doi:10.11676/qxxb2019.049

基于 ERA5 的快速辐射传输模式与 FY-4A 成像仪观测结果的偏差分析*

瞿建华[1]　张　烺[1]　陆其峰[2]　张迺强[1]　王　丁[1]

QU Jianhua[1]　ZHANG Lang[1]　LU Qifeng[2]　ZHANG Naiqiang[1]　WANG Ding[1]

1. 中国气象局北京华云星地通科技有限公司,北京,100081

2. 中国气象局国家卫星气象中心,北京,100081

1. *Huayun ShineTek*, *Beijing* 100081, *China*

2. *National Satellite Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081, *China*

2018-05-29 收稿,2019-04-12 改回.

瞿建华,张烺,陆其峰,张迺强,王丁. 2019. 基于 ERA5 的快速辐射传输模式与 FY-4A 成像仪观测结果的偏差分析. 气象学报, 77(5):911-922

Qu Jianhua, Zhang Lang, Lu Qifeng, Zhang Naiqiang, Wang Ding. 2019. Characterization of bias in FY-4A advanced geostationary radiation imager observations from ERA5 background simulations using RTTOV. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(5):911-922

Abstract The next-generation geostationary satellite FY-4A equipped with Advanced Geostationary Radiation Imager (AGRI) was launched on 11 December 2016. In this study, the biases of seven infrared channels (08－14 channel) of AGRI from model simulations are characterized by using the Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder (RTTOV). The Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) cloud mask is used for selecting clear-sky data. The significant systematic deviations at channel 10 (7.1 μm) are most possibly caused by the overestimation of water vapor in ERA5 (the fifth ECMWF reanalysis) data. The calibration error and higher air temperature of surface layer in ERA5 data are possible causes for deviations at channel 14 (13.5 μm). Since the brightness temperature of near-infrared channel (channel 08, 3.72 μm) is strongly affected by surface reflection, there is a large average bias on the land at channel 08. The bias of this channel over the ocean is less than 0.4 K. The average biases at all other infrared channels over the ocean and land are below 0.6 K and 1.3 K respectively. In addition, surface elevation and sensor zenith also have a certain degree of influence on the simulation and subsequently lead to corresponding bias characteristics. The seasonal variation of bias distribution over the ocean existing at channels 11 (8.5 μm), 12 (10.8 μm) and 13 (12.0 μm) probably comes from the seasonal error of sea surface temperature estimate in the reanalysis data.

Key words Radiative transfer model, Geostationary satellite, Radiation imager

摘　要　2016 年 12 月发射升空的 FY-4A 是中国第二代静止轨道气象卫星,该星上搭载了可提供东半球近实时高分辨率卫星观测数据的扫描辐射成像仪——AGRI(Advanced Geostationary Radiation Imager)。在其观测数据应用于大气参数反演或同化前,数据偏差的定量化分析是一个必要环节。采用快速辐射传输模式 RTTOV (Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder),基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第 5 个全球再分析数据产品(ERA5)对 AGRI 的 7 个红外通道(通道 08—14)进行了模拟,并利用 MODIS 云检测产品对模拟结果进行了晴空筛选,以期得到一些对 AGRI 的定量应用有价值的偏差分析结果。观测-模拟(O-B)的偏差分析结果显示:海洋和陆地上,通道 10(7.1 μm)存在明显大于其他红外通道的

* 资助课题:国家电网公司科技项目(5216A01600VX)。

作者简介:瞿建华,主要从事卫星遥感及应用研究。E-mail: Qujh@cma.gov.cn

通信作者:张烺,主要从事大气辐射传输、大气边界层气象学方面研究。E-mail: zhanglang@itpcas.ac.cn

系统性偏差,这很可能来源于 ERA5 在对流层中层对水汽的高估。通道 08 为近红外短波通道,地表反射作用影响强烈,陆地上存在较大的平均偏差,而海洋上平均偏差小于 0.4 K。通道 14 在 ERA5 近地层气温偏高及定标偏差的影响下,海洋存在接近 1 K 的平均偏差;陆地上存在 2 K 左右的平均偏差。其余各红外通道在海洋和陆地上的平均偏差分别在 0.6 和 1.3 K 以下。偏差影响因子分析结果显示:地表海拔高度、观测天顶角对偏差也存在一定程度的影响;海洋上偏差分布存在季节变化可能来源于再分析资料中海表温度估算的季节性误差。

关键词 辐射传输模式,静止轨道卫星,成像仪

中图法分类号 P405

1 引 言

搭载在中国第二代静止气象卫星(FY-4A)上的扫描辐射成像仪(Advanced Geostationary Radiation Imager,AGRI)(Yang, et al, 2017)与日本 Himawari-8 上搭载的成像仪 AHI(Advanced Himawari Imager)以及美国下一代静止气象卫星(GOES-R)上计划搭载的基线成像仪(ABI)类似(Schmit, et al, 2005, 2017),是目前世界上最先进的静止轨道成像仪,已于 2016 年 12 月 11 日发射升空(张鹏等,2016)。目前,AGRI 位于赤道 104.7°E 上空 35786 km 处,已在轨运行超过 12 个月,可实现每 15 min 生成一幅全圆盘影像,比上一代静止轨道成像仪具有更高的光谱、时间及空间分辨率。

静止轨道成像仪的观测数据对于天气预报、短时临近预报以及防灾、减灾、大气参数反演等方面具有重要作用。其可见光和近红外通道的观测数据可用于反演云、气溶胶、植被覆盖等参数,如云的有效粒子半径、气溶胶光学厚度等;红外和水汽通道可用于反演地表参数、海表温度及云导风产品等。这些反演产品常被用于分析和确定天气系统的演变过程及发生时间(Mecikalski, et al, 2006, Mecikalski, et al, 2015, Zou, et al, 2016)。此外,目前已有不少研究(Zou, et al, 2011, 2015, 2016)显示,同化静止轨道成像仪观测数据到预报系统中,可以给中、小尺度等快速变化天气系统的预报结果带来一定程度的改善(Ma, et al, 2017, Wang, et al, 2018a, 2018b)。因此,要在大气参数反演及数值天气预报中能更有效地利用静止轨道成像仪数据,就需要对数据的准确性进行检验。

在卫星观测数据应用于大气参数反演或同化前,数据偏差的定量化分析是一个必要环节。目前,FY-4A 卫星观测资料已逐渐投入业务运行,但还没有对其观测资料与背景场模拟值间的偏差特征进行分析的系统性报告。此外,由于对数值天气预报通常采用红外通道数据进行同化(Köpken, et al, 2004, Zou, et al, 2011, 2015, 2016),本研究利用快速辐射传输模式 RTTOV(Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder)基于欧洲中心的再分析资料 ERA5,对 AGRI 红外通道观测数据进行模拟,计算观测数据与模拟数据的偏差,并分析偏差分布特征、偏差主要来源以及影响因子等,为卫星资料更有效地应用于反演和同化提供基础条件。

