

FY-4A/GIIRS 大气温度廓线产品质量评估

杜明斌¹, 崔林丽¹, 陆风^{2*}, 彭杰¹, 史军¹, 刘冬韡¹, 樊浩¹

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

2. 国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

摘要: 我国风云四号 A 星 (FY-4A) 携带高光谱红外干涉式大气探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS) 首次实现了地球静止轨道红外高光谱探测, 可连续获得大气温湿度廓线信息。基于常规无线电探空资料, 从产品的探测能力和精度方面对 2020 年 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线产品开展质量评估, 为产品应用和算法研究提供参考。结果表明: FY-4A/GIIRS 反演大气温度廓线探测能力在高度层次和月份统计上受云活跃度影响较大; 晴空条件下大气整层均方根误差约为 2 K, 700~1 000 hPa 的大气低层较大, 约 2.5 K, 偏差整层以负值为主; 月尺度质量评估可见夏秋两季明显优于冬春季, 有利于灾害性天气多发季节的监测; 有云条件下单个像元的温度廓线误差显著增大, 采用多像元 Cressman 客观分析可有效提高产品可用性; 低海拔地区温度廓线产品质量整体优于高海拔地区, 可极大地弥补我国东部、南部地区以及广阔的洋面上的探空资料的不足。

关键词: 高光谱; 质量评估; 温度廓线; FY-4A/GIIRS; 无线电探空

中图分类号: P407.6

文献标识码: A

Quality evaluation of FY-4A/GIIRS atmospheric temperature profile

DU Ming-Bin¹, CUI Lin-Li¹, LU Feng^{2*}, PENG Jie¹, SHI Jun¹, LIU Dong-Wei¹, FAN Hao¹

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, FengYun Meteorological Satellite Innovation Center (FY-MSIC), National Satellite Meteorological Center of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: FY-4A of China carries the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) to realize infrared hyperspectral sounding on a geostationary orbit for the first time, which can continuously obtain information of atmospheric temperature and humidity profiles. Based on the conventional radiosonde data, the quality of FY-4A/GIIRS atmospheric temperature profile products in 2020 is evaluated from the aspects of detection capability and accuracy, providing reference for product applications and algorithm research. The results show that the detection ability of the atmospheric temperature profile retrieved by FY-4A/GIIRS is greatly affected by cloud activity in the height level and monthly statistics. Under clear sky conditions, the root mean square error of the whole atmospheric layer is about 2 K, while the lower atmospheric layer of 700-1 000 hPa is relatively larger (about 2.5 K). The bias of the whole atmospheric layer is mainly negative. The quality assessment of different months shows that summer and autumn are obviously better than winter and spring, which is conducive to observation in the season with the frequent disastrous weather. The temperature profile error of a single pixel is obviously large under cloudy conditions, and the multiple-pixel Cressman objective analysis can effectively improve the product availability. The product quality of temperature profiles in low altitude areas is significantly better than that in high altitude areas, which can greatly make up for the shortage of sounding data in the eastern, southern regions of China and the vast ocean surface.

Key words: hyperspectral, quality evaluation, temperature profile, FY-4A/GIIRS, radiosonde

收稿日期: 2022-11-15, 修回日期: 2022-12-13

Received date: 2022-11-15, Revised date: 2022-12-13

基金项目: 中国气象局风云先行项目 (FY-APP-2021.0106), 国家自然科学基金 (41905007) 和上海市科委自然科学基金项目 (23ZR1447300)

Foundation items: Supported by China Meteorological Administration FengYun Application Pioneering Project (FY-APP-2021.0106), the National Natural Science Foundation of China (41905007) and Natural Science Foundation of Shanghai Science Technology Commission (23ZR1447300)

作者简介 (Biography): 杜明斌 (1983-), 男, 安徽太和人, 高级工程师, 硕士学位, 主要研究领域为 GNSS 气象和卫星遥感应用, Email: nyicer@hotmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): Email: lufeng@cma.gov.cn

引言

卫星遥感探测大气三维结构具有高空间覆盖率的特点,有效弥补海洋、山地以及沙漠等地区常规气象观测资料的不足^[1-3]。与其他探测手段相比,星载红外高光谱探测仪因具有高光谱分辨率和空间分辨率的优点,可获取丰富的大气光谱通道信息^[3-6]。高光谱分辨率使得载荷通道的权重函数峰值较窄,受到大气中臭氧、水汽等吸收成分的污染较小,因此可通过设置较大的通道数目显著提升大气探测垂直分辨能力^[7-8]。国际上在轨运行的高光谱探测仪器多为极轨卫星载荷^[4,9-10],我国新一代地球静止气象FY-4A/GIIRS是国际上第一台在静止轨道上以红外高光谱干涉分光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器,光谱范围为长波8.85~14.29 μm 、中短波4.44~6.06 μm ,具有1650个通道,水平分辨率为16 km,并首次使用32×4的矩阵视场以面阵扫描的方式最快可以每15分钟提供一次区域大气温湿度廓线观测^[7,11-12]。与极轨卫星同类载荷相比,FY-4A/GIIRS具有对固定区域探测和高频次动态探测的优势,能够连续动态监测快速变化的天气系统,对天气预报和气象保障工作,特别是数值天气预报意义重大^[13-15]。

开展FY-4A/GIIRS大气廓线产品质量评估对于我国静止卫星高光谱资料的产品研发和有效应用具有重要意义,尤其是大气温度廓线产品的质量分析。大气温度是大气热力学参数之一,在提高数值模拟预报和气候预测等工作中扮演重要角色^[12,16]。卫星温度探测通道的辐射资料和反演产品的有效应用使得全球数值天气预报水平得到了快速稳定的提高^[17-19],红外高光谱仪器的高垂直分辨能力进一步提高了对大气的热结构的探测能力^[20]。目前已有学者初步开展FY-4A/GIIRS大气温度廓线产品的质量评估。He等(2019)利用无线电探空仪评估了2018年1~5月的温度廓线均方根误差,在晴空下约为2.1 K,有云情况下约3.7 K^[21]。Xue等(2022)统计了2019年12月至2020年1月(冬季)和2020年7月至2020年8月(夏季)期间对流层各垂直层温度反演的均方根误差,约为2 K,晴空条件下的大气底层较高^[12]。Ren等(2022)利用探空资料针对2020年和2021年冬季FY-4A/GIIRS温度产品进行精度评估,得出温度廓线均方根误差约2.5 K,冬季相关系数多在0.95以上,并利用数值模式资料对云污染导致的温度缺失情况进行了数据重建,提高了

