

新息增量法评估 FY-3E/HIRAS-II 观测质量

陈宏涛, 官莉*

(南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要: FY-3E/HIRAS-II 作为世界上第一个晨昏轨道的星载红外高光谱仪器, 评估其观测资料质量对提高资料同化分析场和全球数值天气预报精度具有十分重要的作用。本文基于 2021 年 12 月-2022 年 1 月及 2022 年 3 月共 35 天的 HIRAS-II 观测, 采用新息增量法检验了其在轨辐射观测资料质量, 按陆地和洋面分别统计了 O-B 偏差和标准差的分布特征; 进一步匹配相同时间段、相同区域的 MetOp-B/IASI 观测资料, 使用双重差异的 O-B 法分析了 HIRAS-II 观测资料质量, 可消除偏差中辐射传输模式模拟的影响。结果表明, 不论海洋还是陆地, HIRAS-II 长波与中波大部分通道的 O-B 平均偏差均小于 0.5 K、标准差在 1 K 以内, 陆地上标准差比洋面偏大(尤其是窗区通道)。664~665 cm^{-1} CO_2 吸收带和 1 300~1 680 cm^{-1} 水汽吸收带, 由于再分析资料的偏差引起 RTTOV 模拟的辐射值存在系统性误差, 使得偏差较大; 980~1 080 cm^{-1} O_3 吸收带和 1 300 cm^{-1} CH_4 吸收带附近较大的偏差是由于辐射传输模式 RTTOV 中吸收气体浓度采用固定的气候廓线值造成的, 这些波段与 MetOp-B/IASI 相比的 double O-B 偏差均趋近于 0 K, 说明 O-B 偏差主要是由于辐射传输模式模拟误差造成的, 而不是仪器观测的质量低。短波大部分通道的 O-B 平均偏差在 -2 K~2 K 之间, 标准差在 2 K 以内。1 920 cm^{-1} 附近通道由于是仪器中波与短波的交界处, 采用的探测器不同造成较大的 O-B 偏差。2 267~2 380 cm^{-1} 较大的偏差是由于 RTTOV 模拟亮温时没有考虑非局地热力平衡 NLTE 效应的影响。波数大于 2 400 cm^{-1} 的短波波段由于太阳污染使得偏差和标准差都逐渐增大。HIRAS-II O-B 偏差随扫描角存在不对称现象, 使用时需要进行扫描角偏差订正。

关键词: FY-3E/HIRAS-II; RTTOV; 新息增量法; 观测质量评估
中图分类号: O43 文献标识码: A

Evaluation of observation quality of FY-3E/HIRAS-II using the innovation vector method

CHEN Hong-Tao, GUAN Li*

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: FY-3E/HIRAS-II is the first early morning orbiting infrared hyperspectral instrument in the world. Evaluating the quality of its observation data plays a very important role in improving the data assimilation and the accuracy of global numerical weather prediction. Based on the 35 days of HIRAS-II observations from December 2021 to January 2022 and March 2022, this paper uses the innovation vector method to assess the quality of the on-orbit observation data. The distribution characteristics of O-B deviation and standard deviation are calculated by land and ocean respectively. Further matching MetOp-B/IASI observation data in the same time period and in the same region, the double-difference method is used to analyze the quality of HIRAS-II observation data, which can eliminate the influence of radiation transfer mode simulation deviation. The results show that the O-B average deviation of long wave and medium wave in most channels is less than 0.5 K, and the standard deviation is within 1 K. The standard deviation on land is larger than that on ocean (especially for window channels). Due to the deviation of ERA5 reanalysis data, the radiation value simulated by RTTOV has a systematic error in the 664-665 cm^{-1} CO_2 absorption band and the 1 300-1 680 cm^{-1} water vapor absorption band, which makes the deviation larger, and the double O-B bias in these bands compared with MetOp-B/IASI is close to 0 K, indicating that the O-B bias is mainly caused by the simulation error of the radiation transfer mode, rather than the quality of instrument observation.

收稿日期: 2023-01-06, 修回日期: 2023-08-24

Received date: 2023-01-06, Revised date: 2023-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(41975028)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41975028)

作者简介(Biography): 陈宏涛(1999-), 男, 福建龙岩人, 在读硕士研究生, 主要研究领域为卫星资料的遥感与应用. E-mail: 20211205002@nuist.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: liguan@nuist.edu.cn

er than the low quality of the instrument observation. The large deviation near the $980\text{--}1\,080\text{ cm}^{-1}$ O_3 absorption band and the $1\,300\text{ cm}^{-1}$ CH_4 absorption band is caused by the use of fixed climate profile values in RTTOV. The O-B average deviation of short wave in most channels is between -2 K and 2 K , and the standard deviation is within 2 K . The channels near $1\,920\text{ cm}^{-1}$ are the junction of medium wave and short wave of the instrument, so different detectors will cause large O-B deviation. The large deviation of $2\,267\text{--}2\,380\text{ cm}^{-1}$ due to the fact of the NLTE effect (Non-local Thermodynamic Equilibrium) is not taken into account when RTTOV simulates the brightness temperature. The deviation and standard deviation of channels greater than $2\,400\text{ cm}^{-1}$ increase gradually due to solar pollution. HIRAS-II O-B deviation is asymmetric with the scanning angle, so it is necessary to correct the scanning angle deviation when using HIRAS-II data.

Key words: FY-3E/HIRAS-II, RTTOV, innovation vector method, evaluation of observation quality

引言

星载红外高光谱大气探测仪作为地球观测系统的重要组成部分,能够获取高精度、高光谱分辨率的全球气象观测资料,其观测资料常被应用于大气温湿廓线反演、资料同化、气候研究等工作^[1]。卫星数据应用于数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)同化系统之前,正确量化其红外通道的偏差十分重要,同时也是构建长期红外高光谱基准数据集的基础^[2]。

风云3号E星(FY-3E)作为世界上第一颗晨昏轨道气象卫星,于2021年7月5日成功发射,有效补充了6 h同化时间窗内卫星观测资料的空白,实现了6 h同化窗内卫星资料100%全球覆盖。其搭载的高光谱红外大气探测仪-II(Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder-II, HIRAS-II)仪器是FY-3D红外高光谱仪器HIRAS的延续,相比D星,其空间分辨率、灵敏度和定标精度都有所提升,有望成为红外遥感仪器的比对参考仪器^[3],评估其红外辐射精度对提高和改进全球数值天气预报精度具有十分重要的意义。

