

## 风云四号 A 星红外高光谱大气垂直探测仪观测资料质量评估

王雨润, 官 莉

(南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与  
评估协同创新中心, 江苏南京 210044)

**摘 要:** 评估星载红外高光谱仪器观测资料的质量可以推进其在数值天气预报中的应用。使用 2020 年 7 月 FY-4A 红外高光谱干涉式大气垂直探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS) 观测数据, 分析 GIIRS 所有通道观测噪声随视场和纬度的变化、偏差 (观测亮温与辐射传输模式模拟亮温的差) 随时间、视场、纬度和天顶角的分布来评估 GIIRS 观测资料质量。研究结果表明: 波段  $727.5\sim 733.8\text{ cm}^{-1}$ 、 $1107.5\sim 1130\text{ cm}^{-1}$  和  $1650\sim 1776.9\text{ cm}^{-1}$  的观测噪声超出仪器灵敏度设计指标, 且这些通道的偏差和偏差标准差明显大于其他通道; 除了长波观测噪声大的通道外, 其余通道噪声等效温差 NEdT 在  $32\times 4$  阵列上均呈“中间小, 两边大”的特征, 且 NEdT 的分布不随纬度带和 FOR 阵列而改变, 在进行 GIIRS 资料同化或变分反演时, 其观测误差只用考虑不同通道在  $32\times 4$  阵列内的 NEdT 分布; 由于数值预报模式的地表温度在白天时值偏低, 使得模拟辐射量偏低, 造成偏差绝对值减小, 使偏差有明显的日变化; 中波通道偏差特征基本不随  $32\times 4$  面阵的列而改变, 主要与阵列中的行有关, 在中波通道进行偏差订正时可以针对  $32\times 4$  面阵中行开展, 基本不需要纬度带和卫星天顶角的订正。

**关键词:** 红外高光谱大气探测仪; 噪声等效温差; 偏差

中图分类号: P414 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210838

## Quality assessment of FY-4 A's geostationary interferometric infrared sounder observations data

Wang Yurun, Guan Li

(Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The quality assessment of FY-4A Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) observation data can promote its application in numerical weather forecast. Using FY-4A Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) observation data in July 2020, this paper not only analyzes the dependence on FOV and latitude of noise for all channels of GIIRS, but also analyzes the distribution of bias (observation minus model) with time, FOV, latitude and zenith angle to evaluate the quality of GIIRS observation data. The results show that the noise of GIIRS exceeded the sensitivity index in the bands  $727.5\sim 733.8\text{ cm}^{-1}$ ,  $1107.5\sim 1130\text{ cm}^{-1}$ ,  $1650\sim 1776.9\text{ cm}^{-1}$ , and the biases and standard deviation of biases of these three bands are obviously larger than other channels. Except for the channels with large noise in long wave, the noise of each column is small in the middle and larger on both two sides when the noise of all bands is arranged in a  $32\times 4$  area array. Besides, the distribution of NEdT does not vary with latitude and FOR. So, when GIIRS data assimilation

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41975028)

作者简介: 王雨润, 女, 硕士生, 主要研究方向为卫星遥感资料的研究与应用。

导师简介: 官莉, 女, 教授, 博士, 主要研究方向为大气遥感与大气探测。

or variational inversion is carried out, the observation error can just consider the NEdT distribution of different channels in 32×4 array. The surface temperature of the numerical prediction model is underestimated in the daytime, which makes the underestimation of simulated radiation, reduces the absolute value of the bias, and makes the bias have obvious diurnal variation. The bias characteristics of middle-wave channels basically do not vary with the columns of 32×4 array, and are mainly related to the rows in the array. The bias correction can be carried out for the rows of 32×4 array, and the correction of latitude band and satellite zenith angle is basically not needed.

**Key words:** Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS); NEdT; bias characteristics

## 0 引言

星载红外高光谱大气探测仪具有高光谱分辨率、精确的光谱定标、高空间分辨率等优点,能够提供精确的垂直方向大气温度和湿度信息,被广泛应用于数值天气预报、气候变化研究等方面。

随着探测技术的发展,越来越多的红外高光谱大气探测仪被搭载在极轨气象卫星平台上,如 EOS-Aqua 搭载的 AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder)、MetOp-A 搭载的 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、Suomi NPP 搭载的 CrIS (Cross-track Infrared Sounder) 以及 FY-3 D 搭载的 HIRAS (High-spectral InfraRed Atmospheric Sounder)。分析星载红外高光谱仪器的观测噪声和偏差(即观测亮温与辐射传输模式模拟亮温的差)随时间、地理位置、卫星天顶角和场景亮温的变化可以提高观测资料的质量,推进星载红外高光谱观测资料在数值天气预报中的应用<sup>[1-2]</sup>。Collard 和 McNally<sup>[3]</sup>发现 IASI 在 15 μm CO<sub>2</sub> 探测波段的观测资料比 AIRS 质量更好。Smith 等<sup>[4]</sup>对 CrIS 观测资料进行了质量评估,发现在一些关键的温度探测通道上 CrIS 的偏差标准差低至 0.15 K,仅为 IASI 的一半、AIRS 的三分之一。Li 和 Zou<sup>[5]</sup>分析了 CrIS 的长波、中波、短波通道偏差对纬度和扫描角的依赖性,发现 CrIS 所有通道偏差随扫描角变化的程度均小于±0.4 K,中波通道偏差在中高纬度地区比赤道大,可能是因为水汽的纬度差异。

上述这些搭载在极轨卫星上的红外高光谱探测仪已经被广泛应用于全球和区域数值天气预报当中,2016 年 12 月 11 日新一代中国静止气象卫星风云四号上搭载的红外高光谱干涉式大气垂直探测仪(Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS)首次在静止平台上实现红外高光谱观测,在长波波段 700~

1130 cm<sup>-1</sup>、中波波段 1650~2250 cm<sup>-1</sup> 范围内探测大气红外辐射,光谱分辨率为 0.625 cm<sup>-1</sup>[6]。冯绚等<sup>[7]</sup>对 GIIRS 单个时次噪声的谱分布进行了评价,表明除部分通道受到有机物挥发的影响,85% 的通道噪声优于设计指标,还通过观测光谱与模拟光谱的均方根误差确定激光有效采样频率,实现 GIIRS 在轨光谱定标。Yin 等<sup>[8]</sup>对 GIIRS 长波 CO<sub>2</sub> 温度探测通道进行偏差特征分析,结果表明除了受污染的通道,其他大部分通道在质量控制后偏差在±2 K 之内,还发现长波温度通道的偏差对视场面阵排布有依赖,对流层上层通道偏差有日变化。

由于 GIIRS 扫描工作模式与极轨平台常用的跨轨迹横向扫描模式不同,首次在国际上使用 32×4 矩形观测探元面阵,因此,文中主要通过分析 2020 年 7 月整月 GIIRS 所有通道仪器噪声随时间、视场面阵排布和纬度变化,以及观测亮温与辐射传输模式模拟亮温的差(即偏差)的特征来评估其观测资料的质量,继而推进 GIIRS 观测资料在数值天气预报中的应用。

