(STDV)及均方根误差(RMSE)对同化AHI辐射率资料效果开展检验。计算公式为:

$$MEAN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$STDV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (5)$$

表2 试验设计方案

Tab.2 Experiment design

试验名称	AHI资料同化频次	同化资料	备注
ctl	/	常规观测资料	只同化06时刻资料
da_ra	1次	常规观测资料及AHI晴空辐射率资料	只同化06时刻资料
cycle_3h	3次	常规观测资料及AHI晴空辐射率资料	25日18时冷启动至26日00时,随后逐3 h循环同化资料至26日06时
cycle_hourly	7次	常规观测资料及AHI晴空辐射率资料	25日18时冷启动至26日00时,随后逐1 h循环同化资料至26日06时

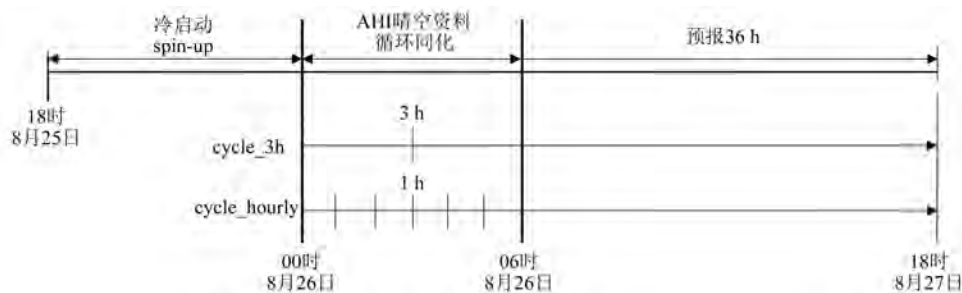


图2 循环同化预报流程图

Fig.2 Flow chart of cycle data assimilation and forecasts

式中: x_i 表示第 i 个样本值; n 为样本个数; \bar{x} 为样本数据的平均值。MEAN 表示所有预测值的平均值; STDV 是表征预测值本身离散程度的统计量, 值越小, 表示预测值之间离散程度越小; RMSE 是预测值与观测值偏差的评分与观测次数 (n) 比值的平方根, 衡量的是各预测值偏离观测值的情况, 其中, F_i 表示预测值, O_i 表示观测值, RMSE 越小表示距离观测值越近。

降水检验采用 2×2 列联表法, 计算模式降水的 4 种评分指标 (见表 3), 即技巧评分 (Threat Score, TS)、公平技巧评分 (Equitable Threat Score, ETS)、真实技巧评分 (True Threat Score, TSS) 及命中率 (Probability of Detection, POD)。计算公式为:

$$TS = A / (A + B + C) \quad (6)$$

$$ETS = (A - C1) / (A + B + C - C1) \quad (7)$$

$$C1 = (A + B)(A + C) / (A + B + C + D) \quad (8)$$

$$POD = A / (A + C) \quad (9)$$

$$TSS = (AD - BC) / (A + C)(B + D) \quad (10)$$

式中: TS 技巧评分可以衡量有降水情况下预报的优劣, TS 越高表示预报效果越好; C1 表示随机预报的值; ETS 评分是对 TS 评分的改进, 能反映空报和漏报, 阈值范围为 $[-1/3 \sim 1]$, ETS 为 0 时表示无预报技巧, 理想情况下 ETS 等于 1; POD 表示预报出现降水与实际出现降水的比例, 代表预报准确率; TSS 评分反映了成功预报与空报的差异, 阈值范围为 $[-1 \sim 1]$, 理想情况下 TSS 等于 1, TSS 为 0 时表示无预报技巧。

表3 降水检验列联表

Tab.3 Contingency table for scoring rainfall forecasts

预报事件	观测事件	
	发生	未发生
发生	A	B
未发生	C	D

2 北上台风个例概况

2020 年第 8 号台风“巴威”于 8 月 22 日 00 时在台湾以东洋面生成, 为热带风暴级别, 随后一路北上; 8 月 26—27 日, 江苏北部、山东中东部、辽宁东部出现大到暴雨, 其中, 山东中部、东北地区等地局地出现大暴雨 (降雨量为 $100 \sim 150 \text{ mm}$)。

利用 ERA5 再分析资料对台风 500 hPa、850 hPa 天气形势开展分析。由图 3 可见, 26 日 06 时, 台风“巴威”位于黄海海域, 处于西风槽和副热带高压之间。受 500 hPa 东南气流引导, 台风路径总体向北偏西方向移动, 台风外围东北急流将黄海的水汽不断输送至山东半岛及江苏沿海地区。受副高外围及西风槽前西南气流共同引导, 台风向东北移动, 约在 27 日 00 时登陆^[30]。登陆后台风环流进一步快速减弱, 台风加速向北偏东方向移动并变性为温带气旋 (图略)。

3 结果分析

基于数值模式模拟结果, 对 AH1 晴空水汽辐射率资料的同化作用进行诊断分析并评估台风强度预报效果, 利用 TS、ETS、TSS 及 POD 指标对 4 组数

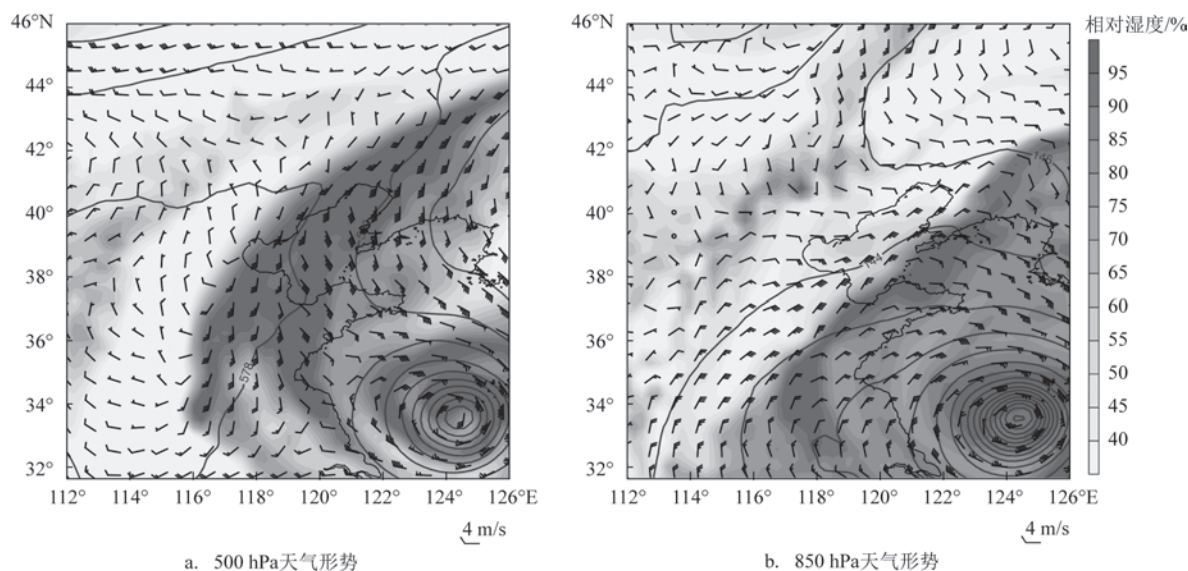


图3 2020年8月26日06时500 hPa和850 hPa位势高度(实线,单位: 10 gpm)、相对湿度和风场合成图

Fig.3 Composite diagram of geopotential height (solid contours, unit: 10 gpm), relative humidity and winds at 06:00 UTC 26 August 2020

