

耿晓雯, 闵锦忠, 杨春, 等. 2020. FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验 [J]. 大气科学, 44(4): 679–694. GENG Xiaowen, MIN Jinzhong, YANG Chun, et al. 2020. Analysis of FY-4A AGRI Radiance Data Bias Characteristics and a Correction Experiment [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 679–694. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18254

FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验

耿晓雯 闵锦忠 杨春 王元兵 许冬梅

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, 南京 210044

摘 要 风云四号 A 星 (Fengyun-4A, 简称 FY-4A) 作为我国最新一代静止气象卫星, 各方面技术指标都体现了“高、精、尖”特色, 处于国际领先地位。其上搭载的多通道扫描成像辐射计 (Advanced Geosynchronous Radiation Imager, 简称 AGRI) 较上一代静止卫星风云二号的可见光红外自旋扫描辐射计观测精度更高、扫描时间更短, 充分体现 AGRI 观测资料将有效提高“一带一路”沿线国家和地区的天气预报和灾害预警水平。偏差订正是卫星资料处理的重要环节之一, 因此本文通过在 WRFDA v3.9.1 (Weather Research and Forecasting model's Data Assimilation v3.9.1) 搭建 AGRI 同化接口, 利用 RTTOV v11.3 辐射传输模式和 GFS 全球预报系统 (Global Forecast System) 分析场研究了 FY-4A AGRI 红外通道 8~14 晴空辐射率资料的偏差特征并进行偏差订正对比试验, 分析了卫星天顶角对 AGRI 资料偏差订正的影响, 为将来实现 AGRI 红外通道辐射率资料在中尺度模式中的同化应用奠定基础。结果表明: (1) 通道 8~10 及 14 为正偏差, 通道 11~13 为负偏差。水汽通道 9 和 10 偏差及其标准差相对较小, 偏差海陆差异不明显。通道 11~14 探测高度较低, 陆地上观测受地表发射率影响大, 质量控制时可剔除这些通道陆地上的观测。(2) 各通道偏差随卫星天顶角变化的拟合直线斜率都小于 0.035, 对比试验结果表明偏差与卫星天顶角的关系不明显, 预报因子中无需考虑卫星天顶角的作用。(3) 通道 8 及 11~14 的偏差随着目标亮温的变化比水汽通道 9~10 明显, 偏差有较强的目标亮温依赖特征。(4) 根据分析的偏差特征对 2018 年 5 月 13 日 18 时 (协调世界时, 下同) 至 15 日 18 时进行变分偏差订正试验, 系统性偏差得到了有效的订正。

关键词 风云四号 A 星 多通道扫描成像辐射计 偏差特征 偏差订正

文章编号 1006-9895(2020)04-0679-16

中图分类号 P405

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18254

Analysis of FY-4A AGRI Radiance Data Bias Characteristics and a Correction Experiment

GENG Xiaowen, MIN Jinzhong, YANG Chun, WANG Yuanbing, and XU Dongmei

Key Laboratory of Meteorological Disaster of 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 and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2018-11-12; 网络预出版日期 2019-10-31

作者简介 耿晓雯, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事资料同化研究。E-mail: gengxw24@163.com

通讯作者 闵锦忠, E-mail: minjz@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1502103, 国家自然科学基金项目 41430427、41805016、41805071, 江苏省自然科学基金项目 BK20160954, 南京信息工程大学人才启动基金项目 2017r058, 江苏高校优势学科建设工程项目 PAPD

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502103), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41430427, 41805016, 41805071), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20160954), Talent Start Foundation of NUIST (Nanjing University of Information Science & Technology) (Grant 2017r058), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

Abstract As the latest generation of geostationary meteorological satellites in our country, a significant development has been made for Fengyun-4A (FY-4A). Compared with the previous generation (Fengyun-2), FY-4A has better observation accuracy and a shorter scanning time. Taking full advantage of the advanced geosynchronous radiation imager (AGRI) data, the level of weather and meteorological disasters forecasting in countries along the “The Belt and Road Initiatives” will be effectively improved. The interface for the FY-4A AGRI data assimilation is complemented in Weather Research and Forecasting Data Assimilation (WRFDA) v3.9.1 model before investigating the bias characteristics based on RTTOV v11.3 model and GFS analysis. Bias-correction experiments of FY-4A AGRI data in infrared Channels 8–14 were further conducted. The results show that: (1) Channels 8–10 and 14 have warm biases. There are cold biases in Channels 11–13. The biases and standard deviation of the water vapor Channels 9 and 10 are small. The characteristics of the biases show obvious differences between land and ocean in Channels 11–14. Land’s biases are more complex than the ocean’s. For these channels, observations on land can be eliminated in quality control. (2) The slope of the linear regression equation between bias and satellite zenith angle is less than 0.035. There is no obvious dependence of biases on the satellite zenith angle. (3) The bias in Channels 8 and 11–14 show more obvious dependence on the scene temperature than those in Channels 9 and 10. (4) The variational bias correction tested during 1800 UTC on May 13–15, 2018 shows that the systematic bias was effectively corrected.

Keywords FY-4A satellite, Advanced Geosynchronous Radiation Imager, Bias characteristics, Bias correction

1 引言

卫星资料作为资料同化中经常引入的一种非常规观测资料,具有观测覆盖面积广、时空分辨率高、不易受到自然或地理条件限制等优点。一些地理条件比较复杂区域(如海洋、高山等)的高分辨率大气运动信息都可以从气象卫星观测资料中获得。因此,卫星资料同化可以有效改善数值天气预报的结果(董佩明等, 2008; 杨春等, 2017; Yang et al., 2016, 2017; Wang et al., 2018)。然而在直接同化卫星资料中,由于辐射传输模式的不确定性(包括基础光谱数据以及输入数据温度、湿度廓线等的误差)和卫星观测数据误差(包括仪器灵敏度、定标、云等的影响及传感器响应特性的改变),卫星观测信息与背景场数据会存在一定的偏差,从而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偏差订正技术是同化的重要环节之一(薛纪善, 2009)。

早期, Eyre (1992) 的偏差订正方法选取 MSU (Microwave Sounding Unit) 通道 2~4 的观测亮温作为所有通道偏差的线性预报因子,结果显示较大的偏差依然存在。Harris and Kelly (2001) 指出偏差主要有扫描偏差和气团偏差两种,同时选用以下这几个量作为预报因子: 模式地表温度、水汽总量、模式初始场 1000~300 hPa 和 200~50 hPa 厚度,进行由气团变化造成的偏差订正,改进了 Eyre (1992) 的方法。以上文献都选择了静态偏差

订正方法,偏差订正系数在同化过程并不会发生变化。Dee (2004) 在前人的基础上提出了变分偏差订正方法。这个方法选择若干个预报因子(Harris and Kelly, 2001) 的线性组合来表示各通道的偏差,然后预报因子的订正系数在变分分析过程中与模式一同进行更新。Auligné et al. (2007) 讨论了静态偏差订正方法(static)、离线偏差订正方法(offline)和变分偏差订正方法(Variational Bias Correction, 简称 VarBC)之间的不同,试验结果表明 VarBC 方法相较于另外两种方法可以保持分析场结果的稳定性。Yang C et al. (2017) 和 Wang et al. (2018) 分别基于 GOES-13 和葵花 8 号静止气象卫星辐射率资料进行了变分偏差订正和同化试验,有效改进了数值预报效果。

静止气象卫星的高度高,视野广,可对同一地区连续观测,具有明显的优势。风云四号 A 星(Fengyun-4A, 简称 FY-4A) 作为我国最新一代静止气象科研试验星,各方面技术指标都体现了“高、精、尖”特色,处于国际领先地位,它充分考虑了大气、海洋以及环境等领域的需求,具有广阔的应用前景。FY-4A 于 2016 年 12 月 11 日 0 时 11 分(北京时,下同)发射升空,并于 2018 年初完成在轨测试,5 月 1 日正式投入业务运行。它位于 104.7°E 的赤道上空,采用三轴稳定姿态控制,与风云二号的自旋稳定方式相比可显著提高对地观测效率,极大提高对中小尺度和灾害性天气系统的监测能力。它配有多通道扫描成像辐射计(Advanced

Geosynchronous Radiation Imager, 简称 AGRI)、干涉式大气垂直探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, 简称 GIIRS)、闪电成像仪 (Lightning Mapping Imager, 简称 LMI) 和空间环境监测仪器 (Space Environment Package, 简称 SEP)。其中多通道扫描成像辐射计 AGRI 的性能较风云二号系列卫星的可见光红外自旋扫描辐射仪有了很大的发展, 它观测精度更高, 扫描时间更短, 实现其资料的同化将有利于改进我国数值天气预报业务水平, 促进我国气象卫星资料的充分利用。

然而目前我们对于其资料还不是很了解, 这将直接影响到未来在数值天气预报中的应用效果。因此本文模拟并分析了多通道扫描成像辐射计 AGRI 晴空资料的偏差特征, 并根据分析的偏差特征进行了初步的订正试验, 为将来实现 FY-4A AGRI 资料在中尺度模式中的同化应用奠定基础。

2 模式与数据

2.1 WRFDA 及 RTTOV 模式

WRFDA 为 WRF (Weather Research and Forecasting model) 模式的资料同化系统, 它可以同化许多种类的观测资料 (如地面观测、无线电探空、大气运动矢量等常规观测资料和雷达、卫星等非常规观测资料)。WRFDA 包含了三维变分 3D-Var (three dimensional variational)、四维变分 4D-Var (four dimensional variational)、集合—变分等同化技术。本文选择的是基于增量变分技术的 3D-Var 同化方法, 在分析控制变量时用共轭梯度法来极小化代价函数 $J(\mathbf{x})$, 估计大气状态, 方程如下所示:

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

式中, $\mathbf{x}$ 表示大气状态矢量, $\mathbf{x}_b$ 表示背景场中的状态矢量, $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 为观测算子, $\mathbf{y}$ 为观测矢量, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{R}$ 表示背景误差协方差和观测误差协方差矩阵。

WRFDA 中的变分偏差订正方法 (VarBC) 选择预报因子的线性组合来表示偏差, 方程如下所示:

$$\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{N_p} \beta_i p_i, \quad (2)$$

其中, $\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})$ 为偏差订正后的观测算子, $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 为辐射传输模式中的观测算子, $\mathbf{x}$ 为背景场状态矢量, $\boldsymbol{\beta}_0$ 为偏差的常数项, β_i 和 p_i 为第 i 个预报因子及其

