

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, doi:10.12284/hyxb2022087

Xu Dongmei, Shen Feifei, Li Hong, 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]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(3): 40–52, doi:10.12284/hyxb2022087

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

许冬梅^{1,3,4}, 沈菲菲^{1,2*}, 李泓², 刘瑞霞⁵, 王易⁶, 束艾青¹

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 4. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 5. 国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081; 6. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008)

摘要: 本文以 2017 年第 13 号台风“天鸽”(Hato) 为例, 在 WRFDA 同化系统中结合日本葵花 8 号(Himawari-8) 资料, 通过同化 Himawari-8 晴空红外辐射率资料并进一步考察其对台风“天鸽”的结构、强度、路径分析和预报的影响。研究结果表明: 同化 Himawari-8 晴空红外辐射率资料对台风背景场的水汽相关变量分析有显著改进, 对背景场中的台风水汽信息有一定的改进作用。与控制实验, 即没有同化 Himawari-8 晴空红外辐射率资料的实验相比, 加入同化实验对台风“天鸽”的风场、500 hPa 气压场的分析效果有所提高, 台风气旋性环流加强, 并进一步改进了对台风“天鸽”的路径、台风中心最低气压和近中心最大风速的预报。平均路径误差和降水预报相对于常规观测变量的均方根误差均有所改善。

关键词: 葵花 8 号; WRF 模式; 三维变分; 台风“天鸽”

中图分类号: P412.25; P444

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)03-0040-13

1 引言

西太平洋台风对我国的影响十分严重, 平均每年有 7~8 个台风登陆^[1], 并带来暴雨、风暴潮灾害以及洪涝灾害等, 造成重大的人员伤亡和财产损失。在过去的 10 年, 有多个超强台风对我国造成了诸如特大风暴潮、风灾、特大海潮、暴雨等多种自然灾害^[2]。因此, 如何有效地对台风进行预报对于防灾减灾至关重要。近年来, 我国对如何提高台风路径的预报准确度做了大量的研究, 统计了多种定位方法、路径预报

方法、强度预报方法等, 并发现数值模式对于改进台风的预报起了重要作用^[3]。李秋阳等^[4]研究了全球预报系统(GFS)再分析资料和日本气象厅(JMA)区域客观分析资料初始场对台风“桑美”的内部结构和移动路径的影响, 发现二者均能较好地把握台风整体的流场形式, 且 JMA 资料在 700 hPa 风场、近地面风速、降水等多个方面有更好的表现。由于台风的生命史中绝大多数时间都在宽阔的大洋面上, 且其结构变化受到能量输送、中尺度强对流活动及其分布以及中纬度环流系统变形等的巨大影响。为提高数值

收稿日期: 2020-05-13; 修订日期: 2020-07-28。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42192553); 上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1404500); 上海台风基金(TFJJ202107); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金(SZKT201904); 中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡研究重点开放实验室联合开放基金(2020SYIAE02); 江苏省气象局科研重点项目(KZ202001); 江苏省北极阁基金(BJG201907); 江苏省 333 工程(BRA2020427)。

作者简介: 许冬梅(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事卫星资料同化和云参数反演研究工作。E-mail: dmXu@nuist.edu.cn

* **通信作者:** 沈菲菲(1984—), 男, 副教授, 主要从事中小尺度数值模拟与资料同化。E-mail: ffshen@nuist.edu.cn

模式的准确度,有必要获得较为精确的模式初始场,而精确的模式初始场的获得又依赖于资料同化。然而常规大洋观测系统,如浮标和船舶等,十分稀少,难以满足提升初始场的的数据需求。同时,岸基雷达的有效观测半径有限,无法观测到远在大洋深处的台风。一系列的研究通过使用各种各样先进的卫星遥感仪器,已经改进了预报的精度。例如, Miyoshi 和 Kunii^[5]运用自适应膨胀方法对大气红外探测器(AIRS)数据进行增强,改善了大气温度和湿度数据在同化中的应用。Zou 等^[6]利用 GSI 分析系统,将 GOES-13 和 GOES-15 成像仪的红外波段辐射强度观测数据进行直接同化,并在飓风天气研究预报模型(HWRF)对称涡旋初始化的基础上,增加了一个非对称分量,改善了墨西哥湾的热带气旋“德比”的轨迹和强度预报能力。俞兆文等^[7]基于 WRF-ARW 和 WRFDA3.8 同化了 AMSR2 卫星微波成像资料,通过质量控制和偏差订正实验,改进了对 2014 年 9 号台风“威马逊”的预报。

卫星观测资料已成为数值天气预报中常规观测资料的补充,对改善模式初值条件和提高预报精度有很大的作用。地球同步卫星由于相对于地球表面静止且距离地球表面距离较远,可以对地球表面进行大面积连续监测。国内外科学家已经对静止卫星的应用开展了一系列的研究。耿晓雯等^[8]在 WRFDAv3.91 中搭建先进的静止卫星扫描辐射成像仪 AGRI(Advanced Geosynchronous Radiation Imager)同化接口,分析 FY-4A 卫星天顶角对 AGRI 资料偏差订正的影响,发现卫星天顶角与偏差关系不明显,不必在预报因子中进行考虑,提升了 AGRI 红外通道辐射率资料在中尺度模式中的应用效率。Wang 等^[9]使用日本葵花 8 号(Himawari-8)卫星的辐射率资料,对 2016 年 7 月 18-21 日的华北特大暴雨两个例做了关于 AHI(Advanced Himawari Imager)水汽通道辐射率资料同化特点的研究,发现引入新一代气象观测遥感器 AHI 资料能够有效改善模拟的湿度场、风场和预报场,并对同化前 6 h 和强度超过 100 mm 的降水预报改进明显。Honda 等^[10]以 2015 年超强台风“苏迪罗”为研究对象,同化了 Himawari-8 卫星辐射率资料,发现 10 min 一次的高分辨率的 Himawari-8 卫星辐射率资料同化可以很好地改进核心区和外部雨带地区的热带气旋结构分析,并由此提高了对台风“苏迪罗”强度和路径预报的精确度。事实上,地球同步卫星可以清晰地观测到和热带气旋有关的旋转的对流性云并在分析热带气旋的最佳观测路径中起到重要作用。然而,云的信号影响了遥感信息的质量,降低了数据的利用率^[11]。

近年来,国内外专家学者在云检测方面做了卓有成效的工作。Goldberg 等^[12]提出了适用于 AIRS 的 NESDIS-Goldberg 云检测方案,这是一种将 AIRS 通道和微波通道进行经验组合,改善云检测能力的方式。官莉^[13]研究了用空间匹配的高空间分辨率的成像仪的云检测信息以及 AIRS 探测器序列定位误差对其观测值、晴空订正辐射强度和云特性反演的影响。官莉和王振会^[14]通过运用与 AIRS 空间匹配的 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectro-radiometer)产品确定受云污染的数据。朱文刚^[11]结合 GPAPES-3DVAR 系统和 AIRS,建立了适合于 GRAPES-3DVAR 模式的晴空通道云检测方案,大大增加了资料,尤其是中高层资料的使用率,并改善了中高层的分析场。然而,云解析模型的计算需要大量资源,包括高度非线性的过程^[15],同时可能会受到参数化方案选择的影响^[16]。因而,剔除云信息,仅保留晴空资料进行同化是目前解决云污染的有效方法。

静止气象卫星位于较高的地球同步轨道,因此视野广阔,可观测范围约 1.7 亿 km²,占地球表面的 1/3。同时,它可以连续观测同一地区,一般可提供 30 min 一次的全盘扫描资料,或是 3~5 min 提供一次特定地区的观测资料,并连续监视天气系统的演变。因此,它在对台风预报方面具有明显优势。2015 年 7 月,日本气象厅开始正式运行葵花 8 号地球同步卫星^[16],这是一系列第三代地球同步气象卫星中的第一颗。它成功发射于 2014 年 10 月 7 日,并在试运行 9 个月后开始业务观测。2015 年 8 月,葵花 8 号卫星成功地获得了台风“苏迪罗”快速增强的过程^[10]。然而值得指出的是, Honda 等^[10]是针对超强台风“苏迪罗”在海上的快速加强阶段进行同化研究,同化窗区间的下垫面为均一的开阔洋面。而适用于我国近海快速增强台风的且针对葵花 8 号辐射率资料同化研究工作还开展较少。另外 Honda 等^[10]采用的是计算代价成本相对较高的集合同化方法,对我国近海快速增强的台风而言,为了赢得宝贵的预警时效,有没有可能采用一种基于快速高效的 GPAPES-3DVAR 同化算法来分析葵花 8 号辐射率资料并考察其对近海台风分析和预报的影响?这也恰恰是气象业务部门亟需解决的难题之一。鉴于现阶段葵花 8 号资料在数值预报中的应用研究还不多,本文以 2017 年 13 号超强台风“天鸽”为例,同化葵花 8 号地球静止卫星的红外辐射率资料,通过改进初始场,讨论其对台风路径、强度的模拟和预报能力的提升作用。