## 1 GIIRS 观测资料与模式

### 1.1 GIIRS 观测资料

表 1 给出了 FY-4 A GIIRS 仪器的主要技术指标。

表 1 FY-4 A GIIRS 主要技术指标

Tab.1 FY-4 A GIIRS main technical indicators

| FY-4 A GIIRS  | Longwave band | Midwave band |
|---|---------------|--------------|
| Wavenumber/cm <sup>-1</sup>                         | 700-1130      | 1650-2250    |
| Channel number                                      | 689           | 961          |
| Spectral resolution/cm <sup>-1</sup>                | 0.625         | 0.625        |
| Spatial resolution/km                               | 16            | 16           |
| Sensitivity/mW·m <sup>-2</sup> ·sr·cm <sup>-1</sup> | 0.5-1.1       | 0.1-0.14     |
| Radiometric calibration accuracy/K                  | 1.5           | 1.5          |
| Spectral calibration accuracy/ppm                   | 10            | 10           |

GIIRS 的工作模式与其它搭载在极轨平台上的红外高光谱探测仪的跨轨迹横扫方式不同,约 2 h 完成一次区域观测,覆盖范围为 3~55°N, 60~137°E(见图 1 (a)),

包含 7 条纬度扫描带,每 15 min 完成一条纬度带的观测,每条纬度带上有 59 个 FOR (Field Of Regard), 每个 FOR 对应一个 32×4 的探测器阵列 (见图 1 (b))。

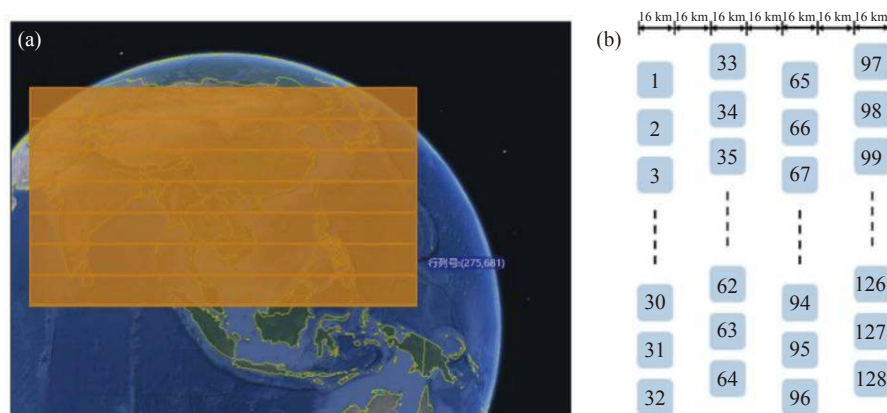


图 1 (a) GIIRS 区域观测覆盖范围 (引自国家卫星气象中心 <http://img.nsmc.org.cn>); (b) GIIRS 矩形探元 32×4 排布方式

Fig.1 (a) The coverage of GIIRS regional observation (Quote from National Satellite Meteorological Center <http://img.nsmc.org.cn>); (b) GIIRS rectangular detection units is arranged in 32×4 array

文中使用 2020 年 7 月整月 FY-4 A GIIRS Level1 级辐射率观测资料, 下载网址是: <http://satellite.nsmc.org.cn>。在 Level1 级资料中需要读取的资料包括长波辐射率、中波辐射率、探元经纬度、太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角及卫星方位角。长波辐射率以 689×128 阵列排布, 中波辐射率以 961×128 阵列排布, 其中 689 和 961 代表长波 689 个通道和中波 961 个通道, 128 列代表 128 个探测点。各个通道观测的辐射率经过如下切趾处理, 切趾后第  $n$  个通道的辐射率  $R_n$  为:

$$R_n = 0.23 \times R_{n-1} + 0.54 \times R_n + 0.23 \times R_{n+1} \quad (1)$$

式中:  $R_{n-1}$  为第  $n-1$  个通道的辐射率;  $R_{n+1}$  为第  $n+1$  个通道的辐射率; 其中, 第一个通道和最后一个通道的辐射率不切趾<sup>[9]</sup>。

### 1.2 ARMS 快速辐射传输模式

文中用 ARMS 快速辐射传输模式 (Advanced Radiative Transfer Modeling System) 模拟 GIIRS 亮温。ARMS 由中国气象局开发<sup>[10]</sup>, 输入参数包括大气垂直廓线数据 (包括温度、水汽、臭氧)、每层的大气压强、地表温度、地表类型、10 m 风速以及仪器的天顶角和方位角、太阳的天顶角和方位角。

针对 GIIRS 的辐射传输模拟, 具体的输入参数及数据来源如表 2 所示。文中采用 2020 年 7 月 ECMWF

的 ERA5 再分析场的 137 层大气垂直廓线数据 (包括温度、水汽、臭氧), 该数据水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间分辨率为 1 h, 顶层气压为 0.01 hPa 左右。地表温度和 10 m 风速由 ERA5 数据中  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  空间分辨率及 1 h 间隔的地面数据提供。仪器的天顶角和方位角、太阳的天顶角和方位角从 FY-4 A GIIRS Level1 级数据中获取, 地表类型从 FY-4 A GIIRS Level2 级数据中获取。

表 2 用于晴空条件 ARMS 辐射传输模拟的输入参数

Tab.2 Input variables and parameters for clear-sky simulations with ARMS

| Variables              | Unit                              | Data sources  |
|------------------------|-----------------------------------|---|
| Atmospheric parameters | Temperature/K                     | ECMWF reanalysis data: ERA5 (137 level, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )    |
|                        | Water vapor/g·kg                  |   |
|                        | Ozone/g·kg                        |   |
|                        | Level pressure/hPa                |   |
| Surface parameters     | Type of surface                   | FY-4 A GIIRS Level2 data  |
|                        | 10 m wind speed/m·s               | ECMWF reanalysis data: ERA5 surface data ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) |
|                        | Surface temperature/K             |   |
| Geometric parameters   | Sensor zenith angle/ $^\circ$     | FY-4 A GIIRS Level1 data  |
|                        | Sensor azimuth angle/ $^\circ$    |   |
|                        | Satellite zenith angle/ $^\circ$  |   |
|                        | Satellite azimuth angle/ $^\circ$ |   |

## 2 GIIRS 观测噪声特征

噪声等效温差 NEdT (Noise Equivalent delta Temperature) 用来描述仪器测量精度, 表现为仪器对辐射变化的分辨能力<sup>[1]</sup>, 可为大气参数变分反演以及资料同化提供观测误差的参考值。当某通道在相同背景温度下的 NEdT 值异常大时, 认为该通道的“噪声”很大, 不宜将该通道的探测结果纳入同化系统之中。文中使用的 NEdT 数据是由 GIIRS Level1 级数据中的噪声等效辐射值 NEdR(Noise Equivalent delta Radiation) 计算得到。GIIRS 的 NEdR 数据是在轨测量得到的, GIIRS 星上面源黑体温度通过控温保持在稳定的状态, NEdR 通过观测星上面源黑体, 根据黑体辐射测量值的标准偏差得到<sup>[7]</sup>。在背景亮温为  $T$  时的噪声等效温差为:

$$NEdT = \frac{NEdR}{\frac{dN}{dT}} \quad (2)$$

式中:  $dN/dT$  是背景亮温为  $T$  时的普朗克辐射亮度的微分。

由于 ARMS 对有云条件下的辐射模拟精度不高,

所以文中用 GIIRS Level2 级 CLM (CLOUD MASK) 产品剔除有云的视场点, 以下所有统计都只针对晴空视场进行。

国家气象卫星中心在 2019 年 8 月 13 日和 2019 年 11 月 7 日对 GIIRS 一级数据定标处理相关算法做了改进。图 2(a)~(c) 分别为定标改进前后统计的平均的 GIIRS 128 个探元 NEdT 的谱分布, 时段依次为 2019 年 6 月 1 日~8 月 12 日、2019 年 8 月 13 日~11 月 6 日和 2019 年 11 月 7 日~2020 年 2 月 29 日, 红线为在背景温度 300 K 下的灵敏度指标。图中可以看出长波波段  $727.5\sim 733.8\text{ cm}^{-1}$ 、长波波段  $1107.5\sim 1130\text{ cm}^{-1}$  和中波波段  $1650\sim 1776.9\text{ cm}^{-1}$  NEdT 超出灵敏度指标, 观测噪声较大, 可能原因是微量的有机物挥发导致系统受到污染<sup>[7]</sup>, 其余通道均达到灵敏度设计指标; 8 月 13 日定标算法改进后 (见图 (b)) 长波波段两端噪声有一定的改善, 但 11 月 7 日重新定标后 (见图 (c)) 反而波段  $1107.5\sim 1130\text{ cm}^{-1}$  和  $1650\sim 1776.9\text{ cm}^{-1}$  的观测噪声增加。图中 NEdT 数值大于仪器设计指标 (红线) 的通道观测噪声较大, 用户在使用这些通道时要谨慎。

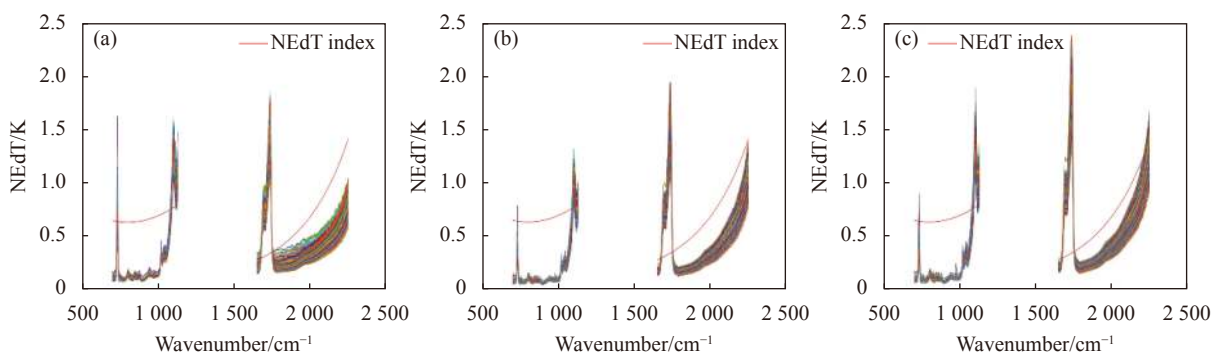


图 2 不同时段平均的 GIIRS 128 个探元 NEdT 的谱分布。(a) 2019 年 6 月 1 日~8 月 12 日; (b) 2019 年 8 月 13 日~11 月 6 日; (c) 2019 年 11 月 7 日~2020 年 2 月 29 日 (红线为在背景温度 300 K 下的灵敏度指标)

Fig.2 The spectral distribution of the average NEdT of 128 detection units in different time periods. (a) June 1 to August 12, 2019; (b) August 13 to November 6, 2019; (c) November 7, 2019 to February 29, 2020 (The red line is the sensitivity index at the background temperature of 300 K)

### 2.1 NEdT 随视场的变化

由于 GIIRS 通道较多, 为展示 NEdT 随  $32\times 4$  面阵的分布特征, 特地选出 6 个典型通道: 长波  $716.3\text{ cm}^{-1}$  (权重函数峰值高度在 550 hPa 附近) 且观测噪声小、长波  $731.3\text{ cm}^{-1}$  (550 hPa) 且噪声大、长波  $900\text{ cm}^{-1}$  (窗区地表通道) 且噪声小、中波  $1908.1\text{ cm}^{-1}$  (500 hPa) 且噪声小、中波  $1725\text{ cm}^{-1}$  (500 hPa) 且噪声大、中波  $1952.5\text{ cm}^{-1}$

(地表) 且观测噪声小。

图 3(a)~(f) 分别为 2020 年 7 月平均的 6 个通道 NEdT 随  $32\times 4$  面阵的分布; 图 (g)~(l) 为这 6 个通道 NEdT 在不同列时随 32 个探元行的变化, 不同颜色的线条代表 4 个不同列。图 (a)、(c) 所示为在长波噪声低的  $716.3\text{ cm}^{-1}$ 、 $900\text{ cm}^{-1}$  通道 NEdT 在  $32\times 4$  阵列上呈“中间小, 两边大”的特征, 而中波通道图 (d)~(f) 不

论观测噪声大小、通道权重函数高低均呈现出阵列中间视场 NEdT 较小, 向四周逐渐增大的趋势。从图 (g)~(l) 可以看出, 6 个通道的 NEdT 在 32×4 阵列上随列的变化不大, 但随行 1~32 分布有变化, 尤其中波通道图 (j)~(l) 随行呈对称分布, 在中间第 16 行视场观

测噪声最小, 而前几行和最后几行观测噪声最大。NEdT 在阵列内“中间小、两边大”的分布特征初步估计为阵列内不同视场离卫星仪器的距离不同造成的, 中间视场到仪器通过的大气路径比较短, 而四周的视场则通过的大气路径相对较长。