评估星载新仪器辐射定标精度常用的方法有:将高光谱分辨率的探测仪与低光谱、高空间精度的成像仪光谱匹配辐射观测进行比较的交叉定标法、比较不同卫星平台同类仪器在星下点视场同时观测辐射值偏差的瞬时星下点交叉比对(Simultaneous Nadir Overpass, SNO)法、基于快速辐射传输模式模拟亮温B与星载光谱仪器观测数据O比对的新息增量法(O-B法)、双重差异法(double O-B)等。Chen等人基于搭载于日本静止卫星Himawari-8上的先进葵花卫星成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)和FY-3E同平台的中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager-Low Light, MERSI-LL)观测,将HIRAS-II观测光谱匹配到成像

仪通道上进行了交叉评估^[4]。廖翼等以Metop-B/红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)的高光谱探测资料为基准,利用SNO法评估了HIRAS-II的在轨光谱数据质量^[5]。Li等人利用快速辐射传输模式RTTOV(Radiative Transfer for TOVS, RTTOV)和社区辐射转移模型CRTM(Community Radiative Transfer Model, CRTM)对跨轨红外大气测深仪(Cross-track Infrared Sounder, CrIS)的399个典型通道用O-B法进行了偏差分析^[6]。Andrés等人通过RTTOV建立模拟观测数据库,评估了新一代高光谱红外大气探测仪IASI-NG的辐射精度^[7]。Wu等通过RTTOV模拟背景场数据,客观评估了中国第一代红外高光谱大气探测仪HIRAS的辐射定标精度^[8]。Zhang等人使用O-B法和double O-B法评估了HIRAS-II辐射定标精度^[9]。

匹配成像仪观测的交叉定标法由于成像仪的光谱分辨率很低,高光谱的探测仪辐射观测要匹配到低光谱分辨率的成像仪上,因此难以刻画高光谱HIRAS-II辐射定标精度精细的谱分布特征。SNO法的优点在于可以精确地评估仪器在轨光谱观测质量,但是由于极轨卫星轨道特点,匹配对位的仪器搭载于不同卫星平台,能满足时空匹配阈值的瞬时星下点观测视场较少且均位于极区,在目前HIRAS-II业务运行时间较短的限制下无法获取较多的观测统计样本。基于快速辐射传输模式模拟亮温B与星载光谱仪器观测数据O比对的新息增量法(O-B)已经成为定量星载光谱仪器红外通道精度最有效的方法之一,不仅可以全面地评估仪器偏差谱特征,还能够获得在整个大气条件范围内的足够样本量进行分析。新息增量法是将仪器观测辐射值O与用辐射传输模式模拟的辐射值B进行比较,如果观测精度和辐射传输模式模拟精度都很高,则两者的差值O-B接近0。O-B出现偏差可能来源于传感

器校准误差和辐射传输模式(Radiative Transfer Mode, RTM)模拟误差等,而辐射传输模式需要数值预报模式NWP大气状态变量预报场或再分析场作为输入,因此NWP预报误差和代表性误差也会间接引起O-B偏差。而使用两个同类仪器的double O-B法,如将HIRAS-II的O-B与IASI再进行比较,就可以消除辐射传输模式带来的系统偏差,两者O-B的差就是由于各自观测质量的差异引起的。

FY-3E/HIRAS-II投入业务时间较短、有效观测资料较少,对其观测资料质量评估的文献还很少。因此,本文基于2021年12月-2022年1月及2022年3月共35天的HIRAS-II观测,采用O-B新息增量法和double O-B法,通过统计O(观测)和B(模拟)亮温偏差特征来评估其辐射观测质量,同时细致、深入地分析偏差来源。

1 研究所用的资料和模式

1.1 仪器及数据介绍

HIRAS-II是一台干涉分光式傅里叶变换光谱仪,在距地面836 km的高空轨道上运行,最大的扫描张角为 $\pm 50.4^\circ$,扫描周期为8 s。HIRAS-II扫描镜以跨轨横向扫描方式对地观测,每个扫描行观测32个驻留视场(Field of Regard, FOR):28个连续对地目标、2个冷空和2个星上黑体目标。每个驻留视场包括9个3×3排列的探元(Field of View, FOV),星下点空间分辨率为14 km,如图1所示,图中箭头所示为卫星飞行方向及星下点位置。图1(a)分别以一段升轨和降轨为例,给出了FOR1~FOR28的位置分布,图1(b)示意了每个FOR中3×3个FOV探元的排列。HIRAS-II覆盖红外3.92~15.38 μm 波段共3041个连续通道,光谱分辨率为0.625 cm^{-1} 。本文使用2021年12月18日至2022年1月14日以及2022年3月15日至21日共计35天的HIRAS-II Level 1级的辐射观测资料,数据来源自风云卫星遥感数据服务网(<http://data.nsmc.org.cn>)。

采用搭载于欧洲气象极轨气象卫星MetOp-B上的IASI作为双重差异法的参考仪器,IASI是一台步进扫描式迈克尔逊干涉仪,运行在距地面817 km的高空上,最大扫描张角为 $\pm 47.85^\circ$ 扫描周期为8 s。IASI一次完整的对地扫描观测30个驻留视场,每个驻留视场包括4个2×2排列的探元,星下点空间分辨率为12 km。本文使用的MetOp-B/IASI的L1C全光谱数据包括在645~2760 cm^{-1} 红外波段8461个通道连续观测,光谱分辨率为0.25 cm^{-1} ,下载地址

为<https://archive.eumetsat.int>。

ERA5再分析资料是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的全球数据集,来源于ECMWF的哥白尼气候变化服务中心(<https://cds.climate.copernicus.eu>)。ERA5再分析资料为格点数据,空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h,从1000~1 hPa分为37垂直层,包括的大气状态参数主要有:温度、湿度和臭氧等垂直廓线。

1.2 快速辐射传输模式

RTTOV是由欧洲中期天气预报中心开发的一种被广泛使用的快速辐射传输模式,适用于可见光、红外和微波观测的卫星辐射计、光谱仪和干涉仪,根据用户输入的大气和地表的状态变量模拟卫星观测辐射数据。本文使用RTTOV v12.3的前向模式来快速模拟FY-3E/HIRAS-II亮温,需要输入的大气状态参数廓线、地表参数和卫星姿态等变量,详见表1。