系数, 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。

本文利用 RTTOV (Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder) 辐射传输模式来模拟 FY-4A AGRI 辐射率数据, 模拟时所用的光谱响应函数和系数文件由我国国家卫星气象中心 (National Satellite Meteorological Center, 简称 NSMC) 和美国威斯康星大学麦迪逊空间科学与工程中心 (the University of Wisconsin-Madison's Space Science and Engineering Center, 简称 SSEC) 联合提供。RTTOV 模式是 20 世纪 90 年代初欧洲中心 ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts) 开发的一套辐射传输模式 (Saunders et al., 1999; Matricardi et al., 2004), 最初只能模拟 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 垂直探测仪亮温, 发展至今已经可以模拟几十种气象卫星的红外及微波辐射率资料。在给定大气的温度和各种气体浓度等状态变量廓线后, 它可以快速模拟卫星的辐射率数据。

2.2 AGRI 辐射率资料

FY-4A AGRI 资料和其数据格式说明可从 NSMC 官网 (<http://satellite.nsmc.org.cn> [2019-01-12]) 下载。本文的研究对象为 AGRI 空间分辨率 4 km 的全圆盘 L1 级辐射率数据及 GEO 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。4 km 全圆盘数据共有 2748 条扫描线, 每条扫描线上有 2748 个扫描点。由于本文仅分析 AGRI 晴空观测数据, 因此利用 4 km 分辨率的全圆盘云检测产品 (Cloud Mask, 简称 CLM) 进行云检测。数据为 netcdf 格式, 分为有云 (cloud)、可能有云 (probably cloud)、晴空 (clear)、可能晴空 (probably clear) 等。同时, 可以利用 4 km 分辨率的全圆盘云类型产品 (Cloud Type, 简称 CLT) 进行云类型的识别。数据为 netcdf 格式, 分为晴空 (clear)、液态水云 (water)、过冷水云 (super cooled water)、混合云 (mixed)、不透明冰云 (ice)、卷云 (半透明冰云, cirrus) 和多层云 (上层为半透明, 下部为不透明云, overlap) 等类型。

AGRI 通道由风云二号卫星可见光红外自旋扫描辐射仪的 5 个增加到 14 个, 从可见光波段 (0.47 μm) 覆盖至长波红外波段 (13.5 μm), 星

上辐射定标精度为 0.5 K、灵敏度为 0.2 K。可见光及近红外通道的空间分辨率最高可达 0.5 km，中波红外通道最高可达 2 km，长波红外通道最高可达 4 km。AGRI 的观测模式分为常规模式、增强模式和应急模式三种。常规观测模式包括：(1) 逐小时一次的全圆盘观测，观测时间为整点至整点过 15 min，其中 00 时至 21 时每隔三小时加密观测两次，每日共 40 次全圆盘观测；(2) 其余时间为每 5 min 一次的中国区域观测，范围约为 (10°~55°N, 70°~140°E) (董瑶海, 2016; 张志清等, 2017; Yang J et al., 2017)。

表 1 为 AGRI 各通道的特征。通道 1~6 为可见光及近红外波段，观测的能量来源于太阳，主要探测白天地表或大气反射（或散射）太阳能量的信息。通道 7~8 为中波红外波段，由于中波红外通道既可以探测来自太阳的信息也可探测来自地表和云的信息，辐射能量变化幅度大，AGRI 通道 7~8 分为高温端和低温端的设置可以有效兼顾同时探测高温和低温目标的需要。通道 9~10、14 为红外吸收波段，这三个通道的大气透过率都很低，说明对大气的吸收很强。通道 9~10 为水汽吸收波段，对水汽的吸收很强，可以反映对流层中高层的水汽信息，通道 14 为二氧化碳吸收波段。通道 11~13 为红外窗区波段，大气透过率较高 (陆风等, 2017)。

由于辐射传输模式对可见光及近红外波段模拟

能力较差，故本文暂不考虑通道 1-7，选择 AGRI 通道 8~14 的辐射率资料为研究对象。图 1 为 AGRI 通道 8~14 的权重函数图，本文利用 RTTOV 辐射传输模式，选择美国标准大气廓线计算权重函数。从图 1 可以看出通道 8 (3.5~4 μm) 权重函数峰值高度较低；通道 9 (5.8~6.7 μm)、10 (6.9~7.3 μm) 这两个水汽吸收通道的权重函数峰值高度分别位于 396 hPa 及 521 hPa 左右，可用于探测对流层中高层的水汽信息；通道 11 (8.0~9.0 μm)、12 (10.3~11.3 μm)、13 (11.5~12.5 μm) 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；通道 14 (13.2~13.8 μm) 权重函数峰值高度位于 800 hPa 左右，主要反映对流层中低层及地表信息，是低层大气温度的探测通道 (Zou et al., 2016; 陆风等, 2017)。

2.3 搭建 FY4A AGRI 与 WRFDA 同化接口

由于 WRFDA 中没有 FY-4A AGRI 辐射率数据的读取模块，故在偏差订正试验前利用 WRFDA v3.9.1 搭建 FY-4A AGRI 同化接口，主要包括变量定义、数据读取等。从 AGRI 4 km 分辨率 hdf5 格式的 L1 级数据中读取各通道图像数据层、定标表、观测时间等信息，从 4 km 分辨率 hdf5 格式的定位数据中读取行列号、卫星及太阳天顶角、卫星及太阳方位角、太阳耀斑角等信息，行列号可根据公式转换成经纬度，从 AGRI L2 级云检测产品 CLM 中读取云检测信息，然后搭建 AGRI 与 WRFDA 同化

表 1 AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 各通道特征 (陆风等, 2017)

Table 1 Characteristics of AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) channels (Lu et al., 2017)

通道号	中心波长/μm	分辨率/km	主要探测目的
1	0.47	1.0	昼间云、沙尘、气溶胶
2	0.65	0.5	昼间云、沙尘、积雪
3	0.825	1.0	白天云、气溶胶、植被和海洋特性
4	1.375	2.0	卷云(冰晶粒子)
5	1.61	2.0	低云/雪识别和水云/冰云识别
6	2.25	2.0	卷云、气溶胶粒子大小观测; 夜晚可用于火点识别
7	3.75H	2.0	高温端, 用于火点高温及白天强的太阳反射监测
8	3.75L	4.0	低温/常温端, 低云和雾的监测
9	6.25	4.0	大气对流层高层的水汽
10	7.1	4.0	大气对流层中层的水汽
11	8.5	4.0	沙尘信息判别
12	10.7	4.0	大气窗区, 观测地球表面和云顶温度
13	12.0	4.0	窗区边缘, 弱吸收
14	13.5	4.0	CO ₂ 吸收带, 探测云、对流层中低层及地表信息

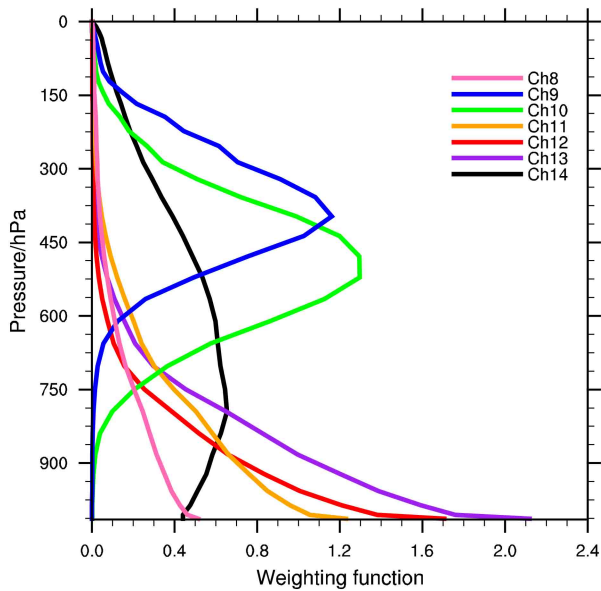


图1 FY-4A AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 通道 8~14 权重函数 (Ch8~Ch14 代表通道 8~14, 权重函数利用美国标准大气廓线基于 RTTOV 辐射传输模式计算得出)

Fig. 1 FY-4A AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) channels 8–14 weighting function, calculated using RTTOV model based on the U.S. standard atmospheric profiles (Ch8–Ch14 represent channels 8–14)

接口。

3 AGRI 偏差分析

3.1 云检测及亮温

图 2 为 2018 年 5 月 15 日 18 时 AGRI 的云检测产品 (图 2a)、云类型产品 (图 2b)、水汽通道 9 亮温 (图 2c) 及窗区通道 12 亮温 (图 2d)。AGRI 云检测的依据是云和晴空区域在辐射特征上存在明显差异, 产品处理采用阈值法, 联合利用 AGRI 的多个通道最终生成云检测产品。云类型产品是根据云的微物理结构和热力学性质, 利用不同相态的云在四个可见光通道的有效吸收光学厚度比上的不同生成 (<http://satellite.nsmc.org.cn> [2019-01-12])。

从图 2a 中可以看出, 晴空和有云的观测数目较多, 可能有云及可能晴空的观测相对较少, 且多分布在有云及晴空区域的交界处。通道 9 (图 2c) 的晴空观测亮温为 245 K 左右, 通道 12 (图 2d) 的晴空观测亮温约为 295 K。有云的区域 (图 2a) 对应通道 9 (图 2c) 及 12 (图 2d) 都是亮温较低值区, 通道 9 和 12 在冰云 Ice 区域 (图 2b) 的亮

温最低, 而多层云 Overlap 区域多分布在冰云 Ice 区域的周围, 对应通道 9 和 12 的亮温 (图 2b, c) 次之。同时, 液态水云 Water 和卷云 Cirrus 比不透明的冰云 Ice 及多层云 Overlap 更难从单一通道的亮温分布中识别出来 (图 2b, c, d)。由图 1 可知通道 9、12 的权重函数峰值高度递减, 对应的亮温分布则呈递增趋势。这是由于在红外波段到达卫星的辐射主要由地面辐射项和大气辐射项两部分组成, 且物体的辐射量与温度有关, 因此随着通道探测的高度越高, 整体亮温值越低; 有云覆盖的区域, 亮温值也越低。

3.2 各通道偏差海陆分布

选取 2018 年 5 月 7 日 00 时至 12 日 18 时每 6 h 一次的 GFS 全球预报系统 (Global Forecast System) $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分析场, 利用 RTTOV v11.3 辐射传输模式模拟 AGRI 通道 8~14 的晴空亮温, 并与观测亮温进行对比分析。由于需要了解各通道的偏差特征, 这里仅运用简单的质量控制: (1) 由于辐射传输模式对云区的模拟不确定性较大, 本文仅分析晴空区域的偏差, 保留晴空观测; (2) 静止卫星星下点两侧的观测像元都会存在不同程度的变形, 且卫星天顶角越大变形率越大, 超过 60° 时观测变形率是星下点的 3 倍, 故保留卫星天顶角小于 60° 的观测 (Da, 2015; Ren, 2016)。经过初步的质量控制后, 每个时刻各通道都约有 45 万至 75 万个观测点进入偏差统计分析。