感性试验的6 h、12 h、24 h及36 h累积降水预报进行客观性检验,并通过分析动力场、热力场及水汽条件来研究AHI晴空水汽辐射率资料不同同化频次对北上台风降水预报的具体作用影响。

3.1 AHI辐射率资料偏差

3.1.1 云检测及亮温

图4为2020年8月26日00时、03时、06时通道10的亮温分布(见图4a—4c)及同时次AHI的云检测(见图4d—4f)。亮温分布显示出此次北上台风“巴威”的台风眼位置及大致形态,其中有云的区域对应亮温值较低的区域,约196 K。00时台风眼大致位于33°N、125°E附近(江苏东部),台风眼清晰可见,外围云系主要在黄海、东海、渤海、京津冀及东北地区,随后台风逐渐向东北方向移动。06时(见图4c)台风眼依旧清晰,外围云系已覆盖至37°N附近(韩国及朝鲜地区)。图4d—4f显示晴空和云区的观测数目较多,而可能有云及可能晴空的区域相对较少,亮温多分布在有云及晴空区域的交界处。本文同化的卫星资料为图4晴空区域内的AHI水汽辐射率资料。

3.1.2 偏差性能评估

验证辐射偏差订正的有效性对于正确同化辐

射率资料至关重要。图5为单次同化试验da_ra在26日06时通道8的亮温散点图。图5a为偏差订正前背景场亮温的散点分布,都分布在对角线两侧,表示与观测有差异。图5b为对背景场亮温开展偏差订正后的散点分布,订正后的背景场亮温平均值(MEAN)为-0.193,订正前(见图5a)为0.507,虽然标准差值(STDV)没有变化,但均方根误差(RMSE)在订正后减少约5%。图5c为同化AHI晴空辐射率资料并经偏差订正后的分析场亮温散点分布,从图中能看出散点明显收敛至对角线,即分析场亮温与观测更接近。相较偏差订正后的背景场亮温,分析场亮温的STDV值及RMSE值在同化后均降低了约66%,证明了同化AHI晴空水汽辐射率资料的有效性。

为评估AHI晴空辐射率资料1 h循环同化效果,图6展示了cycle_hourly试验2020年8月26日00—06时逐小时(共7次)的亮温偏差时间序列。以通道8为例(见图6a),亮温观测数目随时间的变化呈现减少趋势,从26日00时的3 228减少到06时的1 733,这是由于在WRF3D-Var同化系统中进行了严格质控的结果,云和降水点被剔除。从亮温偏差平均值随时间的变化能看出,偏差订正在0~1 h、4~6 h具有有效性。从亮温偏差标准差随时间的变

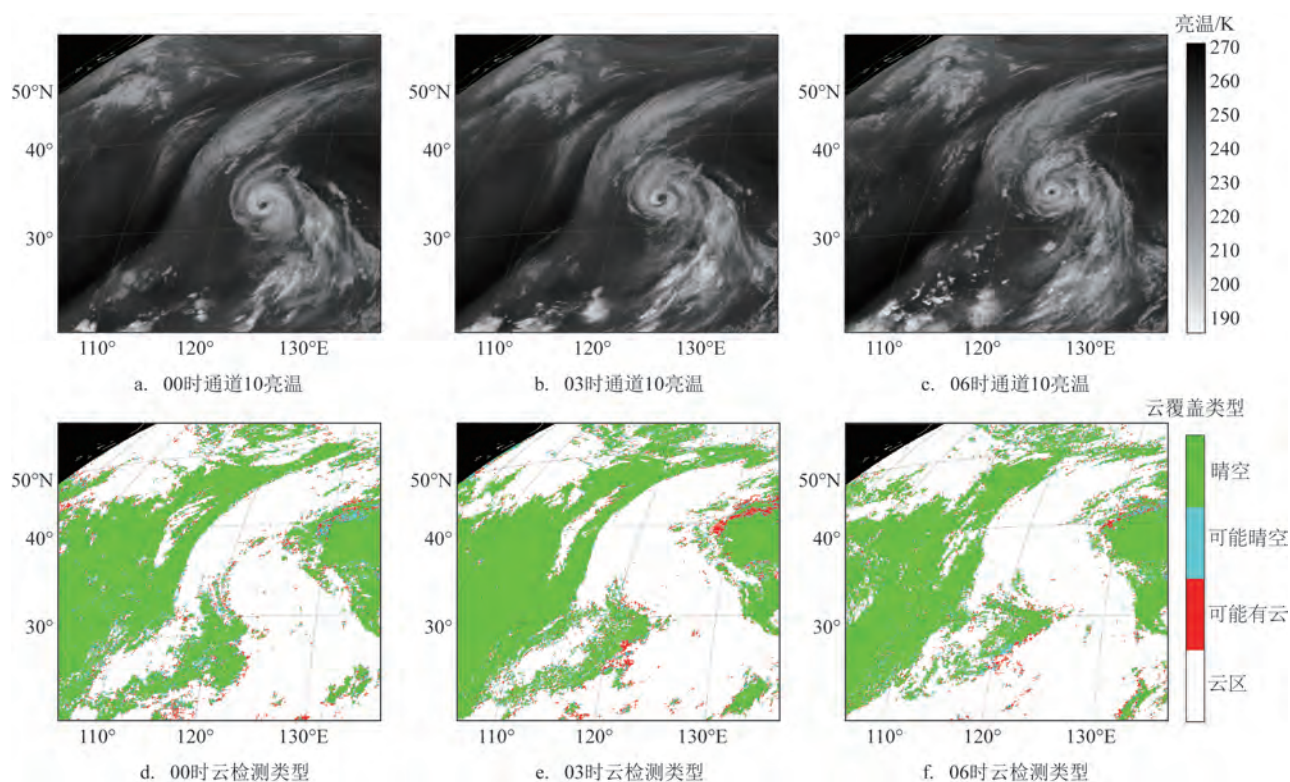


图4 2020年8月26日通道10亮温分布及同时次AHI的云检测覆盖类型分布图

Fig.4 Distributions of channel 10 brightness temperature and simultaneous AHI cloud detection at 26 August 2020