ERA5再分析资料与HIRAS-II观测的时空匹配:将空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的ERA5格点数据插值到HIRAS-II的观测视场FOV上(选择距离其最近的4个格点ERA5再分析数据进行双线性插值);ERA5再分析资料与HIRAS-II观测时间差控制在30 min以内。

1.3 晴空视场检测方案

RTTOV前向模式在有云情况下的模拟具有很大的不确定性,因此筛选出置信度高的晴空视场是保证模拟精度的前提。由于FY-3E同平台的成像仪和探测仪都没有正式发布的云检测产品,而一般常用的选取HIRAS-II几个窗区通道的O-B偏差用阈值3~5 K来筛选出晴空视场的方法误判率较高^[9]。本文利用时间、空间匹配的FY-4A/先进地球同步辐射成像仪AGRI(Advanced Geostationary Radiation Imager, AGRI)云检测产品来进行FY-3E/HIRAS-II视场的云检测。FY-4A/AGRI Level 2级4 km的云检测产品来源于风云卫星遥感数据服务网(<http://data.nsmc.org.cn>)。

两个仪器处于不同的卫星平台,联合应用前需要进行时空匹配。当卫星观测目标的视角较大时,视场会变形,空间分辨率降低。为了尽量排除视场偏差的影响,本文只选取静止平台FY-4A/AGRI卫星天顶角小于 60° 的视场。极轨卫星FY-3E每日约7条轨道经过地球静止卫星FY-4A/AGRI观测区域,

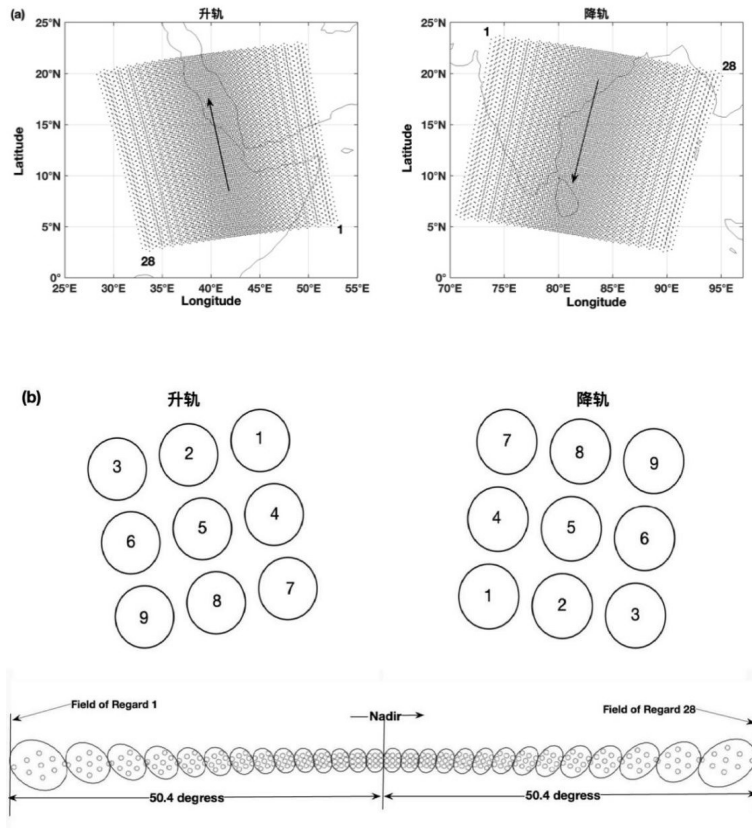


图1 FY-3E/HIRAS-II(a)升降轨每条扫描线以及每个驻留视场的分布(图中箭头为卫星飞行方向), (b)每个FOR中9个FOV的分布

Fig. 1 (a) The distribution of each scan line and each FOR of FY-3E/HIRAS-II (arrows refer to the satellite flight direction), (b) the distribution of 9 FOVs in each FOR

表1 RTTOV模式输入的参数

Table 1 Input parameters for RTTOV forward mode

类型	变量	单位	数据来源
大气参数	气压	hPa	ERA5再分析资料
	温度	K	
	水汽	ppmv	
	臭氧	ppmv	
地表参数	2 m 温度	K	ERA5再分析资料
	2 m 水汽	ppmv	
	10 m 风速	m/s	
	地表类型		
地理几何参数	海拔高度	km	FY-3E/HIRAS-II
	经纬度		
	卫星天顶角		
	卫星方位角	Degrees	
	太阳天顶角		
	太阳方位角		

而AGRI大多每隔15 min完成一次全圆盘观测,将两者观测时间差控制在15 min以内。探测仪和成

像仪匹配的关键是找到两者一致的观测视场。HIRAS-II视场空间分辨率较粗,星下点为14 km,AGRI云检测产品的空间分辨率为4 km,因此一个HIRAS-II视场中大约覆盖了4×4个AGRI像元,当这些空间匹配落在HIRAS-II视场中的AGRI像元全部为晴空时,将该HIRAS-II视场作为晴空视场。

基于上述匹配步骤,对2021年12月18日至2022年1月14日以及2022年3月15日至21日共计35天的HIRAS-II观测数据进行匹配,共获得177886对晴空样本(其中:海洋样本115766对,陆地样本62120对)。统计其O-B平均偏差 $ME_{hiras-2}$

$$(ME_{hiras-2} = \frac{\sum_{i=1}^n (BT observation_i - BT simulation_i)}{n})$$

$$\text{和偏差标准差 } Std(Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (BT diff_i - ME_{hiras-2})^2}{n-1}},$$

n 为样本数量)。

1.4 与IASI数据匹配

MetOp-B/IASI与FY-3E/HIRAS-II的光谱分辨率不同,不能直接比对其对应的辐射值,需要对高光谱分辨率的IASI光谱进行傅里叶转换,具体转换步骤如下:1)将IASI光谱通过傅里叶转换为时域干涉图;2)基于HIRAS-II的干涉图光程差对IASI干涉图进行采样截断;3)通过傅里叶变换将截断处理后的IASI干涉图转化为频域光谱;4)对傅里叶转换后的IASI光谱做Hanning切趾处理。

IASI观测数据与ERA5再分析资料的时空匹配、晴空视场检测等步骤均与HIRAS-II相同,将同时段共35天的IASI观测数据匹配后得到129540对海洋晴空样本。统计其O-B平均偏差 ME_{iasi} ,并计算与HIRAS-II的double O-B偏差 DB ($DB = ME_{hiras-2} - ME_{iasi}$)。