2 AGRI 观测特性

搭载在 FY-4A 上的 AGRI,15 min 完成一次全圆盘观测,共 14 个通道,包括可见光、近红外、短波红外、中波红外及热红外通道(表 1)。对于所有红外通道,AGRI 观测分辨率均为 4 km,这有利于将多通道数据应用于同化以及基于通道差异的参数反演。

3 辐射传输模拟

RTTOV 模式最初是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)开发的用于模拟 TOVS(NOAA 的 TIROS 系列极轨卫星上搭载的垂直探测仪)的快速辐射传输模式,现在已经发展成为被普遍认可的可用于模拟多种气象卫星探测器接收到地球大气层顶的红外及微波辐射的辐射传输模式(Bormann, et al, 2011, Matricardi, 2008, 2010)。根据提供的大气垂直廓线数据(包括气温、水汽和大气成分等)、地表温度、湿度、风速、风向等信息,结合卫星观测角度、太阳天顶角、方位角等几何角度数据,利用 RTTOV 可模拟得到卫星观测数据。

针对 AGRI 的辐射传输模拟,具体输入参数及数据来源如表 2。文中采用 2017 年 8 月 ECMWF 的再分析数据ERA5作为辐射传输模拟所需大气

表 1 AGRI 通道特性、空间分辨率、仪器灵敏度以及应用范围

Table 1 AGRI channel characteristics of central wavelength, bandwidth and application

通道	中心波长(μm)	通道号	空间分辨率(km)	灵敏度	应用
可见光与近红外	0.45—0.49	01	1	$S/N\geqslant 90(\rho=100\%)$	气溶胶
	0.55—0.75	02	0.5—1	$S/N\geqslant 200(\rho=100\%)$	雾、云
	0.75—0.90	03	1	$S/N\geqslant 200(\rho=100\%)$	植被
短波红外	1.36—1.39	04	2	$S/N\geqslant 90(\rho=100\%)$	卷云
	1.58—1.64	05	2	$S/N\geqslant 200(\rho=100\%)$	云、雪
	2.1—2.35	06	2	$S/N\geqslant 200(\rho=100\%)$	卷云、气溶胶
中波红外	3.5—4.0(High)	07	2—4	$NE\Delta T\leqslant 0.7$ K(300 K)	火点
	3.5—4.0(Low)	08	4	$NE\Delta T\leqslant 0.2$ K(300 K)	地表
水汽	5.8—6.7	09	4	$NE\Delta T\leqslant 0.3$ K(260 K)	水汽和云导风
	6.9—7.3	10	4	$NE\Delta T\leqslant 0.3$ K(260 K)	水汽和云导风
长波红外	8.0—9.0	11	4	$NE\Delta T\leqslant 0.2$ K(300 K)	云导风
	10.3—11.3	12	4	$NE\Delta T\leqslant 0.2$ K(300 K)	海表温度
	11.5—12.5	13	4	$NE\Delta T\leqslant 0.2$ K(300 K)	海表温度
	13.2—13.8	14	4	$NE\Delta T\leqslant 0.5$ K(300 K)	云顶高度

表 2 用于晴空条件 RTTOV 辐射传输模拟的输入参数

Table 2 Input variables and parameters for clear-sky simulations with RTTOV

种类	变量	单位	数据源
大气参数	分层气压	hPa	ECMWF 再分析数据:ERA5(137 层,0.28125°×0.28125°)
	气温	K	
	水汽	10^{-6}	
	臭氧	10^{-6}	气候态值(101 层)
	二氧化碳	10^{-6}	单条廓线(101 层)
地表参数	地表类型		静态海陆掩码
	海拔高度	m	GTOP30[a]
	地表发射率		Borbas 等(2010)的数据集
	地表温度	K	ECMWF 再分析数据:ERA5 地表数据(0.28125°×0.28125°)
	海表温度	K	
	2 m 气温	K	
	2 m 露点温度	K	
	10 m 风速风向	m/s	

[a] http://webmap.ornl.gov/ogcdown/dataset.jsp?ds_id510003

温度和水汽廓线的输入数据。该数据水平分辨率为 0.28125°×0.28125°,时间分辨率为 1 h,顶层气压在 0.01 hPa 左右。地面气温、湿度、10 m 风速、风向等数据由 ERA5 数据中 0.28125°×0.28125°空间分辨率及 1 h 间隔的地面数据提供。由于再分析资料的时、空分辨率与 AGRI 观测数据的时、空分辨率不同,在辐射传输模拟前,将再分析资料插值到卫星观测的时间和空间网格上。空间插值是根据卫星观测数据的地理位置信息,选择距离最近 4 个点的再分析数据进行反距离加权插值;时间插值是以卫星观测时间为准,选择相邻两个时次的再分析数据进行线性插值。此外,臭氧浓度廓线根据经、纬度及季节选择相应气候态值,二氧化碳浓度廓线为一条固定的平均气候态数据(图 2a)。辐射传输模式使用的是 RTTOV 10.1 版本,其中系数文件版本为 RTTOV 7,即只反映了水汽、臭氧及混合气体的吸收。

由于目前有云条件下的辐射传输模拟精度还不够高,模拟结果还具有较大的不确定性,将主要针对晴空条件下的 AGRI 观测模拟数据进行讨论。为此,需选择有效的云检测方案或产品对模拟数据进行筛选。由于 FY-4A 在轨运行时间还不长,针对 AGRI 的云检测产品还未发布,因此,选择具有比较成熟的应用效果且结果较为可靠的 MODIS 云检测

产品对数据进行筛选。利用 MODIS 上午星(Terra)和下午星(Aqua)5 min 间隔 1 km 分辨率的云检测产品,对 AGRI 观测模拟数据进行筛选。由于 Terra 和 Aqua 为极轨卫星,其探测时间及区域与 AGRI 的观测时段及区域不完全重合,但文中侧重于定量化讨论模拟与观测的整体偏差特征,而利用 MODIS 较长时间范围内的云检测产品可筛选得到能基本覆盖 AGRI 观测区域的模拟观测数据,因此,利用 MODIS 云检测产品对观测模拟数据进行筛选可以实现对 AGRI 模拟与观测整体偏差特征的定量化分析。选择 2017 年 8 月的 AGRI 及 MODIS 云检测数据进行分析,首先确定 Aqua 和 Terra 探测区域在 AGRI 观测区域内的卫星过境时次,再将每 15 min 过境时段内的云检测数据匹配到 AGRI 观测时间上,最后选择有 Aqua 或 Terra 过境的 AGRI 观测时次数据进行数据筛选。为了最大化地过滤有云影响的模拟结果,将有云和可能有云的数据均剔除。最后,将该时段内筛选后的偏差数据取平均并进行拼接,得到卫星观测区域范围的偏差分布特征。图1显示了经过MODIS云检测数据筛选后,满足晴空条件,大小为 2°×2°且卫星观测天顶角小于 60°的像素点上,用于本研究的样本数分布情况。