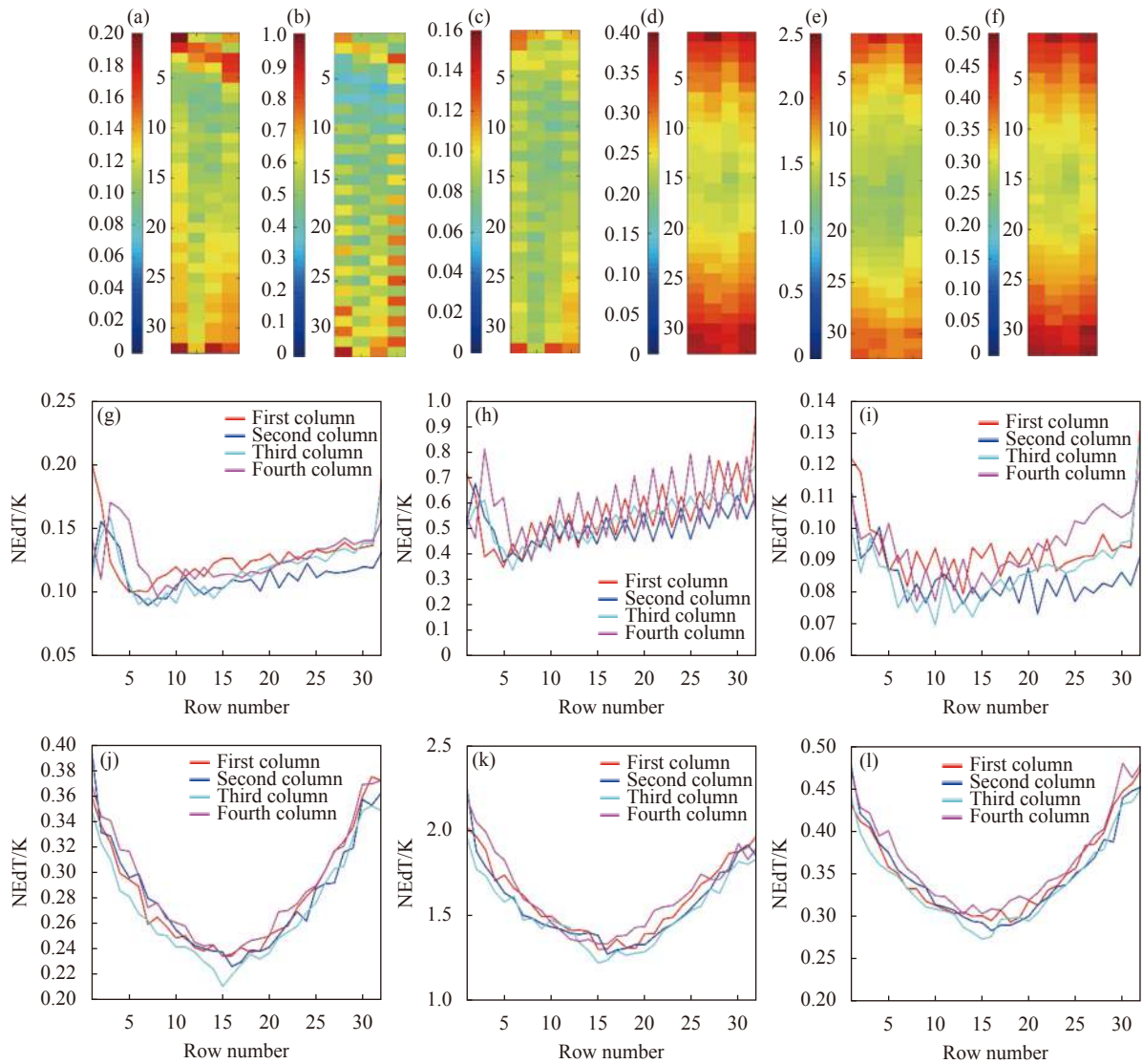


图 3 2020 年 7 月平均的 (a)~(f) 716.3  $\text{cm}^{-1}$ 、731.3  $\text{cm}^{-1}$ 、900  $\text{cm}^{-1}$ 、1908.1  $\text{cm}^{-1}$ 、1725  $\text{cm}^{-1}$ 、1952.5  $\text{cm}^{-1}$  的 NEdT 随 32×4 面阵分布; (g)~(l) 对应通道 NEdT 随 32 个探元行的变化

Fig.3 (a)-(f) The average NEdT variation of 716.3  $\text{cm}^{-1}$ , 731.3  $\text{cm}^{-1}$ , 900  $\text{cm}^{-1}$ , 1908.1  $\text{cm}^{-1}$ , 1725  $\text{cm}^{-1}$  and 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  with 32×4 array in July 2020; (g)-(l) The average NEdT variation of corresponding channels with the rows of 32×4 array in July 2020

## 2.2 NEdT 随纬度的变化

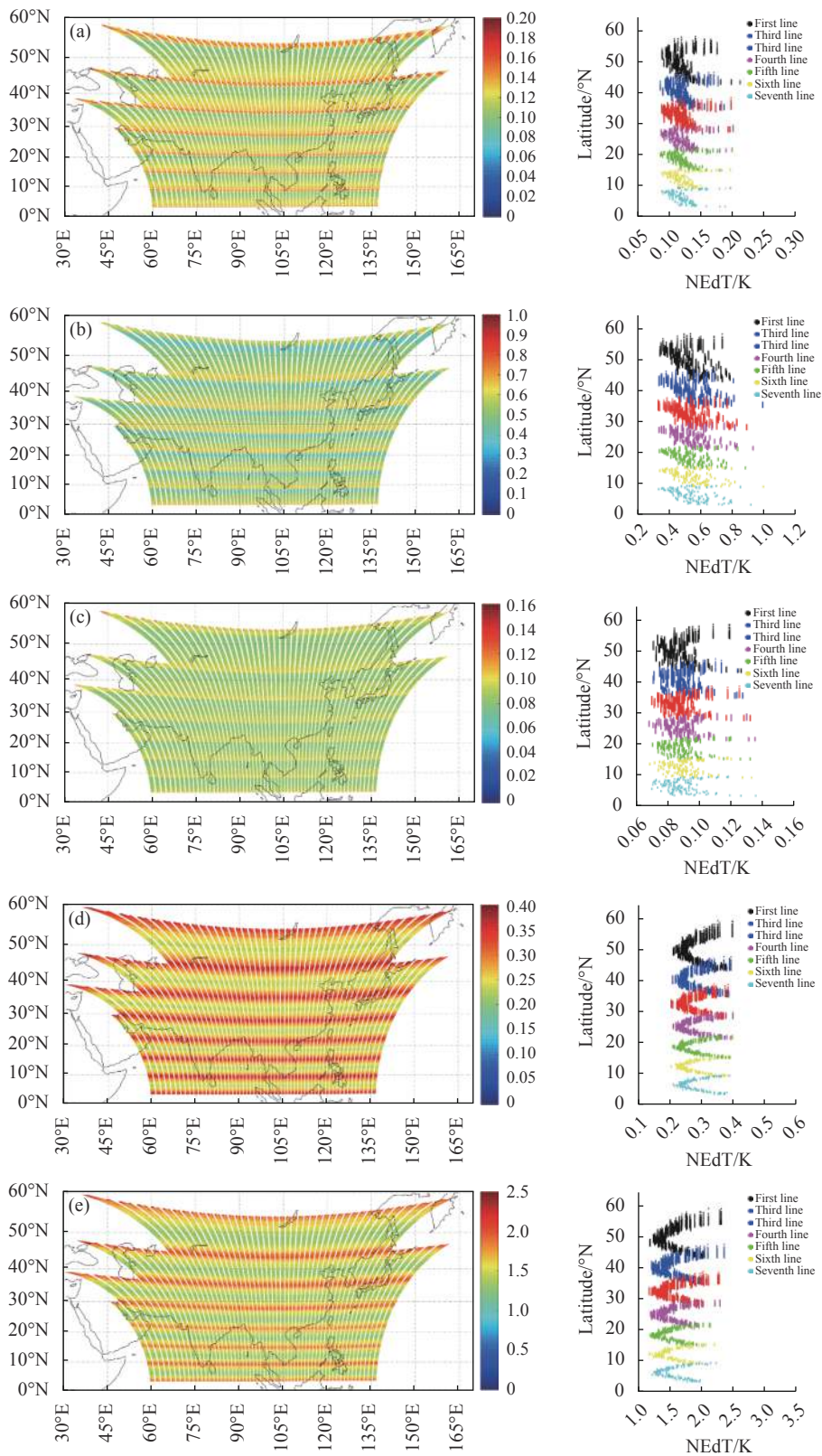
GIIRS 完成一次区域观测需要扫描 7 条纬度带, 每条纬度带都由 59 个 32×4 的矩形面阵组成。图 4 显示了 7 月平均的 6 个通道 NEdT 的空间分布, 右侧图是对应通道的 NEdT 随纬度的变化, 不同颜色表示

不同的扫描纬度带。从图中可以看出这 6 个通道在每条纬度带上都有中间噪声小, 两边纬度噪声大的特征; 而且从右图可分析出在不同纬度带上 NEdT 数值大小和分布特征类似, 说明 NEdT 的分布特征不随纬度带而改变。而且在每一条纬度带上 NEdT 的分布