2 观测资料及同化系统

2.1 Himawari-8 晴空红外辐射率资料介绍

葵花 8 号卫星搭载了先进的静止轨道成像仪 AHI, 它具有 16 个观测通道(表 1), 其 8、9、10(波长为 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $6.9 \mu\text{m}$ 和 $7.3 \mu\text{m}$)3 个通道能够对水汽进行探测, 因此有较强的对云探测的能力。表 1 给出了各个通道透过率随着高度的变化, 即各个通道的权重函数($d\text{Tau}/d\ln P$)。AHI 能提供 10 min 一次的 16 通道的全圆盘高分辨率的观测资料, 其高时间分辨率的资料能够有效改进资料同化的准确性^[17]。此外, 其空间分辨率也大幅提高, 达到了 1 km 左右。已有研究揭示了葵花 8 号卫星观测数据的特点以及其对降水预测的作用^[18-19]。

表 1 AHI 16 个通道的中心波长

Table 1 The central wavelength of 16 AHI bands

频带名称	波段类别	中心波长/ μm
1	可见光	0.47
2	可见光	0.51
3	可见光	0.64
4	近红外线	0.86
5	近红外线	1.6
6	近红外线	2.3
7	红外线	3.9
8	红外线	6.2
9	红外线	6.9
10	红外线	7.3
11	红外线	8.6
12	红外线	9.6
13	红外线	10.4
14	红外线	11.2
15	红外线	12.3
16	红外线	13.3

本实验采用通道 8、9、10 这 3 个水汽通道, 它们是红外波段, 中心波长如表 1 所示, 分别为 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $6.9 \mu\text{m}$ 和 $7.3 \mu\text{m}$ 。由于本文同化的观测资料主要是针对水汽通道的 AHI 辐射率资料, 首先采用晴空条件下的模式温度廓线和湿度廓线作为大气辐射传输模式(Community Radiative Transfer Model, CRTM)来输入计算权重函数(图 1)。由图 1 可以发现葵花 8 号 3 个

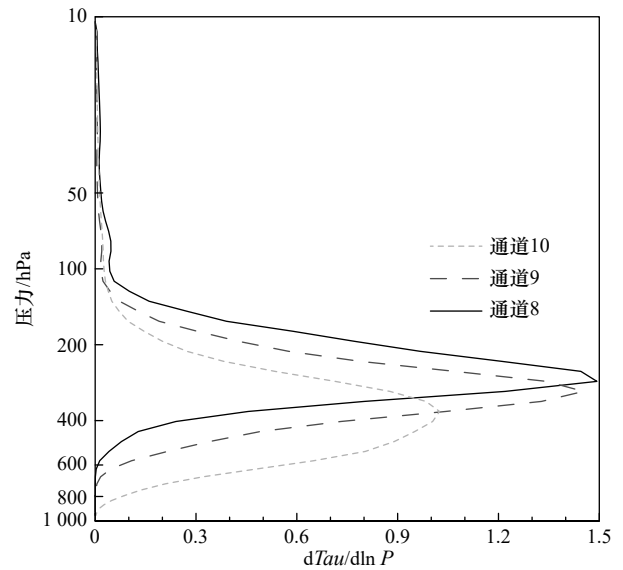


图 1 通道 8、9、10 的权重函数

Fig. 1 The weight function of bands 8, 9 and 10

水汽通道的权重函数峰值位于对流层的中高层位置, 从而为对流层的 AHI 辐射率资料同化提供丰富的大气水汽信息。水汽通道 8、9、10 的权重函数峰值位于 $300 \sim 400 \text{ hPa}$ 附近的对流层中高层, 其中通道 10 较通道 8 和通道 9 要低, 通道 8 峰值最高, 因此减小了地面带来的影响。在全空同化红外辐射率资料过程中, 由于辐射率资料和模式变量间复杂的非线性以及观测误差和系统偏差不确定性较大等问题, 本实验只同化水汽通道的晴空辐射率资料。

2.2 WRFDA 系统及 AHI 同化模块构建

2.2.1 WRFDA 同化系统

WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式是一种可压缩、非静力的中尺度天气预报模式。而 WRFDA 是 WRF 模式的同化系统, 由美国国家大气研究中心开发和维护。本研究基于其中的 3DVAR 同化方法, 通过分析多源观测资料来改善初始场^[20-22]。

2.2.2 AHI 同化模块

WRFDA 系统目前可以同化多种常规观测和非常规观测, 本研究采用系统自带的 CRTM(Community Radiative Transfer Model)作为观测算子来对 AHI 辐射率资料进行模拟计算。为了去除受云和降水污染的格点, 引入了非常严格的云检测方案^[22]。具体步骤包括: 通过通道 14 亮温的空间和时间变化、通道 14 和通道 15 的相关差异、通道 14 和水汽通道 10 之间的空间相关以及通道 7 的辐射率值来检测云。

2.2.3 偏差订正模块

卫星资料同化的过程中包含了来自于观测本身和模式以及同化系统的误差。本文利用 WRFDA 系

统中的回归偏差订正法来修正卫星观测算子,公式为

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

被修正的观测算子 \tilde{H} 在以往的观测算子 $H(x)$ 基础上额外加入了总偏差常数项 β_0 和各预报因子 p_i 及其系数项 β_i 。在本研究中,首先通过离线的方式统计得到第一个同化时次所需的初始偏差订正系数,并在同化的过程中得以更新。后续的同化时次用到的偏差订正系数为前一个同化时刻更新过的系数。偏差订正使用到的预报因子包括:1 000~300 hPa和200~50 hPa层结厚度、地表温度以及水汽总含量。

2.3 台风“天鸽”个例

台风“天鸽”是2017年13号台风,于2017年8月20日14时在20.4°N, 118°E处生成,中心附近最大风力为8级,中心最低气压为1 000 hPa。之后“天鸽”的风力逐渐加强并向西移动,其观测路径如图2a所示。值得注意的是,“天鸽”在8月22日08时和15时风速连升两级,迅速升级为台风,并向西偏北方向移动。此后,“天鸽”的风速继续增强,移速不断增大,到8月23日05时,“天鸽”移动至21.3°N, 115.2°E,中心附近最大风力加强到13级,中心气压为955 hPa;并在2 h后进一步加强到14级,中心气压为950 hPa;到8月23日10时,其中心附近最大风速达到了15级,中心气压为945 hPa。“天鸽”能够在5 h内迅速增强3级,可能是近海浅水区域(深度<30 m)反常温暖的结果。8月23日13时,台风“天鸽”登陆,其登陆地点为22°N, 113.2°E,登陆时等级为强台风级,并在24日

20时被停止编号。台风“天鸽”具有以下4个特点:第一,它的移动速度快,其预报移速一度达到30 km/h,导致应急准备严重不足;第二,它的强度变化大,在8月23日05时到10时的5 h内中心附近最大风力由13级迅速增加到15级;第三,“天鸽”登陆时期恰逢天文大潮,使得风暴潮增水严重;第四,它的影响面广、影响大,按照美国联合台风预警中心(JTWC)的统计,台风“天鸽”严重摧毁了城市,造成了10人死亡,仅澳门的经济损失估计超过15亿美元。事实上,台风“天鸽”总共造成24人死亡^[23],并对港澳一带造成严重的影响。因此,台风委员会宣布将“天鸽”除名。图2b是8月22日18时葵花8号卫星13通道(10.4 μm)的亮度温度图,从图中可以看到在“天鸽”中心附近有强烈的冷中心,其最低亮温可达190 K,图2b也较好地反映出了台风螺旋雨带的结构。