表 2 为通道 8~14 观测与模拟亮温平均偏差及偏差标准差, 统计出的观测误差及标准差可用于后续变分偏差订正试验中质量控制的阈值设定。通道 8~10、14 为正偏差, 最大正偏差位于通道 10, 达到 1.18 K; 通道 11~13 为负偏差, 最大负偏差位于通道 12, 达到 -1.36 K。通道 8 的偏差标准差最大, 约为 4.18 K; 通道 11~13 的偏差标准差次之, 约为 2.7 K; 通道 9~10、14 的偏差标准差较小。

进一步分析偏差的海陆分布特征, 图 3 为通道 8~14 偏差均值的平面分布情况, 统计时基于 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格 (Zou et al., 2016) 计算平均求得。从图中可以看出通道 9、10 偏差的海陆分布差异较小, 大部分偏差位于 $-2 \sim 2$ K 之间, 以正偏差为主, 在喜马拉雅山脉附近出现 4 K 以上的极大值区。其余通道偏差的海陆分布差异较大, 通道 11~14 偏差海洋上的分布比较均匀, 通道 11~13 海洋上偏

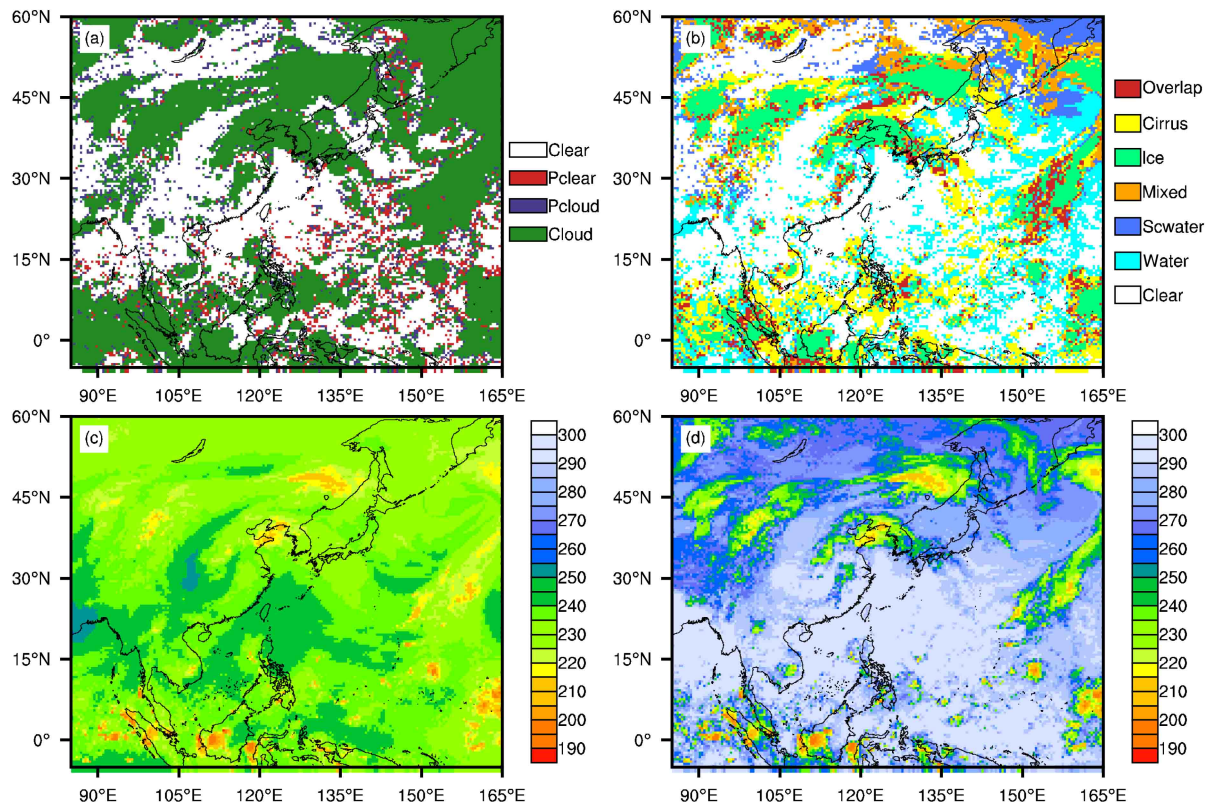


图2 2018年5月15日18时(协调世界时,下同)AGRI的(a)云检测(其中Clear为晴空,Pclear为可能晴空,Pcloud为可能有云,Cloud为有云观测)、(b)云类型(其中Clear为晴空,Water为液态水云,Scwater为过冷水云,Mixed为混合云,Ice为不透明冰云,Cirrus为卷云,Overlap为多层云)、(c)通道9和(d)通道12亮温(单位:K)的分布

Fig. 2 Distributions of AGRI (a) cloud detection (Clear, Pclear, Pcloud and Cloud represent clear, probably clear, probably cloudy, and cloudy observations, respectively), (b) cloud types (Scwater represents super cooled water type), (c) channel 9 and (d) channel 12 brightness temperature (units: K) at 1800 UTC on 15 May 2018

表2 通道8~14 2018年5月7日00时至12日18时观测与模拟亮温平均偏差及其标准差(单位:K)

Table 2 The bias and standard deviation between observed and stimulated brightness temperature in channels 8–14 averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC 12 May 2018 (units: K)

通道号	8	9	10	11	12	13	14
偏差/K	0.966	0.098	1.182	−1.163	−1.359	−1.195	0.215
偏差标准差/K	4.179	1.731	1.659	2.623	2.772	2.798	1.972

差位于 $-2\sim 0$ K之间,通道14位于 $0\sim 2$ K之间,陆地上偏差分布差异较大。同时,从图4可以看出,通道8~14陆地上的偏差标准差均大于海洋,其中通道8及11~14尤为明显。通道14陆地上的偏差标准差比海洋上大1.8 K左右,通道8陆地上的偏差标准差比海洋上增大约2.6 K,通道11~13则增大约3 K,说明通道8及11~14陆地上的偏差分布更加分散,模拟误差大的原因一方面是模式地表裸温与实际温度在特定地形下相差大,另一方面是特定地形的地表发射率与模式默认值有较大差异。

各通道晴空观测偏差的海陆分布特征可以用来完善AGRI资料偏差订正试验中的质量控制方案。

此外,从图4可以看出,通道8在陆地上的偏差标准差最大,海洋上的偏差标准差也明显大于其余几个通道,这说明通道8的偏差分布更分散。进一步分析2018年5月7~12日通道8偏差的时间序列分布(图5),该通道的平均偏差及标准差存在着非常明显的日变化特征,00时及06时的平均偏差及标准差明显大于12时及18时,其中06时最大。00时及06时对应本文研究区域的白天,而

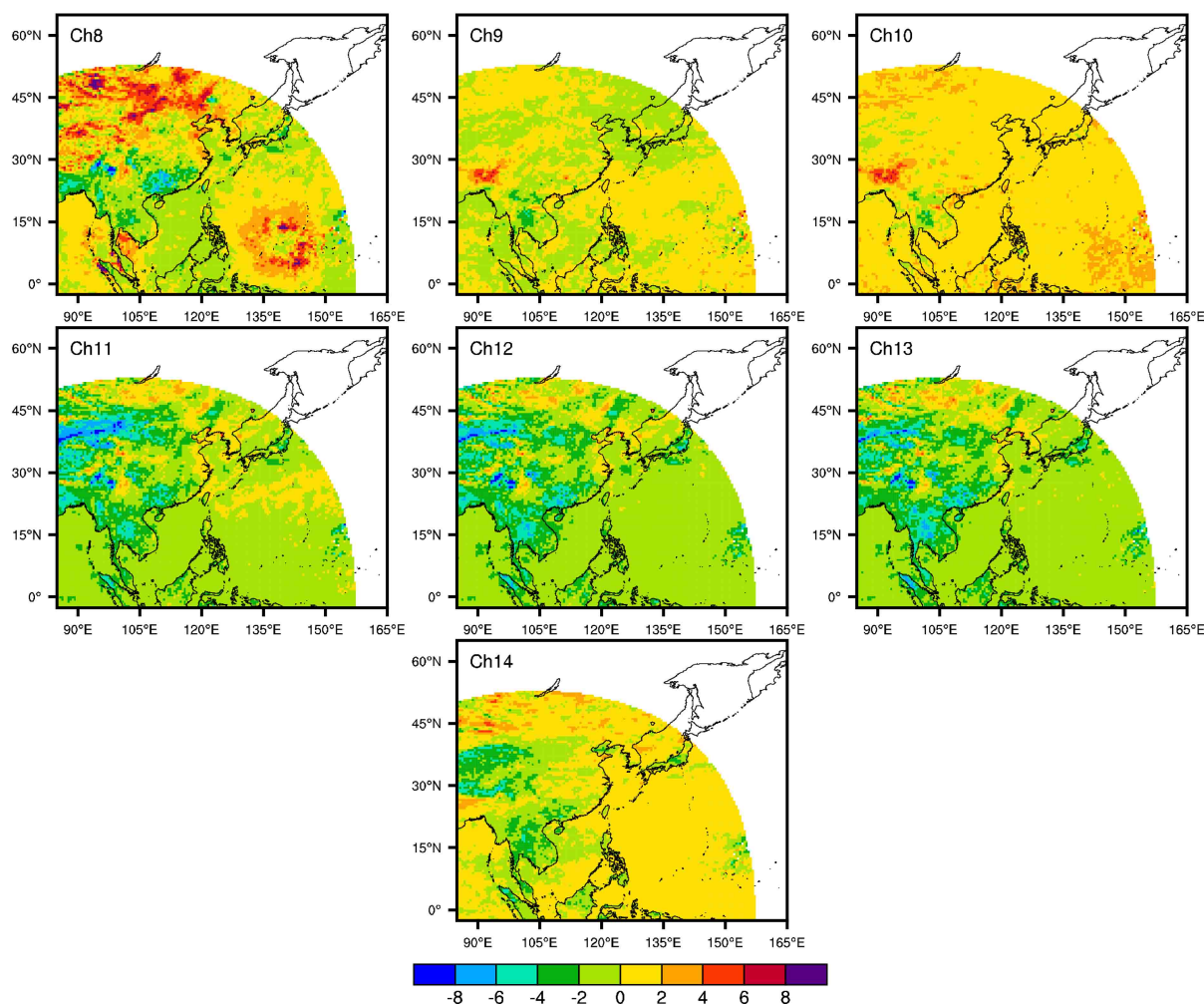


图3 2018年5月7日00时至12日18时通道8~14观测与模拟亮温偏差海陆分布 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格内平均, 色标表示偏差的大小)