在 59 个 FOR 中也类似。

综上, 利用 GIRS 资料进行同化或变分反演时, 其观测误差只用考虑不同通道在  $32 \times 4$  阵列的 NEdT

分布 (图 3 上列), 而不用考虑  $32 \times 4$  阵列随每个 FOR 和每个纬度带的区别。



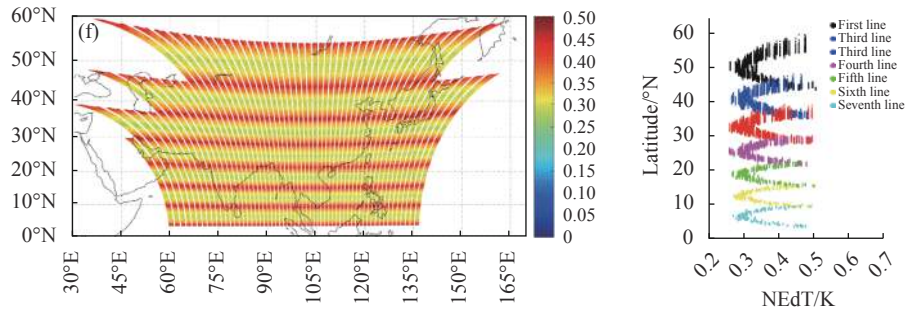


图 4 2020 年 7 月平均的 (a)~(f)  $716.3\text{ cm}^{-1}$ 、 $731.3\text{ cm}^{-1}$ 、 $900\text{ cm}^{-1}$ 、 $1908.1\text{ cm}^{-1}$ 、 $1725\text{ cm}^{-1}$ 、 $1952.5\text{ cm}^{-1}$  NEdT 的空间分布。右侧是对应通道的 NEdT 随纬度的分布

Fig.4 (a)-(f) The average NEdT variation of  $716.3\text{ cm}^{-1}$ ,  $731.3\text{ cm}^{-1}$ ,  $900\text{ cm}^{-1}$ ,  $1908.1\text{ cm}^{-1}$ ,  $1725\text{ cm}^{-1}$  and  $1952.5\text{ cm}^{-1}$  with space in July 2020. On the right side is the average NEdT variation of the corresponding channel with latitude in July 2020

### 3 偏差分析

检验星载仪器观测资料质量的另一个方法是统计其信息向量,即偏差(O-B):观测和模拟辐射值的差。资料同化理论是基于偏差服从高斯分布的假设下,若偏差较小可在资料同化质量控制过程中进行偏差订正,若偏差过大,则该通道的观测场无意义,当通道新息向量的平均值以及标准差均比较小时观测资料的质量更好。

#### 3.1 偏差的谱分布

图 5 为 2020 年 7 月 GIIRS 所有晴空点统计的偏

差谱分布,浅蓝色实线代表偏差,紫色实线代表偏差标准差,深蓝色实线为 NEdT,深绿色的误差条代表每个通道 NEdT 的标准差;左侧纵坐标为偏差和偏差标准差(K)、右侧纵坐标为 NEdT(K)。从图中可以看出,受污染通道(即 NEdT 值较大)的偏差和偏差标准差明显大于其他通道,最大偏差出现在水汽吸收带  $1650\sim 1776.9\text{ cm}^{-1}$ ,可高达 20 K,表明这些通道不适用于资料同化。选取上述 6 个通道中观测质量较好且偏差较小的 4 个通道进行进一步的分析,分别代表长波和中波、地表和对流层中层。

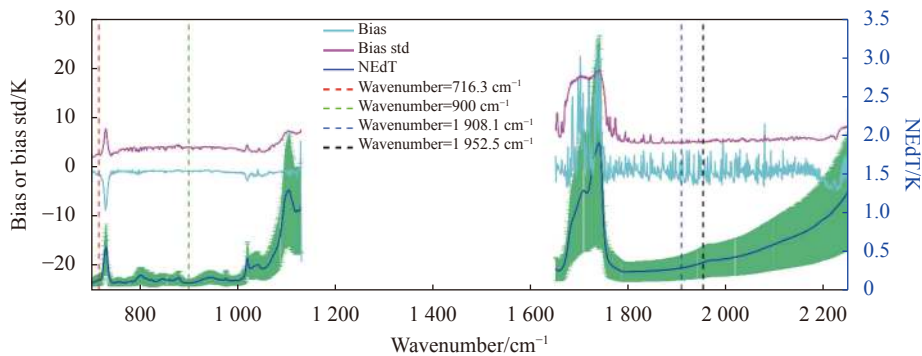


图 5 2020 年 7 月 GIIRS 晴空点统计的偏差(浅蓝线)、偏差标准差(紫线)、NEdT(深蓝线)的谱分布(深绿色的误差条表示 NEdT 的标准差)

Fig.5 Bias (light blue line), the deviation standard of bias (purple line) and NEdT (dark blue line) of GIIRS clear point in July 2020 (dark green error bar represents the standard deviation of NEdT)

#### 3.2 偏差随时间的变化

图 6 展示了 2020 年 7 月统计的 (a)  $716.3\text{ cm}^{-1}$ 、(b)  $900\text{ cm}^{-1}$ 、(c)  $1908.1\text{ cm}^{-1}$ 、(d)  $1952.5\text{ cm}^{-1}$  通道偏差(蓝线)和偏差标准差(紫线)的逐日变化,红色虚线

为 NEdT,对应右侧纵坐标。一般都是选取 08 时、14 时、20 时和 02 时(北京时,下同) 4 个同化再分析场时刻来研究偏差特征,但由于 GIIRS 在 02 时不进行观测,故文中将 02 时换为 04 时,即用 08、14、20、