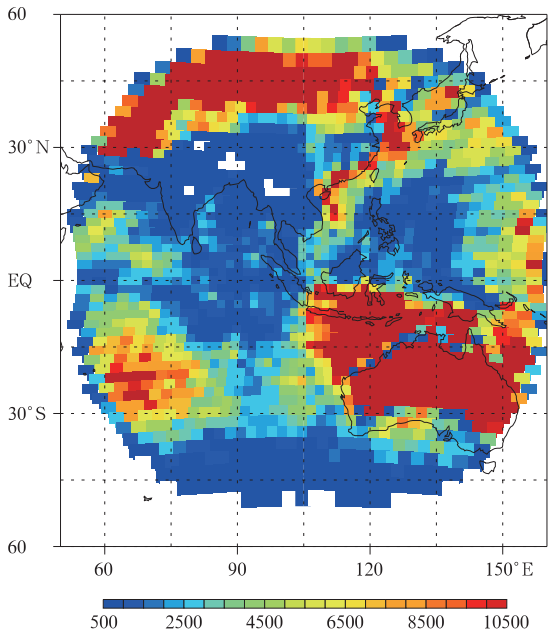


图 1 卫星观测天顶角小于 60°大小为 2°×2°的像素点上满足晴空条件的样本数分布

Fig. 1 Total data counts of clear-sky pixels within 2°×2° grid boxes in August observed at satellite zenith smaller than 60°

4 结果分析

4.1 AGRI 红外通道在晴空条件下的垂直响应及光谱响应

利用图 2a 所示的晴空大气廓线作为输入,通过 RTTOV 计算得到垂直方向各大气变量的雅可比分布,进而可得到 AGRI 各通道与垂直方向大气相应状态量的响应关系。图 2b 为 AGRI 红外通道观测亮温对大气温度(图 $2b_1$)和水汽(图 $2b_2$)的雅可比垂直分布,根据图中各曲线峰值所在位置可判断出该通道获取的大气信息主要反映的是哪一层大气的状态变化。例如,通道 09 和 10 主要反映了以 400 及 500 hPa 为中心高度的大气层辐射信息,而通道 08、11、12 及 13 反映的则主要是地球表面及近地面大气辐射的信息(曾庆存,1974)。图 2c 为 AGRI 红外、近红外各通道的光谱响应函数。可以看出,通道 09 和 10 的波长范围位于一个较强的水汽吸收带内。结合图 2b 中各通道观测亮温对水汽的雅可比计算结果,可以认为通道 09 和 10 对对流层中上层大气(100—500 hPa)中的水汽变化反应敏感(Di, et al, 2016),因此,该通道观测数据可以为中小尺度天气系统的发生和演变提供更丰富的信息,进而提高短时临近天气预报的服务质量。

4.2 海洋上的观测模拟偏差分布特征

对于 AGRI 通道 08—14 在海洋上的偏差特征,文中将从偏差空间分布、偏差是否与卫星观测天顶角以及观测亮温存在一定的影响关系等方面进行分析。

图 3 为利用 RTTOV 模拟的 AGRI 通道 08—14 海洋上 4 km 分辨率的 O-B(观测-模拟)偏差分布。通道 08 为近红外通道,对地表状态反应敏感,从图中可以看出,赤道附近存在较多比较大的正偏差,这可能是由于 8 月卫星观测角度与太阳辐射入射角之间容易在赤道洋面附近形成镜面反射,而 RTTOV 模式未能准确模拟产生的镜面反射辐射,从而造成这些区域偏差较大。通道 09 除在南半球中纬度地区存在一些比较小的负偏差外,其他地区均为正偏差,但在印度洋西北部及太平洋热带地区的偏差比其他地区要更大一些。对对流层中层水汽

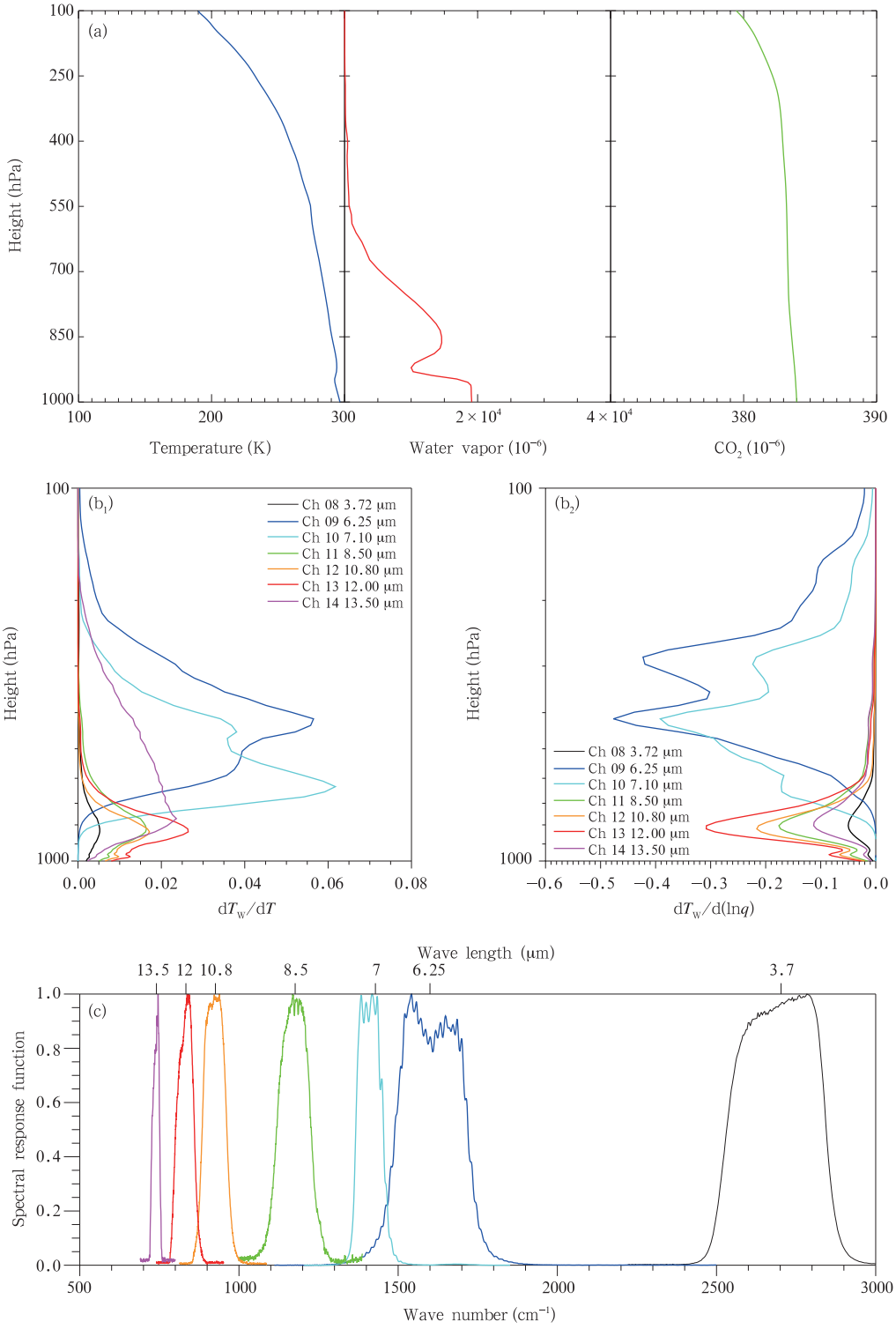


图 2 RTTOV 针对晴空大气廓线(a)计算得到的 AGRI 红外通道对于温度(b_1)及水汽(b_2)的雅可比垂直分布以及 AGRI 红外通道光谱响应函数(c)