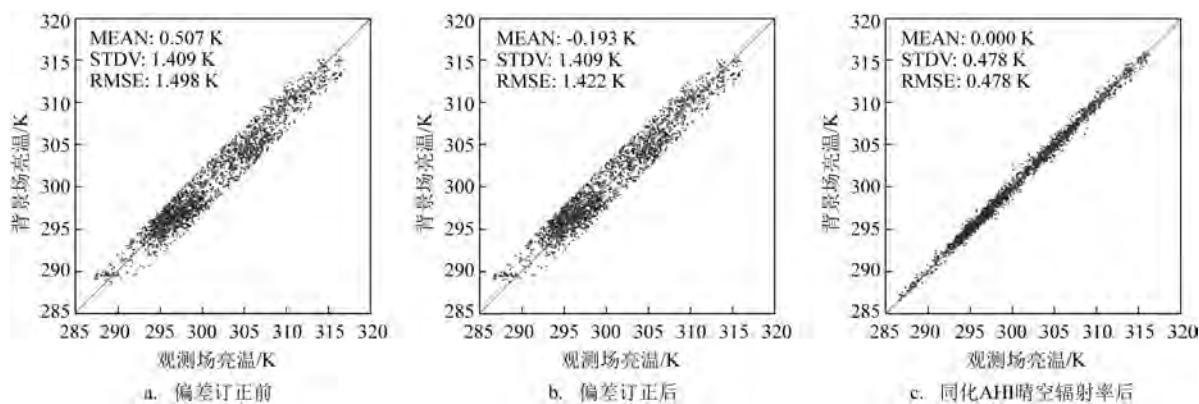


图5 2020年8月26日06时AHI通道8的亮温散点分布

Fig.5 The scatter of brightness temperature distribution based on the channel 8 of AHI at 06:00 UTC 26 August 2020

化可以看出,偏差订正前后观测与背景场差值(Observation Minus Background, OMB)的标准差曲线重合,其中OMB亮温偏差标准差远大于观测与分析场差值(Observation Minus Analysis, OMA)的标准差。随着时间变化,标准差值逐渐增大,通道8、9、10的OMA亮温偏差标准差均为0.4 K左右。相较OMB,OMA的偏差平均值基本与X轴重合,通

道8、9、10的亮温偏差平均值最大均为 ± 0.01 K左右,说明分析场基本同观测场相同,AHI辐射率资料同化能够显著改善初始场分析。

由图5背景场亮温、分析场亮温与实际观测偏差得知,经WRF3D-Var系统单次同化AHI晴空辐射率资料后,分析场亮温标准差及均方根误差均有所减小。1 h循环同化试验 cycle_hourly因每隔1 h进

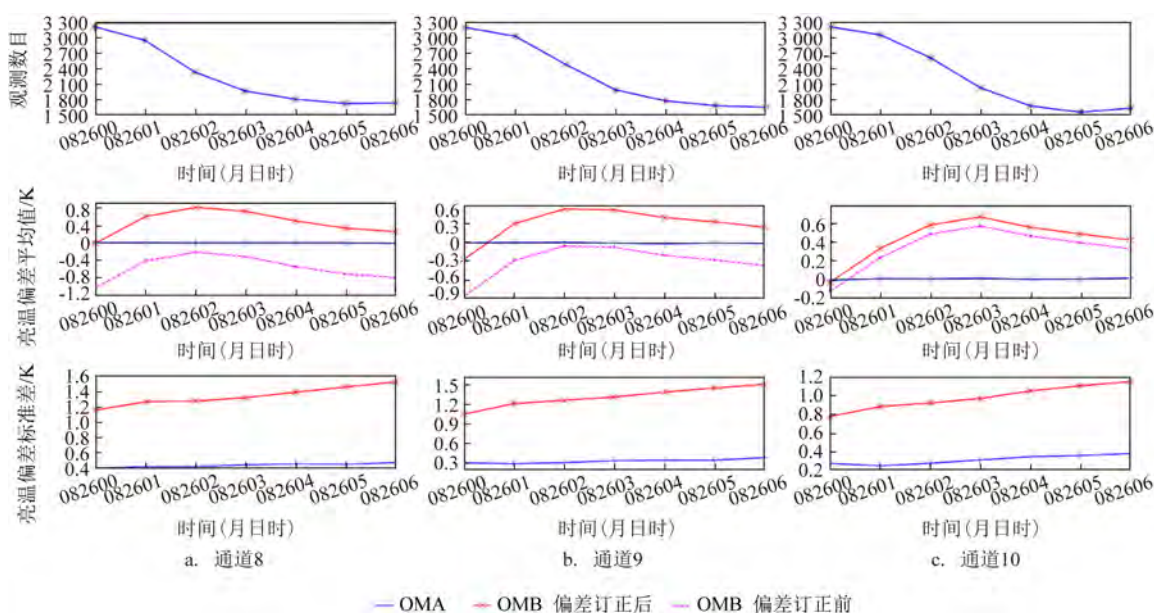


图6 8月26日00—06时3个通道逐小时(共7次)的观测数目、偏差平均值和偏差的标准偏差

Fig.6 Time series of hourly data counts, the mean value and STDV of the biases for total 7 cycles in three bands from 00 to 06 UTC 26 August 2020

行偏差订正,相同时刻同化的AHI晴空观测较少,同化AHI晴空辐射率后分析场亮温与实际观测的亮温平均偏差也较小,较为显著地改善了分析场质量(见图6)。后续将从各个试验预报的台风强度、降水及具体作用影响逐一进行对比分析。

3.2 台风强度

台风强度是由台风中心地面最大平均风速和台风中心海平面最低气压二者共同确定的。本文利用中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)提供的最佳数据集^[31-32]中的最大平均风速和台风中心海平面最低气压作为台风的实际强度。由图7可以看出,台风中心地面最大平均风速与台风中心海平面最低气压呈现反向关系,即当台风中心最低气压逐渐降低或者升高时,台风中心地面最大平均风速逐渐增强或者减弱。在前30 h(见图7a),5组数据的海平面最低气压变化较为一致,均逐渐缓慢增长,随后实况(obs-CMA)气压维持在998 hPa几乎不变,但试验预报的气压均在增加。前12 h,循环同化试验与单次同化试验da_ra、ctl试验的差异较大,其中循环同化试验cycle_3h和cycle_hourly对台风中心海平面气压的预报更接近

实况,特别是前6 h体现了明显优势,与实际相差约1 hPa;随后差异明显,最大差异达6 hPa。图7b显示,在前12 h,台风中心地面最大平均风速以循环同化试验预报最好,特别是cycle_hourly试验的初始时刻几乎与实况一致(风速约为45 m/s),随后实况风速降低;cycle_3h台风中心地面最大平均风速在前12 h几乎不变。12 h后,5组数据的变化趋势较为一致,均表现出12~24 h风速迅速降低。

3.3 降水预报检验

陆地降水实况采用国家气象站站点数据(见图8a),ERA5再分析资料作为海上区域降水分布参考(见图8b),图8c—8f为各试验预报的26日06时—27日06时的24 h降水分布图。图8b显示台风眼以北降水分布存在两个强中心,一个在海上,另一个位于中国辽宁省与朝鲜的边界区域。国家气象站资料显示(见图8a),暴雨主要出现在辽东半岛及江苏中部等地,其中江苏盐城建湖站达到143.5 mm,大连普兰店站降雨量达96.9 mm。从图8c—8f中可以看出,4组数值试验预报的海上降水量均较ERA5资料偏大,其中ctl、da_ra试验的台风眼以北强降水中心较分散(见图8c、8d),韩国北部、江苏中部地区