2.4 实验设计

本实验采用WRF模式对台风“天鸽”进行模拟。如图3所示,模拟的中心区域为20°N, 115°E。并采用两层网格嵌套方案,内外层网格格点数分别为401×329、481×430,模式顶层为10 hPa,垂直层数共61层。本实验采用了WRF单参6类微物理方案(WRF Single-Moment 6-class scheme)、RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、MM5 similarity近地面层方案、Noah Land Surface Model陆面方案、Yonsei University行星边界层方案以及Kain-Fritsch积云参数化方案。

本次实验流程如图4,为了说明AHI辐射率资料对同化的改进作用,设置了控制实验(CTLN,下同)和AHI资料同化实验(AHI_DA,下同)。2017年8月

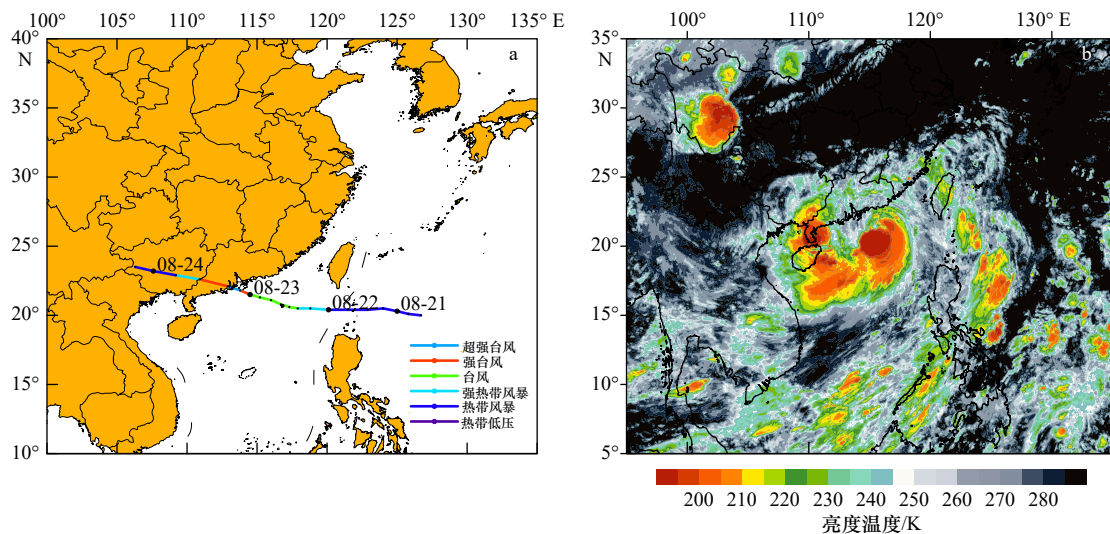


图2 台风“天鸽”的观测路径(a)以及2017年8月22日18时Himawari-8 AHI通道13的亮度温度(b)

Fig. 2 The observation track of Typhoon Hato (a) and the brightness temperature of band 13 of the Himawari-8 AHI at 18:00 UTC on August 22, 2017 (b)

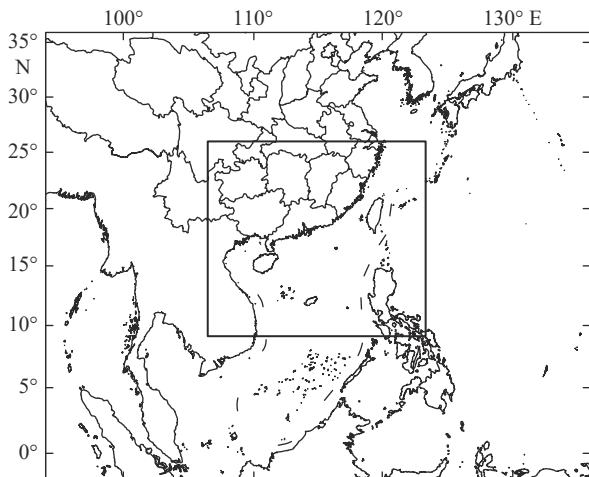


图3 WRF模拟区域

Fig. 3 The simulation area of WRF

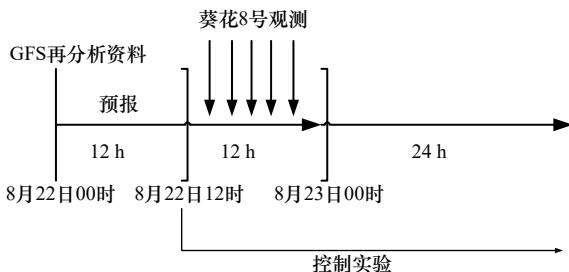


图4 实验流程设置

Fig. 4 The experimental flowchart

22日00时(世界时)的初始场和侧边界条件由美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的GFS(Global Forecasting System)再分析资料提供。经过12h的Spin-up后得到第一次同化所需的背景场。并以此进行了连续12h(每小时一次)的循环同化及预报实验。其中,CTNL实验采用常规观测资料进行同化实验,而AHI_DA不仅采用常规观测资料,同时还引入AHI观测资料进行同化。实验结果(表2)将在第3部分进行分析。

表2 模拟实验方案设置

Table 2 Simulation experiment scheme setting

实验	说明
CTNL	常规观测资料
AHI_DA	常规观测资料和AHI观测资料

3 实验结果分析

3.1 分析效果检验

3.1.1 预报因子分析

图5给出了晴空条件下观测亮温减去模拟亮温

(OMB)和各个预报因子分布的散点图,图中的阴影的颜色对应着分布密度。同时图5列出了相应的偏差bias和预报因子 P 的相关函数。通过图5中的统计结果可以得到4个预报因子偏差订正系数。该系数给出了不同预报因子相关的偏差系数,利用这些系数以及每次同化时背景场中的预报因子可以得到初始的偏差大小。基于初始的偏差经过同化过程进一步进行偏差订正。

图6为2017年8月22日12时AHI资料通道8、9、10亮温观测残差频数分布直方图。图6a黑色直方图为偏差订正前的OMB(观测亮温减去模拟亮温)频数分布。白色直方图为偏差订正处理后的结果,而灰色直方图为对分析场进行偏差订正后的OMA(观测亮温减去分析场亮温)频数分布。以通道8(图6a)为例,相较于图6a中OMB频数分布,图6a中的OMA频数分布更加集中在0K附近,峰值位于0K,频数达到3500,而偏差订正前后的OMB频数峰值分别为2600和2500,且相较于OMB更加接近于正态分布,说明分析场更加接近观测,同化效果较好。而通道9、10(图6b、图6c)也有类似的效果,且峰值频数更大,说明通道9、10的分析场更加接近于观测场。

图7为2017年8月22日12时到8月23日00时每小时一次(共13次)的亮温偏差时间序列,图7a至图7c依次为通道8、9、10,从上到下分别为观测数目、亮温偏差平均值和亮温偏差标准差。以通道8(图7a)为例,图中第一行为观测数目随时间的变化,整体呈减少趋势,由8月22日12时的10500最终减少到8月23日00时的7500,这是进行了严格的质量控制的结果,云和降水点被严格剔除掉。图中第2行为亮温偏差平均值随时间的变化,可见在偏差订正前,13次同化的OMB平均值大致在0.8K附近浮动,其中最大值为1.1K,最小值为0.35K,而偏差订正后,13次同化的OMB平均值位于0K附近,最大值0.35K,最小值-0.4K,说明偏差订正使得背景场模拟亮温更加接近于观测亮温,证明了偏差订正的有效性。而相对于OMB,OMA的平均偏差基本同x轴重合,其平均偏差最大值为0.1K,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。图中第3行为亮温偏差标准差随时间的变化。偏差订正后和偏差订正前的OMB标准差曲线重合。其中OMB的亮温偏差标准差远大于OMA的亮温偏差标准差,除第一次同化外,其余12次同化结果均位于1.2K附近,而OMA的亮温偏差标准差在13次同化实验中均位于0.4K附近。通道9(图7b)