Fig. 2 Vertical distributions of AGRI infrared channels Jacobians for temperature (b_1) and water vapor (b_2) by using RTTOV with a clear-sky profile (a) and spectral response functions of infrared channels for AGRI (c)

反应敏感的通道 10 的偏差分布显示出一个较大的系统性正偏差。值得注意的是,Zou 等(2016)利用 CRTM(Community Radiative Transfer Model)结合 ECMWF 的分析场数据对 AHI 进行了模拟,并对观测与模拟结果的偏差特征进行了分析,与 AGRI 通道 10 比较接近的 AHI 通道 09(中心波长 6.95 μm,带宽 0.402 μm)的结果也存在系统性正偏差。此外,基于 T639 数值预报数据,利用 RTTOV 对 2017 年 8 月 AGRI 的该通道数据进行模拟,结果显示(图略)海洋区域平均偏差为 −0.8 K,陆地平

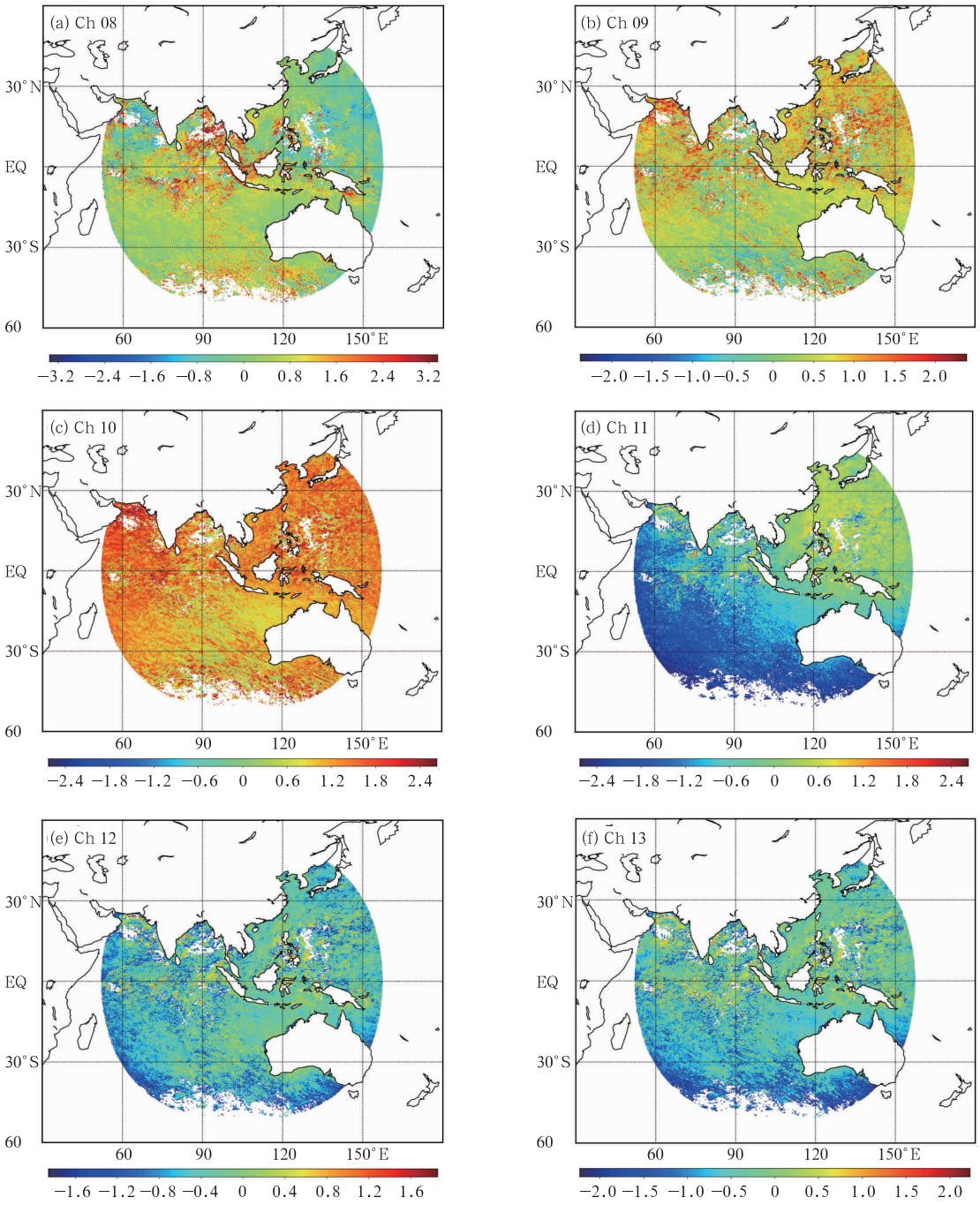
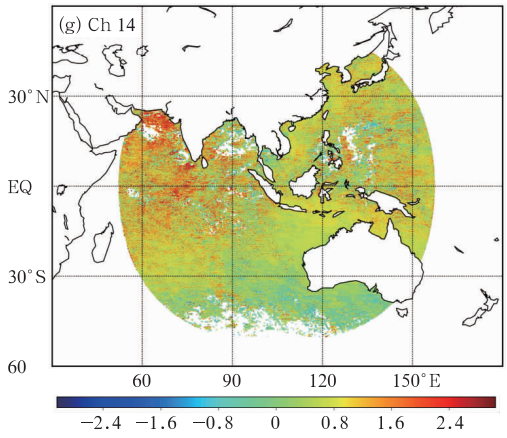


图 3 AGRI 红外通道在海洋区域观测数据与模拟数据的平均偏差(单位:K)

(a—g. 通道 08—14)

Fig. 3 Spatial distributions of O-B biases (unit: K) of AGRI channels 08 − 14 (a − g) over the ocean



续图 3

Fig. 3 Continued

均偏差为 −1.705 K,未表现出系统性正偏差特征。可以认为该通道观测与模拟的系统性偏差可能主要来源于 ERA5 数据对对流层中层水汽的高估。通道 11 的偏差分布显示,南半球大部分区域存在较大的负偏差,而北太平洋地区则整体呈现较小的正偏差。通道 12 和 13 在大部分区域的偏差是一个较小的值,但在南半球卫星观测天顶角较大的区域存在一些较大的负偏差。通道 14 除印度洋西北部区域存在一些较大的正偏差外,其余地区的偏差均较小,而整体分布表现为大部分区域为正的偏差。结合图 2 可以看出,对地表至 700 hPa 的大气状态通道 14 反应最为敏感,因此,再分析资料中近地层气温偏高可能是造成通道 14 模拟偏差的一个原因。