Fig. 3 Sea and Land distribution of bias between observed and stimulated brightness temperature in channels 8–14 averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC on 12 May 2018 within $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ grid boxes (color labels represent bias)

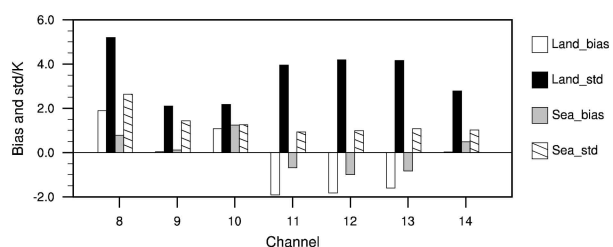


图4 2018年5月7日00时至12日18时通道8~14观测与模拟亮温偏差及其标准差海陆差异柱状图(单位: K, 其中 Land_bias 表示陆地上偏差, Land_std 表示陆地上偏差标准差, Sea_bias 表示海洋上偏差, Sea_std 表示海洋上偏差标准差)

Fig. 4 The bias and its standard deviation between observed and stimulated brightness temperature over land or sea in Channels 8–14 averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC on 12 May 2018 (units: K, Land_bias and Sea_bias represent bias over land and sea respectively, Land_std and Sea_std represent standard deviation over land and sea, respectively)

通道8位于中波红外波段, 白天观测易受散射或反射的太阳短波辐射的影响, 因此以5月7日通道8的偏差特征为例(其余几天特征类似)进行分析(图6)。从图6可以看出, 在本文研究区域的白天(00时及06时), 分别在西太平洋西部、孟加拉湾东部及亚洲大陆出现正偏差极值区, 海洋上的正偏差极值区对应太阳耀斑角较小的位置, 即耀斑区域, 耀斑区太阳辐射在中波红外通道有很强的反射, 造成了较大的正偏差。而在亚洲大陆地区出现的偏差正极值区是由于白天GFS分析场对于地表温度的模拟存在着较大的偏差(Zheng et al., 2012; Zhuo et al., 2016; Zou et al., 2016)。

3.3 偏差与卫星天顶角的关系

卫星观测数据通常还存在扫描偏差, 造成此类偏差的原因有仪器本身(偏振、安装矩阵等)和辐

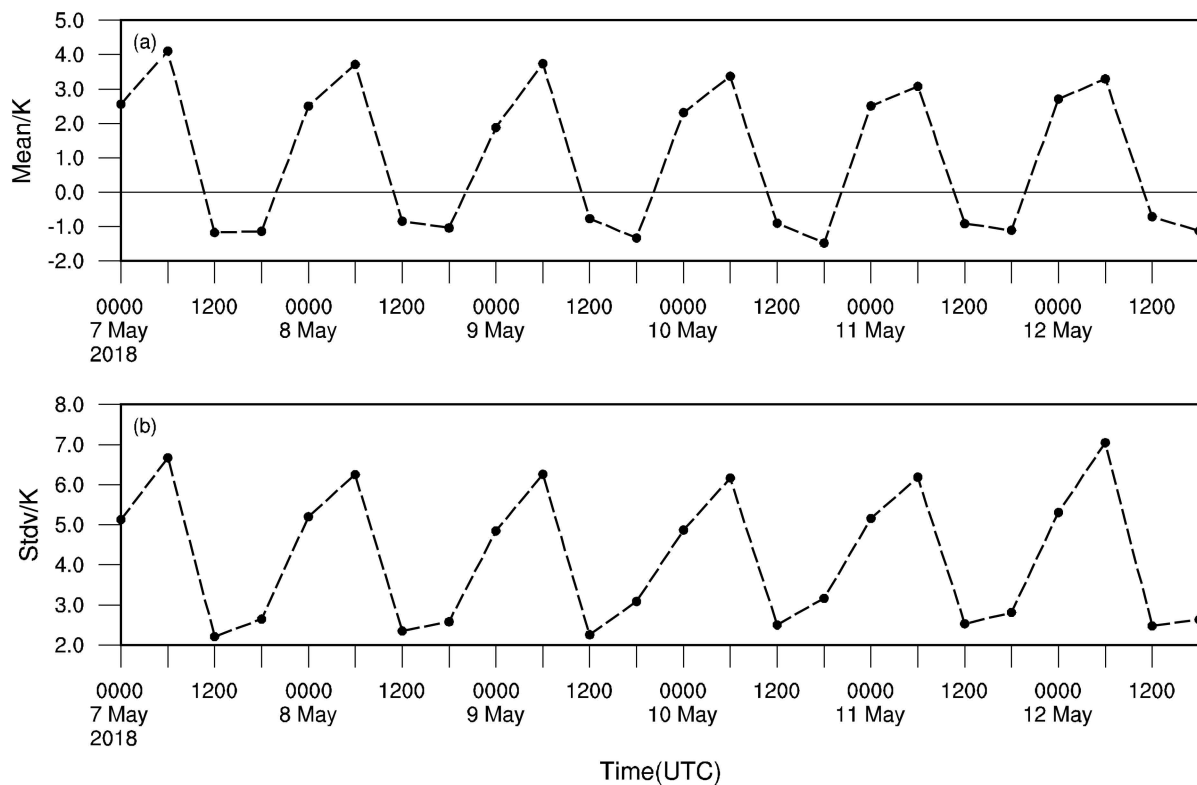


图5 2018年5月7~12日通道8观测与模拟亮温偏差均值 Mean 及其标准差 Stdv 时间序列 (单位: K)

Fig. 5 Time series of mean bias and its standard deviation between observed and simulated brightness temperature in channel 8 on 7–12 May 2018 (units: K)

射传输模式 (包括大气路径) 等因素, 因此进一步分析偏差与卫星天顶角之间的关系 (Da, 2015; Ren, 2016)。针对通道 8~14, 分别统计在卫星天顶角每间隔 2° 、偏差每间隔 0.5 K 范围内的平均观测数目, 基于这些观测进一步进行卫星天顶角和偏差值的回归线的拟合 (图 7)。从图 7 可以看出, 通道 8~14 的观测在偏差值为 0 K 的附近分布最多, 随着偏差绝对值的增大, 观测数目开始递减。拟合直线斜率均大于 0 , 其中通道 8 的斜率最大 (仅为 0.0351), 其余 6 个通道随卫星天顶角变化的拟合直线斜率都小于 0.023 。进一步分析通道 8~14 的偏差及其标准差随卫星天顶角的变化曲线 (图 8), 图 8a 的柱状图表示每 2° 天顶角内的观测总数, 天顶角为 10° 以下的观测个数相对其他角度较少, 观测主要集中在 $15^\circ\sim 60^\circ$ 之间。通道 9、10 偏差随卫星天顶角的变化不明显。通道 11~13 的偏差在天顶角位于 $30^\circ\sim 60^\circ$ 之间有波动。通道 14 的偏差在天顶角大于 48° 时有增大的趋势。再来看偏差标准差的变化 (图 8b), 通道 9、10 的偏差标准差最小, 且稳定在 0.8 K 左右; 通道 11~14 标准差的

波动介于通道 8 及 9、10 之间。各通道在卫星天顶角较大时, 偏差及其标准差都会出现一定的波动, 故下文在变分偏差订正试验中, 进一步探究卫星天顶角的变化对 AGRI 资料的偏差订正影响。

3.4 偏差与目标亮温的关系

几乎所有的红外探测器都采用一种星上内定标方式, 这种方式利用仪器中的黑体当作热源, 太空当作冷源 (Zou et al., 2016)。非线性问题是影响红外探测器定标精度的重要因子, 定标的非线性问题会导致通道对冷、暖目标探测有误差, 因此进一步讨论偏差随目标亮温的变化特征。由于模式对下垫面模拟存在不确定性, 如沙漠地区的午间实际地表裸温大于 320 K , 而模式的预报温度仅有 300 K 左右等, 因此首先剔除下垫面参数带来的误差, 仅对海洋上的观测进行分析 (图 9)。图 9 中的偏差、偏差标准差及观测个数在每间隔 3 K 范围内进行统计。图 9a 中通道 9、10 偏差与目标亮温的关系不明显, 通道 11~13 随着目标亮温的增加, 负偏差逐渐减小, 通道 8 及 14 有由负偏差变为正偏差的趋势。各通道的偏差标准差在亮温较低的地方波动