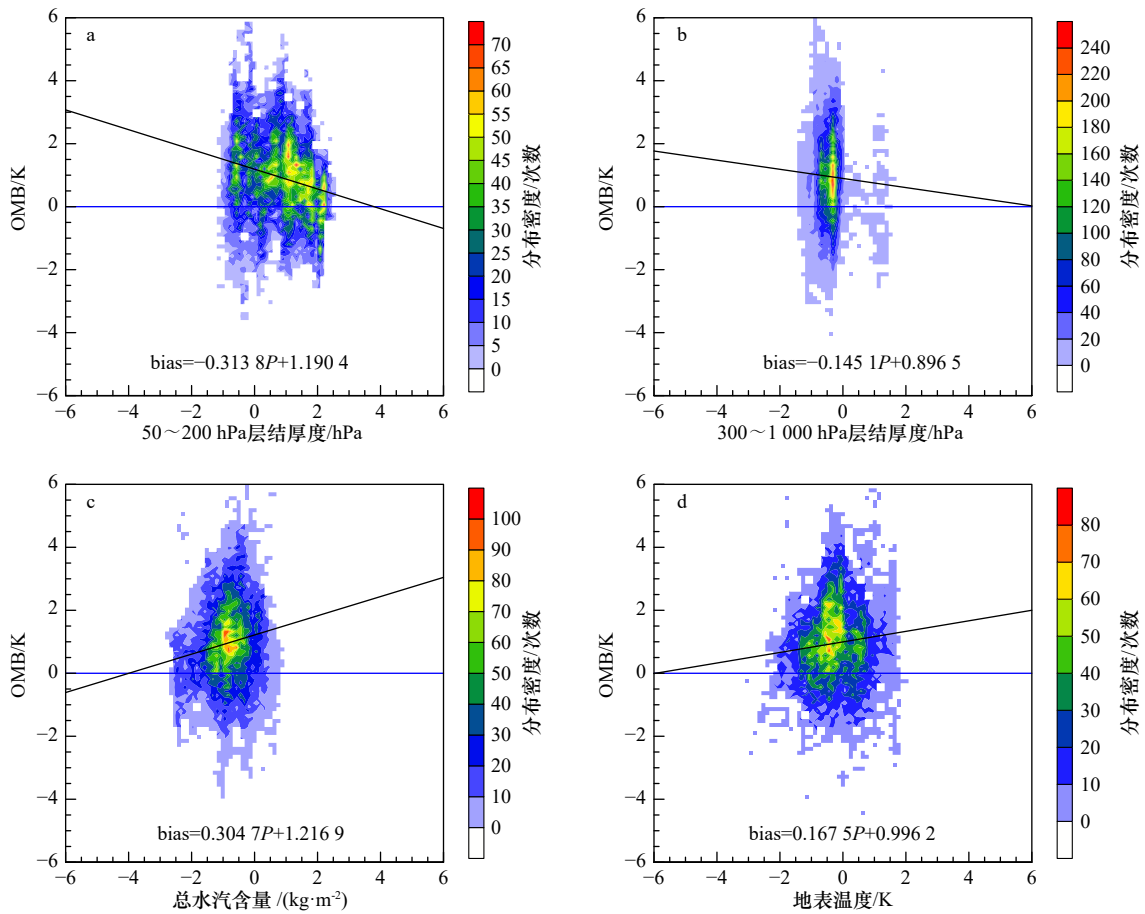


图5 OMB和预报因子50~200 hPa层结厚度(a)、300~1 000 hPa层结厚度(b)、总水汽含量(c)和地表温度(d)的分布散点图

Fig. 5 Scatter plots of OMB and predictors of 50~200 hPa layer thickness (a), 300~1 000 hPa layer thickness (b), total moisture content (c), and surface temperature (d)

图中的阴影显示是分布密度以及偏差 bias 和预报因子 P 的相关函数

The shadow in figure shows distribution density and bias and correlation function of predictor

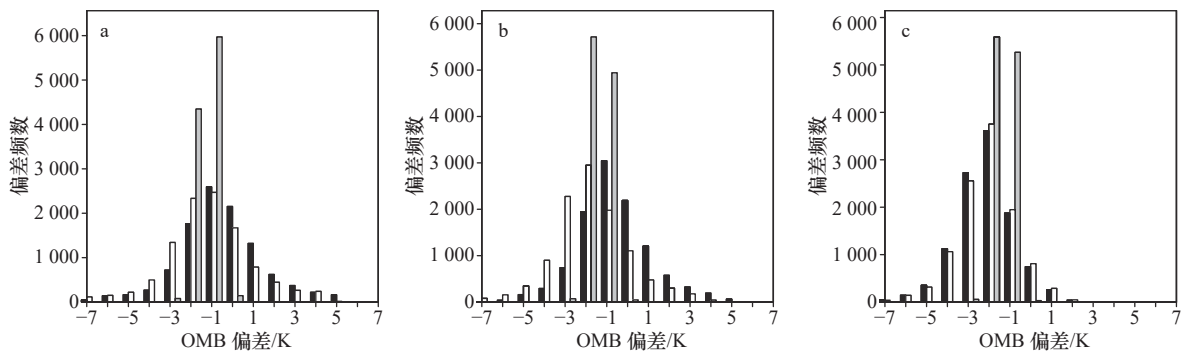


图6 2017年8月22日12时AH1资料通道8(a)、通道9(b)、通道10(c)观测与偏差订正前背景场模拟的辐射率值差异分布直方图(黑色)、观测与偏差订正后背景场模拟的辐射率值差异分布直方图(白色)以及观测与分析场模拟的辐射率值差异分布直方图(灰色)

Fig. 6 Histogram of AHI observation minus simulated radiance from the background without bias correction (black), observation minus simulated radiance from the background with bias correction (white), and observation minus simulated radiance from the analysis (gray) for band 8 (a), band 9 (b) and band 10 (c) at 12:00 UTC on August 22th, 2017

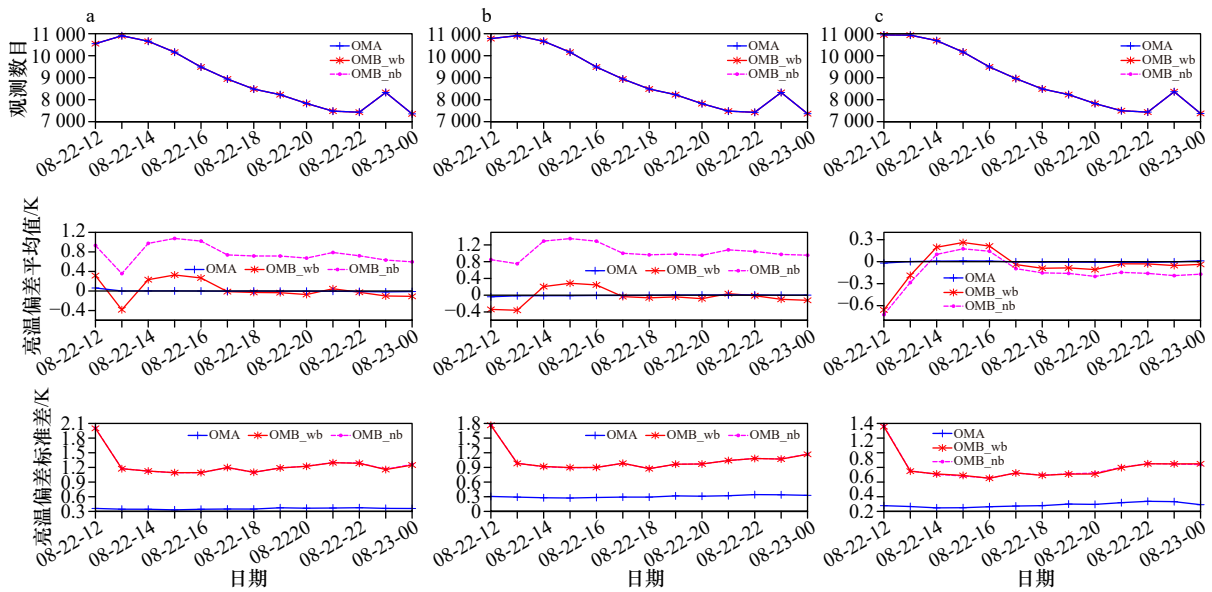


图7 2017年8月22日12时到8月23日00时通道8(a)、通道9(b)、通道10(c)逐小时(共13次)的观测数目(上),偏差平均(中)和偏差的标准偏差(下)