一个需要注意的问题是,对于通道 11、12 及 13,数值较大的负偏差主要分布在南半球,偏差分布与纬度存在一定的关系,尤其是对于通道 11 的偏差分布,这种现象更为明显。但同年 10 月相同通道的偏差分析结果显示的信息却与这种分布形式相反(图 4),说明这种偏差与纬度的关系又存在季节性变化。同时,4.3 节对陆地上 O-B 偏差特征的分析结果并未显示存在相似的现象。陆地地表发射辐射是通过查找地表发射率库同时结合地表温度计算得到的;而对于海洋,海表发射辐射是根据海表温度、海面风速、风向计算得到,地(海)表发射辐射计算方

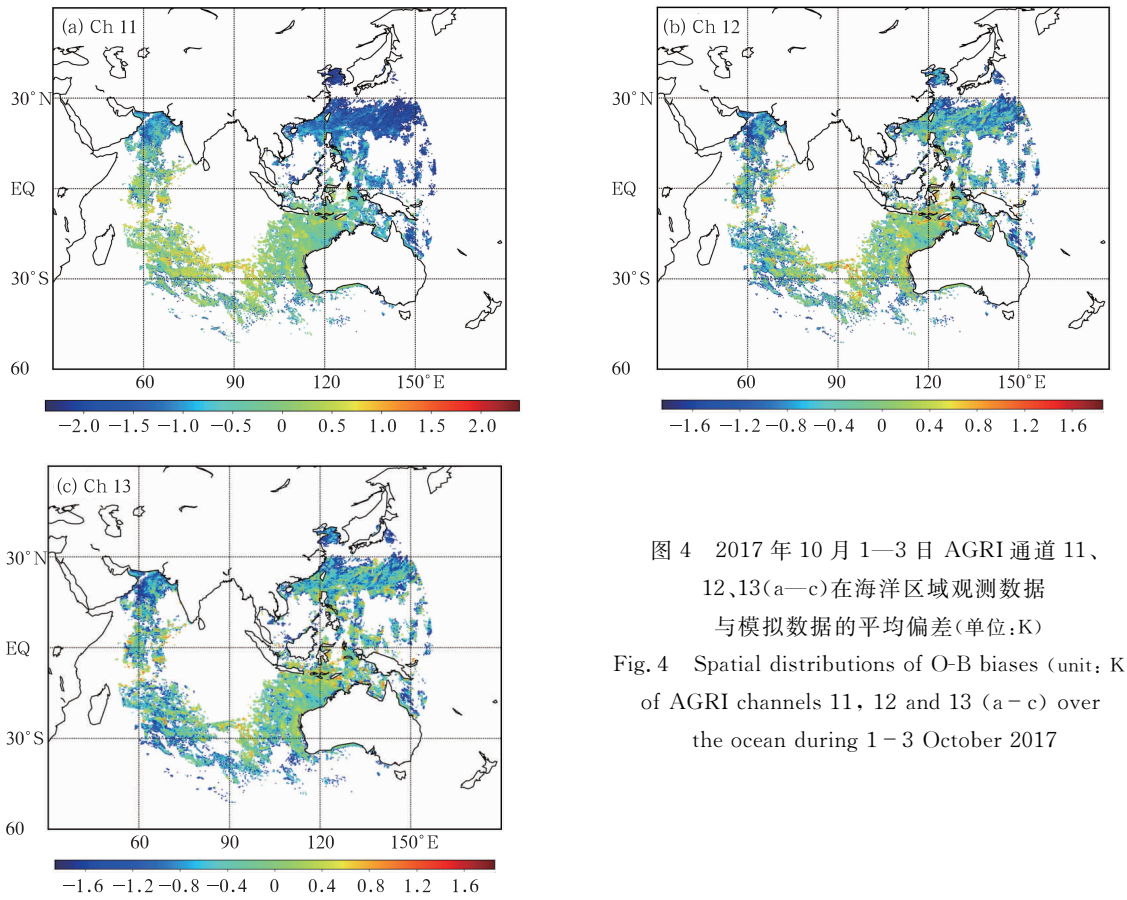


图 4 2017 年 10 月 1—3 日 AGRI 通道 11、12、13(a—c)在海洋区域观测数据与模拟数据的平均偏差(单位:K)

Fig. 4 Spatial distributions of O-B biases (unit: K) of AGRI channels 11, 12 and 13 (a − c) over the ocean during 1 − 3 October 2017

法的不同是辐射传输模式计算中,陆地与海洋的主要差别。此外,根据图 2b,通道 11、12 及 13 对地球表面辐射状态的敏感性要高于除通道 08 外的其他通道。因此,可以认为通道 11、12 及 13 的这种随纬度变化的偏差分布特征很可能是来源于海表发射辐射的计算误差,这可能是由于 ERA5 数据对海表温度在某些区域的高估造成,并且这种区域性高估存在一定的季节性差异。

图 5、6 分别为海洋上 AGRI 各红外通道 O-B 偏差及标准差随卫星观测亮温和卫星天顶角的变化。对于通道 10,当观测亮温在 252—270 K 时,偏差随观测亮温升高有减小的趋势,但在其他范围,偏差随观测亮温升高明显增大,同时,整体平均状态表现出 1 K 左右的系统性偏差。通道 08、09 虽然偏差随观测亮温变化存在波动,但整体趋势为观测随亮温升高而偏差增大。AGRI 是利用内置黑体作为热目标,冷空作为冷目标来进行辐射定标,这种定标方式是建立在仪器对入射辐射的线性响应假设基础上,而在实际观测时,仪器对入射辐射的响应则是非线性的。Zou 等(2016)及 Saunders 等(2013)认为这种仪器的非线性特性是造成偏差与观测亮温间依赖关系的主要原因,结合图 3 通道 11 的偏差分布,定标精度问题可能对通道呈南北分布的偏差特征有一定贡献。通道 14 也表现出明显的偏差随亮温升高而增大的趋势,该通道可能也存在定标偏差的问题,这可能是通道 14 偏差较大(图 3)的另一个原因。

从各红外通道偏差随卫星观测天顶角的变化(图 6)可见,通道 09、10 及 14 未表现出明显的偏差随卫星天顶角的变化趋势,而通道 08 的偏差随卫星天顶角增大有减小的趋势,通道 11、12、13 则表现为偏差随卫星天顶角增大而增大(负向),并且,通道 11 在卫星天顶角较大时,偏差表现出更大的离散性。由于通道 08 为近红外通道,观测数据容易受洋面对太阳反射辐射的影响,夏季(8 月)在卫星观测天顶角较小的区域,镜面反射辐射较之无镜面反射影响时大气层顶的出射辐射可能要大很多,因此呈现出通道 08 偏差随卫星天顶角增大而减小的现象。

从 AGRI 各红外通道空间平均的偏差及标准差(图 7)可见,通道 10、14 偏差较大,通道 08 和 09 为较小的正偏差,但通道 08 偏差的离散性较大。通道 11、12 及 13 表现为较小的负偏差,其中通道 11