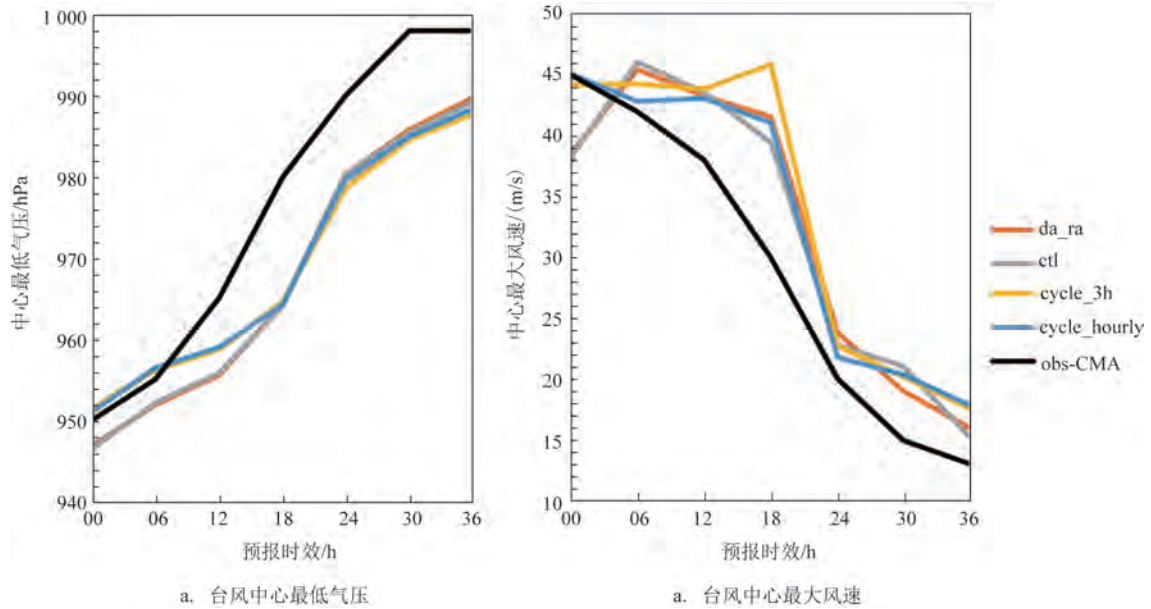


图7 各试验预报和观测的台风中心最低气压与最大风速随预报时效变化图

Fig.7 The evolution of minimum air pressure and maximum wind speed in the different forecasts and observations

的降水强中心明显较实况偏小,而循环试验 cycle_3h(见图 8e)、cycle_hourly(见图 8f)的强中心则较为集中,与 ERA5 再分析资料更为相似;另外, cycle_3h、cycle_hourly 试验的降雨量预报结果虽然在辽宁西部较实况过大,但对江苏中西部暴雨落区的预报与实况较为相似,但 cycle_3h 试验在山东东部及山东与江苏交界处、江苏北部等地的降水预报偏弱。

为更好地评估不同试验对此次降水的预报效果,利用客观评分 TS、ETS、TSS 及 POD 对 24 h 累积降水预报进行检验,并额外增加对 6 h、12 h 及 36 h 预报时效的检验,以检测同化 AHI 晴空水汽辐射率资料的有效性。由图 9a 可看出,随着降水预报量级的增大,TS 评分降低。在 6 h、24 h 强降水量级中,循环同化试验 cycle_3h 和 cycle_hourly 有明显的优势, cycle_hourly 试验评分较高,其在 6 h 强降水 (≥ 25 mm)、12 h 强降水 (≥ 50 mm)、24 h 暴雨及以上量级 (≥ 50 mm) 中的 TS 评分分别达 0.19、0.15、0.14,但在 36 h 暴雨及以上量级的预报优势不显著。图 9b 为 ETS 评分情况,在去掉偶然预报正确项后,相较其他 3 组试验, cycle_hourly 试验对 6 h 强降水、12 h 及 24 h 暴雨及以上量级仍然具有较高的预报技巧。TSS 评分反映了成功预报与空报的差异,随着检验降水阈值的增大, TSS 评分有降低的趋势(见图 9c),表示预

报正确率和空报率的差异逐渐减小。 cycle_hourly 试验的 TSS 评分在 6 h 强降水、12 h 及 24 h 暴雨及以上量级中最高,即预报成功率高于空报率。图 9d 为不同试验的 POD 评分,主要反映对天气事件发生的成功预报率。同样,在 6 h 强降水、12 h 及 24 h 暴雨及以上量级中, cycle_hourly 试验的命中率均优于其他 3 组试验,如其在 24 h 暴雨及以上量级的 POD 评分为 0.25,而 ctl 试验的评分为 0.17, da_ra 试验的评分为 0.13, cycle_3h 试验的评分为 0.21。

从图 9 可以看出,经 TS、ETS、TSS 及 POD 多种客观评分检验,除 ctl 控制试验外,其他同化 AHI 晴空辐射率资料的试验在不同预报降水量级和预报时效上均有较好的预报技巧,且在 6 h 强降水 (≥ 25 mm)、24 h 暴雨及以上量级预报中,循环同化试验的预报优势显著,且 cycle_hourly 试验的预报技巧更优。

3.4 热动力及水汽条件

为分析 1 h 循环同化试验 cycle_hourly 对强降水预报较好的原因,本文从动力、水汽及热力层结等方面对比不同方案的预报结果,进一步探究 1 h 循环同化 AHI 晴空水汽辐射率资料的具体作用影响。