数据可用性^[22]。从目前的FY-4A/GIIRS大气温度廓线产品质量评估情况来看,温度反演具有较高的可用性,但反演产品在全年不同月份、不同大气层高度和不同区域的探测能力和精度还存在不确定性,缺乏对长序列产品的系统性质量检验和特征分析。为了充分利用并发挥FY-4A/GIIRS仪器的观测特性和优势,为灾害性天气监测以及数值气象模式应用提供科学支撑,本文利用常规无线电探空资料,从产品的探测能力和精度方面分别评估2020年整年FY-4A/GIIRS大气温度廓线的数据质量,一方面探索分析利用质量特征提高产品应用能力的方法,另一方面也为相关产品反演算法研究提供参考。

1 数据选取及评估方法

1.1 资料选取

研究选取2020年FY-4A/GIIRS温度廓线业务产品,以常规无线电探空资料为参考进行质量分析评估。其中,FY-4A/GIIRS温度廓线来源于国家卫星气象中心大气垂直探测区域合成产品(http://img.nsmc.org.cn/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/DataFormat/FY4A/Data/Format/FY4A_GIIRS_L2_AVP_REGX_V2.0.pdf),该产品每2小时完成一次区域拼接,输出0.005~1100 hPa共计101层的大气温度,水平分辨率为16 km。为了剔除云污染和定标质量影响,国家卫星气象中心对大气垂直探测区域合成产品质量进行了标记,其中0为“perfect”,即数据质量最好;1为“good”,即数据质量较好;2为“bad”,即数据质量较差;标记为“do not use”,即不可利用的数据,“-99”为系统无效值。四种质量标记主要与两个因素有关,分别反映了L1级数据质量以及反演结果与参考值数值模式场的差异^[23-24]。为了产品精度评估的可靠性,本研究主要选取质量标记为“perfect”和“good”的数据,其余质量的数据被剔除。

常规无线电探空观测是目前国际统一的探测高空大气要素的规范方式,可用于卫星资料定标和卫星产品反演的参考资料,一般精度是大气温度 ± 0.5 K,气压 ± 1 hPa,相对湿度 $\pm 5\%$ ^[25]。该资料来自中国气象局国家气象信息中心,筛选覆盖中国及周边地区的无线电探空站点共172个,按照FY-4A/GIIRS载荷的扫描时间序列,选择探空观测时间60分钟内覆盖的站点共计150个,用于质量评估^[5,21],各站点分布详见图1。所选取探空数据和卫星共有的

观测时间段为 UTC 00 时和 12 时(以下同),分别代表白天和夜间的反演结果。

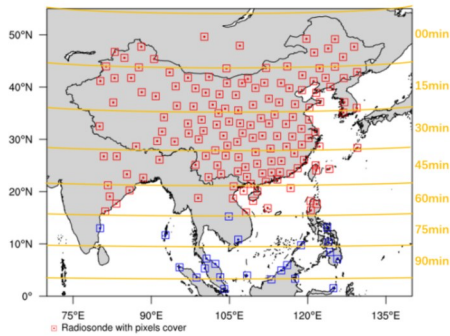


图1 无线电探空站分布示意图(红色为参与评估的站点,蓝色为未使用的站点;右侧为FY-4A/GIIRS扫描相对时间)
Fig. 1 Spatial distribution of radiosondes after matching (the red sites are participating in the evaluation, and blue sites are not used; the right side is the relative time of FY-4A/GIIRS scanning sequence)

1.2 评估方法

无线电探空观测资料一般为规定等压面层(标准层),共有24层^[25],依次为:1 000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3, 2, 1 hPa,而FY-4A/GIIRS产品温度廓线垂直层次分辨率较高,共有101层(0.005~1 100 hPa)。为确保两者在垂直层进行准确比较,文中依照无线电探空资料选取规定等压面层进行温度精度检验。无线电探空观测是固定站点上空附近一定间隔时间的连续观测值,卫星观测是扫描区域面上的瞬时观测值,两者观测方式的不同是时空匹配过程中的主要误差因素。李伟等^[26]对无线电探空气球空间漂移进行分析发现,400 hPa以下气球漂移距离一般在10 km以内,且各个季节差异不大;400 hPa以上漂移距离随高度较快增大,至100 hPa漂移距离平均可达46 km左右,其中夏季漂移平均最少,冬季最多。根据探空气球的平均升速约5 m/s,气球达到100 hPa需要50 min左右^[26-27]。FY-4A/GIIRS像元分辨率为16×16 km,根据像元排列方式可见,两个像元中心间隔约32 km。综合两种观测特点,时间匹配上选取观测时间点60分钟内的数据进行比较。空间匹配上采用两种方案分别进行检验(图2):一是Cressman匹配法,选取探空站点附近68 km范围内约9个像元反演的结果,并对卫星反演采用Cressman客观分析;二是邻近匹配法,选取探空站附近32 km内最近的有效像元作为

卫星反演结果。一方面考虑到一般情况红外通道产品受云影响较大,Cressman匹配法可以在更大区域内通过客观分析法匹配样本,另一方面,邻近匹配法有利于考察单个像元反演质量。

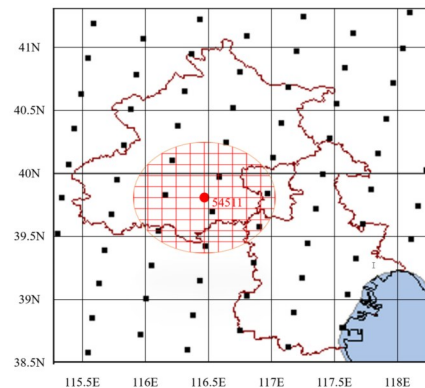


图2 FY-4A/GIIRS像元与探空站匹配示意图(红点是北京54511探空站点,黑点是FY-4A/GIIRS像元,阴影部分是探空站周围半径为68公里的覆盖区域)

Fig. 2 The schematic diagram of FY-4A/GIIRS pixel matching with radiosonde data (The red point is radiosonde site of Beijing 54511, the black dots are FY-4A/GIIRS pixels, and the shaded is the coverage area around the radiosonde site with a radius of 92 km)

根据《气象卫星定量产品质量评价指标和评估报告要求》^[28],FY-4A/GIIRS温度廓线业务产品采用以下几个指标开展精度分析与评估,具体包括:偏差(Bias)、相对误差(MRE)、均方根误差(RMS)和相关系数(Corr)。

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_1^n (T_g - T_r) \quad , \quad (1)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (T_g - T_r)^2} \quad , \quad (2)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{|T_g - T_r|}{T_r} \times 100\% \quad , \quad (3)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_1^n (T_r - \bar{T}_r)(T_g - \bar{T}_g)}{\sqrt{\sum_1^n (T_r - \bar{T}_r)^2} \sqrt{\sum_1^n (T_g - \bar{T}_g)^2}} \quad , \quad (4)$$