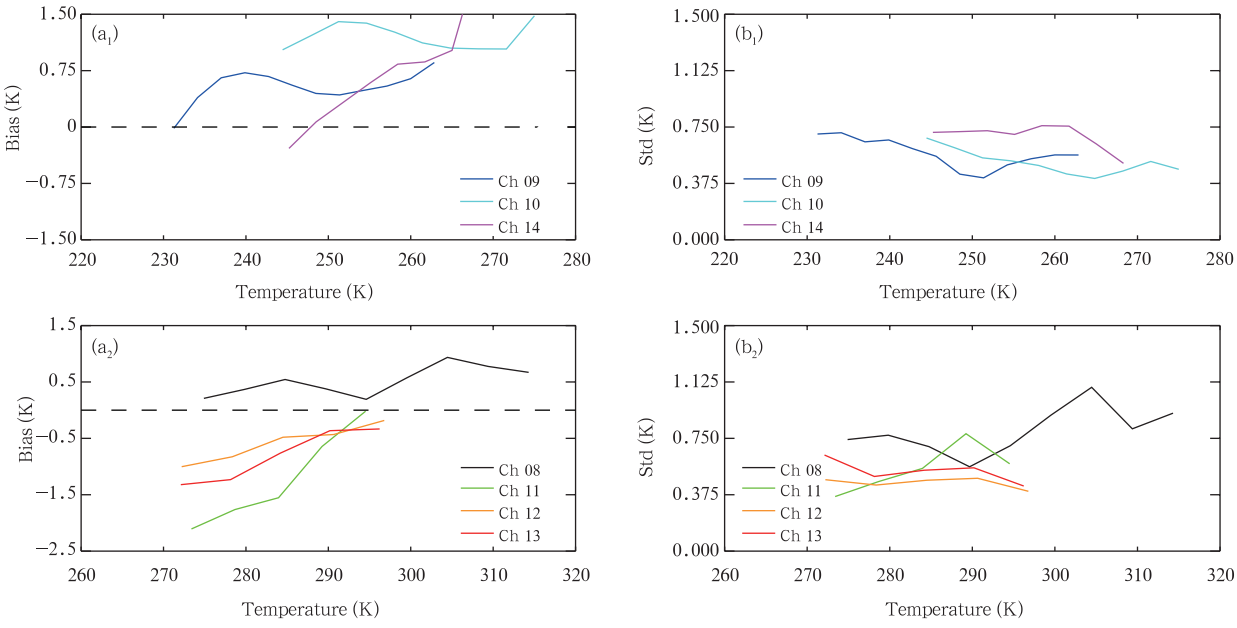


图 5 海洋上 AGRI 红外通道 O-B 偏差(a)及标准差(b)随观测亮温的变化

(a_1、b_1. Ch 09、10、14; a_2、b_2. Ch 08、11、12、13)

Fig. 5 Variations of biases (a) and standard deviations (b) of O-B with the scene brightness temperature over the ocean

(a_1, b_1. Ch 09, 10, 14; a_2, b_2. Ch 08, 11, 12, 13)

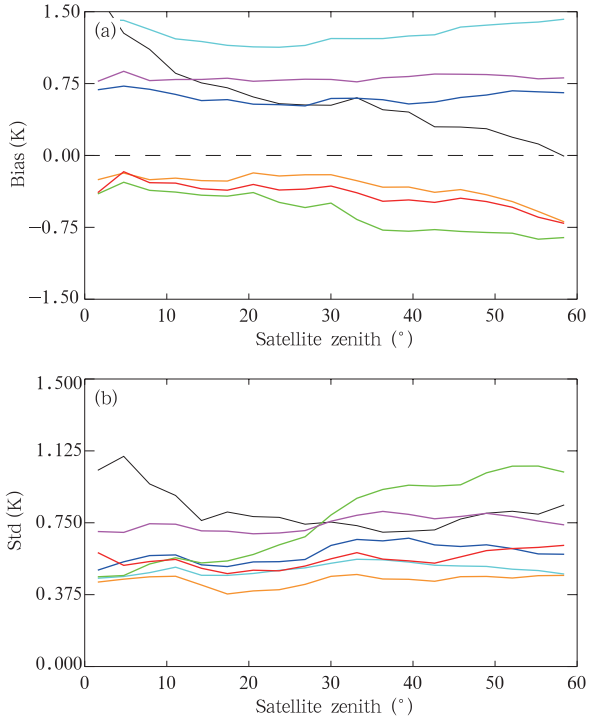


图 6 海洋上 AGRI 红外通道 O-B 偏差(a)及标准差(b)随卫星观测天顶角的变化
(图例同图 5)

Fig. 6 Variations of biases (a) and standard deviations (b) of O-B with the satellite zenith over the ocean
(the color convention for different channels is the same as in Fig. 5)

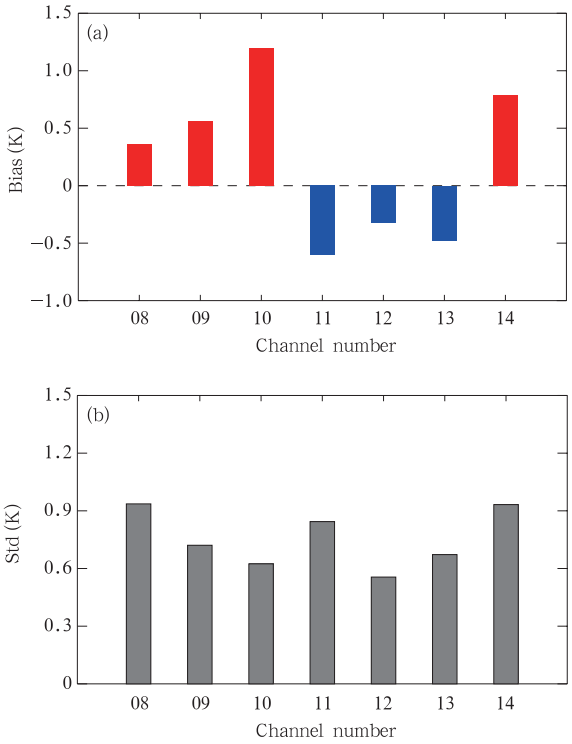


图 7 AGRI 在海洋观测区域各红外通道卫星观测天顶角小于 60°的 O-B 偏差(a)及标准差(b)

Fig. 7 Biases (a) and standard deviations (b) for all data over the ocean with satellite zenith smaller than 60°