Fig. 7 Time series of hourly data counts (top), the averaged bias (middle) and the stdv of the bias (bottom) for band 8 (a), band 9 (b), band 10 (c) from 12:00 UTC August 22, 2017 to 00:00 UTC August 23, 2017 for total 13 cycles

和通道10(图7c)均有类似的效果,说明AHI辐射率资料可以显著改善亮温分析。值得注意的是,3个通道的OMB标准差均在8月22日12时达到最大(图7a为2.0 K,图7b为1.75 K,图7c为1.35 K),而之后迅速减小,而OMA标准差则相对较小,说明其改进模式背景场效果最好。

3.1.2 风场和高度场分析

图8是2017年8月22日12时00分CTNL实验和AHI_DA实验分析的500 hPa高度场。图8a为CTNL实验,图8b为AHI_DA实验。在图8a中,闭合等压

线的数目为4,最低等高线为5780位势米,位于20°~21°N,116°~117°E,与位于19.5°N,117.5°E的台风中心偏离,未能模拟出台风“天鸽”的涡旋中心。而图8b中,AHI_DA实验模拟出的闭合等压线数目增加到7,最低等高线为5720位势米,且其位置和台风中心重合。由图可见,AHI_DA实验不仅较好地模拟出了台风“天鸽”的涡旋环流形势,而且其模拟出的台风涡旋强度也比CTNL实验要强很多。

图9是2017年8月22日12时00分CTNL实验和AHI_DA实验分析的海平面气压场和近地面风场

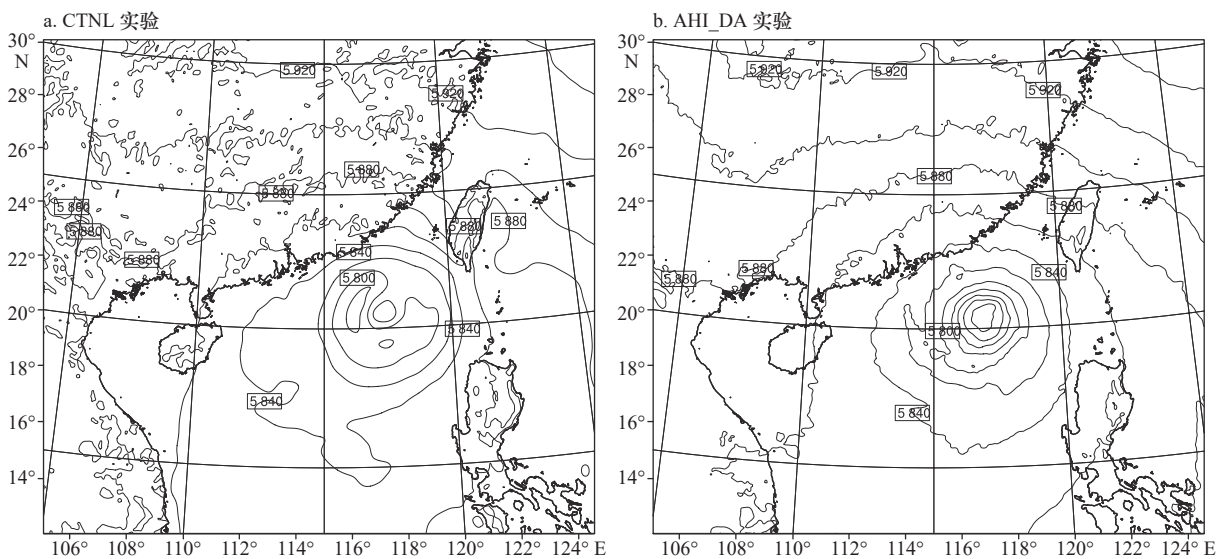


图8 2017年8月22日12时00分500 hPa位势高度场对比

Fig. 8 500 hPa geopotential height field at 12:00 UTC on August 22, 2017

的合成图。图 9a 为 CTNL 实验,图 9b 为 AHI_DA 实验。此时,台风的中心位于 19.5°N, 117.5°E 的海面。由图 9a 可见,CTNL 实验的闭合等压线数目为 3,且彼此间距离较大,海平面气压的最低值为 990 hPa,说明 CTNL 实验模拟的台风比较弱。在中心北偏西方向有风速的最大值,约为 32 m/s,台风的风场较气压场向东北方向偏移。而 AHI_DA 实验的闭合等压线数目增加到 5,且等压线密度更大,反映出同化了 AHI 辐射率资料后台风中心气压快速下降的特点,海平面气压最低值为 978 hPa,气旋强度得到了显著增强。而且台风的大风带也由图 9a 中位于台风中心北偏西方向变为图 9b 中基本环绕台风中心,风速最大值位于中心偏南,并提高到了 36 m/s,且台风风场与气压场基本匹配。由图可见,同化过程使得气旋强度和风速都得到了有效的增强,且使得台风的风场和气压场更加匹配。

3.1.3 均方根误差(RMSE)分析

在长达 12 h 的同化区间内,分析场与观测场之间的误差一般可以用来评定同化系统的优劣。本文将同化区间的分析场与常规观测资料作检验。通过均方根误差平均值的廓线分布可以看出分析场和观测的接近程度。图 10a、图 10b 分别为同化区间的均方根误差平均值的垂直廓线分布图,由图可以发现两组分析的速度分量 u 和 v 在 100 hPa 高度均方根误差最大,但是整体看来,AHI_DA 实验分析的风速的 RMSE 要显著小于 CTNL 实验分析的 RMSE。这也进一步

表明通过同化 AHI 辐射率资料可以通过多变量相关显著改进风场预报。图 10c 表明对于温度场而言,AHI_DA 实验分析的温度场在 1 000~400 hPa 之间相比 CTNL 实验有显著的改进作用。通过图 10d 可以进一步发现 AHI_DA 实验在 925~300 hPa 之间分析的 RMSE 要显著低于 CTNL 实验分析的湿度场 RMSE,并且随着高度的降低,改进效果更加明显。表明 AHI 辐射率资料中的水汽信息可以有效延伸到对流层较低层,并对背景场起到一定的修正作用。值得指出的是,湿度场在 925~1 000 hPa 表现不好可能是由于地表发射率存在较大的误差以及本文所同化的通道的权重函数位于对流层中上层等原因造成的。

3.2 预报效果检验

3.2.1 降水效果

图 11 为 8 月 22 日 18 时到 8 月 23 日 00 时的 6 h 累积降水,此时,台风尚未登陆。由图 11a 中可以看出,在这 6 h 内,主要降水区域集中在 22°~26°N, 114°~116°E 范围的沿海区域,还有一降水最大值区域位于 111°E 以西的内陆区域。最大降水强度中心位于 24°N, 115°E 附近,6 h 累积降水量接近 50 mm。然而,由图 11b 可见,CTNL 实验预报得到的主要降水区域为 112°~118°E 的沿海及内陆区域,且最大降水中心降水强度超过 120 mm,而位于 111°E 以西的降水区域则被漏报。图 11c 为 AHI_DA 实验预报得到的 6 h 累积降水,主要降水区域为 22°~31°N, 111°~119°E 的沿海区域,降水区域的面积和降水强度均有