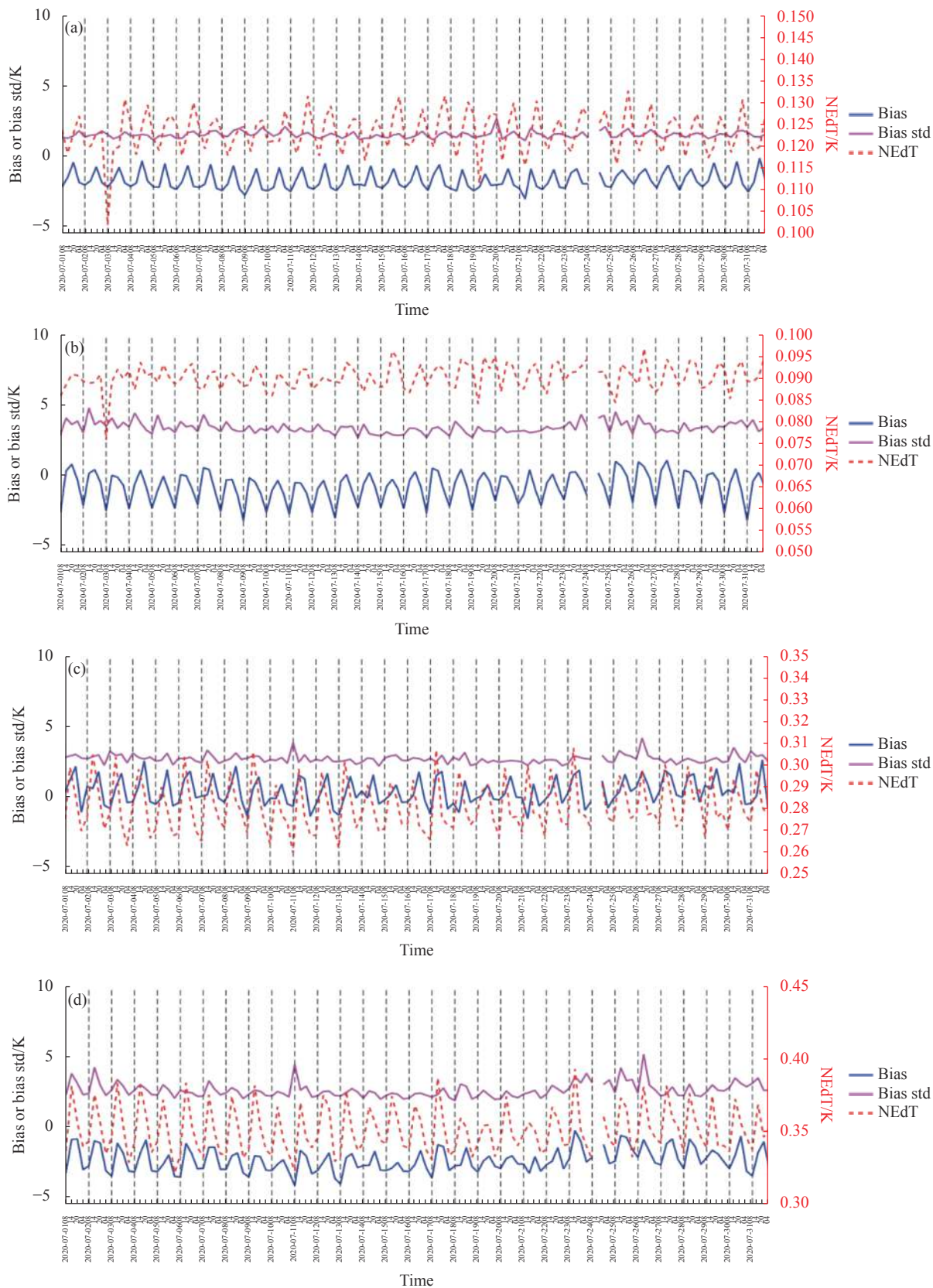


图 6 2020 年 7 月 (a) 716.3 cm<sup>-1</sup>、(b) 900 cm<sup>-1</sup>、(c) 1908.1 cm<sup>-1</sup>、(d) 1952.5 cm<sup>-1</sup> 的偏差、偏差标准差、NEdT 的逐日变化

Fig.6 The diurnal variation of bias, the deviation standard of bias and NEdT of (a) 716.3 cm<sup>-1</sup>, (b) 900 cm<sup>-1</sup>, (c) 1908.1 cm<sup>-1</sup>, (d) 1952.5 cm<sup>-1</sup> in July 2020



04 时来分析偏差的日变化。因为国家气象卫星中心未提供 2020 年 7 月 24 日 14 时的 GIIRS Level2 级数据,所以在图 6 中该时次的偏差空缺。从图中可以看出,716.3 cm<sup>-1</sup> 通道的偏差在-2~-0.15 K,偏差标准差约 2 K;900 cm<sup>-1</sup> 通道由于接近地表,偏差增大且日变化幅度增强,偏差标准差约 4 K;1908.1 cm<sup>-1</sup> 通道的偏差在-1.9~2.6 K,偏差标准差约 3 K;1952.5 cm<sup>-1</sup> 通道为负偏差,偏差日变化幅度增强。

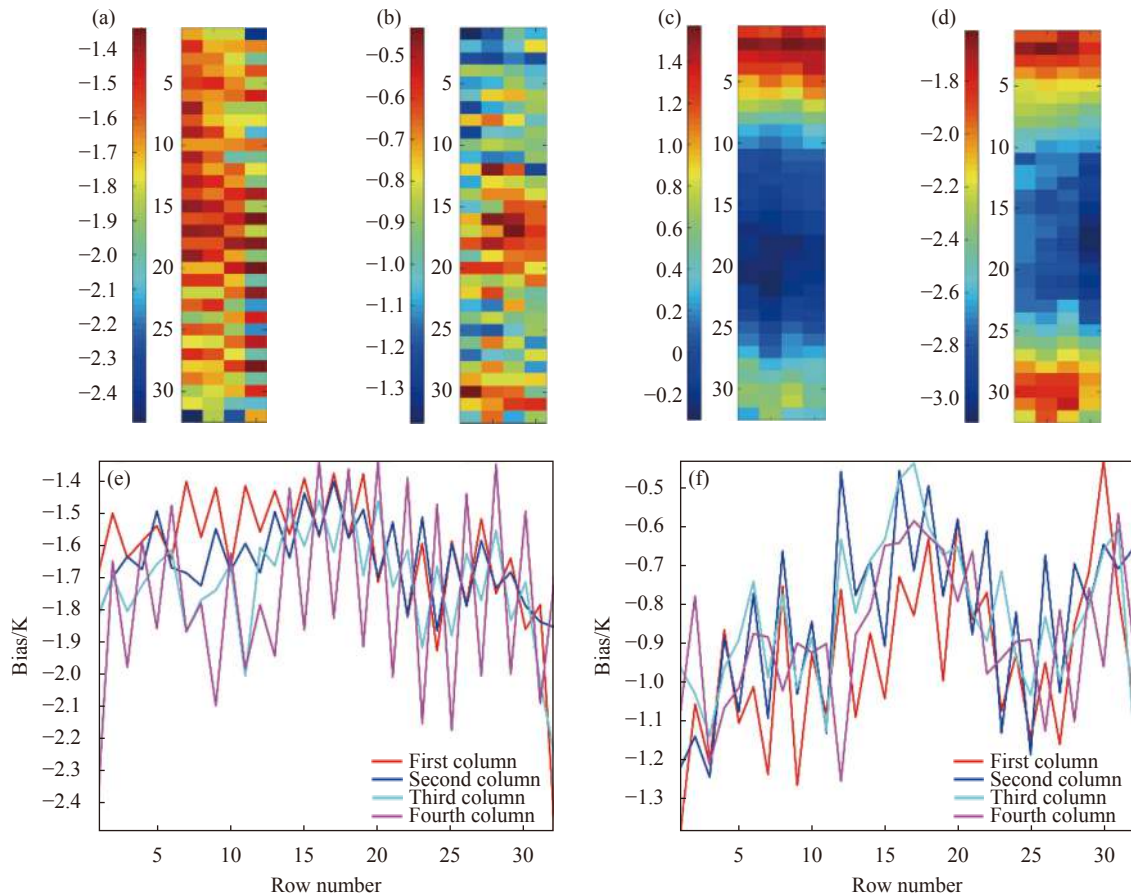
NEdT 是通过计算一定数目的扫描行内观测的标准偏差来统计获得的,标准偏差计算非常依赖平均值;静止卫星对地高时间频次观测,大气温度日变化明显,而红外通道观测对温度变化很敏感,造成仪器观测平均值的日变化,进而引起 NEdT 存在日变化(见图 6 (a)~(d)),这与极轨卫星平台上 NEdT 随时间变化很小是不同的;在中波波段(见图 6 (c)~(d))由于太阳辐射的干扰<sup>[12]</sup>,使得日变化特征更明显,NEdT 值也较大。

O-B 的偏差主要来源于仪器观测误差、快速辐射

传输模式误差和数值预报模式误差等几个方面,是几种误差的共同结果,很难将其中某一种偏差剥离出来。其中观测误差 NEdT 在 0.1 K 量级(图 6 右坐标),辐射传输模式误差在 0.1 K 量级<sup>[10]</sup>,而 O-B 偏差值在 1 K 量级,说明偏差中作为辐射传输模式输入的数值预报大气参数的误差占主导。图 6 大部分通道 O-B 都是负偏差,根据参考文献[13-14]数值预报模式的地表温度在白天时值偏低,使得模拟辐射量偏低,造成偏差绝对值减小,使偏差有日变化。