的偏差也具有较大的离散性。

4.3 陆地上的观测模拟偏差分布特征

对于陆地的模拟,地表发射率采用 Borbas 等(2010)制作的分辨率为 0.5°×0.5°月平均地表发射率库。从观测模拟的 O-B 偏差分布(图 8)可见。通道 08 为近红外短波通道,由于卫星观测容易受到地面反射的影响,偏差分布中青藏高原、亚洲北部及中、东部等地形较复杂的区域存在较大的偏差,说明该通道辐射传输模式在复杂地形下准确模拟亮温还存在较大难度,再分析数据在复杂地形下的精度问题尚需进一步评估。由于澳大利亚地形起伏较小,地形对观测和模拟的影响均较小,除通道 10 和 14 外,澳大利亚的偏差均较小。与海洋上的分析结果类似,由于通道 10 对对流层中层水汽反应敏感,而ERA5数据可能存在对对流层中层水汽的高估,进而导致该通道整体表现为存在较多正的偏差。对于通道 14,定标偏差以及模拟采用的再分析资料中近地层的气温高估均有可能造成该通道的这种偏差特征。对于通道 09,尽管澳大利亚的偏差较小,但在海拔超过 1 km 的大部分区域仍然存在较大的偏差。通道 11、12 及 13 除一些海拔较高的区域存在较大偏差外,其他区域偏差均较小。

AGRI 各红外通道在陆地上的偏差分布显示,地表海拔较高区域存在偏差普遍较大的现象,为分析陆地上的偏差与海拔高度是否存在一定的依赖关系,计算了地表海拔高度每 300 m 范围内的偏差平均值(图 9)。可以看出,地表海拔高度小于1 km 时,所有红外通道的观测模拟偏差与地表海拔高度均存在显著的依赖关系,表现为随地表海拔高度升高,偏差增大明显且均为正的偏差。地表海拔高于 1 km 时,通道 08 的偏差与地表海拔高度的依赖关系最显著。通道 11、12 及 13 在 1—4 km 偏差变化不明显,而在 4 km 以上偏差随地表海拔高度升高

而增大,但在到达 5 km 以后随地表海拔高度升高偏差有减小的趋势,且 3 个通道的偏差与地表海拔高度的依赖关系较为一致。通道 09 和 10,偏差与地表海拔高度的依赖关系比较接近,在地表海拔高于 1 km 而低于 3 km 时,偏差随地表海拔升高有微弱的增大趋势;地表海拔在 3 km 以上时,偏差随海拔升高而减小。通道 14 在地表海拔高于1 km 时,偏差与海拔高度的依赖关系变得不太明显。通常,地表海拔高度在 600—1000 m的区域多为地形快速变化区域,地表海拔高度在这个范围内的偏差随地

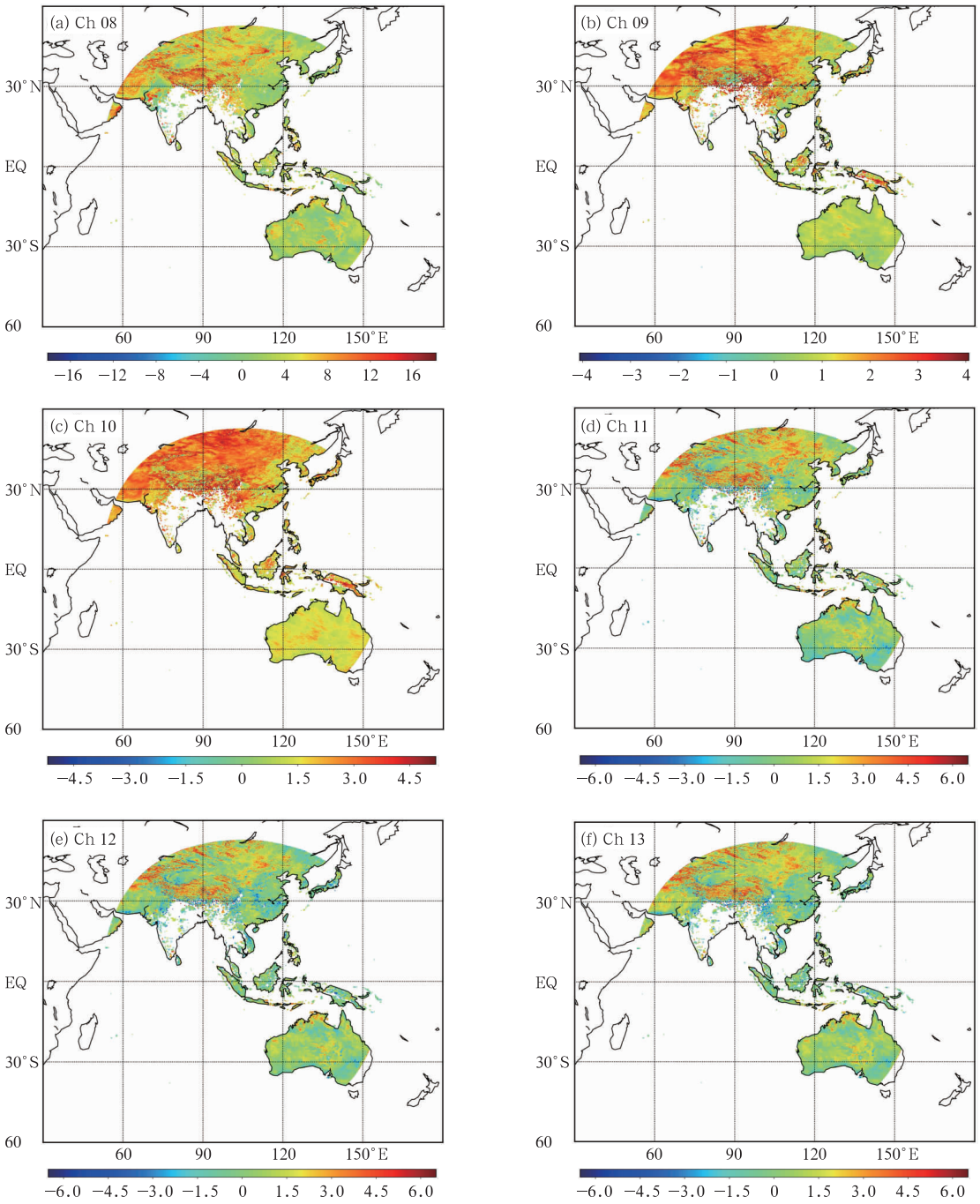
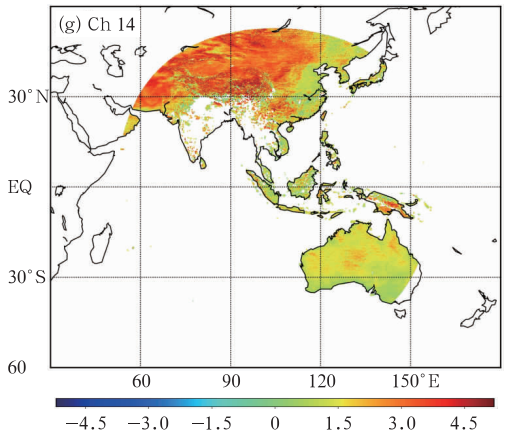


图 8 AGRI 红外通道在陆地区域观测数据与模拟数据的平均偏差(单位:K)

(a—g. 通道 08—14)

Fig. 8 Spatial distributions of O-B biases (unit: K) of AGRI channels 08 − 14 (a − g) over the land