2 偏差分析

图2为2021年12月08日20:10在轨测得的FY-3E/HIRAS-II 9个FOV的等效噪声温度(Noise Equivalent Delta Temperature, NEdT)谱分布,红线为在背景温度280 K下的灵敏度指标。从图中可看出,大部分波段HIRAS-II在轨观测噪声都小于仪器设计指标,除了波数大于 2400 cm^{-1} 的短波波段。FOV1的观测噪声在波数大于 1920 cm^{-1} 的短波波段超过指标较严重,NEdT最大达到6 K,因此以下统计结果均剔除了FOV1样本,只对其余8个视场样本数据进行分析。建议用户在使用FY-3E/HIRAS-II观测资料时FOV1谨慎使用。

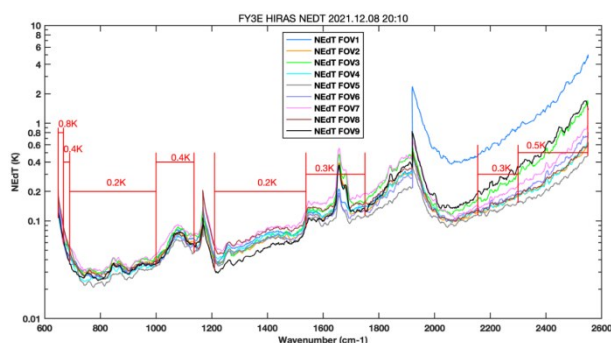


图2 2021年12月8日FY-3E HIRAS-II的NEdT谱分布
Fig. 2 The NEdT distribution of FY-3E HIRAS-II on December 8, 2021

2.1 O-B偏差分布谱特征

针对177886对FY-3E/HIRAS-II晴空样本,根据不同地表类型分别统计其O-B偏差和偏差标准

差。图3和图4分别显示了O-B平均偏差和偏差标准差随光谱的分布,其中红线为陆地样本,蓝线为海洋样本。从图中可看出,除 $980\sim 1080\text{ cm}^{-1}$ 的 O_3 吸收带和 $2400\sim 2550\text{ cm}^{-1}$ 的 N_2O 吸收带外,海洋与陆地样本O-B的平均偏差并无明显区别,但两者的标准差相差较大,陆地明显大于洋面,尤其是窗区通道,强吸收带时两者的值接近。这是由于洋面相对均匀,卫星视场内下垫面较均一,RTTOV计算的地表发射率相对精确,而陆地下垫面相对复杂,RTTOV模拟时有一定误差。

对于长波通道,除 $664\sim 665\text{ cm}^{-1}$ 的 CO_2 和 $980\sim 1080\text{ cm}^{-1}$ 的 O_3 吸收带外,其余通道的O-B偏差均小于0.4 K,海洋Std小于1 K,陆地Std小于2 K。其中 667 cm^{-1} 处出现高达-4.8 K的负偏差,这是由于ECMWF再分析资料对流层中上层温度系统性高估造成的模拟B偏高,所以出现较大负偏差^[10]。 $980\sim 1080\text{ cm}^{-1}$ 臭氧吸收带出现接近2 K的正偏差,而标准差又不大,这是由于RTTOV中没有考虑臭氧的时空分布特征,缺省使用的是固定的气候廓线,使得模拟的B有偏差^[11]。 $1300\sim 1305\text{ cm}^{-1}$ 通道负偏差也较大,该波段是 CH_4 强吸收带,模式中 CH_4 使用的也是固定的气候廓线,使模拟的B存在偏差。中波水汽通道 $1400\sim 1680\text{ cm}^{-1}$ 大约有0.5 K的正偏差,这些通道的权重函数峰值高度在对流层中高层,ECMWF再分析资料存在对流层中高层水汽含量的高估,导致了该正偏差,而标准差基本都稳定在1 K^[12]。短波大部分通道的O-B平均偏差在-2 K~2 K之间,除 $2267\sim 2380\text{ cm}^{-1}$ 受到非局地热力平衡(Non-Local Thermodynamic Equilibrium, NLTE)影响的通道外,其余通道Std均在2 K以内。值得注意的是, 1920 cm^{-1} 附近偏差接近-6 K、标准差高达5 K,该波段刚好是HIRAS-II仪器中波和短波通道的交界处,仪器在中波使用的是光生伏特型碲镉汞探测器,短波使用的是光生伏特型碲化铟探测器,中波和短波所用探测器不同,造成光谱交界处观测误差较大^[13]。 2077.5 cm^{-1} 通道的O-B平均偏差异常高(达到7 K),廖翼等利用METOP-B/IASI数据通过SNO法评估FY-3E/HIRAS-II的光谱精度时在该通道也发现了高估现象^[5],说明HIRAS-II该通道仪器系统性观测误差较大,建议用户不要使用该通道。 $2200\sim 2267\text{ cm}^{-1}$ 随权重函数峰值高度的增加,O-B平均偏差和Std逐渐增大,O-B偏差最大至-4.5 K、Std最大至3.4 K。 $2267\sim 2380\text{ cm}^{-1}$ 较大

的偏差是受到非局地热力平衡(NLTE)效应的影响,在下面3.3节将详细分析。波数大于 $2\ 400\text{ cm}^{-1}$ 的短波波段由于太阳影响的加入使得偏差和标准差都逐渐增大。

如图1(b)中所示每个FY-3E/HIRAS-II FOR是由9个FOV组成的,因此分别对每个FOV统计了O-B偏差和标准差的谱分布,结果FOV2~FOV9的谱分布不论是在洋面上还是陆地上都相差不大(图略),与图3和图4中数值接近。

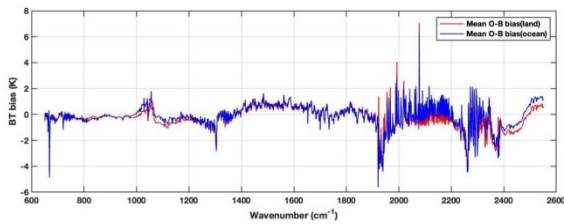


图3 FY-3E/HIRAS-II O-B平均偏差随光谱的分布(红线为陆地,蓝线为海洋)

Fig. 3 The distribution of FY-3E/HIRAS-II O-B mean deviation with spectrum (the red line is the land, the blue line is the ocean)