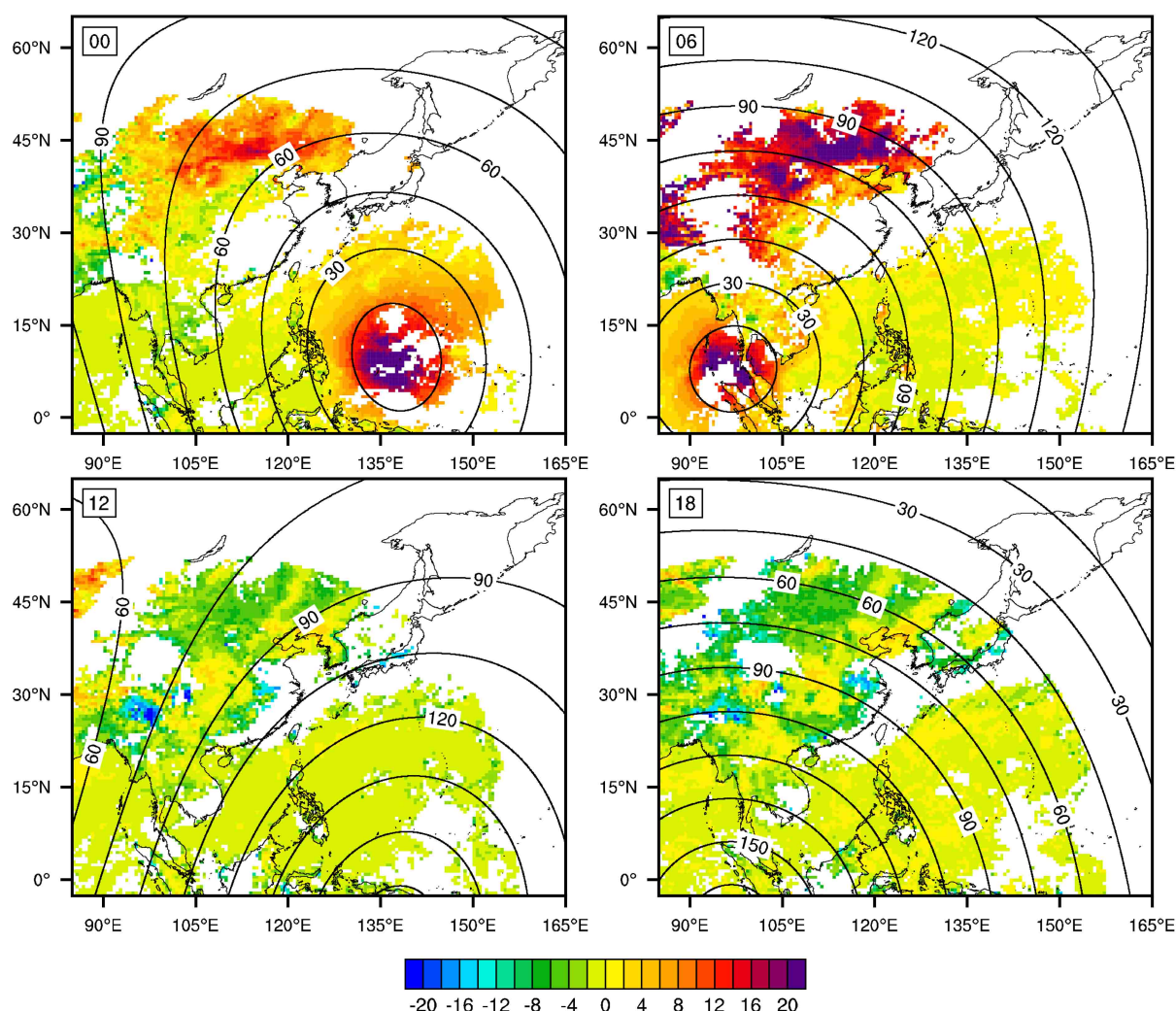


图6 2018年5月7日00、06、12、18时通道8质量控制后的观测与模拟亮温偏差(阴影,在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格内统计平均,单位:K)及太阳耀斑角分布[等值线,单位:($^{\circ}$)]

Fig. 6 Distribution of bias between observed and stimulated brightness temperature in Channel 8 within $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ grid boxes after quality control (shadings, units: K) and sun glint angles [contours, units: ($^{\circ}$)] at 0000, 0600, 1200, 1800 UTC 7 May 2018

都较大,而后随着目标亮温的增加,偏差标准差呈现逐渐减小的特征。通道8及11~14的偏差相对于通道9~10有较强的目标亮温依赖特征。

4 偏差订正试验及结果分析

4.1 质量控制方法

质量控制为卫星资料同化中十分重要的一步,偏差订正是针对质量控制后的卫星资料进行的,因此根据前文分析得出的观测及模拟偏差特征,制定变分偏差订正试验的质量控制方案如下:

(1) 剔除所有通道混合地表的观测(包括 mixed predominately sea 混合海洋、mixed predominately sea ice 混合海冰、mixed predominately land 混

合陆地、mixed predominately snow 混合雪地);

(2) 通道11~14陆地上的偏差较为复杂,受地表发射率影响大,剔除这些通道陆地上的观测;

(3) 保留卫星天顶角小于 60° 的观测;

(4) 保留晴空观测;

(5) 当云中液态水直径 CLWP (cloud liquid water path, 数据来源于背景场,通过 WRFDA 计算得到)较大时,由于散射的影响偏差会较大,因此剔除背景场中 CLWP 大于 0.2 kg m^{-2} 的观测;

(6) 剔除新息增量(观测亮温减模拟亮温)绝对值大于 15 K 的观测;

(7) 剔除新息增量(观测亮温减模拟亮温)绝对值大于 3 倍观测误差标准差的观测。

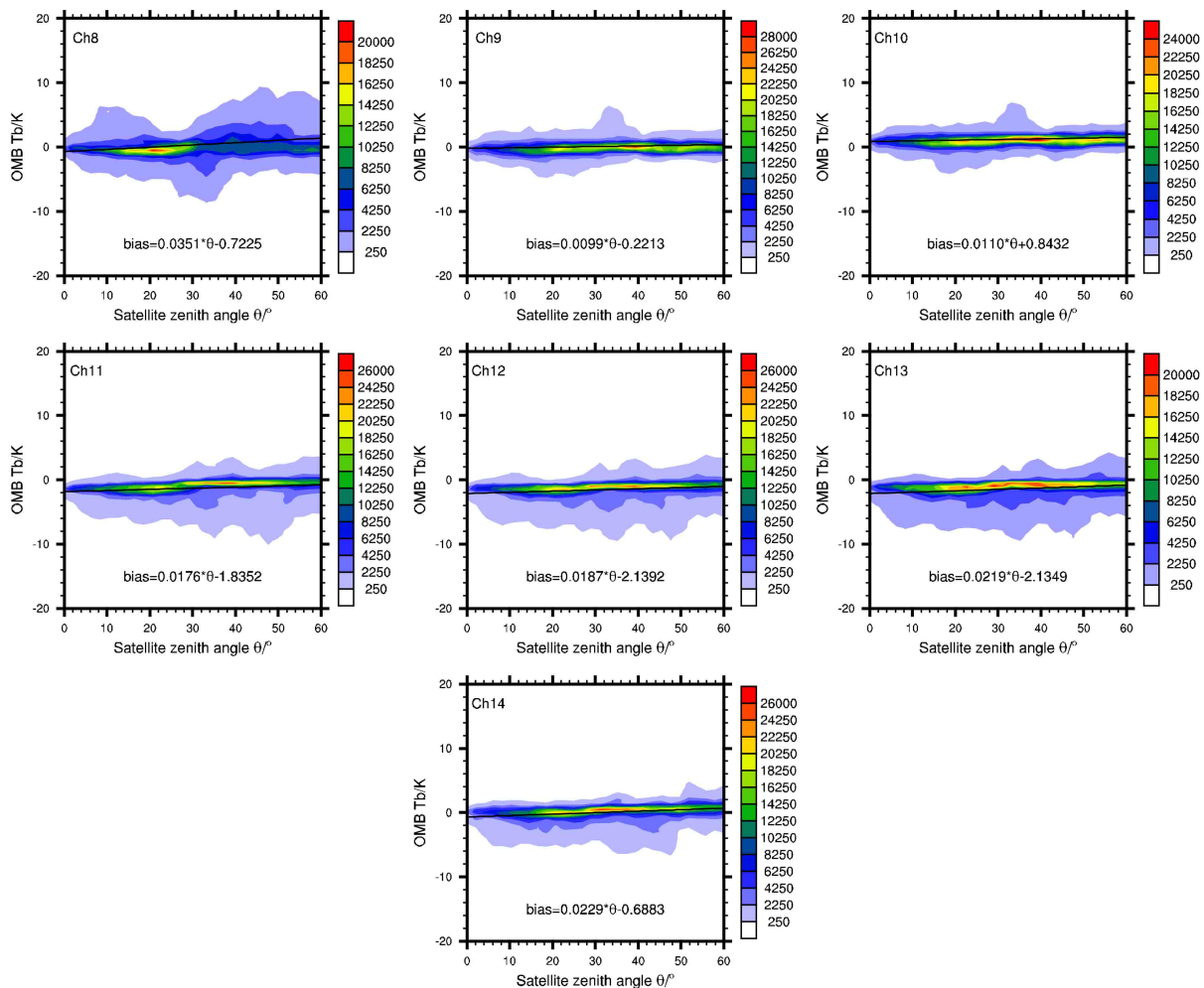


图7 2018年5月7日00时至12日18时通道8~14观测与模拟亮温偏差(OMB Tb, 单位: K)与卫星天顶角[Satellite zenith angle, 单位: (°)]的关系(阴影表示观测数目, 方程和实线表示线性回归的拟合直线)

Fig. 7 The dependence of the bias (OMB Tb, units:K) between observed and simulated brightness temperature in channels 8–14 on satellite zenith angle [units: (°)] averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC on 12 May 2018 (Observation counts are shaded, the equation and solid line show a linear regression line)

4.2 试验设置

由前文的偏差特征分析得出, 通道8白天易受到反射或散射的太阳短波辐射影响, 因此只对通道9~14质量控制后的资料进行偏差订正试验。

利用WRF及WRFDA v3.9.1, 选择GFS $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 预报场进行试验。模拟区域大致为 ($0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$, $90^\circ \sim 160^\circ\text{E}$), 格距为 30 km, AGRI 数据稀疏化也选择 30 km。同时, 由于静止卫星固定在赤道上空的观测方式, 为了避免研究区域大量资料的冗余, 仅选择同化时刻的观测资料进入 3D-Var 时间窗。选择的物理参数化方案如下: 微物理方案为 WSM6 (WRF Single-Moment 6-class scheme, Hong, 2006); 长波辐射方案为 RRTM (the Rapid

Radiative Transfer Model longwave radiation scheme, Mlawer et al., 1997); 短波辐射方案为 Dudhia (the Dudhia shortwave radiation scheme, Dudhia, 1989); 陆面过程方案为 Noah (Tewari et al., 2004); 行星边界层方案为 YSU (Yonsei University planetary boundary layer scheme, Hong et al., 2006); 积云参数化方案为 KF (the Kain Fritsch convective parameterization; Kain, 2004)。

根据前文得出的 AGRI 资料偏差特征制定变分偏差订正试验方案并统计初始偏差订正系数。由于不同的卫星天顶角对应的气团特征会发生变化, 因此探究卫星天顶角对于 AGRI 资料的偏差订正影响, 设计了一组对比试验 no_satzen 和 satzen。其中