其中, T_g 为FY-4A/GIIRS反演的温度, T_r 为由无线电探空观测的温度, n 表示样本个数。

2 结果分析

2.1 产品探测能力

选取反演资料中质量标记为“perfect”和“good”的数据作为有效观测,分别统计2020年00时和12

时各时次 FY-4A/GIIRS 反演的廓线资料在不同高度层中有效数据所占的百分比,用以评估 FY-4A/GIIRS 温度廓线对不同层次的探测能力。如图 3 所示,可见 00 时和 12 时 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线反演结果有效性在高度层次和月份上都呈现出明显的差异。首先,从高度上,近地面 1 000 hPa 附近的层次有效性较低,约为 10% 左右;近地面层到 250 hPa 有效性多在 40~60 % 之间;250 hPa 至 30 hPa 有效性较高,多在 60 % 以上;30 hPa 以上,有效性有明显降低,多低于 10%。其次,在月份上,冬季(1~2 月份、12 月份)和春季(3~5 月份)的有效性明显高于夏秋两季,夏季最差,整层反演结果占比多低于 40%,同时,白天(00 时)的有效性略低于夜间(12 时)。由于云的发射、衰减对红外通道辐射值有很大的影响,尽管高光谱红外探测仪可解决反演过程中的欠定性问题^[29],云的复杂性是干扰反演结果有效性的主要原因。由图 3 分析可见,从时间维度上看,夏秋两季的云系活动明显强于春冬两季,白天云系活动强于夜间;从垂直层次上看,对流层更容易受到云的影响,尤其是中低层,高光谱红外探测仪反演结果的有效性与云的活动有明显的负相关。

2.2 整体反演精度评估

统计无线电探空站资料和 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线偏差、均方根误差和相对误差(图 4)可见,晴空条件下误差较小,其中第二种方案即邻近匹配法的晴空评估结果最优。两种匹配方案在晴空条件下差别不大,偏差在 ± 1 K 之内,均方根误差在 1.5~2.7 K 之间,主要差异表现在有云情况。邻近匹配法统计结果受单一像元反演精度影响较大,有

云情况误差明显增大,600 hPa 以上偏差最高超过 5.5 K,均方根误差最高超过 6 K;500 hPa 以上相对误差超过了 1%(如图 4(b)),并且随高度增加误差增大较快。Cressman 匹配法由于通过客观分析技术包含了多像元的反演结果,误差统计效果较好。综合分析可知,有云条件下单个像元的温度廓线反演质量较差,需谨慎使用该产品,而 Cressman 等客观分析法由于综合利用多像元反演信息可有效提高产品的可用性。100 hPa 以上由于探空资料缺测较多无法有效评估,故文中不做分析,重点关注 200 hPa 以下的大气对流层。

从图 4 可见,两种匹配方案的晴空检验结果几乎一致,其中邻近像元匹配法检验结果较优,尤其是中高层,因此本文后续以邻近匹配法来考察目前 FY-4A/GIIRS 反演业务产品质量。以北京站(站号 54511)为例,FY-4A/GIIRS 各层次的温度廓线和探空观测的散点图可见(如图 5),晴空下两者温度在各高度层显著一致,尤其是在低层。有云情况下出现较多的偏差,尤其在高空 500 hPa 以上,这与图 4 中结论一致。

2.3 时间特征

以邻近匹配法来分析 FY-4A/GIIRS 晴空条件下反演产品质量的时间特征,全年统计结果见图 6。从偏差统计可见,无论白天还是夜间 FY-4A/GIIRS 反演的大气温度以偏低为主,但整体偏差较小。除近地面到 850 hPa 以及 600 hPa 外,平均偏差均控制在 ± 1 K 之内,中高层 500~150 hPa 以上的高度,平均偏差小于 0.5 K(图 6(a)),700 hPa 以下的中低层夜间偏冷更多,平均偏差在 -1.5 K 左右。从均方根误差上看,白天和夜间差异也不大,整层

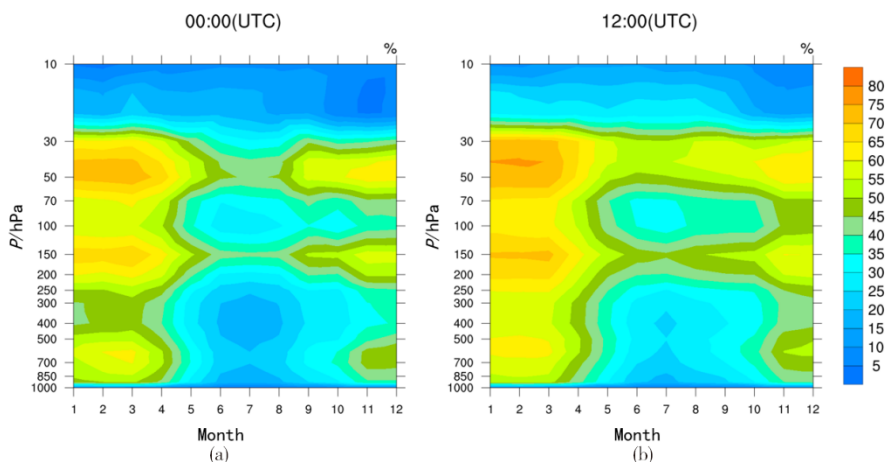


图 3 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线有效性(a)UTC 00:00(b)UTC 12:00:(a) (b)

Fig. 3 Effectiveness of FY-4A/GIIRS atmospheric temperature profile(a)UTC 00:00(b)UTC 12:00

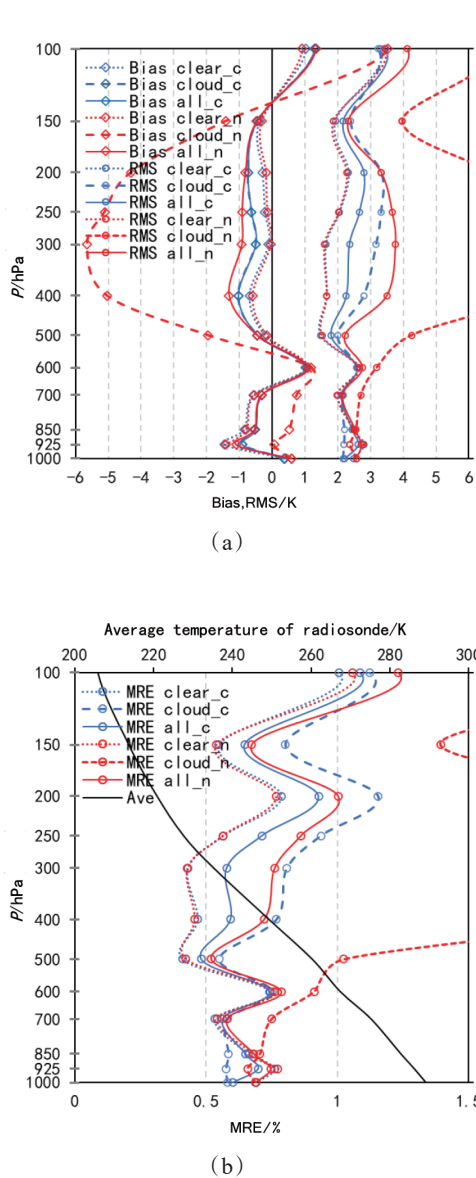


图4 FY-4A/GIIRS 温度廓线反演精度评估(a) 偏差与均方根误差(b)相对误差与年平均温度廓线;图例中 clear, cloud, all 分别代表晴空、有云以及所有情况;后缀 c 代表第一种 Cressman 匹配法, n 代表第二种邻近像元匹配法