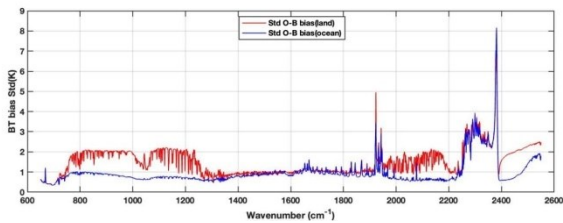


图4 FY-3E/HIRAS-II O-B偏差标准差随光谱的分布(红线为陆地,蓝线为海洋)

Fig. 4 The distribution of FY-3E/HIRAS-II O-B standard deviation with spectrum (the red line is the land, the blue line is the ocean)

2.2 O-B偏差随扫描角的变化

FY-3E/HIRAS-II对地观测采用的是扫描镜跨轨横向扫描,每个扫描行包括28个连续的对地驻留视场(FOR),最大的扫描张角为 $\pm 50.4^\circ$,如图1(a)所示。FY-3E是极轨卫星,轨道倾角为 98.75° ,不是严格的 90° ,所以同一条扫描线上从右FOR1到左FOR28视场约有 $3\sim 4^\circ$ 的纬度差别。为了分析O-B偏差随扫描角的变化,以3个典型通道 900 cm^{-1} 、 $1\ 855\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 500\text{ cm}^{-1}$ 为例分别给出了洋面和陆地上O-B平均偏差和偏差标准差随扫描角的变化,如图5~7所示。

图5为洋面上长波 900 cm^{-1} 窗区通道不同FOV

的O-B平均偏差(实线)和偏差标准差(虚线)随扫描位置的分布,横坐标为每条扫描线上驻留视场的位置(即扫描角),星下点为FOR14和15中间,左纵坐标为O-B差值,右纵坐标为样本数量,柱状线给出了每个FOR的统计样本数。从图5可以看出,O-B平均偏差和偏差标准差在所有FOV都呈现出两边大、中间小的趋势,即随着扫描角的增大偏差增大。FOV8和FOV9在扫描到卫星飞行方向左侧最大扫描角的两个视场(即FOR27和28)时偏差增大很快,建议用户在同化HIRAS资料时左右最大扫描角的2个视场不要使用。值得注意的是,每个FOV都存在一定相对于星下点两侧O-B偏差不对称的现象,即第1个FOR的O-B偏差略微小于第28个FOR,该现象在陆地样本中尤为明显,左右两侧的差值会高达1 K(图略)。

中波 1855 cm^{-1} 为强水汽吸收通道,权重函数峰值高度为500 hPa,各个FOV洋面上O-B平均偏差和偏差标准差随扫描位置的分布如图6所示。从实线可看出偏差也存在星下点两侧分布不对称的现象,尤其是FOV3、6、9。由于洋面上下垫面比较均匀,而且该通道权重函数峰值高度比较高,除左右扫描角最大的两个驻留视场外,标准差基本不随扫描角变化。

图7为短波 $2\ 500\text{ cm}^{-1}$ 窗区通道各个FOV(a)海洋、(b)陆地O-B平均偏差和偏差标准差随扫描位置的分布。洋面上驻留视场FOR25~28(在卫星飞行方向最左侧)偏差和标准差剧增,这是由于该通道易受到太阳短波辐射的影响。Zhang等人统计了FY-3E/HIRAS-II太阳闪烁角(Sun-glint Angle)的全球分布,发现太阳闪烁角小于 40° 的样本都集中在扫描线上较低纬度一侧,即第25至28 FOR^[9],由于镜面反射太阳辐射的干扰使得观测辐射大大增多,造成O-B较大的正偏差,而向右侧扫描时则不存在镜面反射太阳辐射的污染。除FOR25~28以外,偏差和标准差几乎不随扫描角改变。陆地上时(图7(b))镜面反射太阳辐射的影响没有洋面那么突出,但最左侧几个扫描视场还是呈现了较大正偏差的特征。陆地时扫描到右侧是正偏差,扫描到左侧时一般是负偏差。

上述通道出现的星下点两侧偏差不对称现象,主要是因为极轨卫星轨道倾角不是 90° 引起的,扫描线两侧的纬度差使得视场的纬度不一致,造成HIRAS-II观测亮温一侧偏高、一侧偏低,进而引起

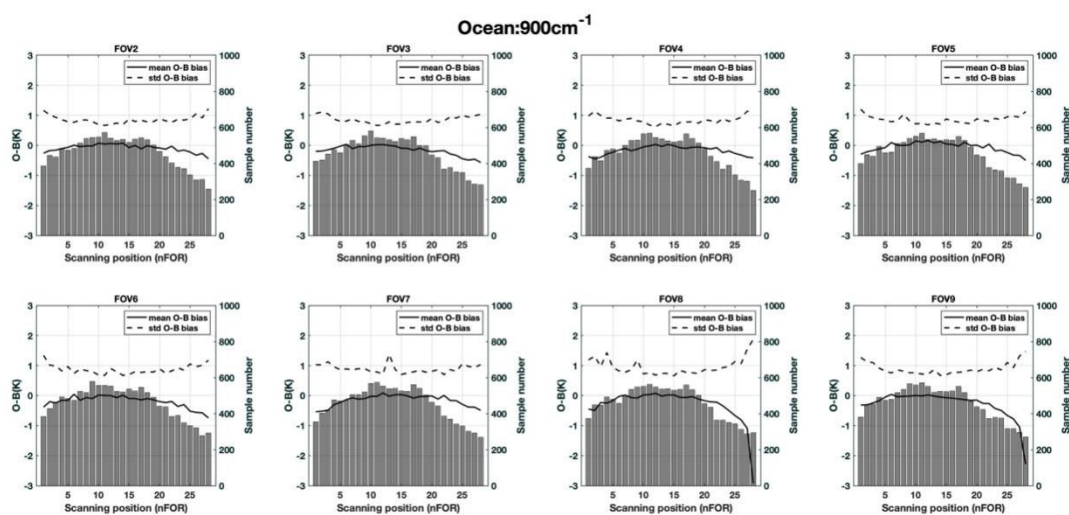


图5 FY-3E/HIRAS-II长波窗区通道 900 cm^{-1} 各个FOV的O-B平均偏差和偏差标准差随扫描角的分布

Fig. 5 The distribution of O-B mean deviation and deviation standard deviation of each FOV in the FY-3E/HIRAS-II long wave 900 cm^{-1} window channel with the scanning angle