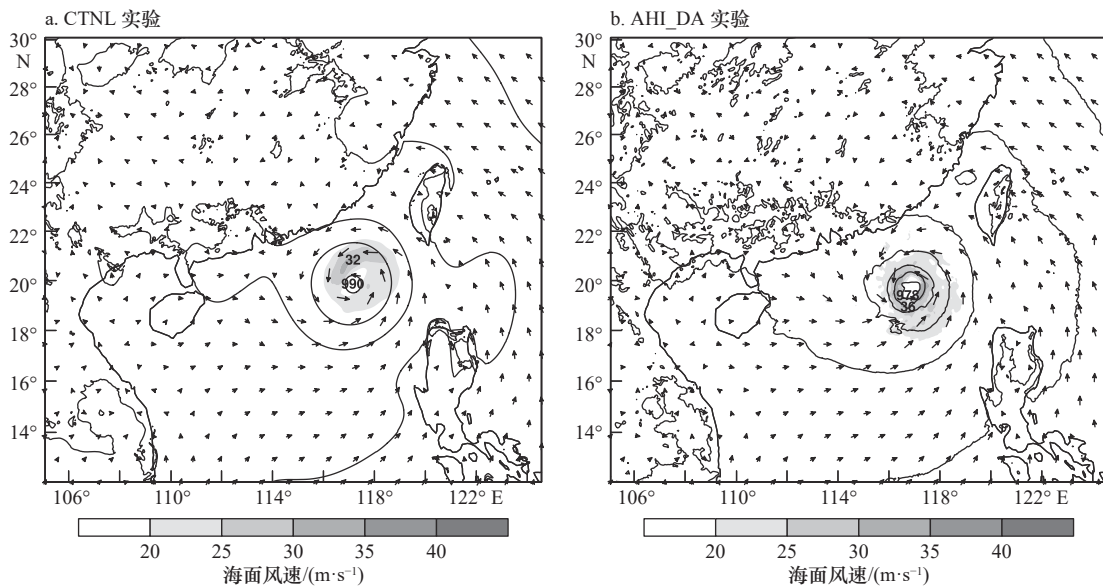


图 9 2017 年 8 月 22 日 12 时 00 分海平面气压场风场对比

Fig. 9 Sea level pressure and wind at 12:00 UTC on August 22, 2017

海平面气压等值线范围为 980~1 010 hPa(间隔为 5 hPa)

Sea level pressure is from 980 hPa to 1 010 hPa by 5 hPa

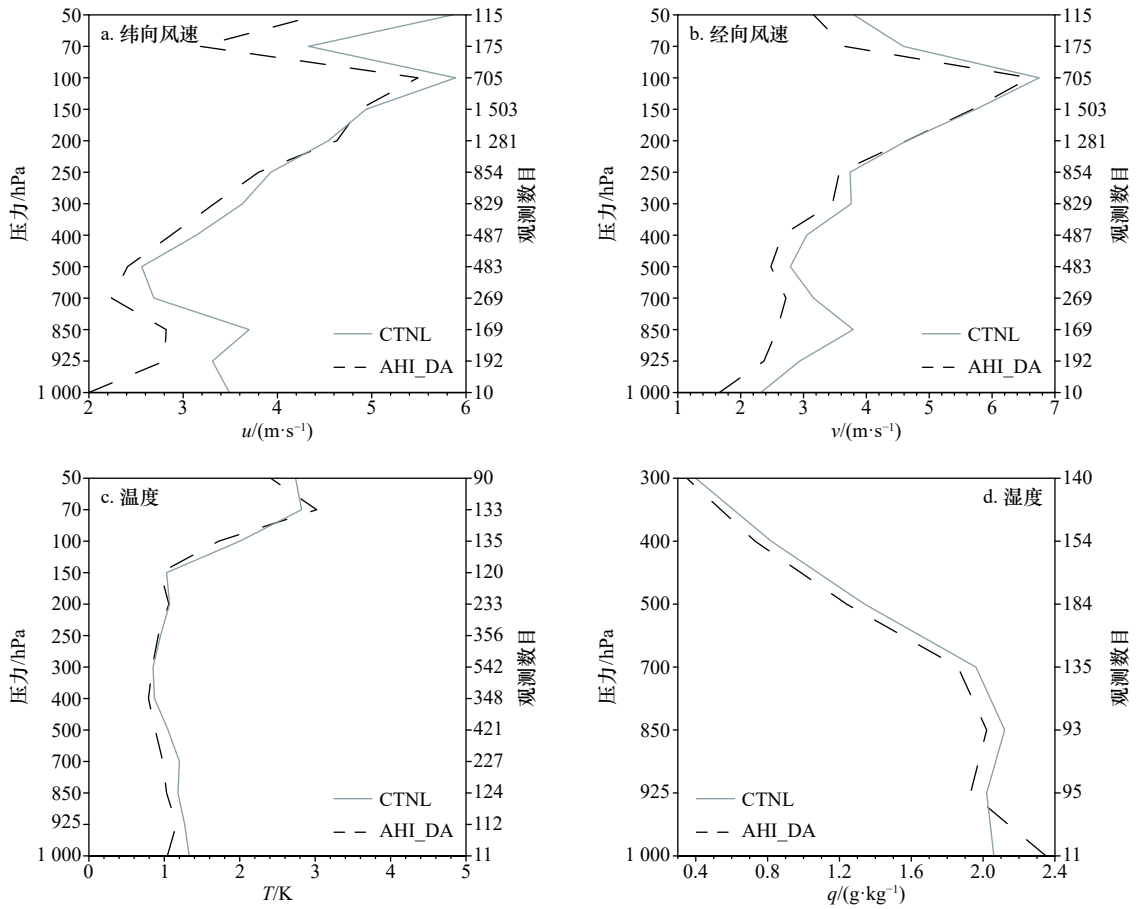


图 10 同化分析场相对于常规观测资料的 RMSE 均值的垂直廓线

Fig. 10 The averaged RMSE of the analyses against the conventional data

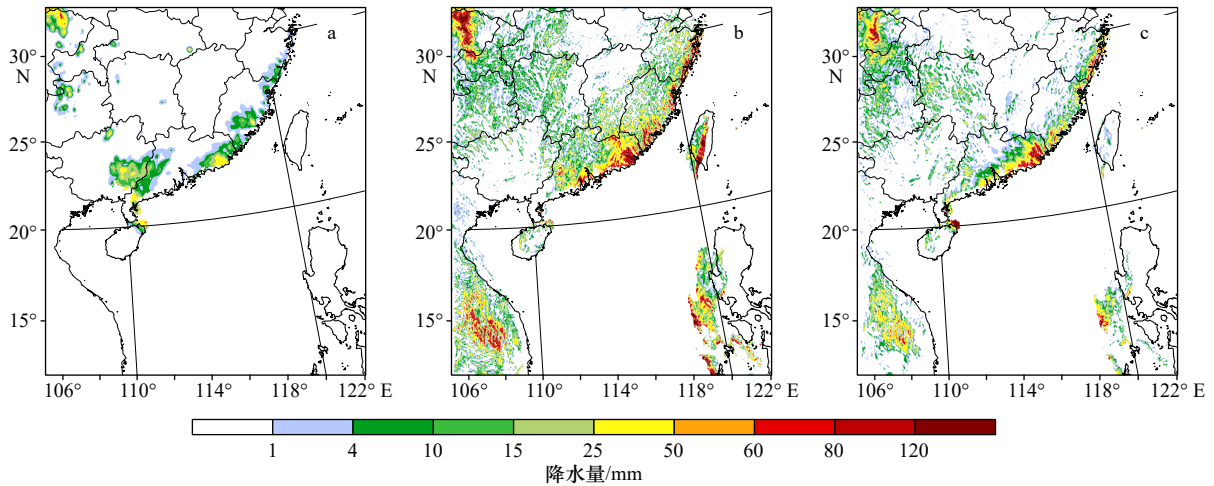


图 11 2017 年 8 月 22 日 18 时到 23 日 00 时 6 h 累积降水

Fig. 11 Accumulated 6 hour precipitation initialized from 18:00 UTC on August 22, 2017

a. 观测值; b. CTNL 实验预报; c. AHI_DA 实验预报

a. Observed value; b. CTNL test forecast; c. AHI_DA test forecast

所减小。可见 AHI_DA 实验得到的 6 h 累积降水图更加接近于实际的观测情况。

本文进一步对各组实验 6 h 累计降水量计算 FSS (Fraction Skill Score)^[24] 评分。定义 FSS 评分为

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{fi} - P_{oi})^2}{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N P_{fi}^2 + \sum_{i=1}^N P_{oi}^2 \right)}, \quad (2)$$

式中, P_{fi} 和 P_{oi} 分别是第 i 个网格点处超过给定阈值的预报和观测降雨区域的概率; N 是验证区域中的网格点总数。FSS 的值在 0 到 1 之间, 0 表示预报和观测的降雨区域没有重叠, 1 表示预报和观测的降雨区域完全重叠。由图 12 可以发现, 资料同化实验明显优于控制实验, 得到的 FSS 显著提高。对于小于 25 mm 阈值的评分更加优于 25 mm 阈值的评分。