3.4.1 低层风场及水汽

水汽通量散度表征着水汽的辐合和辐散。通

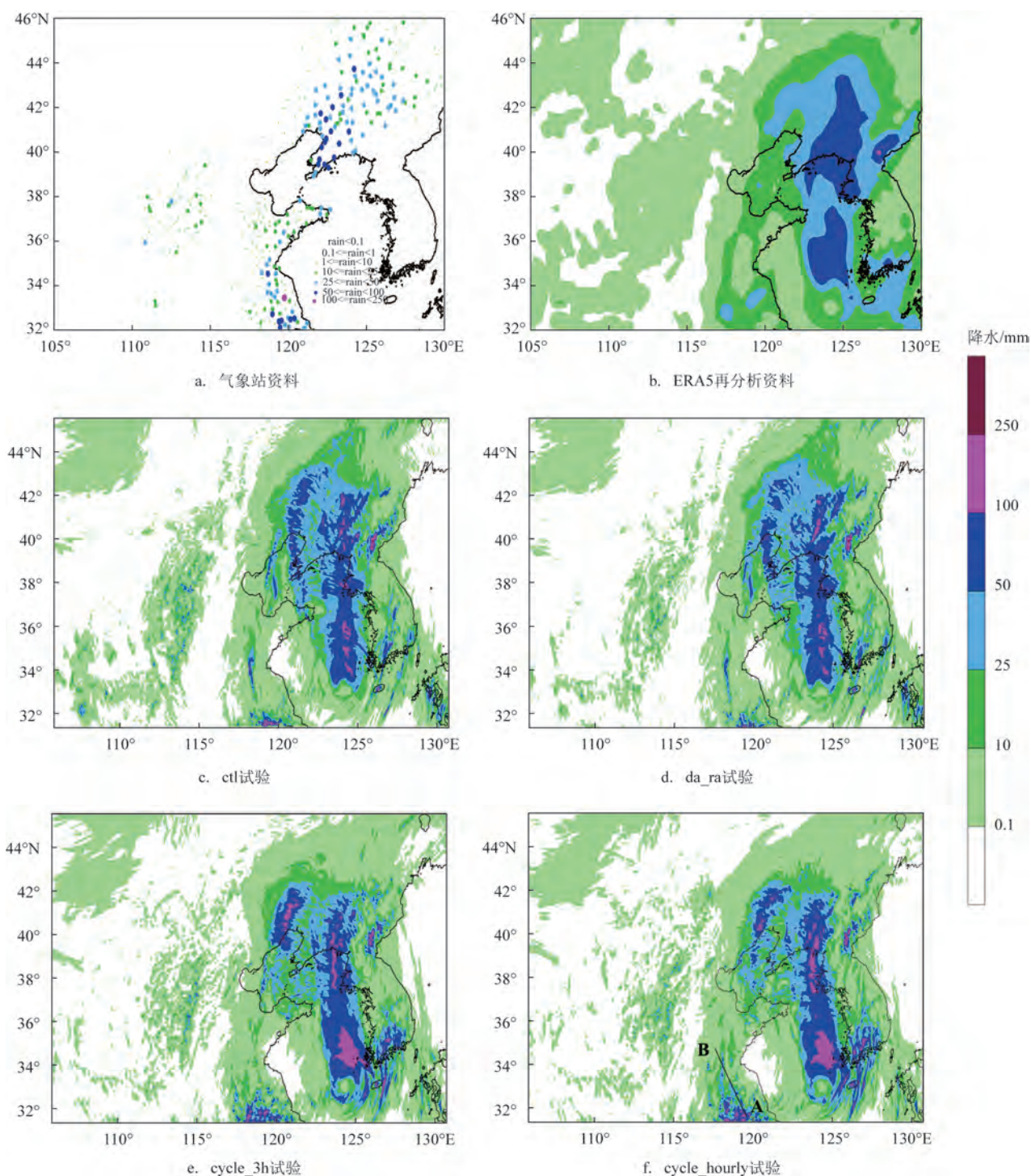


图8 2020年8月26日06时—27日06时的24 h降水分布

Fig.8 The 24 h precipitation from 06:00 UTC 26 to 06:00 UTC 27 August 2020

过分析8月26日06时的水汽通量散度及风场可知,ctl试验和da_ra试验采用动力降尺度方法直接将分辨率降至3 km,所以水汽通量散度分布未体现出小

尺度特征(见图10a、10b)。二者在风场上差异较小,均表现为环渤海区域、山东中部为东北风,在山东东部、山东与江苏交界处有明显的水汽辐合,水

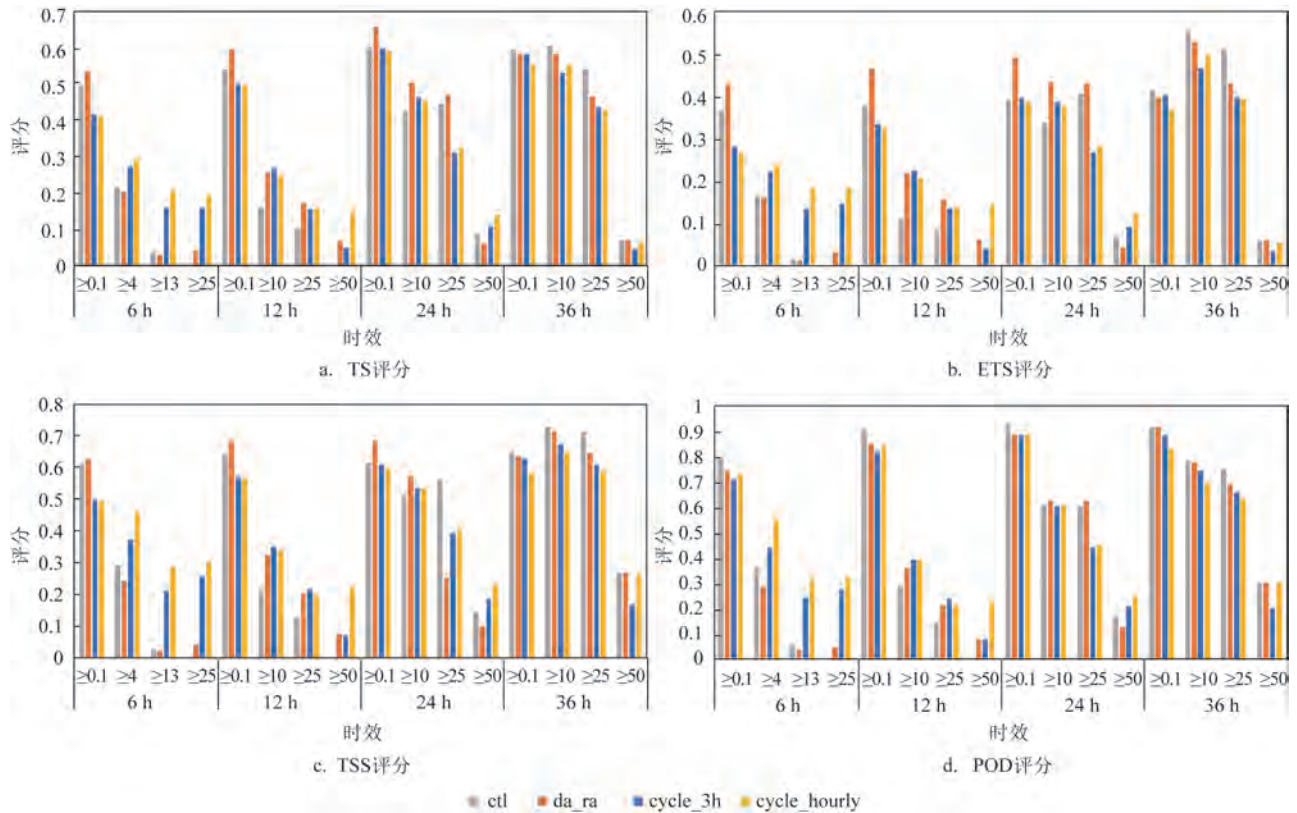


图9 各试验下不同强度降水6 h、12 h、24 h和36 h的预报评分

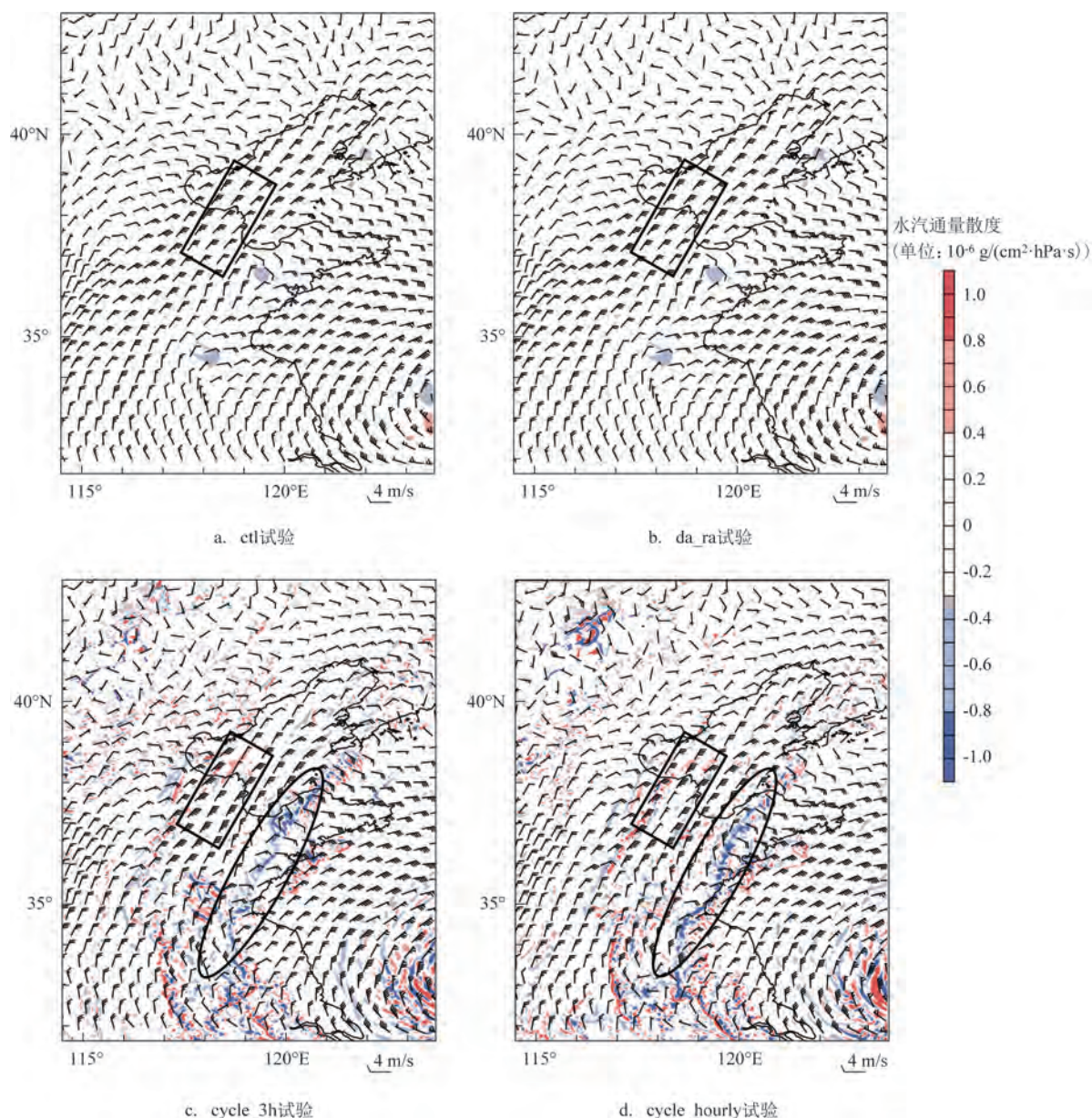
Fig.9 The scores in different accumulated precipitation thresholds for the 6 h, 12 h, 24 h and 36 h forecast from different experiments

汽通量散度约为 $-0.3 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。而循环同化试验 cycle_3h(见图 10c)和 cycle_hourly(见图 10d)对于风场有明显的改善,同时体现出了水汽通量散度的局地尺度信息。两组循环同化试验在环渤海区域及山东中部的预报风速较ctl试验明显增大(见图 10矩形区域)。以 cycle_hourly 试验为例,该区域东北风最大风速约为 22 m/s,较ctl试验增大 10 m/s,较 cycle_3h 增大 2 m/s。