Fig. 4 Accuracy evaluation of FY-4A/GIIRS temperature profile retrieval (a) Bias and RMS (b) relative error and annually average temperature profile; in the legends, clear, cloud and all represent clear sky, cloudy and all cases statistical results respectively, and the suffix c represents the first Cressman matching method, and n represents the second nearest pixel matching method)

在 2 K 左右,其中 500~250 hPa 较小,低于 2 K;大气低层和 250 hPa 以上高度均方根误差相对较高,基本都在 2~3 K 范围内波动。目前,国内外对极轨卫星的高光谱资料反演的大气温度廓线产品质量评

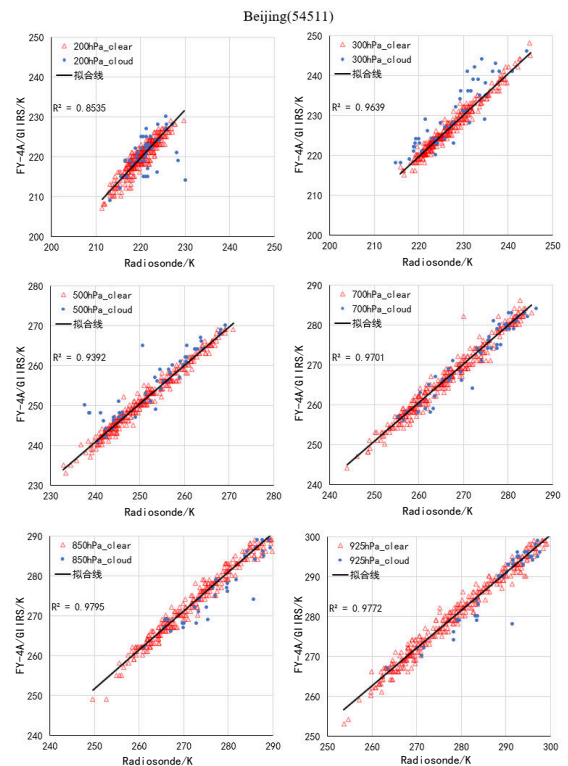


图5 北京站 54511 FY-4A/GIIRS 温度廓线和与之匹配的探空观测散点图(图例中 clear 和 cloud 分别代表晴空和有云情况, R 为晴空相关系数)

Fig. 5 Temperature scatterplot of FY-4A/GIIRS inversion and radiosonde data at Beijing site 54511 (clear and cloud represent clear sky and cloudy respectively, and R is the correlation coefficient of the clear sky)

估表明:整层偏低为主,但偏差绝对值一般小于 0.5 K;均方根误差平均为 1.6 K 左右,近地面层反演结果较差,约为 2.5 K^[13,30-31]。可见, FY-4A/GIIRS 与目前业务运行的极轨卫星同类载荷在大气温度廓线反演精度整体水平相当。相对误差使用了开尔文绝对温度计算, FY-4A/GIIRS 温度廓线相对误差则普遍在 0.8% 以下(图 6(b)),其中 500~250 hPa 的高度层平均约 0.4%,其余高度层平均约 0.6%。

逐月对 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线进行误差统计(图 7),整体情况与图 6 结论一致。从偏差上看(图 7(a)), 150 hPa 高度层以下温度偏低为主,尤其是夏秋两季的 5~10 月份,但偏低值多在 0.6 K 以内。在 600 hPa 高度存在明显的系统性温度偏高 1 K 左右,其中 4~5 月偏高可达 1.5 K。从均方根误差来看(图 7(b)),夏秋季明显优于冬春季,整层在冬春两季较高,约为 2.5 K 左右,夏秋两季相对较低,约为 1.5 K 左右,这对汛期灾害性天气监测至关重要