续图 8

Fig. 8 Continued

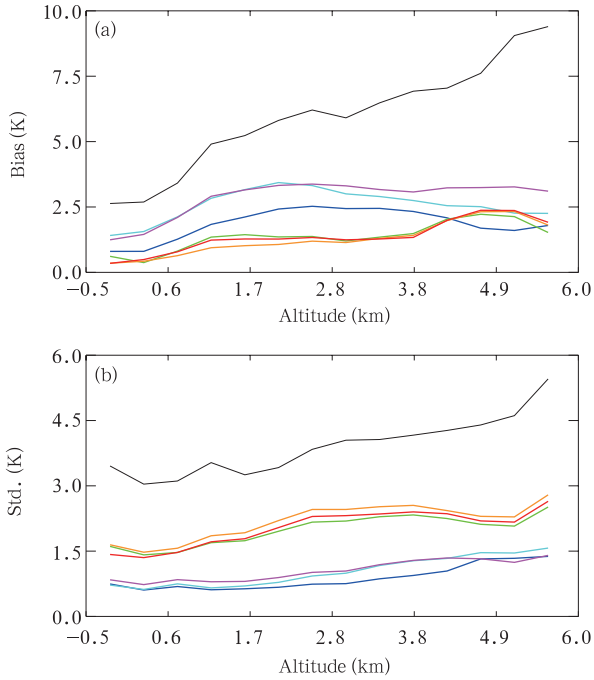


图 9 AGRI 在陆地观测区域各红外通道偏差(a)及标准差(b)随地表海拔高度的变化

(图例同图 5)

Fig. 9 Variations of biases (a) and standard deviations (b) of O-B with surface elevation over land

(the color convention for different channels is the same as in Fig. 5)

表海拔高度变化最为显著。

5 总结与讨论

作为搭载在中国第二代静止气象卫星(FY-4)上的成像仪 AGRI,可提供东半球近实时高分辨的卫星观测数据。为了使 AGRI 观测数据,特别是常用于同化数值天气预报的红外通道观测数据得到更有效的利用,数据偏差的特征及定量分析是一个重要环节。

以 2017 年 8 月 ECMWF 的再分析数据 ERA5 作为地球背景数据输入,利用辐射传输模式 RTTOV 对 AGRI 的 7 个红外通道进行模拟,并采用 MODIS 云检测产品对模拟结果进行晴空筛选,最后对观测数据与模拟结果进行 O-B 偏差分析。海洋上,ERA5 数据在对流层中层对水汽可能存在的高估是造成通道 10 存在大于 1 K 系统性偏差的主要原因,这同时说明利用该通道观测数据同化预报模式,将会产生正效应;而再分析资料对近地层气温的高估及观测数据的定标偏差影响,则是通道 14 存在大于 0.6 K 偏差的主要原因;其余红外通道偏差均小于 0.6 K。陆地上,通道 08 作为短波红外通道,卫星观测受地表反射影响较大,由于辐射传输模式对该波段模拟的不确定性较大,尤其是在地形复杂地区,因此存在较大偏差。同样,通道 10 及 14,在 ERA5 对对流层中层水汽和近地层气温的高估以及定标偏差的影响下,存在 2 K 左右的偏差,而其余红外通道偏差均小于 1.3 K。

3 个长波红外通道(通道 11、12、13)在海洋上的偏差存在随纬度变化的现象,并且这种随纬度的变化特征还存在季节性差异。这可能是由于 ERA5 数据在部分区域对海表温度的高估造成,并且这种区域性高估还存在一定的季节性变化;此外,由于这 3 个通道偏差与亮温存在明显的依赖关系,因此,定标偏差可能也是造成这种偏差分布的原因之一。但这仅是一种可能性推断,更深入的研究尚待在下一步工作中提供更丰富的数据支撑。陆地上,这 3 个通道的偏差与海拔高度有关,部分偏差来源于辐射传输模式计算中地表温度和地表发射率以及云检测的不确定性。

参考文献

曾庆存. 1974. 大气红外遥测原理. 北京:科学出版社, 174. Zeng Q C. 1974. The Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing. Beijing: Science Press, 174 (in Chinese)

张鹏,郭强,陈博洋等. 2016. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. 气象科技进展 6(1):72-75. Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al. 2016. The Chinese next-generation

geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites. J Adv Meteor Sci Technol, 6(1): 72-75 (in Chinese)

Borbas E E, Ruston B C. 2011. The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module. EUMETSAT

Bormann N, Geer A, Wilhelmsson T. 2011. Operational implementation of RTTOV-10 in the IFS. Tech. Memo, 650, 23pp

Di D, Ai Y F, Li J, et al. 2016. Geostationary satellite-based 6.7 μm band best water vapor information layer analysis over the Tibetan Plateau. J Geophys Res, 121(9): 4600-4613

Köpken C, Kelly G, Thépaut J N. 2004. Assimilation of meteosat radiance data within the 4D-Var system at ECMWF: Assimilation experiments and forecast impact. Quart J Roy Meteor Soc, 130(601): 2277-2292

Ma Z Z, Maddy E S, Zhang B L, et al. 2017. Impact assessment of Himawari-8 AHI data assimilation in NCEP GDAS/GFS with GSI. J Atmos Ocean Technol, 34(4): 797-815

Matricardi M. 2008. An assessment of the accuracy of the RTTOV fast radiative transfer model using IASI data. Atmos Chem Phys, 9(18): 6899-6913

Matricardi M. 2010. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model. Quart J Roy Meteor Soc, 136(652): 1823-1835

Mecikalski J R, Bedka K M. 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. Mon Wea Rev, 134(1): 49-78

Mecikalski J R, Williams J K, Jewett C P, et al. 2015. Probabilistic 0−1 h convective initiation nowcasts that combine geostationary satellite observations and numerical weather prediction model data. J Appl Meteor Climate, 54(5): 1039-1059

Saunders R W, Blackmore T A, Candy B, et al. 2013. Monitoring satellite radiance biases using NWP models. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 51(3): 1124-1138

Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al. 2005. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. Bull Amer Meteor Soc, 86(8): 1079-1096

Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, et al. 2017. A closer look at the ABI on the GOES-R series. Bull Amer Meteor Soc, 98(4): 681-698

Wang P, Li J, Lu B, et al. 2018a. Impact of moisture information from advanced Himawari imager measurements on heavy precipitation forecasts in a regional NWP model. J Geophys Res, 123(11): 6022-6038

Wang Y B, Liu Z Q, Yang S, et al. 2018b. Added value of assimilating Himawari-8 AHI water vapor radiances on analyses and forecasts for "7.19" severe storm over north China. J Geophys Res, 123(7): 3374-3394

Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. Bull Amer Meteor Soc, 98(8): 1637-1658

Zou X, Qin Z, Zheng Y. 2015. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF. Mon Wea Rev, 143(7): 2485-2505

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 Atmos Ocean Technol, 33(12): 2553-2567

Zou X L, Qin Z K, Weng F Z. 2011. Improved coastal precipitation forecasts with direct assimilation of GOES-11/12 imager radiances. Mon Wea Rev, 139(12): 3711-3729