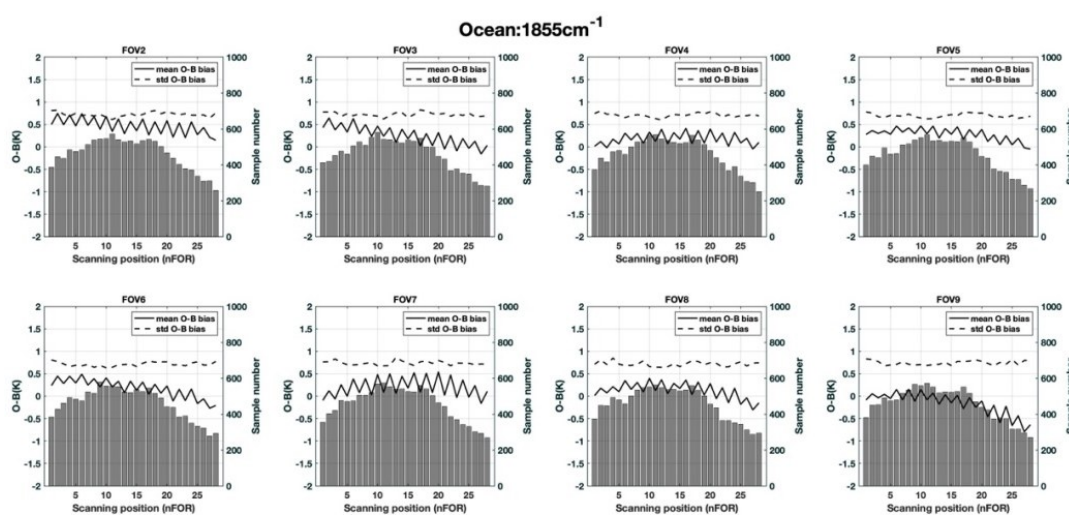


图6 同图5,通道 1855 cm^{-1}

Fig. 6 Same as Fig. 5, the 1855 cm^{-1} channel

O-B偏差的不对称分布,且偏差不对称程度随着通道权重函数峰值高度的降低而增大。相对而言FOV3、6、9偏差不对称现象较明显。

2.3 非局地热力平衡分析

从图3和4可看出 $2267\sim 2380\text{ cm}^{-1}$ 波段HIRAS-II O-B的偏差和标准差都比较大。非局地热力平衡效应通常发生在白天的高层大气中(40 km以上),由于高层大气比较稀薄,气体分子碰撞频率降低,而太阳辐射作用导致的分子能级跃迁频率大于其碰撞速率,使卫星观测辐射明显大于局地热力平衡假设下通过普朗克黑体辐射定律计算的辐

射^[15]。由于HIRAS-II是全新仪器,其NLTE-correction模块还没有开发,因此本文所用的快速辐射传输模式在模拟B时没有考虑NLTE的影响。为了定量分析NLTE效应对模拟亮温的影响,以METOP-B/IASI为例,在RTTOV中NLTE-correction模块打开与关闭时模拟的亮温差,如图8(b)所示(黑色虚线为拟合曲线),可以看出在 $2267\sim 2380\text{ cm}^{-1}$ 波段模拟亮温因NLTE效应引起的误差在 $0\sim 12\text{ K}$ 之间。由于NLTE效应受太阳影响仅在白天存在,为分析NLTE效应带来的偏差有多大,分别统计了HIRAS-II白天和黑夜O-B的平均偏差,图8(a)显示了两