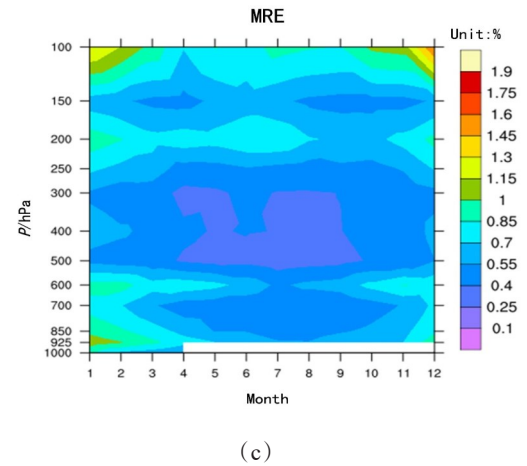
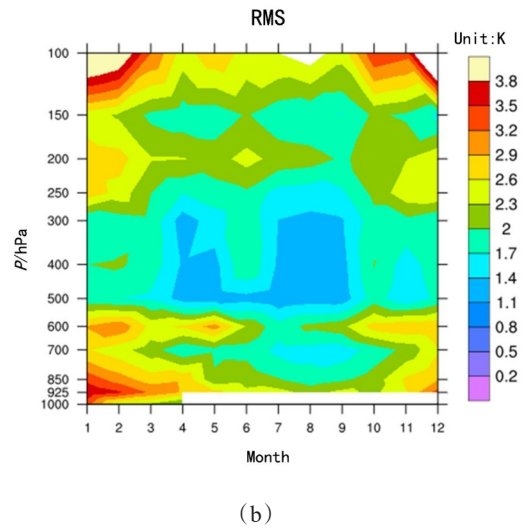
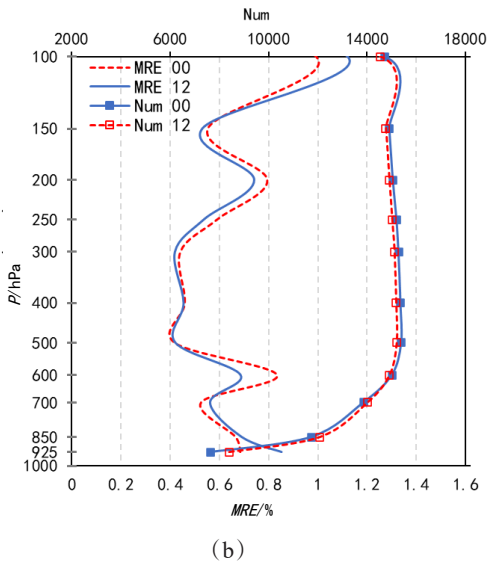
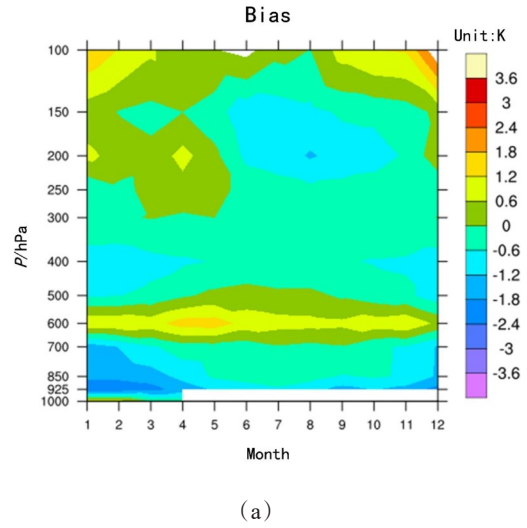
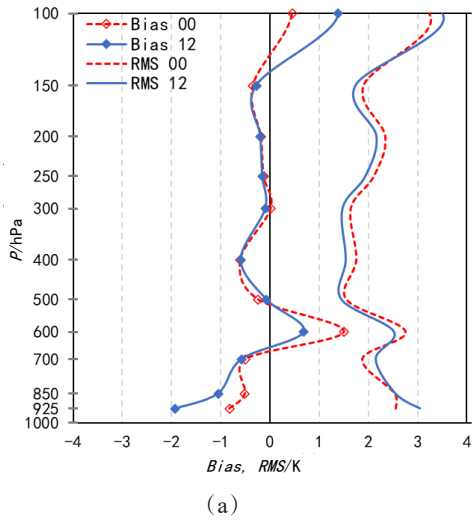


图6 FY-4A/GIIRS晴空温度廓线反演精度评估(a)偏差和均方根误差(b)相对误差和样本数目;图例中00和12代表UTC观测时间

Fig. 6 Accuracy evaluation of clear sky temperature profile for FY-4A GIIRS inversion (a)Bias and RMS (b) relative error and sample number; 00 and 12 in the legends mean UTC observation time which represent day time and night respectively)

要。从相对误差上看(图7(c)),全年中低层普遍在0.5%以下,从相关系数来看(图7(d)),无线电探空站资料和FY-4A/GIIRS反演的温度廓线整层相关性较高,普遍为0.94以上。250 hPa以下高度层相关系数高达0.98以上,其中冬春两季却明显优于夏秋两季,中高层优于中低层,6~8月份大气底层相关系数在0.8以下,表现相对较差。

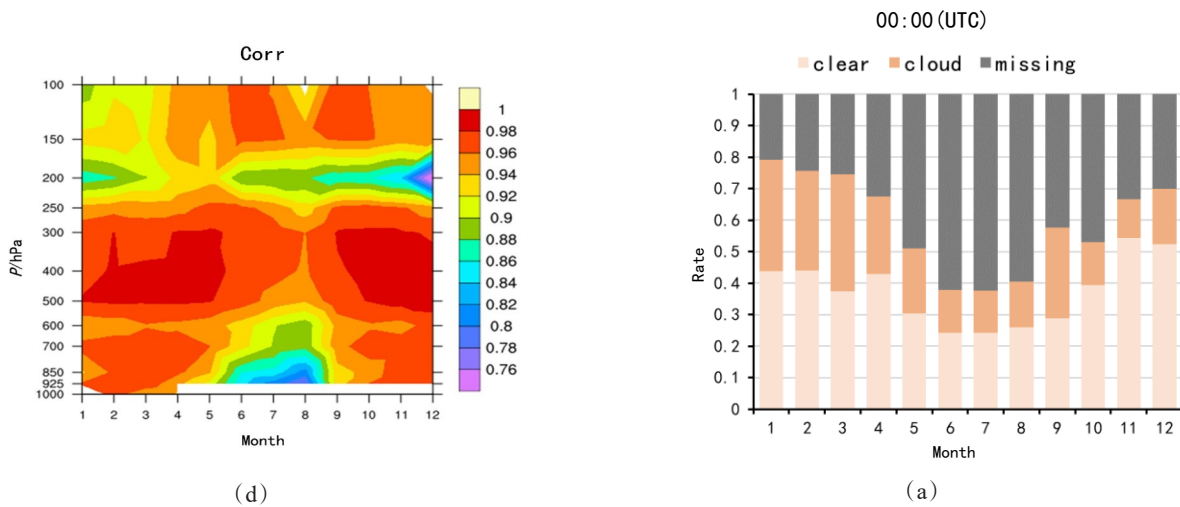


图7 FY-4A/GIIRS 温度廓线质量月度分析(a)偏差(b)均方根误差(c)相对误差(d)相关系数

Fig. 7 Monthly quality analysis of FY-4A GIIRS temperature profile (a) Bias (b) RMS (c) MRE (d) Correlation coefficient

如图8所示,逐月统计样本的云覆盖情况可以看出,夏秋两季FY-4A/GIIRS 大气温度廓线样本有效性明显较低,其中夏季个别月份缺测比例超过50%,这与图3结果较为一致。红外波穿透云层的能力较差,在晴空、薄云情况下温度的反演有效。考虑到FY-4A/GIIRS 大气温度廓线反演缺测的主要因素是由于云尤其是厚云的存在,使得反演过程中无法进行准确的晴空订正^[7,29],因此可以认为缺测是厚云情况,有云情况且反演产品有效的为薄云或部分有云情况。由于受太阳辐射影响,对流在上午时段(00~05 UTC)较弱,一般下午时段有所发展,在傍晚(09~12 UTC)稍强^[32-33],所以各月份晴空比例在00时整体稍微高于12时,但差异不大。从缺测所代表的厚云情况来看,白天整体也稍稍高于夜晚,说明白天的有云情况较大可能影响红外高光谱大气温度产品反演。