此外,两组循环同化试验在山东东部均存在东北—西南走向的水汽通量散度辐合带,该辐合带基本从环渤海区域延伸至江苏西部。但 cycle_hourly 试验在山东东部及江苏西部的水汽辐合较强(见图 10椭圆区域),水汽通量散度约为 $-0.9 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,较 cycle_3h 试验的水汽辐合强度最大提升约 44%。在山东与江苏交界处,两组循环试验的风场差异也较为明显, cycle_3h 试验表现为西北风, cycle_hourly 试验为北风,风速为 10~16 m/s,二者风速相差 4~

6 m/s,致使 cycle_hourly 试验的水汽辐合带位置向西偏移,水汽通量散度辐合也较 cycle_3h 试验更强,最大值为 $-0.9 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,降水分布图(见图 8f)也显示出此位置的降水量较大。

3.4.2 热力层结及上升运动

图 11 为 4 组试验在 8 月 26 日 06 时沿图 5f 中 AB 线段的假相当位温(θ_{sc})及风矢量场(U 风及 10 倍 W 风的合成)垂直剖面,其中 θ_{sc} 是综合大气温度、湿度特征的物理量,可以表征大气层结稳定度。图 11a 和 11b 显示,ctl 试验和 da_ra 试验在空气暖湿程度及垂直运动上变化不大,垂直运动均较弱。在 118.24°E 以东(见图 11 方框区域),随着高度增加至 550 hPa, θ_{sc} 值从 354 K 减小至 342 K,大气处于不稳定层结。在 550 hPa 以上,随着高度增加 θ_{sc} 值逐渐增大。循环同化试验在该处(图 11c 和 11d 的矩形区域)则显现出 θ_{sc} 值随高度变化的复杂性,大气虽仍处于不稳定层结,但在对流层(550~300 hPa),循环同化试