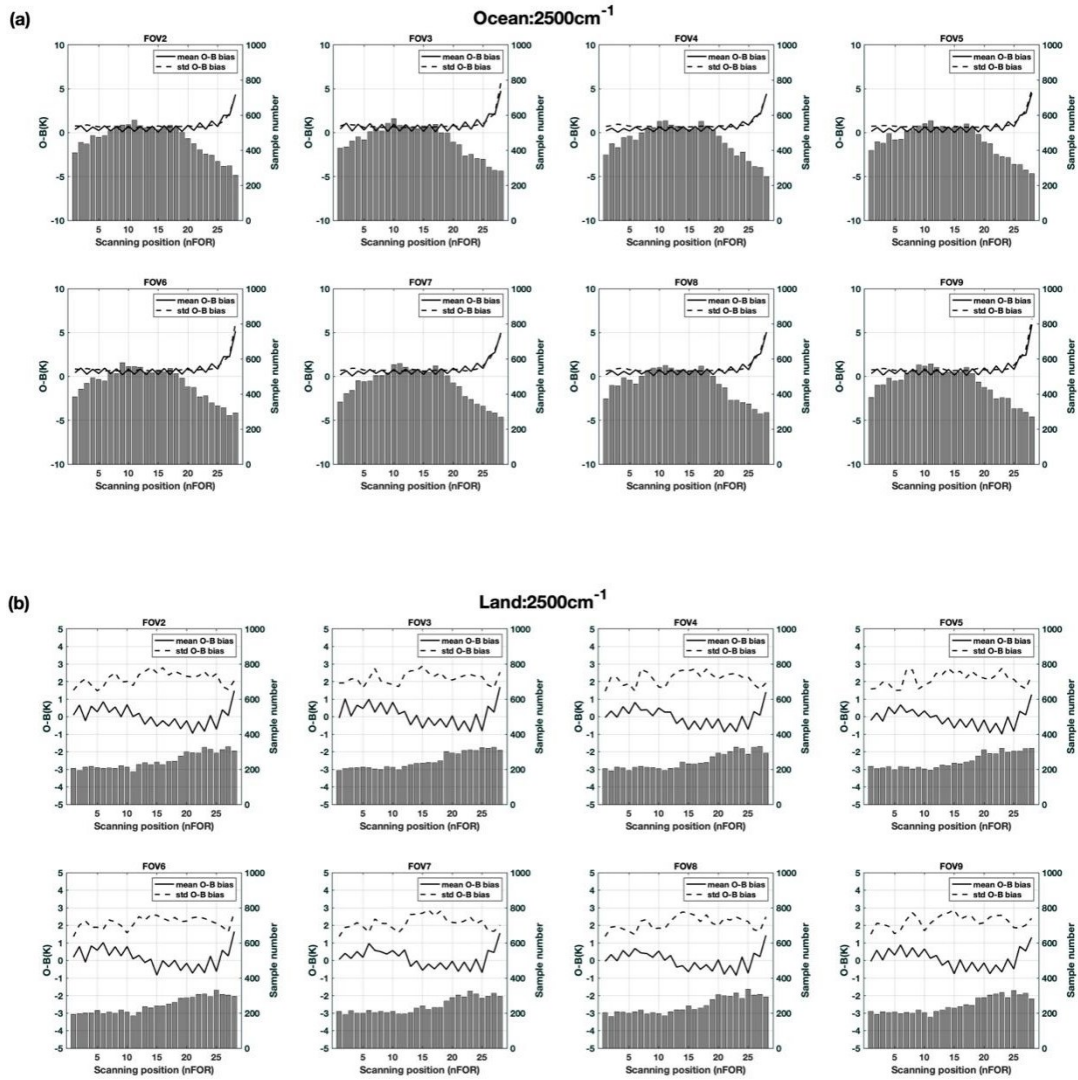


图7 FY-3E/HIRAS-II 短波红外通道 2500 cm^{-1} 各个 FOV (a)海洋和(b)陆地 O-B 平均偏差和偏差标准差随扫描位置的分布

Fig. 7 The distribution of O-B mean deviation and deviation standard deviation of each FOV in the FY-3E/HIRAS-II short wave 2500 cm^{-1} channel with the scanning angle, (a) ocean and (b) land

的差(黑色虚线为拟合曲线),可以看出白天与黑夜由 NLTE 效应引起的亮温差在 $0\sim 6\text{ K}$ 之间。对比图 8(a)和(b)可以发现,两者拟合曲线的变化趋势基本一致,且与图 4 中标准差的分布形式也接近,只是 HIRAS-II 数值减少了一半。这是因为 HIRAS-II 搭载于晨昏轨道卫星,过境时间为 $05:30$,而 METOP-B/IASI 搭载于上午星,过境时间为 $09:30$,此时受太阳辐射影响比晨昏时大,因此 NLTE 效应对 IASI 影响更大。可以初步认为 HIRAS-II 的 O-B 平均偏差和偏差标准差在 $2\ 267\sim 2\ 380\text{ cm}^{-1}$ 波段突然增大的原因是由于 RTTOV 模拟亮温时没有考虑到 NLTE 效应的影响,该波段的观测质量还是可靠的。

2.4 Double O-B 分析

O-B 法采用基于 ERA5 再分析资料的 RTTOV 模式模拟结果作为评估标准,不可避免引入 NWP 模式预测误差和快速辐射传输模式模拟误差,为更完善地评估 HIRAS-II 在轨辐射观测质量,基于相同时间段、相同区域的 MetOp-B/IASI 观测数据使用 double O-B 方法比较两个仪器的 O-B 差别,这样做可以消除辐射传输模式模拟引起的系统误差。

基于匹配的洋面上 129540 对样本,图 9(a)、(b)和(c)分别显示了 HIRAS-II O-B 平均偏差、IASI O-B 平均偏差以及 double-O-B 偏差随光谱的分布。从图 9(a)和(b)可以明显看出除短波通道外,HI-

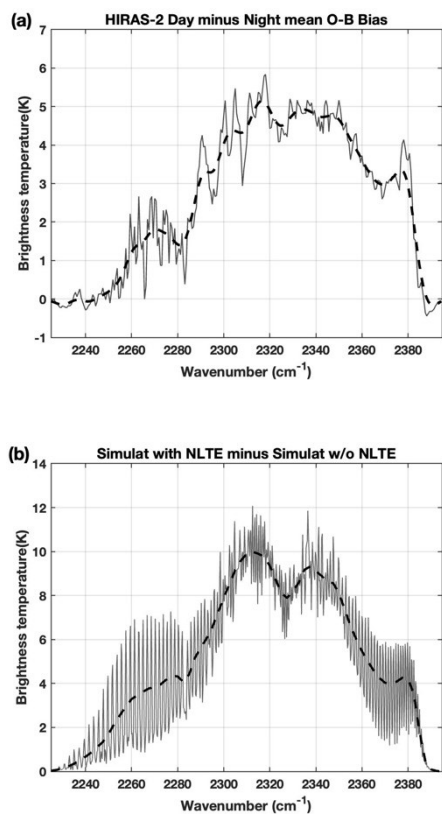


图8 非局地热力平衡效应,(a) HIRAS-II白天和黑夜O-B偏差的差和(b)IASI是否考虑NLTE效应对模拟亮温的影响
Fig. 8 Non-local thermodynamic equilibrium effect, (a) the difference between day and night HIRAS-II O-B deviation and (b) the influence of NLTE effect on IASI simulated brightness temperature

RAS-II与IASI的O-B平均偏差大小及分布基本一致,IASI在 $2\ 267\sim 2\ 380\ \text{cm}^{-1}$ 波段受到更强烈的NLTE效应影响O-B平均偏差明显大于HIRAS-II,最大达到8 K。如图9(c)所示,除 $1\ 920\sim 2\ 080\ \text{cm}^{-1}$ 波段和 $2\ 080\ \text{cm}^{-1}$ 以上波段外,HIRAS-II与IASI的double O-B偏差基本都在0.5 K以内。值得注意的是,上述2.1部分讨论的由于模拟B造成的 $667\ \text{cm}^{-1}$ 处高达4.8 K的负偏差、 $980\sim 1\ 080\ \text{cm}^{-1}$ 臭氧吸收带接近2 K的正偏差、 $1\ 300\sim 1\ 305\ \text{cm}^{-1}$ 通道CH₄强吸收带的负偏差、以及中波水汽通道 $1\ 400\sim 1\ 680\ \text{cm}^{-1}$ 的正偏差均趋近于0 K,说明这些波段的HIRAS-II观测资料还是十分可靠的。

3 结论

本文基于2021年12月-2022年1月及2022年3月共35天的HIRAS-II观测,采用新息增量法对HI-

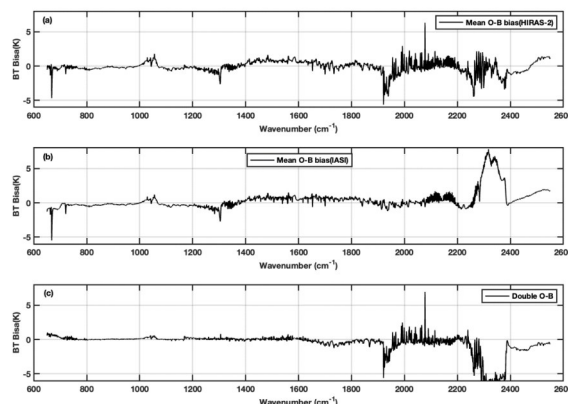


图9 偏差谱分布,(a) HIRAS-II,(b) IASI,(c) double O-B
Fig. 9 The bias spectrum of (a) HIRAS-II, (b) IASI, (c) double O-B