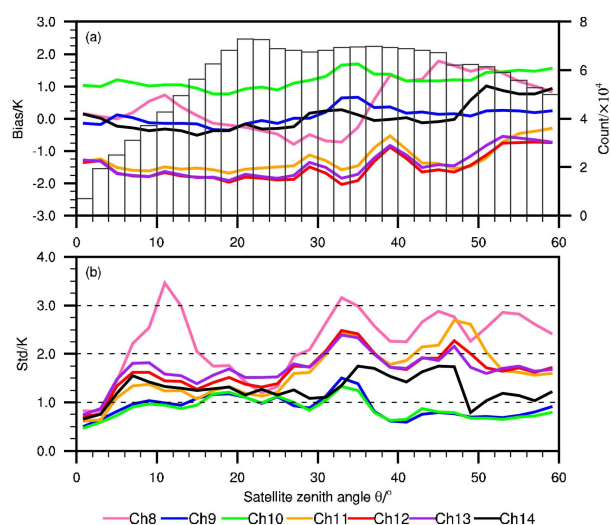


图8 2018年5月7日00时至12日18时通道8~14 (a) 观测与模拟亮温偏差 Bias 及其 (b) 标准差 Std (单位: K) 与卫星天顶角 [Satellite zenith angle, 单位: ($^{\circ}$)] 的关系。图 a 中柱状图为每 2° 天顶角内的观测总数 ($\times 10^4$)

Fig. 8 The dependence of (a) bias and (b) its standard deviation between observed and stimulated brightness temperature (units: K) in channels 8–14 on satellite zenith angle [units: ($^{\circ}$)] averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC on 12 May 2018. The bar chart in Fig. a represents observation data counts at 2° interval ($\times 10^4$)

no_satzen 试验为预报因子中不考虑卫星天顶角的影响, satzen 试验为预报因子中考虑卫星天顶角的影响 (表 3)。首先利用 VarBC 离线方法 (offline) 进行 2018 年 5 月 7 日 00 时至 12 日 18 时各通道初始偏差订正系数的统计, 每三小时进行一次 (共计 48 次)。然后从 2018 年 5 月 13 日 12 时 spin-up 6 小时至 18 时, 开始进行三小时同化一次的 VarBC 试验, 至 5 月 15 日 18 时结束。每个时刻的背景场来自前一个同化时刻的 3 小时预报场, 利用 GFS 预报场更新边界条件。

4.3 偏差订正结果分析

以通道 9 代表水汽通道, 通道 12 代表权重函数接近于地表的通道分析变分偏差订正试验的订正效果, 进行偏差订正试验结果分析的观测均经过了质量控制。图 10 表示 no_satzen 和 satzen 试验中通道 9、12 偏差订正前后观测与背景场偏差均值及标准差、观测与分析场偏差均值及标准差随时间的变化。从图中可以看出, no_satzen 和 satzen 的偏差订正试验结果仅有微小差别, 这说明卫星天顶角的变化对 AGRI 资料的系统性偏差影响不明显, 这与极轨卫星偏差随扫描位置变化较大的特征有很大的

不同。这可能与静止卫星的观测高度距地球太远, 到达各个扫描位置经过的光学路径与星下点位置的差异不大有关 (Ren, 2016)。未来在 AGRI 资料的变分偏差订正试验中可以不用考虑卫星天顶角的影响。

总体来说变分偏差订正试验效果较好, 由于辐射传输模式的不确定性 (包括基础光谱数据以及输入数据温度、湿度廓线等的误差) 和卫星观测数据误差 (包括仪器灵敏度、定标、云等的影响及传感器响应特性的改变) 造成的系统性偏差得到了有效的订正。通道 9 订正前的平均偏差均为正值 (图 10a), 且随时间都有增大的趋势, 偏差订正后, 观测与背景场之间的平均偏差 (除第一个同化时刻) 都更加接近于 0 K, 同化后各时刻分析场的平均偏差都基本为 0 K; 通道 9 偏差标准差 (图 10b) 随时间亦有增大的趋势, 偏差订正后大部分时刻都有所减小, 同化后分析场偏差标准差进一步减小至 0.9 K 左右。通道 12 订正前平均偏差均为负值且随着时间的变化趋势不明显 (图 10c), 大约为 -1.1 K, 订正后各时刻平均偏差更接近于 0 K, 同化后分析场的平均偏差在 0 K 附近有较小的波动; 通道 12 偏差标准差 (图 10d) 随时间有增大的趋势, 偏差订正后明显减小, 同化后分析场偏差标准差进一步减小至 0.7 K 左右。

下面以 no_satzen 试验的最后一个同化时刻 2018 年 5 月 15 日 18 时为例进一步分析变分偏差订正结果。图 11 为最后一个同化时刻通道 9、12 偏差订正前观测残差 (各点观测与模拟亮温差值) 水平分布, 该时刻通道 9、12 分别有 14973、11291 个观测点进入系统进行偏差订正试验分析。通道 9 质量控制后观测与模拟亮温以正偏差为主, 通道 12 则以负偏差为主; 通道 9 正偏差最大值达到 5K 以上, 通道 12 的负偏差最小达到 -6 K 以下。偏差订正前 (图 11), 通道 9、12 的偏差跨度较大, 且较为分散; 经过偏差订正后 (图 12), 偏差明显减小, 通道 9 正偏差极值从 6 K 减小至 4 K 左右, 通道 12 的负偏差极值也从 -6 K 减小至 -4.5 K 左右, 偏差相对集中在 0 K 附近。

最后分析通道 9、12 偏差订正前后观测与背景场、观测与分析场亮温差散点分布 (图 13)。通道 9 的亮温集中在 232~252 K 之间, 偏差订正前后背景场与观测场偏差均值从 1.849 K 减小至 -0.227 K, 偏差标准差从 2.353 K 减小至 2.349 K,

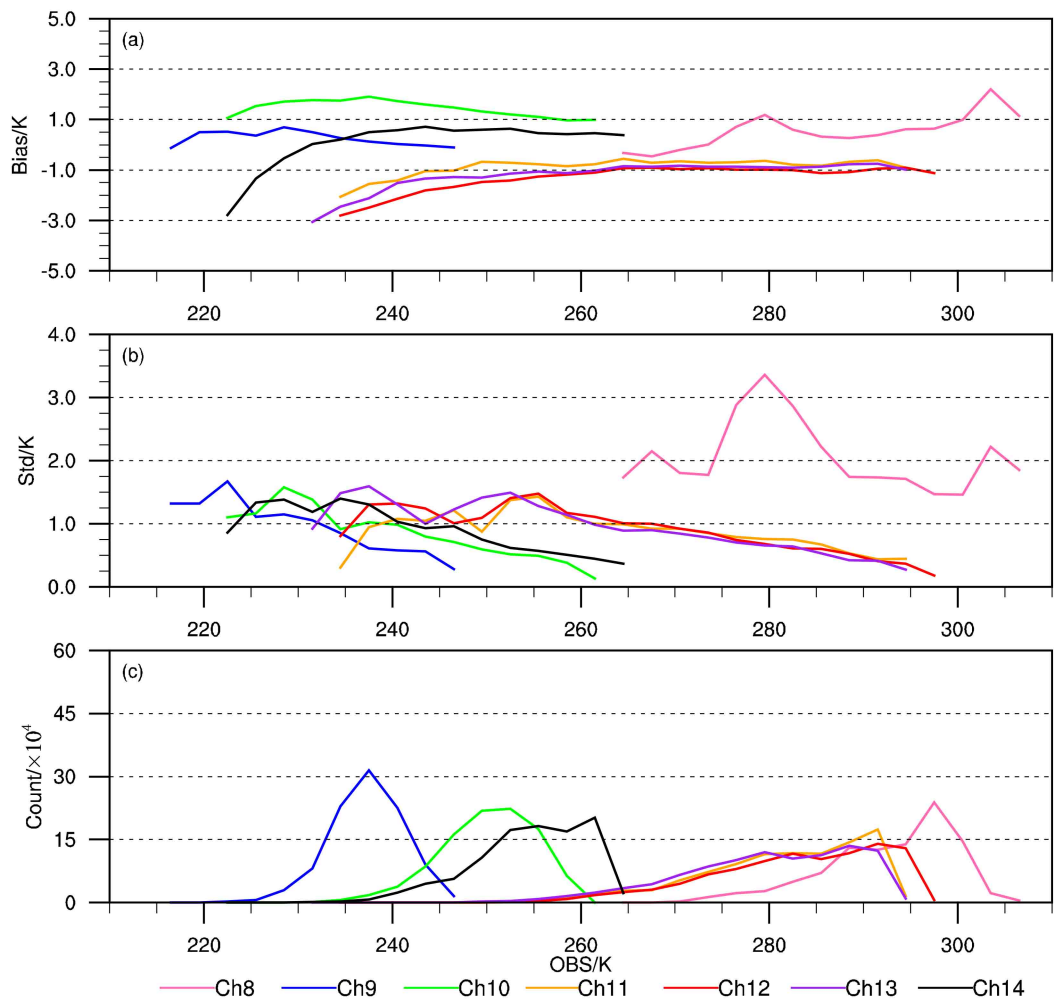


图9 2018年5月7日00时至12日18时通道8~14海洋上 (a) 观测与模拟亮温偏差 Bias、(b) 偏差标准差 Std、(c) 观测个数 Count ($\times 10^4$) 与目标亮温 (OBS, 单位: K) 的关系

Fig. 9 The dependence of (a) bias, (b) standard deviation between observed and stimulated brightness temperature, and (c) counts in channels 8–14 on the scene brightness temperature (units: K) over the ocean averaged from 0000 UTC 7 to 1800 UTC on 12 May 2018

表3 AGRI变分偏差订正试验方案

Table 3 The scheme of AGRI variational bias correction experiment

试验名称	预报因子					
	常数	1000~300 hPa大气厚度	200~50 hPa大气厚度	模式地表温度	模式初始场水汽总量	卫星天顶角的正弦值及其平方、立方
no_satzen	√	√	√	√	√	×
satzen	√	√	√	√	√	√

注: 表中√表示试验时选择该预报因子, ×表示不选择该预报因子

分析场与观测场之间的偏差均值较背景场更小, 仅为 0.007 K, 偏差标准差也减小为 1.051 K; 通道 12 的亮温集中在 280~300 K 之间, 偏差订正前偏差均值为-1.344 K, 订正后减小为-0.187 K, 同化后分析场继续减小为 0.031 K, 偏差标准差从偏差订正前的 1.389 K 减小至同化后的 0.809 K。由此可见, 经过偏差订正后, 观测及模拟亮温散点更加

均匀地集中在对角线附近。

5 总结与讨论

AGRI 作为我国最新一代静止气象卫星 FY-4A 搭载的仪器之一, 具有广阔的应用前景。本文通过在 WRFDA v3.9.1 搭建 AGRI 同化接口, 利用 RTTOV v11.3 辐射传输模式和 GFS 全球预报系统