### 3.3 偏差随视场的变化

图 7(a)~(d) 是 2020 年 7 月统计的 4 个通道偏差随 32×4 面阵的分布,图 7(e)~(h) 则是相应通道偏差在不同列时随 32 个探元的变化。从图中可看出,长波时偏差在面阵内分布没有明显规律,而中波通道则明显在中心位置偏差最小,越往两边偏差越大。通过图 (g)~(h) 可看出,两个中波通道偏差基本不随 32×4 面阵的列而改变(图中不同颜色的线),主要



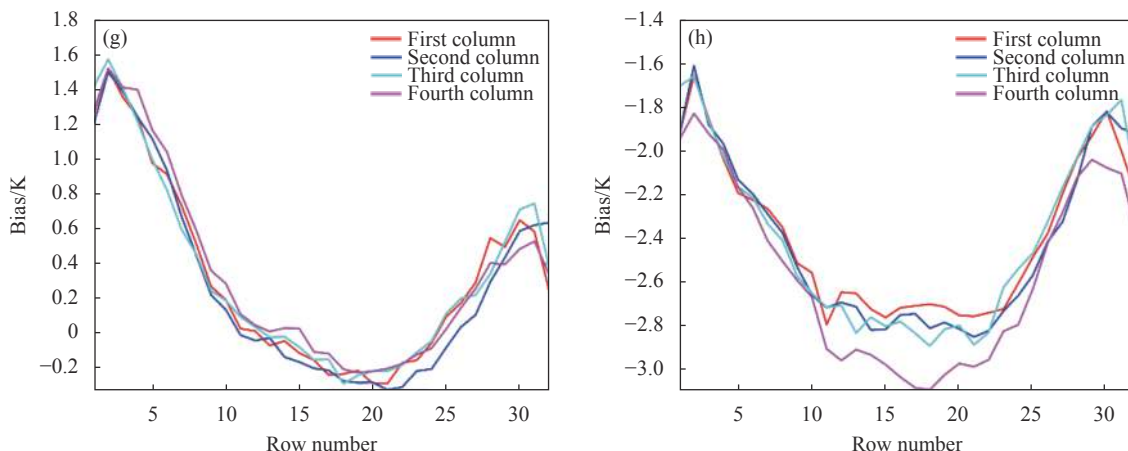


图 7 2020 年 7 月平均的 (a)~(d) 716.3  $\text{cm}^{-1}$ 、900  $\text{cm}^{-1}$ 、1908.1  $\text{cm}^{-1}$ 、1952.5  $\text{cm}^{-1}$  的偏差随  $32 \times 4$  面阵的分布、(e)~(h) 对应通道的偏差随每一列 32 个探元的变化

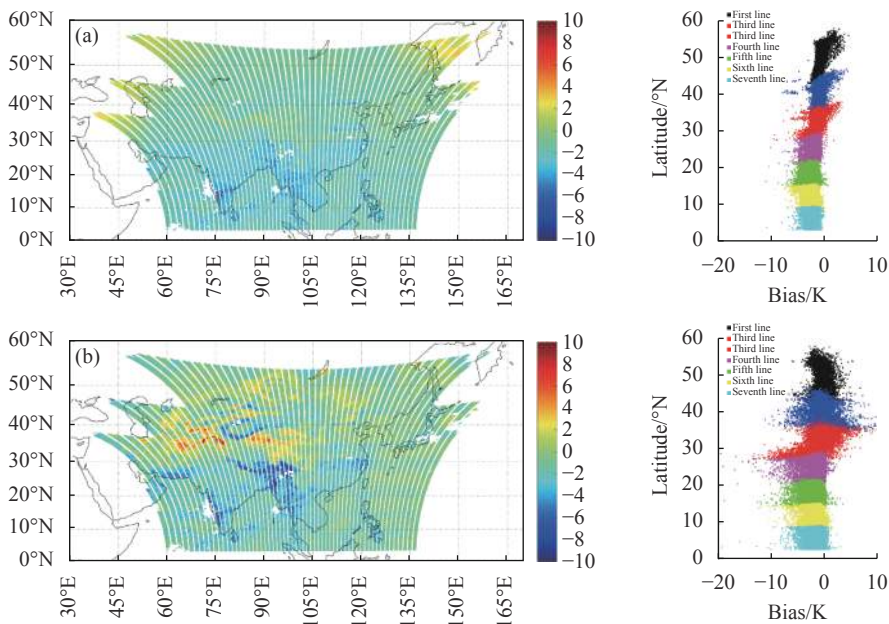
Fig.7 (a)-(d) The bias variation of 716.3  $\text{cm}^{-1}$ , 900  $\text{cm}^{-1}$ , 1908.1  $\text{cm}^{-1}$  and 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  with  $32 \times 4$  array in July 2020; (e)-(h) The bias variation of corresponding channels with the rows of  $32 \times 4$  array in July 2020

与阵列中的行有关,且前 5 行偏差较大,然后随行数递减,在第 16 左右达到最小,然后再随行数增加而增大。

### 3.4 偏差随纬度的变化

GIIRS 每覆盖中国区域一次有 7 条纬度扫描带,图 8(a)~(d) 分别给出了 2020 年 7 月平均的中国区域 4 个通道的偏差空间分布,右图为相应通道的偏差随纬度带的变化,图中不同颜色代表 7 个不同的扫描纬度带。波数为 900  $\text{cm}^{-1}$ (见图 (b))、1952.5  $\text{cm}^{-1}$ (见图

(d)) 的窗区通道在青藏高原地区均出现比较大的偏差,这是因为快速辐射传输模式对高原地区模拟不准确;而在权重函数较高的 716.3  $\text{cm}^{-1}$  和 1908.1  $\text{cm}^{-1}$  通道则整体偏差较小。1908.1  $\text{cm}^{-1}$  通道偏差在每条纬度带上都呈现中间小,两边大的特征(与 3.3 节分析的面阵偏差分布特征一致),1952.5  $\text{cm}^{-1}$  该特征稍弱。从右侧图可以看出所有通道偏差分布与纬度带基本不相关,除 716.3  $\text{cm}^{-1}$  通道偏差有轻微随纬度带的变化,纬度越低偏差越大。