RAS-II在轨辐射观测质量进行了评估,得出以下结论:

1) HIRAS-II 3×3 探元阵列中视场FOV1在短波波段不论在轨观测误差NEdT还是O-B偏差都比较大,建议用户谨慎使用该视场的观测。

2) HIRAS-II长波与中波大部分通道的O-B平均偏差小于0.5 K,标准差在1 K以内。部分通道如 $664\sim 665\ \text{cm}^{-1}$ CO₂吸收带、 $980\sim 1\ 080\ \text{cm}^{-1}$ O₃吸收带和 $1\ 300\sim 1\ 680\ \text{cm}^{-1}$ 水汽吸收带,由于RTTOV模拟的辐射值存在系统性误差,出现偏差增大现象;短波大部分通道的O-B平均偏差在-2 K~2 K之间,标准差在2 K以内。

3) $1\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 附近通道(中波与短波的交界处)因为两个波段所用探测器不同,造成光谱交界处观测误差较大, $2\ 077.5\ \text{cm}^{-1}$ 由于HIRAS-II系统性观测误差造成近7 K的正偏差,建议用户不要使用这些通道。

4) $2\ 267\sim 2\ 380\ \text{cm}^{-1}$ 较大的偏差是由于RTTOV模拟亮温时没有考虑到NLTE效应的影响。波数大于 $2\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 的短波波段由于太阳污染使得偏差和标准差都逐渐增大。第25~28个FOR在短波波段易受到太阳镜面反射污染,因此建议用户不要使用第1~2个以及第25~28个驻留视场的观测资料。

5) HIRAS-II O-B偏差随扫描角存在不对称现象,使用时需要进行扫描角偏差订正。

6) HIRAS-II与IASI的double O-B偏差除个别短波通道外基本都在0.5 K以内;部分由于模拟B引起O-B偏差较大波段的double O-B值趋近于0 K,这些通道的观测资料用户可以使用。

References

- [1] Tianhang Yang, Xiuqing Hu, Hanlie Xu, *et al.* Radiation Calibration Accuracy Assessment of FY-3D Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder Based on Inter-Comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(11): 337-387.(杨天杭,胡秀清,徐寒列,等.基于交叉比对的风云三号D星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估[J].*光学学报*),2019,**39**(11):377-387.
- [2] Guan L, Ren X. The Observation Quality Assessment of Satellite borne Microwave Imager at New-added Frequency over East Asia Land [J]. *Trans. Atmos. Sci.*, 2018, **41**(04): 554-560.(官莉,任心怡.东亚陆地星载微波成像仪新增通道观测质量评估[J].*大气科学学报*),2018,**41**(04):554-560.
- [3] Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, *et al.* FY-3E: The First Operational Meteorological Satellite Mission in an Early Morning Orbit[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021,**01**:1-8.
- [4] Hongtao Chen, Li Guan. Assessing FY-3E HIRAS-II Radiance Accuracy Using AHI and MERSI-LL [J]. *Remote Sensing*, 2022,**14**(17): 4309.
- [5] Yi Liao, Guan Li. Spectrum Accuracy Evaluation of FY-3E Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder [J]. *Progress in Geophysics*, 2023,**38**(3):977-986).(廖翼,官莉. FY-3E 红外高光谱大气探测仪光谱资料精度评估[J].*地球物理学进展*),2023,**38**(3):977-986.
- [6] X Li, X Zou. Bias Characterization of CrIS Radiances at 399 Selected Channels with Respect to NWP Model Simulations[J]. *Atmospheric Research*, 2017, **8095**(17):1-7.
- [7] Javier Andrey-Andrés, Nadia Fourrié, Vincent Guidard, *et al.* A simulated observation database to assess the impact of the IASI-NG hyperspectral infrared sounder [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**:803 - 818.
- [8] Chunming Wu, Chengli Qi, Xiuqing Wu, *et al.* FY-3D HIRAS Radiometric Calibration and Accuracy Assessment [J]. *Remote Sensing*, 2020, **58**(06):3965-3976.
- [9] Chunming Zhang, Chengli Qi, Tianhang Yang, *et al.* Evaluation of FY-3E/HIRAS-II Radiometric Calibration Accuracy Based on OMB Analysis [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**:3222-3236.
- [10] M. Matricardi. An assessment of the accuracy of the RTTOV fast radiative transfer model using IASI data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**:6899-6913.
- [11] Li Guan, Wei Liu. Influence of Ozone Concentration on Simulated Brightness Temperature of Spaceborne High-spectral Infrared Atmospheric Sounder [J]. *Progress in Geophysics*, 2022,**37**(5):1818-1824.(官莉,刘薇.臭氧含量变化对星载红外高光谱探测仪亮度温度模拟的影响[J].*地球物理学进展*),2022,**37**(5):1818-1824.
- [12] X Zou, Characterization of Bias of Advanced Himawari Imager Infrared Observations from NWP Background Simulations Using CRTM and RTTOV [J]. *Atmospheric and oceanic technology*, 2016, **33**:2553-2567.
- [13] Tianhang Yang, Jianming Gu, Chunyuan Zhao, *et al.* Nonlinearity Correction of FY-3E HIRAS-II in Pre-launch Thermal Vacuum Calibration Tests [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(3): 598-607.(杨天杭,顾剑明,邵春沅,等. FY-3E/HIRAS-II 发射前热真空定标试验非线性校正[J].*红外与毫米波学报*),2022,**41**(3): 598-607.
- [14] Li Guan, Wenjing Lu. Scan Correction Scheme of FY-3A Microwave Atmospheric Humidity Sounder Radiance for Data Assimilation [J]. *Trans Atmos Sci*, 2016, **39**(3): 289-299.(官莉,陆文婧.风云三号卫星微波湿度计的扫描角偏差订正[J].*大气科学学报*),2016,**39**(3): 289-299.
- [15] Mengtao Yin. Bias characterization of CrIS shortwave temperature sounding channels using fast NLTE model and GFS forecast field [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, **121**:1248 - 1263.