2.4 空间特征

以邻近匹配法来分析FY-4A/GIIRS 晴空条件下温度廓线误差空间分布(图9),可见整层平均均方根误差多在2 K左右,我国西南、西北和东北的山地等海拔较高地区相对较大,可达3 K以上(图9(a))。考虑大气低层误差相对较大,因此根据无线电探空站的海拔高度统计各参考站近地面层的温度误差(图9(b)),在我国西南、西北和东北的山地等海拔较高地区近地面层误差普遍较大,均方根误差可达3.4 K以上,而在我国东部及南部海拔较低

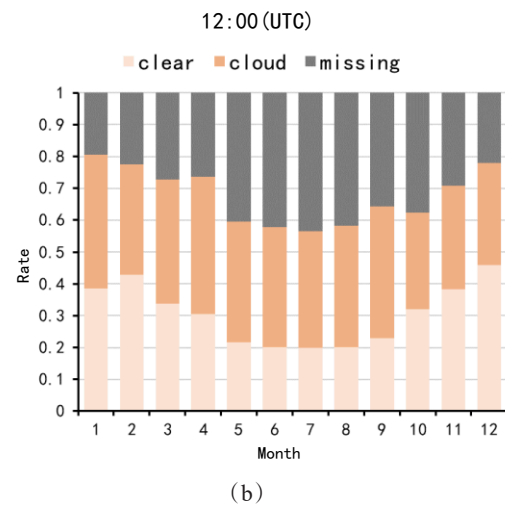


图8 匹配样本的云覆盖情况月度统计(a) UTC 00:00(b) UTC 12:00

Fig. 8 Monthly statistics of cloud coverage of matching samples (a) UTC 00:00 (b) UTC 12:00

的地区近地层误差相对较小,均方根误差一般在1.9~2.5 K之间。

根据无线电探空站点的海拔高度将把样本分成低海拔区、中海拔区和高海拔区三类(见表1),分别统计FY-4A/GIIRS 温度廓线的均方根误差和标准偏差,统计范围仍为如图1所示60 min内覆盖的150个站点。

结果如图10所示,低海拔地区的均方根误差和标准偏差在整层都表现最优,中海拔地区次之,高海拔地区最差,尤其是在600 hPa以下的大气中低层。低海拔地区温度廓线在大气中低层平均方根误差约为2 K(图10(a)),标准偏差约为1.8 K(图10

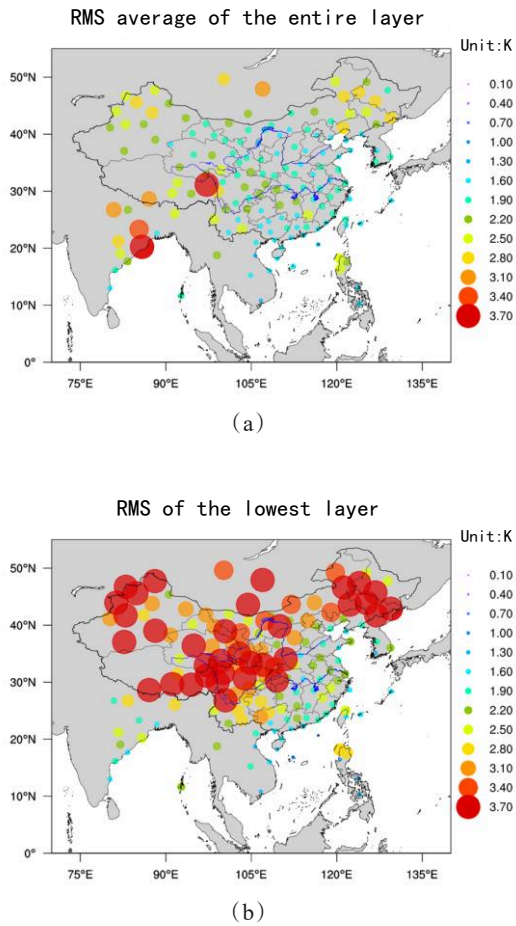


图9 FY-4A/GIIRS温度廓线的均方根误差空间分布(a)均方根误差整层平均 (b)近地层均方根误差
Fig. 9 Spatial distribution of RMS for FY-4A GIIRS temperature profiles with reference to radiosonde (a) Average RMS of the entire layer(b) RMS of the lowest layer

表1 不同海拔地区站点数目

Table 1 Number of stations with different altitudes

分类	海拔范围	站点数目
低海拔	≤100 m	53
中海拔	>100 m, ≤1 500 m	71
高海拔	>1 500 m	26
合计		150

(b)。可见,在低海拔地区无论是温度产品误差还是误差分布的分散程度都较低,这表明FY-4A/GIIRS可极大地弥补我国东部、南部地区以及广阔的洋面上的探空资料的不足。

2.5 误差概率统计

根据各层次对应的RMS比例统计晴空条件下FY-4A/GIIRS温度廓线误差概率可知(图11),整层

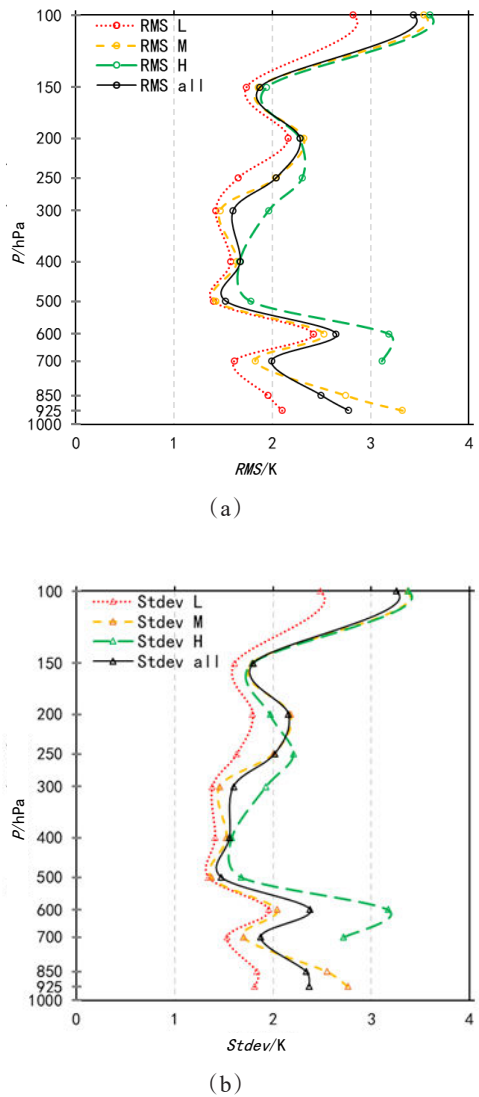


图10 不同海拔高度的均方根误差和标准偏差统计(a)均方根误差(b)标准偏差; 图例中L、M、H和all分别代表低海拔、中海拔、高海拔和所有情况下的统计结果
Fig. 10 RMS and standard deviation with reference to radiosonde at different altitudes (a) RMS(b)standard deviation; L, M, H and all in the legend represent the statistical results of low altitude, medium altitude, high altitude and all cases respectively