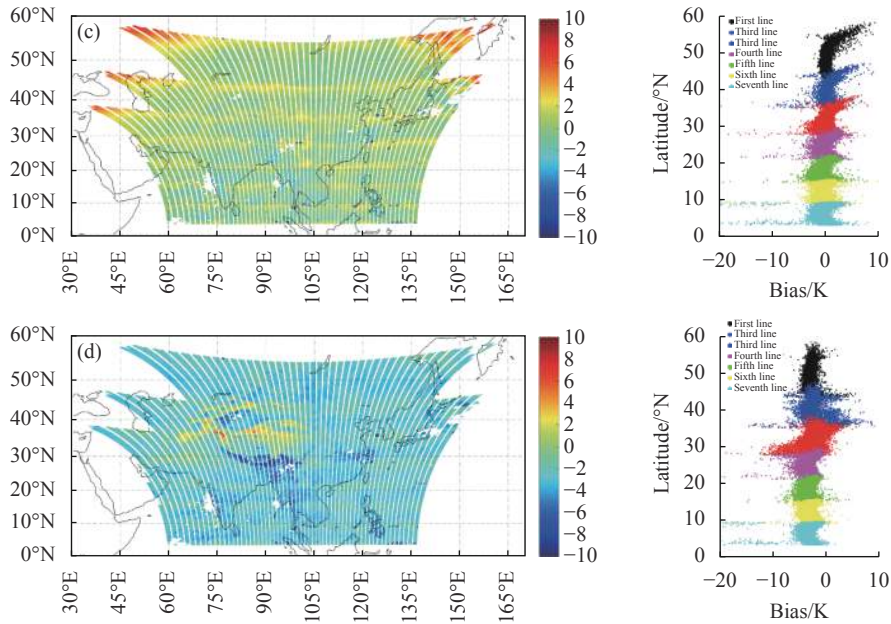


图 8 2020 年 7 月平均的中国区域 (a) 716.3  $\text{cm}^{-1}$ 、(b) 900  $\text{cm}^{-1}$ 、(c) 1908.1  $\text{cm}^{-1}$ 、(d) 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  偏差的空间分布 (右侧为相应通道偏差随纬度的变化)

Fig.8 The bias variation of (a) 716.3  $\text{cm}^{-1}$ , (b) 900  $\text{cm}^{-1}$ , (c) 1908.1  $\text{cm}^{-1}$  and (d) 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  with space in July 2020. On the right side is the bias variation of the corresponding channel with latitude in July 2020

### 3.5 偏差随天顶角的变化

卫星的观测数据会存在扫描角偏差, 所以需要分析偏差与卫星天顶角的关系。这 4 个通道 (由 4 条不同颜色的线代表) 偏差随卫星天顶角的变化如图 9 所示, 图中柱状为卫星天顶角每隔 2° 的观测数目 (右纵坐标), 可以看出卫星在天顶角 50°~64° 的观测频率最高, 所有通道当天顶角 >70° 时偏差明显增加, 在低于此天顶角时偏差几乎不随天顶角而变, 而天顶角 >70°

的观测视场很少, 因此在进行偏差订正时基本可以不考虑随天顶角的变化。

## 4 结论

文中通过分析 2020 年 7 月 FY-4 A GIIRS 所有通道的观测噪声和偏差统计特征来评估 GIIRS 观测资料质量, 为资料同化和反演做准备。因 GIIRS 通道较多, 故选出 6 个典型通道进行分析, 分别代表长波和中波、噪声大和噪声小、窗区和权重函数峰值高度在对流层中层, 结论如下:

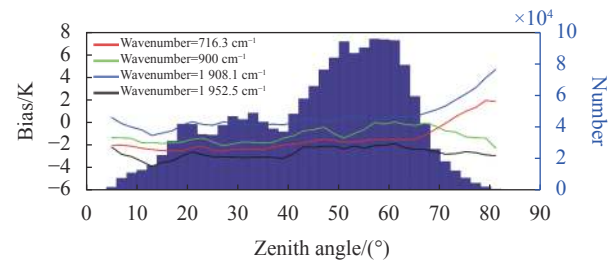


图 9 2020 年 7 月 716.3  $\text{cm}^{-1}$  (红线)、900  $\text{cm}^{-1}$  (绿线)、1908.1  $\text{cm}^{-1}$  (蓝线) 和 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  (黑线) 的偏差与卫星天顶角的关系 (图中柱状图为每 2° 天顶角范围内的数目)

Fig.9 The relationship between bias of 716.3  $\text{cm}^{-1}$  (red line), 900  $\text{cm}^{-1}$  (green line), 1908.1  $\text{cm}^{-1}$  (blue line) and 1952.5  $\text{cm}^{-1}$  (black line) and satellite zenith angle in July 2020 (the histogram in the figure is the number within every 2° zenith angle)

(1) 波段 727.5~733.8  $\text{cm}^{-1}$ 、1107.5~1130  $\text{cm}^{-1}$  和 1650~1776.9  $\text{cm}^{-1}$  的观测噪声超出仪器灵敏度设计指标, 而且偏差和偏差标准差明显大于其他通道, 最大偏差出现在水汽吸收带 1650~1776.9  $\text{cm}^{-1}$ , 用户在使用这些通道时要谨慎。

(2) 长波噪声低的 716.3  $\text{cm}^{-1}$ 、900  $\text{cm}^{-1}$  通道 NEdT 在 32×4 阵列上呈“中间小, 两边大”的特征。而中波通道不论观测噪声大小、通道权重函数高低均呈现出阵列中间视场 NEdT 较小, 向四周增大的趋势。NEdT 的分布特征不随扫描纬度带和每条扫描纬度带中的 59 个 FOR 而改变, 所以进行 GIIRS 资料同化或

变分反演时,其观测误差只考虑不同通道在  $32 \times 4$  阵列的 NEdT 分布,不用考虑  $32 \times 4$  阵列随每个 FOR 和每个纬度带的区别。

(3) GIIRS O-B 偏差中作为辐射传输模式输入的数值预报大气参数的误差占主导。所选通道大部分 O-B 都是负偏差,因为数值预报模式的地表温度在白天时值偏低,使得模拟辐射量偏低,造成偏差绝对值减小,使偏差有日变化。

(4) GIIRS 中波通道偏差主要与  $32 \times 4$  面阵中的行有关,因此在中波通道进行偏差订正时可以针对  $32 \times 4$  面阵中行开展,基本不需要纬度带和卫星天顶角的订正。

#### 参考文献:

- [1] Dee D P. Bias and data assimilation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(613): 3323-3343.
- [2] Saunders R W, Blackmore T A, Candy B, et al. Monitoring satellite radiance biases using NWP models [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1124-1138.
- [3] Collard A D, McNally A P. The assimilation of infrared atmospheric sounding interferometer radiances at ECMWF [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135(641): 1044-1058.
- [4] Smith A, Atkinson N, Bell W, et al. An initial assessment of observations from the Suomi-NPP satellite: data from the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2015, 16(3): 260-266.
- [5] Li X, Zou X L. Bias characterization of CrIS radiances at 399 selected channels with respect to NWP model simulations [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 196: 164-181.
- [6] 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.
- [7] Feng X, Li L B, Cheng B Y, et al. Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4 A [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 648-654. (in Chinese)
- [8] Yin R Y, Han W, Gao Z Q, et al. The evaluation of FY-4 A's geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) long-wave temperature sounding channels using the GRAPES global 4 D-Var [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146: 1-18.
- [9] Han Y, Revercomb H, Cromp M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12734-12748.
- [10] Kan W L, Dong P M, Zhang Z Q, et al. Development and application of ARMS fast transmittance model for GIIRS data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 251: 107025.
- [11] Ren H. Assimilation of FY4 A/GIIRS infrared water vapor channels radiances and its application in regional Numerical Weather Prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] Geng X W, Min J Z, Yang C, et al. Analysis of FY-4 A AGRI radiance data bias characteristics and a correction experiment [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(4): 679-694. (in Chinese)
- [13] Zhuge X, Zou X, Weng F, et al. Dependence of simulation biases at AHI surface-sensitive channels on land surface emissivity over China [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35: 1283-1297.
- [14] Wang A, Barlage M, Zeng X, et al. Comparison of land skin temperature from a land model, remote sensing, and in situ measurement [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119: 3093-3106.