3.2.2 路径和强度预报

为了评估 AHI 辐射率资料同化对台风“天鸽”预报的影响, 本文在同化后作了 2017 年 8 月 23 日 00 时至 24 日 00 时的 24 h 确定性预报。图 13a 是台风“天鸽”的路径预报效果图。在预报起始的 6 h 内两组实验预报的路径误差均相对较小, 但是在起始预报的 6 h 之后, CTNL 实验预报的台风路径逐渐向偏南方向转折, 并逐渐产生了较大的误差。而 AHI_DA 实验虽然在起始预报的 12~18 h 内也有部分向南转折的趋势, 但在起始预报的 18~24 h 内, 误差又逐渐减小。总体而言, 在 24 h 的确定性预报中, 相比于 CTNL 实验, AHI_DA 实验预报的路径更加接近于实际观测路径。图 13b 是两组实验预报的台风路径误差图。从图 13b 中可以发现, 初始时刻, 同化实验和控制实验的预报误差分别为 33 km 和 42 km, 而经过模式 6 h 预报之后分别为 33 km 和 37 km, 此时, 两组预报实验的路径误差均相对较小。之后, 控制实验的误差迅速增加, 到起始预报时刻 24 h 后, 控制实验的路径误差达到最大, 为 123 km。而同化实验在起始预报的 12~18 h 内也有迅速增加的趋势, 在起始预报 18 h 后, 误差也达到了 70 km; 但在起始预报 18 h 后, 又逐渐下降, 到起始预报 24 h 后, 路径误差下降到 56 km。综合图 13a 和图 13b 来看, 在 24 h 的预报过程内, 同化实验预报的路径误差均明显小于控制实验预报的路径误差。两组实验预报的台风路径均相对于最佳观测路径偏南, 且随时间推移, 预报的路径会更加偏南, 路径误差总体也在逐步增加, 24 h 内同化实验和控制实验预报的平均路径误差分别达到了约 45 km 和 67 km。总体而言, AHI 同化实验预报的台风路径相对于控制实验改进显著。从前文可以看出, 同化 AHI 辐射率资料能一定程度上对台风的动力场、热力场、质量场有所改善, 因而图 13b 和图 13d 给出了两组实验在台风中心最低气压和近中心最大风速方面的预报效果。从图 13c 可以看出, AHI 同化实验的中心最低气压始终和最佳观测更为接近, 控制实验预

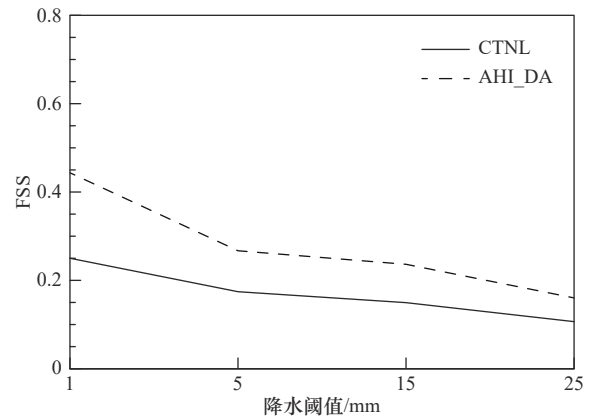


图 12 各量级 6 h 累计降水量的 FSS 评分

Fig. 12 FSS scores of accumulated 6 hour precipitation for different thresholds

报的台风强度偏弱。图 13d 中两组实验对台风近中心最大风速的预报结果和气压场结论较为一致, 控制实验预报的台风近中心最大风速偏弱, 而 AHI 同化实验和最佳观测的台风近中心最大风速误差始终小于 2 m/s。

4 结论

本文基于 WRFDA 同化系统, 引入 Himawari-8 的 AHI 红外辐射率资料, 在同化过程中采用严格的云检测方式剔除云和降水的影响, 通过设置 AHI_DA 和 CTNL 两个实验, 来检验 AHI 晴空红外辐射率资料同化是否对台风“天鸽”的分析预报有改进作用, 并可以得到以下结论:

(1) 引入 AHI 红外辐射率资料能使模拟亮温的偏差减小, 经过偏差订正后, OMB 分布基本接近均值为 0 的正态分布, 但相对 OMB 来说, OMA 的偏差标准差和平均值均大幅下降, 分布更加收敛, 说明同化情况较好。

(2) AHI 晴空红外辐射率资料的引入能够有效地改进台风的海平面气压场, 近地面风场和 500 hPa 高度场的预报, 经过同化之后, 台风的中心气压和最大风速都得到了改进, 且台风风场和流场也更加匹配。

(3) 相对于 CTNL 实验, AHI_DA 实验得到的纬向风速、经向风、温度、湿度等要素的均方根误差均有所减小, 更加符合实际情况。

(4) AHI_DA 实验能够改进对 6 h 累计降水的预报, 相对于 CTNL 实验有效减少了预报的降水区域和降水强度, 使之更加接近于观测值。

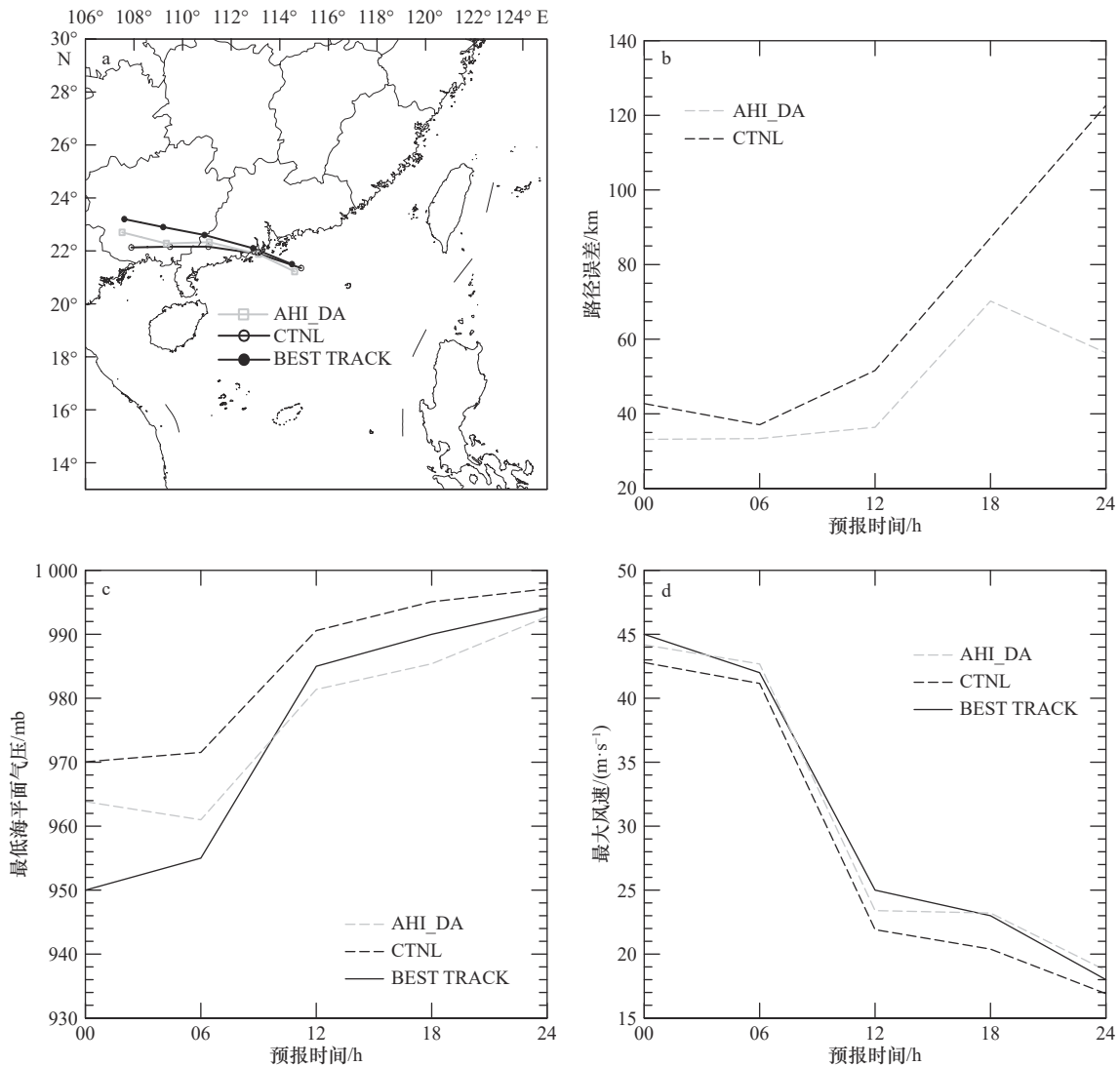


图 13 2017 年 8 月 23 日 00 时后 24 h 确定性预报的实际路径和预报路径(a), 路径误差随预报时间变化分布(b), 最低海平面气压随预报时间变化分布(c)和最大风速随预报时间变化分布(d)