大气温度廓线误差分布多集中在-1~0.25倍RMS之间,各层概率分布都有明显的负偏移,说明对应层次FY-4A/GIIRS温度反演有明显的偏低特征,与图6中偏差平均值的情况一致。从峰值落区上看,峰值偏移的绝对值基本都在0.5倍RMS之内,如图11所示,对925 hPa、850 hPa、500 hPa和200 hPa的概率密度分布进行正态曲线拟合可得,平均误差为-0.25倍RMS,标准偏差为0.75倍RMS。从表2中

可见, FY-4A/GIIRS 温度廓线误差概率峰值落区在整层偏移也为 0.5 倍 RMS 之内, 且大多数高度层为负偏差。

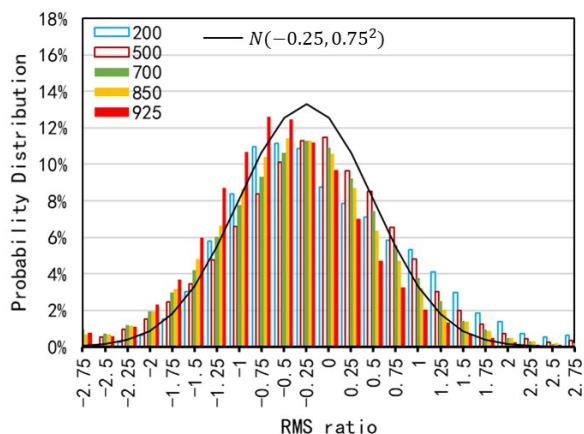


图 11 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线在不同高度层上的误差分布(横坐标表示对应高度层次 RMS 比例)

Fig. 11 Bias probability density of temperature profiles of FY-4A/GIIRS (the abscissa represents the proportion of RMS in corresponding height level)

表 2 FY-4A/GIIRS 温度廓线误差概率峰值落区

Table 2 The probability peak fall region of FY-4A/GIIRS temperature profile bias

高度 (hPa)	峰值概率 (%)	峰值落区 (RMS 比例)	峰值偏差 估计(K)	样本数目
1000	10.84	0.25	0.85	886
925	12.60	-0.75	-2.03	16 027
850	11.45	-0.5	-1.21	23 807
700	11.28	-0.25	-0.49	27 862
600	11.77	0.25	0.67	29 912
500	11.50	0	0.00	30 587
400	13.17	-0.25	-0.41	30 538
300	12.99	0	0.00	30 389
250	13.58	0	0.00	30 217
200	11.16	-0.5	-1.12	29 956
150	12.34	-0.25	-0.44	29 672
100	13.02	0	0.00	29 234

3 结论

本文利用常规无线电探空资料, 从产品的探测能力和精度方面评估 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线的数据质量, 主要结论如下:

1) 在产品的探测能力方面, FY-4A/GIIRS 反演大气温度廓线有效性与云的活动有明显的负相关, 探测能力在高度层次和月份上因云系活跃度都呈

现较明显的差异。目前温度廓线产品在大气对流层的有效率平均在 50% 左右, 云活跃较高的夏季大气中低层有效率平均约 25%。这说明实际应用中, 云污染严重影响目前 FY-4A/GIIRS 的大气探测能力。

2) 对 2020 年整体质量评估表明, 晴空条件下 FY-4A/GIIRS 大气温度廓线偏差约在 ± 1 K 之内, 且以负值为主, 均方根误差约为 2 K, 近地层较高。有云条件下单个像元的温度廓线反演误差明显增大, 在 600 hPa 以上偏差最高超过 5.5 K, 均方根误差最高超过 6 K。有云条件谨慎使用该产品, 采用 Cressman 等客观分析法综合利用多像元反演信息可有效降低产品应用中误差影响。

3) 在月尺度精度结果方面, 全年 FY-4A/GIIRS 反演温度偏低, 尤其是夏秋两季的 5~10 月份, 但偏低值多在 0.6 K 以内; 从均方根误差来看, 夏秋两季均方根误差在 1.5~2.5 K, 明显优于冬春季, 有利于灾害性多发季节的天气监测。考察 FY-4A/GIIRS 温度廓线在不同地区特征发现, 反演质量随海拔高度升高而显著降低, 低海拔地区精度最高, 尤其是大气中低层, 平均方根误差约为 2 K。

4) FY-4A/GIIRS 温度廓线与探空资料在不同气压高度层的相关性都较高, 普遍在 0.94 以上, 其中冬春两季却明显优于夏秋两季, 中高层优于中低层。FY-4A 大气温度廓线的误差概率统计表明, 整层误差分布多集中在 -1~0.25 倍 RMS 之间, 各层概率分布都有明显的负偏移。

致谢: 感谢中国科学院上海技术物理研究所风云四号高光谱探测仪研制团队丁雷研究员和韩昌佩研究员提供 FY-4A 卫星和载荷性能参数信息。

References

- [1] DU Ming-Bin, YANG Yin-Ming, YANG Yu-Hua, et al. Bias correction for fy-3a microwave sounding data and its application in typhoon track forecast [J]. J. Appl Meteor Sci, 2012, 23(1): 89-95 (杜明斌, 杨引明, 杨玉华, 等. FY-3A 微波资料偏差订正及台风路径预报应用. 应用气象学报, 2012, 23(1): 89-95).
- [2] YANG Yin-Ming, DU Ming-Bin, ZHANG Jie. FY-3A satellite microwave data assimilation experiments in tropical cyclone forecast [J]. J Trop Meteor., 2013, 19(3): 297-304.
- [3] YANG Jun, ZHANG Zhi-Qing, WEI Cai-Ying, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, FengYun-4 [J]. Bull Amer Meteor Soc., 2017, 98(8): 1637-1658.
- [4] Gambacorta A, Barnet C D. Atmospheric soundings from