注:椭圆形区域为水汽辐合带大值区;矩形区域为低空急流大值区

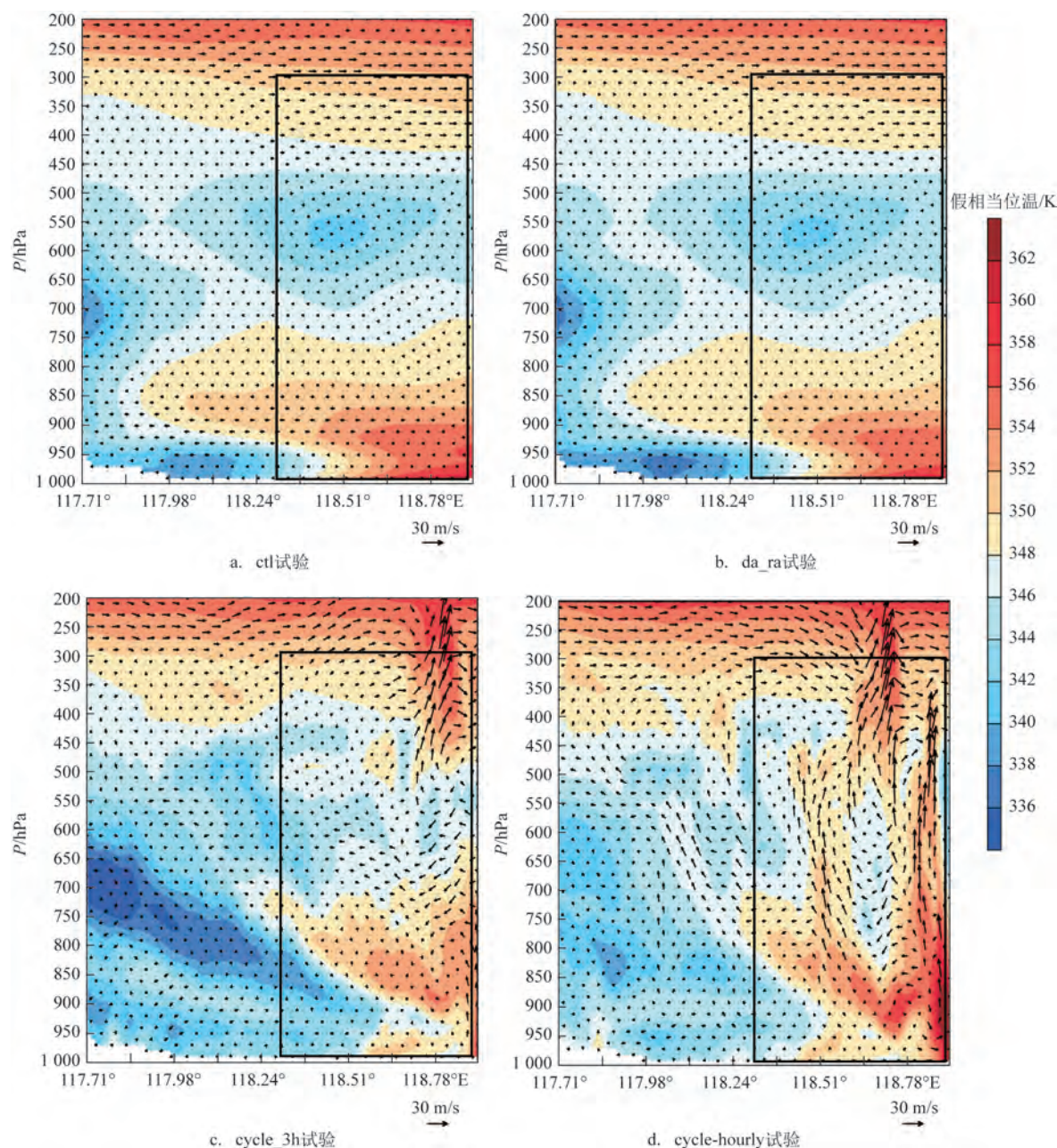
图10 2020年8月26日06时850 hPa水汽通量散度及风场合成图

Fig.10 Composite diagram of water vapour flux divergence and horizontal winds at 850 hPa 06:00 UTC 26 August 2020

验破坏了ctl试验的干冷空气结构,且cycle_hourly试验的 θ_{se} 值分布改进明显,较ctl试验最大增加6 K,使得该层空气更为暖湿(见图11d)。在低层950~700 hPa上,由于循环同化作用的影响,cycle_3h(见图11c)及cycle_hourly试验(见图11d)的 θ_{se} 分布不如ctl试验平滑,但整体来看, θ_{se} 值依然随高度增加而降低。此外,在118.78°E以东,cycle_hourly

试验存在着显著的上升运动,最大上升速度较cycle_3h试验大6 m/s左右,并由低层850 hPa一直延伸至对流层顶200 hPa处,不断将地面的暖湿空气输送至高层,使得cycle_hourly试验的暖湿条件更为充分(见图11d)。

由热动力及水汽条件分析可知,4组试验的大气均处于不稳定层结状态,但在对流层中上层550~



注:矩形区域为试验间假相当位温及合成风差异明显区

图 11 2020年8月26日06时各试验沿图5f线段AB的假相当位温及合成风(U、10*W,矢量箭头)合成图

Fig.11 Composite diagram of Crossing sections of pseudo-equivalent potential temperature and (U, 10*W) resultant wind (vector arrows) for different experiment along the line AB Fig.5f at 06:00 UTC 26 August 2020

300 hPa 间,两组循环同化试验的 θ_{se} 值较ctl试验变化明显,循环同化试验在该层的空气更为暖湿,体现了同化AHI晴空水汽辐射率资料的调整作用。其次,循环同化试验在低层风场和水汽辐合上的改

进较大,1 h 循环同化试验 cycle_hourly 较 cycle_3h 的低空急流强度增大,风场辐合增强,进一步促进了上升运动的发展,使 cycle_hourly 试验的上升运动从低层延伸至对流层,故预报的降水量级较大,

与实况较为一致。

4 结论与讨论

本次研究以2020年第8号北上台风“巴威”为例,基于WRF模式及其3D-Var变分系统,研究3条水汽通道的晴空辐射率资料同化对此次北上台风的预报影响。结论如下:

①同化AHI晴空辐射率资料后,经偏差订正后的AHI辐射平均偏差比订正前小,标准差及均方根误差在同化后均降低了约66%;同化AHI晴空辐射率资料后的分析场与观测辐射更接近,说明AHI晴空水汽辐射率资料同化能够改善初始场分析。

②台风中心气压随时间变化的结果显示,各组试验变化趋势与实际大致相似。两组循环试验前18 h预报的台风中心气压均更接近实况;在最大风速方面,两组循环同化试验前12 h的预报与实况差异较小,其中1 h循环同化试验更接近实际风速。

③经TS、ETS、TSS及POD多种客观评分指标检验,同化AHI晴空辐射率资料的试验在预报时效和预报降水量级上均有较好的预报技巧;循环同化试验的优势主要体现在对6 h强降水和24 h暴雨及以上量级的预报,其中1 h循环同化试验预报优势显著。

④循环同化AHI晴空水汽辐射率资料改善了对流层中上层的 θ_{sc} ,使对流层中上层的空气较为暖湿。1 h循环同化试验增大了低空急流的强度,使得风场辐合增强,改进了低层水汽辐合;同时风场辐合的增强又进一步促进了上升运动的发展,故1 h循环同化试验的强降水预报与实况更为接近。

本研究表明,循环同化AHI晴空水汽辐射率资料对北上台风24 h内的强降水预报有所改善,且1 h循环同化资料对强降水的预报提升明显。由于本文未同化云区的AHI辐射率资料,因而实现全空卫星资料的同化也是本研究团队的后续研究方向。团队将尝试开展多源资料的同化试验,以期进一步提高台风引发的强降水的精细化预报能力。本文基于WRF3D-Var模式1 h循环同化AHI晴空水汽辐射率资料,对台风强度及强降水预报均有较好的改进作用,这为今后3D-Var同化AHI晴空辐射率资料业务化提供了重要参考,同时也为我国自主静止卫

星资料的同化应用奠定了一定基础。

参考文献:

- [1] 刘学刚,李庆宝,张金艳,等.近年来引发青岛暴雨的台风特征分析[J].气象,2011,37(9):1091-1099.
LIU X G, LI Q B, ZHANG J Y, et al. The analysis on characteristics of recent typhoons causing heavy rainfall in Qingdao [J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(9): 1091-1099.
- [2] 孙密娜,杨洋,姜皓严.影响黄渤海区域两次北上台风的对比分析[J].海洋预报,2018,35(5):74-84.
SUN M N, YANG Y, JIANG H Y. Comparative analysis of two northward typhoons affecting the Bohai and Yellow sea areas[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(5): 74-84.
- [3] 陈淑琴,李英,范悦敏,等.台风“山竹”(2018)远距离暴雨的成因分析[J].大气科学,2021,45(3):573-587.
CHEN S Q, LI Y, FAN Y M, et al. Analysis of long-distance heavy rainfall caused by Typhoon Mangosteen (2018)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(3): 573-587.
- [4] 李欣,张璐.北上台风强降水形成机制及微物理特征[J].应用气象学报,2022,33(1):29-42.
LI X, ZHANG L. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(1): 29-42.
- [5] BROWNING K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteorological Applications, 1997, 4(4): 317-324.
- [6] 程正泉,陈联寿,徐祥德,等.近10年中国台风暴雨研究进展[J].气象,2005,31(12):3-9.
CHENG Z Q, CHEN L S, XU X D, et al. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(12): 3-9.
- [7] 陈宏,杨晓君,易笑园,等.北上台风“安比”后期两个阶段暴雨落区分布的差异性分析[J].高原气象,2021,40(5):1087-1100.
CHEN H, YANG X J, YI X Y, et al. Analysis of difference in distribution of rainstorms in the later two stages of Northward-Moving Typhoon Ampil[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1087-1100.
- [8] 杨晓亮,杨敏,隆璘雪,等.影响环渤海地区的北上台风特征及其各类型大暴雨过程分析[J].海洋预报,2021,38(4):100-106.
YANG X L, YANG M, LONG L X, et al. The characteristics of northward-moving typhoons affecting the Bohai rim region and the analysis of various types of related heavy rainfall processes[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(4): 100-106.
- [9] YANG J, ZHANG Z Q, WEI C Y, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, FengYun-4 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(8): 1637-1658.