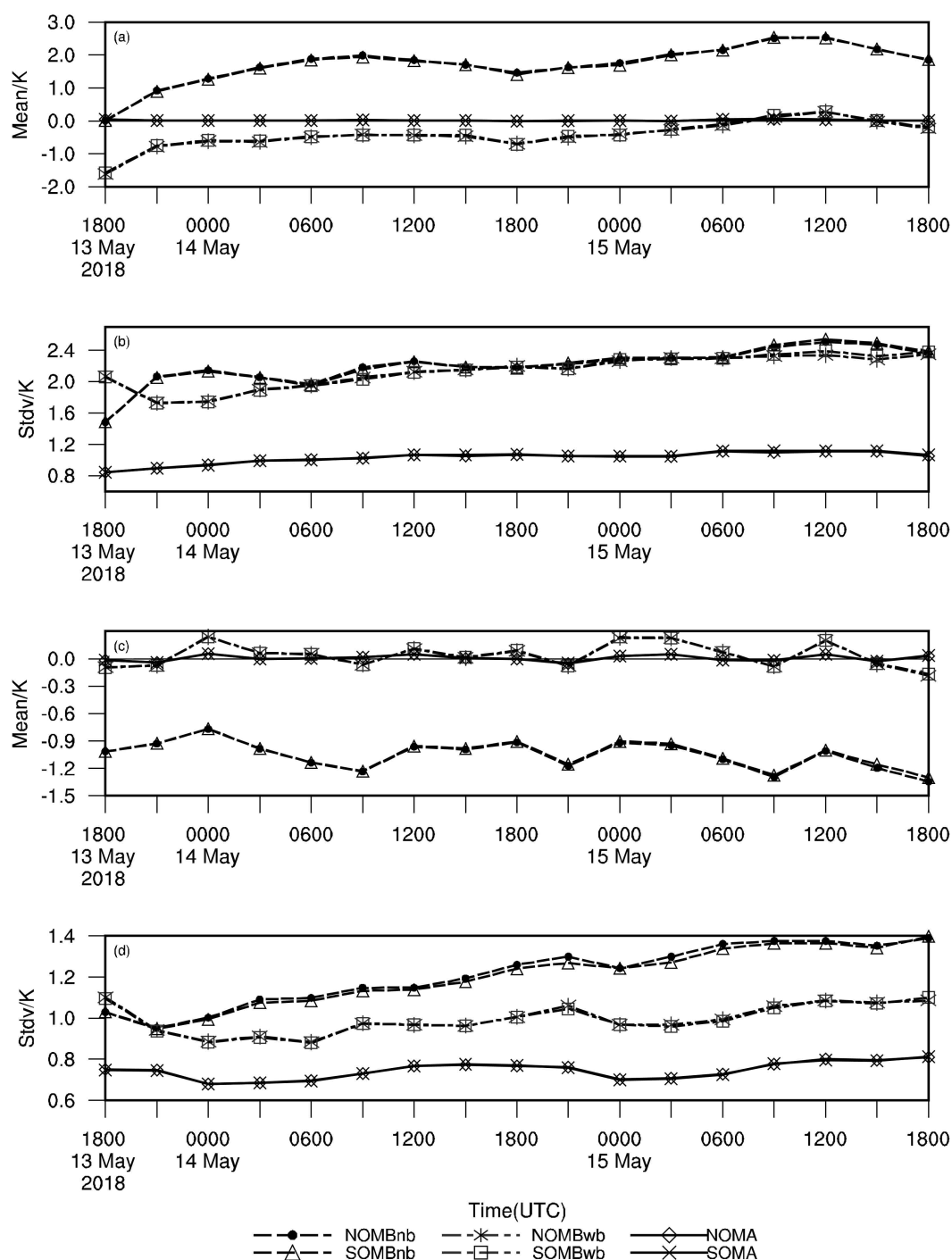


图 10 2018 年 5 月 13 日 18 时至 15 日 18 时 no_satzen 和 satzen 试验通道 (a, b) 9、(c, d) 12 偏差均值 Mean, 偏差标准差 Std 时间序列 (单位: K) (图中 NOMBnb (虚线) 表示 no_satzen 试验偏差订正前观测与背景场亮温偏差, NOMBwb (点虚线) 表示 no_satzen 试验偏差订正后观测与背景场亮温偏差, NOMA (实线) 表示 no_satzen 试验偏差订正后观测与分析场亮温偏差; SOMBnb (虚线) 表示 satzen 试验偏差订正前观测与背景场亮温偏差, SOMBwb (点虚线) 表示 satzen 试验偏差订正后观测与背景场亮温偏差, SOMA (实线) 表示 satzen 试验偏差订正后观测与分析场亮温偏差)

Fig. 10 The mean and stand deviation of bias in channels (a, b) 9 and (c, d) 12 before and after no_satzen and satzen experiments during 1800 UTC on 13–15 May, 2018 (units: K). NOMBnb (dashed line), NOMBwb (dash and dot line), NOMA (solid line) represent observed minus stimulated brightness temperature and minus analyzed brightness temperature before and after no_satzen experiment, respectively. SOMBnb (dashed line), SOMBwb (dash and dot line), SOMA (solid line) represent observed minus stimulated brightness temperature and observed minus analyzed brightness temperature before and after satzen experiments, respectively

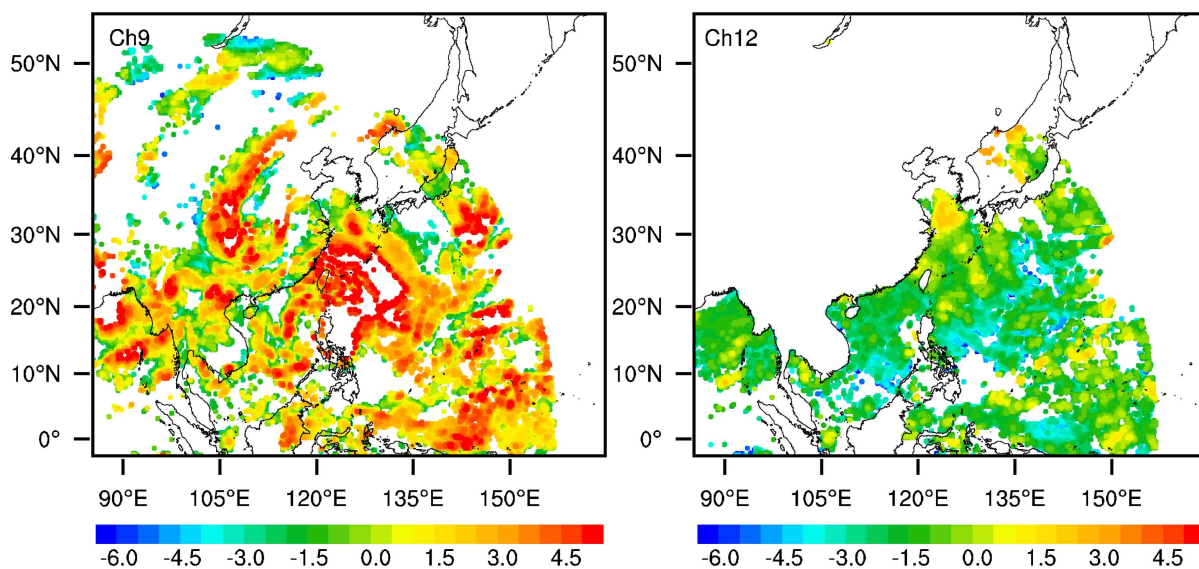


图 11 no_satzen 试验 2018 年 5 月 15 日 18 时偏差订正前通道 9、12 观测残差 (各点观测与模拟亮温差值) 水平分布

Fig. 11 Spatial distribution of the difference between observed and stimulated brightness temperature in channels 9 and 12 at 1800 UTC 15 May 2018 (before no_satzen experiment), where the colors represent the difference between observed and stimulated brightness temperature

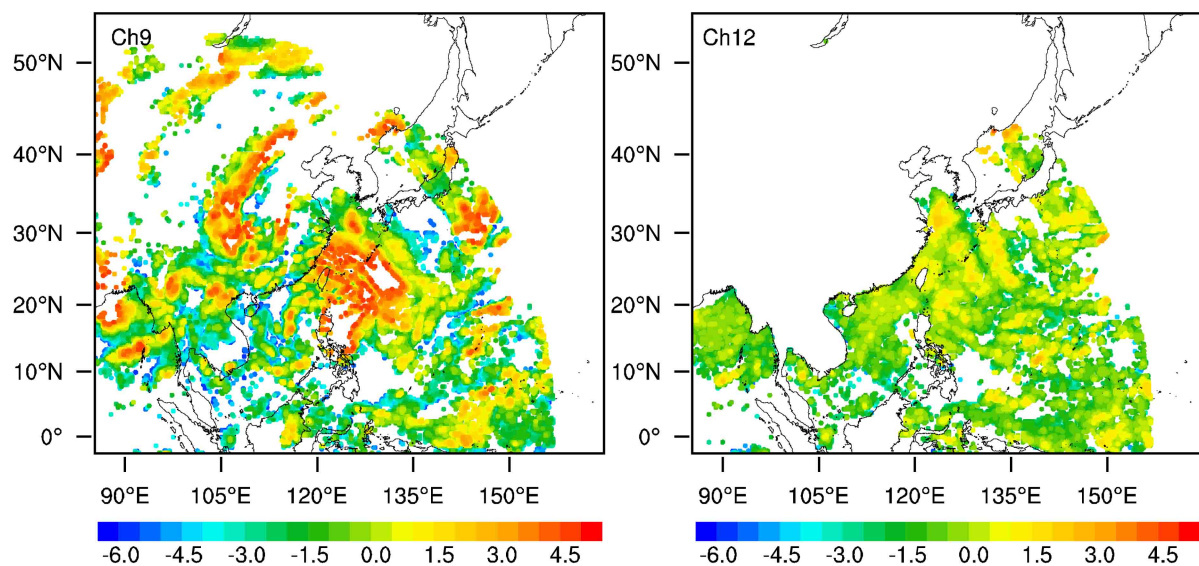


图 12 no_satzen 试验 2018 年 5 月 15 日 18 时偏差订正后通道 9、12 观测残差水平分布

Fig. 12 Spatial distribution of the difference between observed and stimulated brightness temperature in channels 9 and 12 at 1800 UTC 15 May 2018(after no_satzen experiment), where the colors represent the difference between observed and stimulated brightness temperature

分析场研究了 FY-4A AGRI 红外通道 8~14 晴空辐射率资料的偏差特征并进行偏差订正对比试验, 分析了卫星天顶角对 AGRI 资料偏差订正的影响, 为将来实现 AGRI 红外通道辐射率资料在中尺度模式中的同化应用奠定基础。得到结论如下:

(1) 通道 8~10 及 14 观测与模拟亮温为正偏差, 通道 11~13 为负偏差。通道 9 和 10 偏差及其标准差相对较小, 偏差海陆差异不明显。通道

11~14 偏差的海陆分布差异较大, 陆地上偏差复杂, 质量控制时可以剔除这些通道陆地上的观测。

(2) 各通道观测在偏差值为 0 K 附近的分布最多, 随着偏差绝对值的增大, 观测数目开始递减。偏差和卫星天顶角的拟合线斜率均大于 0, 其中通道 8 的斜率最大 (仅为 0.0351)。其余 6 个通道随卫星天顶角变化的拟合直线斜率都小于 0.023。对比 no_satzen 和 satzen 试验结果表明, AGRI 资料

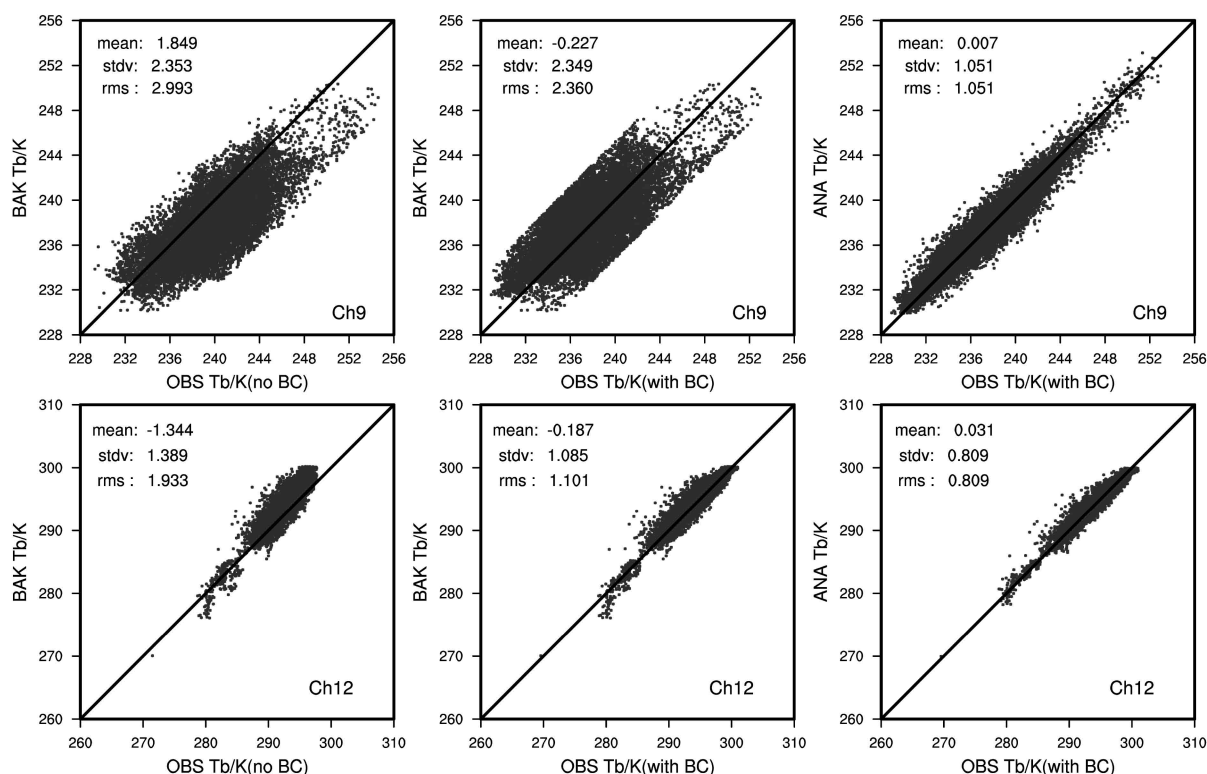


图 13 no_satzen 试验 2018 年 5 月 15 日 18 时通道 9、12 的观测与模拟亮温对比散点图 (图中 mean 代表平均偏差, stdv 代表偏差标准差, rms 代表均方根误差, OBS Tb 表示观测, BAK Tb 表示背景场模拟亮温, ANA Tb 表示分析场模拟亮温。单位: K。no BC 和 with BC 分别表示偏差订正前后)

Fig. 13 Scatter plots of the observed versus stimulated brightness temperature in channels 9 and 12 at 1800 UTC 15 May 2018 (Mean represents the mean value of bias. Stdv represents the standard deviation. Rms represents the root mean square error. OBS Tb, BAK Tb and ANA Tb represent the observed, stimulated, and analyzed brightness temperature, respectively (units: K). The no BC and with BC represent before and after the no_satzen experiment)

的偏差与卫星天顶角的关系不明显, 预报因子中无需考虑卫星天顶角的作用。通道 8 及 11~14 的偏差随着目标亮温的变化比水汽通道 9~10 明显, 它们的偏差有较强的目标亮温依赖特征。

(3) 根据分析的偏差特征进行变分偏差订正试验, 通道 9 偏差订正后观测与背景场之间的平均偏差更加接近于 0 K, 同化后各时刻分析场的平均偏差都基本为 0 K; 偏差标准差订正后大部分时刻都有所减小, 同化后分析场偏差标准差进一步减小至 0.9 K 左右。通道 12 偏差订正后各时刻平均偏差减小, 同化后分析场的平均偏差在 0 K 附近有较小的波动; 偏差标准差订正后明显减小, 同化后分析场偏差标准差进一步减小至 0.7 K 左右。总体来说偏差订正试验效果较好, 系统性偏差得到了有效的订正。

本文是对于 FY-4A AGRI 辐射率资料的初步研究, 对其资料的特征有了一定的了解。关于该资料

的质量控制及偏差订正方案还需未来更深入的研究, 该资料的同化效果以及对数值模式的初始场和数值预报的效果也是未来值得研究的问题。

参考文献 (References)

- Auligné T, McNally A P, Dee D P. 2007. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133(624): 631–642. doi:10.1002/qj.56
- Da C. 2015. Preliminary assessment of the Advanced Himawari Imager (AHI) measurement onboard Himawari-8 geostationary satellite [J]. *Remote Sensing Letters*, 6(8): 637–646. doi:10.1080/2150704X.2015.1066522
- Dee D P. 2004. Variational bias correction of satellite radiance data in the ECMWF system [C]. *Proceedings of the ECMWF Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP*, Reading, UK, 28 June to 1 July 2004, 97–112.
- 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 2008. 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*, 36(1): 1–7. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. 2008. Application status and development

- of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology(in Chinese)*, 36(1): 1–7. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.001
- 董瑶海. 2016. 风云四号气象卫星及其应用展望 [J]. *上海航天*, 33(2): 1–8. Dong Yaohai. 2016. FY-4 meteorological satellite and its application prospect [J]. *Aerospace Shanghai(in Chinese)*, 33(2): 1–8. doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2016.02.001
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46(20): 3077–3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2
- Eyre J R. 1992. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures [J]. *ECMWF*, 186: 81–109.
- Harris B A, Kelly G. 2001. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127(574): 1453–1468. doi:10.1002/qj.49712757418
- Hong S Y. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2): 129–151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006b. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(1): 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:tkcpau>2.0.co;2
- 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 2017. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景 [J]. *海洋气象学报*, 37(2): 1–12. Lu Feng, Zhang Xiaohu, Chen Boyang, et al. 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 37(2): 1–12. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.001
- Matricardi M, Chevallier F, Kelly G, et al. 2004. An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130(596): 153–173. doi:10.1256/qj.02.181
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 16663–16682. doi:10.1029/97jd00237
- Ren Lu. 2016. A case study of GOES-15 imager bias characterization with a numerical weather prediction model [J]. *Front. Earth Sci.*, 10(3): 409–418. doi:10.1007/s11707-016-0579-y
- Saunders R, Matricardi M, Brunel P. 1999. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125(556): 1407–1425. doi:10.1002/qj.1999.4971255615
- Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model [C]. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 11–15.
- Wang Y B, Liu Z Q, Yang S, et al. 2018. Added value of assimilating Himawari-8 AHI water vapor radiances on analyses and forecasts for “7.19” severe storm over North China [J]. *J. Geophys. Res.*, 123(7): 3374–3394. doi:10.1002/2017jd027697
- 薛纪善. 2009. 气象卫星资料同化的科学问题与前景 [J]. *气象学报*, 67(6): 903–911. Xue Jishan. 2009. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data [J]. *Acta Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 67(6): 903–911. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.06.001
- 杨春, 闵锦忠, 刘志权. 2017. AMSR2 辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究 [J]. *大气科学*, 41(2): 372–384. Yang Chun, Min Jinzhong, Liu Zhiqun. 2017. The impact of AMSR2 radiance data assimilation on the analysis and forecast of typhoon Son-Tinh [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 41(2): 372–384. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127
- Yang C, Liu Z Q, Bresch J, et al. 2016. AMSR2 all-sky radiance assimilation and its impact on the analysis and forecast of hurricane Sandy with a limited-area data assimilation system [J]. *Tellus A*, 68: 30917. doi:10.3402/tellusa.v68.30917
- Yang C, Liu Z Q, Gao F, et al. 2017. Impact of assimilating GOES-imager clear-sky radiance with a rapid refresh assimilation system for convection-permitting forecast over Mexico [J]. *J. Geophys. Res.*, 122(10): 5472–5490. doi:10.1002/2016jd026436
- Yang J, Zhang Z, Wei C, et al. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 (FY-4) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98(8): 1637–1658. doi:10.1175/BAMS-D-16-0065.1
- 张志清, 陆风, 方翔, 等. 2017. FY-4 卫星应用和发展 [J]. *上海航天*, 34(4): 8–19. Zhang Zhiqing, Lu Feng, Fang Xiang, et al. 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite [J]. *Aerospace Shanghai(in Chinese)*, 34(4): 8–19. doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.002
- Zheng W Z, Wei H L, Wang Z, et al. 2012. Improvement of daytime land surface skin temperature over arid regions in the NCEP GFS model and its impact on satellite data assimilation [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D06117. doi:10.1029/2011jd015901
- Zhuo H F, Liu Y M, Jin J M. 2016. Improvement of land surface temperature simulation over the Tibetan Plateau and the associated impact on circulation in East Asia [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17(2): 162–168. doi:10.1002/asl.638
- Zou X, Zhuge X, Weng F. 2016. Characterization of bias of advanced Himawari imager infrared observations from NWP background simulations using CRTM and RTTOV [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 33(12): 2553–2567. doi:10.1175/jtech-d-16-0105.1