Fig. 13 24-hour deterministic forecast at 00:00 UTC on August 23, 2017, the best track and forecast track (a), the track error with the forecast leading time (b), minimum sea level pressure with the forecast leading time (c) and maximum wind speed with the forecast leading time (d)

(5) AHI_DA 实验和 CTNL 实验在前 6 h 内对台风路径的预报效果均较好, 但 6 h 后 AHI_DA 实验的预报效果明显优于 CTNL 实验。

本文实现了 Himawari-8 卫星红外辐射率资料同化实验, 但是由于本文检验的台风个例只有 1 个, 且对台风累计降水和路径的预报仍有偏差。未来将采用更先进的同化方式, 如四维变分同化, 集合-变分同化等进一步针对更多的台风个例进行研究; 同时针对集合同化方法中水平局地化距离的调整等方案展开细致深入的研究, 最后, 本文去除了云和降水区域的观测资料, 只进行了 AHI 资料的晴空同化, 因此实现 AHI 资料的全天空同化也是本研究参与者的下一个主要研究方向, 同时也包括联合其他卫星遥感资料进

行多源同化尝试^[25]。鉴于本文尝试利用日本葵花 8 号高时空分辨率卫星水汽通道数据开展同化实验, 得到了较好的同化和预报效果, 对未来在业务化预报进一步使用新一代静止卫星葵花 8 号辐射率资料提供了重要参考, 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。由于静止卫星的时空连续性, 下一步我们将开展长时间的同化实验, 进一步探讨静止卫星在改善台风的路径和强度预报中的作用。

致谢: 本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持与帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 沈菲菲, 许冬梅, 闵锦忠, 等. 云尺度雷达资料的混合同化对台风“桑美”的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(5): 48–61.
Shen Feifei, Xu Dongmei, Min Jinzhong, et al. Assimilation of radar observations with En3DVAR at cloud-resolving scale for the prediction of Typhoon Saomai[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(5): 48–61.
- [2] 沈菲菲, 闵锦忠, 许冬梅, 等. 双多普勒雷达资料同化在飓风“艾克”预报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(11): 60–72.
Shen Feifei, Min Jinzhong, Xu Dongmei, et al. Application of assimilating dual doppler radar data in forecast of Hurricane Ike[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(11): 60–72.
- [3] 沈菲菲, 闵锦忠, 陈鹏, 等. 多普勒雷达资料同化在台风“桑美”预报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(3): 25–36.
Shen Feifei, Min Jinzhong, Chen Peng, et al. Experiments of assimilating doppler radar data in forecast of typhoon Saomai[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(3): 25–36.
- [4] 李秋阳, 沈菲菲, 许冬梅, 等. 不同初始场资料对台风“桑美”数值模拟的影响[J]. 气象科技, 2019, 47(3): 460–468.
Li Qiuyang, Shen Feifei, Xu Dongmei, et al. Influence of different initial fields on numerical simulation of typhoon Saomai[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(3): 460–468.
- [5] Miyoshi T, Kunii M. Using AIRS retrievals in the WRF-LETKF system to improve regional numerical weather prediction[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2012, 64(1): 18408.
- [6] Zou X, Qin Zhengkun, Zheng Y. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF[J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(7): 2485–2505.
- [7] 俞兆文, 刘健文, 黄江平, 等. AMSR2微波成像资料同化试验及其对台风预报的影响[J]. 气象海洋水仪器, 2017, 34(2): 1–8.
Yu Zhaowen, Liu Jianwen, Huang Jiangping, et al. Assimilation experiment of AMSR2 microwave imaging data and its influence on typhoon forecasting[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2017, 34(2): 1–8.
- [8] 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 Xiaowen, Min Jinzhong, Yang Chun, et al. Analysis of FY-4A AGRI radiance data bias characteristics and a correction experiment[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2020, 44(4): 679–694.
- [9] 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*, 2018, 123: 3374–3394.
- [10] 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.
- [11] 朱文刚. 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[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Zhu Wengang. Impliment study on hyperspectral atmospheric infrared detectors AIRS cloud detect and clear channels application technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [12] Goldberg M D, Qu Y, Mcmillin L M, et al. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 379–389.
- [13] 官莉. 卫星红外超光谱资料及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
Guan Li. A study on infrared hyperspectral measurements and its applications on cloud detection, cloud-clearing and atmospheric sounding profile[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2005.
- [14] 官莉, 王振会. 用空间匹配的MODIS云产品客观确定AIRS云检测[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 516–521.
Guan Li, Wang Zhenhui. Objective determination of AIRS cloud mask using co-located MODIS cloud mask[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(5): 516–521.
- [15] 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): ES25–ES28.
- [16] 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.
- [17] 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*, 2016, 94(2): 151–183.
- [18] Honda T, Kotsuki S, Lien G Y, et al. Assimilation of himawari-8 all-sky radiances every 10 minutes: Impact on precipitation and flood risk prediction[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(2): 965–976.
- [19] Qin Z, Zou X, Weng F. Impacts of assimilating all or GOES-like AHI infrared channels radiances on QPFs over eastern China[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2017, 69(1): 1345265.
- [20] Barker D, Huang Xiangyu, Liu Zhiqian, et al. The weather research and forecasting model’s community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(6): 831–843.
- [21] Ide K, Courtier P, Ghil M, et al. Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 1997, 75(1): 181–189.
- [22] Zhuge X, Zou X. Test of a modified infrared-only ABI cloud mask algorithm for AHI radiance observations[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(11): 2529–2546.

- [23] 张涛, 姜立鹏, 师春香, 等. AMSU-A全空辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42(5): 705–714.
Zhang Tao, Jiang Lipeng, Shi Chunxiang, et al. The impact of AMSU-A all-sky data assimilation on the forecast of super typhoon HATO[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(5): 705–714.
- [24] Roberts N M, Lean H W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(1): 78–97.
- [25] 王天驹, 齐琳琳, 朱江, 等. HY-2卫星高度计波高资料在集合最优插值同化中的应用研究——以台风“Lipee”为例[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 29–38.
Wang Tianju, Qi Linlin, Zhu Jiang, et al. Application studies of using HY-2 satellite altimeter wave data in ensemble optimal interpolation method—“Lipee” for instance[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(2): 29–38.

The impact of assimilation of Himawari-8 clear-sky data from the new generation geostationary meteorological satellite on the forecast of super Typhoon Hato

Xu Dongmei^{1,3,4}, Shen Feifei^{1,2}, Li Hong², Liu Ruixia⁵, Wang Yi⁶, Shu Aiqing¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 3. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 4. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 5. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 6. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the Typhoon Hato in 2017, the Himawari-8 AHI infrared radiance data are assimilated under the clear-sky condition in WRFDA system to investigate its impact on the typhoon forecast. The structure, strength, as well as the track forecasts are also studied for the Typhoon Hato. The results show that the clear-sky assimilation of Himawari-8 infrared radiance data provides obvious increment of cyclonic winds in the typhoon core and an obvious increase of typhoon in background field. Compared with the control experiment without assimilating Himawari-8 AHI infrared radiance data, the experiment that assimilates Himawari-8 AHI data strengthens the wind field of Typhoon Hato, 500 hPa pressure field analysis, and typhoon cyclonic circulation. In addition, the AHI radiance assimilation further improves the forecast of track, minimum sea level pressure, and the maximum wind speed of the Typhoon Hato. The average track error, the precipitation distribution, the root mean square error against the conventional data are also improved.

Key words: Himawari-8; WRF model; 3D Var; Typhoon Hato