- [10] BESSHO K, DATE K, HAYASHI M, et al. An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellite[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 2016, 94(2): 151-183.
- [11] SCHMIT T J, GUNSHOR M M, MENZEL W P, et al. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(8): 1079-1096.
- [12] XU D M, LIU Z Q, FAN S Y, 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.
- [13] 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.
- GENG X W, MIN J Z, YANG C, et al. Analysis of FY-4A AGRI radiance data bias characteristics and a correction experiment[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(4): 679-694.
- [14] YANG C, LIU Z Q, 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.
- [15] HONDA T, MIYOSHI T, LIEN G Y, 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.
- [16] 窦芳丽, 陆其峰, 郭杨. 全天候卫星微波观测资料变分同化研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(11): 1120-1130.
- DOU F L, LU Q F, GUO Y. Overview of researches on all-sky satellite microwave data variational assimilation[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(11): 1120-1130.
- [17] 廖捷, 周自江. 全球常规气象观测资料质量控制研究进展与展望[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 56-63.
- LIAO J, ZHOU Z J. Quality control of the global conventional meteorological observations: progresses and prospects[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 56-63.
- [18] 朱文刚, 李刚, 张华, 等. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究[J]. *气象*, 2013, 39(5): 633-644.
- ZHU W G, LI G, ZHANG H, et al. Study on application technique of cloud detection and clear channels hyperspectral atmospheric infrared detector airs data[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(5): 633-644.
- [19] BAUER P, OHRING 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): ES25-ES28.
- [20] OTKIN J A. Assimilation of water vapor sensitive infrared brightness temperature observations during a high impact weather event[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 140(D19): D19203.
- [21] 梁皓, 许冬梅, 束艾青, 等. 葵花 8 号辐射率资料同化在一次川渝暴雨预报中的应用研究[J]. *高原气象*, 2023, 42(6): 1478-1491.
- LIANG H, XU D M, SHU A Q, et al. The impact of assimilating himawari-8 radiance data on the prediction of a severe storm over Sichuan-Chongqing Region[J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(6): 1478-1491.
- [22] Wang Y B, Liu Z Q, 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.
- [23] 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.
- XU D M, SHEN F F, LI H, et al. The impact of assimilation of Himawari-8 clear-sky data from the new generation geostationary meteorological satellite on the forecast of super Typhoon Hato[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 44(3): 40-52.
- [24] HEIDINGER A, BOTAMBEKO D, WALTHER A. A naïve Bayesian cloud mask delivered to NOAA enterprise[C]//NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research Algorithm Theoretical Basis Document. Maryland: STAR JPSS Annual Science Team Meeting, 2016.
- [25] 张涵斌, 李玉焕, 陈敏, 等. 集合变分混合同化方案在快速循环同化系统中的应用研究[J]. *大气科学*, 2020, 44(6): 1349-1363.
- ZHANG H B, LI Y H, CHEN M, et al. Implementation of hybrid En-3DVAR assimilation scheme in rapid cycling assimilation system[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(6): 1349-1363.
- [26] BARKER D M, HUANG W, GUO Y R, et al. A Three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(4): 897-914.
- [27] THODSAN T, WU F L, TORSRI K, et al. Satellite radiance data assimilation using the WRF-3DVAR system for tropical storm Dianmu (2021) forecasts[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(6): 956.
- [28] 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.
- XUE J S. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(6): 903-911.
- [29] 束艾青, 许冬梅, 李泓, 等. FY-3D 卫星 MWHS-2 辐射率资料直接同化对台风“米娜”预报的影响[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(5): 17-28.
- SHU A Q, XU D M, LI H, et al. Assimilating MWHS-2 radiance of FY-3D satellite and its influence on the forecast of Typhoon Mitag[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(5): 17-28.
- [30] 刘硕, 王金丹, 阎琦, 等. 热带气旋“巴威”北上引发辽宁省强降水的形成机制分析[J]. *暴雨灾害*, 2023, 42(2): 150-159.

- LIU S, WANG J D, YAN Q, et al. Analysis on the formation mechanism of heavy precipitation in Liaoning Province caused by northward-moving tropical cyclone "Bavi"[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2023, 42(2): 150-159.
- [31] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [32] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690-699.

The impact of assimilating Himawari-8 AHI clear-sky water vapor radiance on the precipitation forecasts for northward-moving Typhoon "Bavi"

DONG Qiru¹, LIU Lili^{1*}, PAN Xiao², QIU Xiaobin¹, LI Deqin², YANG Xu³

(1. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin Institute of meteorological science, Tianjin 300074, China; 2. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: To improve the heavy precipitation forecasts of northward-moving typhoons, taking Typhoon "Bavi" in August 2020 as an example, this work studies the influence of assimilation frequency of the clear-sky AHI water vapor radiance, collected by three water vapor channels on the Himawari-8 geostationary meteorological satellite, on the precipitation forecasts of Typhoon "Bavi" based on the Weather Research Forecast (WRF) model with a horizontal resolution of 3 km and Three-Dimensional Variational assimilation system (3D-Var). The dynamical and thermodynamical mechanisms for the improved heavy precipitation forecasts in the hourly-cycle assimilation experiment are discussed. The results show that the cycle assimilation of the clear-sky AHI water vapor radiance improves the 12-hour forecasts of typhoon center minimum pressure and maximum wind speeds. The typhoon center maximum wind speed forecasts improve substantially when the assimilation frequency increases to 1 hour. A multiple of objective statistical scores including TS, ETS, TSS, and POD confirm that assimilating AHI clear-sky water vapor radiance produces better forecasting skills for both lead time and rainfall threshold. The hourly-cycle assimilation experiment has the best ability for 0~24 hours heavy precipitation forecasts. Cycling AHI clear-sky water vapor radiance assimilation greatly modifies the warm and humid conditions in the middle and upper troposphere. Compared to three hourly cycle assimilation experiment, the hourly cycle assimilation experiment further enhances the low-level jet and updraft, thus improving the forecasts of heavy precipitation.

Key words: AHI clear-sky water vapor radiance; northward-moving typhoon; geostationary meteorological satellite Himawari-8; precipitation forecasts; Typhoon "Bavi"