- hyperspectral satellite observations [C]//Comprehensive Remote Sensing. Science and Technology Corporation, Columbia: Elsevier, 2018, 64–96.
- [5] FENG Xuan, LI Li-Bing, CHEN Bo-Yang, *et al.* Post-launch calibration and validation of the geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2019, **38**(5): 648–654. (冯绚, 李利兵, 陈博洋, 等. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(5): 648–654.
- [6] NONG Chuan, YIN Qiu, SONG Ci, *et al.* Sensitivity analysis of the satellite infrared hyper-spectral atmospheric sounder GIIRS on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, **40**(3): 353–362.
- [7] LI Jun, LI Zheng-Long, WANG Pei, *et al.* An efficient radiative transfer model for hyperspectral IR radiance simulation and applications under cloudy-sky conditions [J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2017, (122): 7600–7613.
- [8] DI Di. Data assimilation research for geosynchronous interferometric infrared sounder onboard FengYun-4 satellite [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (狄迪. 风云四号高光谱红外探测仪资料同化相关问题研究, 中国气象科学研究院), 2019.
- [9] HAN Yong, Revercomb H, Cromp M, *et al.* Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2013, **118**(22): 1–15.
- [10] LU Qi-Feng, ZHOU Fang, QI Cheng-Li, *et al.* 2019. Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D [J]. *Optics and Precision Engineering*, **27**(10): 2105–2115. (陆其峰, 周方, 漆成莉, 等. 2019. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估. *光学精密工程*), **27**(10): 2105–2115.
- [11] HUA Jian-Wen, MAO Jian-Hua. Atmospheric sounder of FY-4 meteorological satellite [J]. *Science (Shanghai)*, 2018, **070**(001): 24–29. (华建文, 毛建华. “风云四号”气象卫星大气垂直探测仪. *科学(上海)*), 2018, **070**(001): 24–29.
- [12] XUE Qiu-Meng, GUAN Li, SHI Xiao-Ning. One-dimensional variational retrieval of temperature and humidity profiles from the FY4A GIIRS [J]. *Adv Atmos Sci.*, 2022, **39**(3): 471–486.
- [13] KWON E H, Sohn B J, Smith W L, *et al.* Validating IASI temperature and moisture sounding retrievals over east Asia using radiosonde observations [J]. *J Atmos Ocean Tech*, 2012, **29**(9): 1250–1262.
- [14] CAI Xi, BAO Yan-Song, Petropoulos G P, *et al.* Temperature and humidity profile retrieval from FY4-GIIRS hyperspectral data using artificial neural networks [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11): 1872.
- [15] LU Feng, ZHANG Xiao-Hu, CHEN Bo-Yang, *et al.* FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J]. *J. of Marine Meteorology*, 2017, **37**(2): 1–12. (陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景. *海洋气象学报*), 2017, **37**(2): 1–12.
- [16] CAI Yi, XU Qing-Shan. Data assimilation between atmospheric temperature of medium resolution imaging spectroradiometer and ground sounding data [J]. *Laser & optoelectronics progress*, 2017, **54**(07): 1–6. (蔡熠, 徐青山. 中分辨率成像光谱仪的大气温度廓线和地面探空数据同化. *激光与光电子学进展*), 2017, **54**(07): 1–6.
- [17] Eyre J R, Kelly G A, McNally A P, *et al.* Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1993, **119**: 1427–1463.
- [18] ZOU Xiao-Lei, QIN Zheng-Kun, WENG Fu-Zhong. Impact of dawn - dusk satellite AMSU-A data on quantitative precipitation forecasts and the implications for three-orbit constellation [J]. *Chin J Atmos Sci*. 2016, **40**(1): 46–62. (邹晓蕾, 秦正坤, 翁富忠. 晨昏轨道微波温度计资料同化对降水定量预报的影响及其对三轨卫星系统的意义. *大气科学*), 2016, **40**(1): 46–62.
- [19] Jones T A, Koch S, LI Zheng-Long. Assimilating synthetic hyperspectral sounder temperature and humidity retrievals to improve severe weather forecasts [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **186**: 9–25.
- [20] Reale O, Susskind J, Rosenberg R, *et al.* Improving forecast skill by assimilation of quality-controlled AIRS temperature retrievals under partially cloud conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(8): L08809.
- [21] HE Min, WANG Dong-Hai, DING Wei-Yu, *et al.* A validation of Fengyun4A temperature and humidity profile products by radiosonde observations [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(17), 2039: 1–19.
- [22] REN Su-Ling, Jiang Jian-Ying, FANG Xiang, *et al.* FY-4A/GIIRS temperature validation in winter and application to cold wave monitoring [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2022, **36**(4): 658–676.
- [23] MIN Min, WU Chun-Qiang, LI Chuan, *et al.* Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(04): 708–719.
- [24] ZHANG Zhi-Qin, LU Feng, Fang Xiang, *et al.* Application and development of FY-4 satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, **34**(004): 8–19. 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展 [J]. *上海航天*, 2017, **34**(004), 8–19.
- [25] China Meteorological Administration. Operational specification for conventional High Altitude Meteorological Observation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010. (中国气象局. 常规高空气象观测业务规范) [M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [26] LI Wei, LI Shu-Yan, Wang Jian-Kai, *et al.* The analysis of upper-air meteorological balloon floating in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, **68**(3): 421–427. (李伟, 李书严, 王建凯, 等. 中国地区高空气象探测气球空间漂移分析. *气象学报*), 2010, **68**(3): 421–427.
- [27] Seidel D J, Sun Bo-Min, Pettet M, *et al.* Global radiosonde balloon drift statistics [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: D07102.
- [28] China Meteorological Administration. QX/T 127–2011, Requirements for quality assessment index and report on quantitative products of meteorological satellites [S]. 2011 (中国气象局. QX/T 127–2011, 气象卫星定量产品质量评价指标和评估报告要求). 2011.
- [29] GUAN Li, HUANG Hung-Lung, WANG Zhen-Hui. Sim-

- ulation of atmospheric profile retrieval from hyperspectral infrared data under cloudy condition [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, **12**(6): 987-992 (官莉, Huang Hung-Lung, 王振会. 红外高光谱资料反演有云时大气温湿廓线的模拟研究. *遥感学报*), 2008, **12**(6): 987-992.
- [30] LIU Hui, DONG Chao-Hua, ZHANG Wen-Jian, *et al.* Retrieval of clear-air atmospheric temperature profiles using AIRS observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (刘辉, 董超华, 张文建, 等. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验, *气象学报*), 2008, **66**(4): 513-519.
- [31] Nalli Nicholas R., Gambacorta A, LIU Quan-Hua, *et al.* Validation of atmospheric profile retrievals from the SNPP NOAA-Unique combined atmospheric processing system. Part 1: temperature and moisture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **56**(1): 180-190.
- [32] CHEN Guo-Chun, ZHENG Yong-Guang, XIAO Tian-Gui. Distribution and spatiotemporal variations of deep convective clouds over China during the warm season [J]. *Meteorological Monthly* (陈国春, 郑永光, 肖天贵. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析. *气象*), 2011, **37**(1): 75-84.
- [33] YOU Ting, ZHANG Hua, WANG Hai-Bo, *et al.* Distribution of different cloud types and their effects on near-surface air temperature during summer daytime in central eastern China [J]. *Chin J Atmos Sci.*, (游婷, 张华, 王海波, 等. 夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响. *大气科学*), 2020, **44**(4): 835-850.