

LIU Hongshan, XU Jiyao, BAI Weihua, HE Jieying, SUN Longchang, ZHU Yajun, YUAN Wei, GAO Hong. Comparison of FY3D/GNOS Atmospheric Occultation Detection Temperature with TIMED/ SABER Temperature and NRLMSISE00 Model Temperature (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 474–487. DOI:10.11728/cjss2024.03.2023–0072

FY3D/GNOS 大气掩星探测 温度与 TIMED/SABER 探测温度和 NRLMSISE00 模式温度的比较*

刘红珊^{1,4} 徐寄遥¹ 白伟华² 何杰颖³
孙龙昌¹ 朱亚军¹ 袁 韦¹ 高 红¹

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点研究室 北京 100190)

4(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 大气温度数据的精确探测对于研究中高层大气的结构特征和动力学过程具有重要意义. 利用 2019 年 1 月至 2021 年 12 月共 3 年的 FY3D 掩星观测数据, 借助 TIMED/SABER 探测数据和 NRLMSISE00 大气模式数据, 对 12~100 km 范围内的大气温度数据进行比较. 统计分析 SABER-FY3D 温度偏差 ($T_{\text{SABER}} - T_{\text{FY3D}}$) 和 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差 ($T_{\text{NRLMSISE00}} - T_{\text{FY3D}}$) 及其随纬度、季节的分布和南北半球的差异. 结果显示, 三种温度数据随高度变化趋势是大体一致的, SABER-FY3D 温度偏差在 12~30 km 高度范围内为正偏差 (0~1.8 K), 随高度升高, 温度偏差从 30 km 处的 0 K 增加到 77 km 处的 -11.6 K. NRLMSISE00-FY3D 温度偏差在平流层为正偏差 (0~4.4 K), 在中间层和低热层为负偏差 (-2~0 K). 两种温度偏差随纬度和季节都存在明显的变化特征. 60 km 以下, SABER-FY3D 温度偏差在低纬地区较小 (-3.8~1.8 K), 高纬地区较大 (-12~1.6 K), 夏季较小 (-0.5~2.2 K), 冬季较大 (-6.2~1 K); NRLMSISE00-FY3D 温度偏差正好相反, 在高纬地区较小 (-1.6~2.4 K), 低纬地区较大 (-3.9~6.1 K), 冬季较小 (-2~2.2 K), 夏季较大 (-1.3~7.1 K). 两类月平均温度偏差的零偏差线所在高度在南北半球均存在春夏季节较高, 秋冬季节较低的特征. 冬季 40~60 km 高度区域内, 北半球的 SABER-FY3D 平均温度负偏差比南半球的明显.

关键词 FY3D 大气掩星温度, 温度偏差, 季节变化, 纬度变化

中图分类号 P352

* 中国科学院青年交叉团队项目 (JCTD-2021-10), 国家自然科学基金项目 (41774160, 41831073), 中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目, 云南省汪景琇院士工作站 (202005AF150025), 中国科学院青年创新促进会项目 (2020156) 和中高层大气和电离层中-俄联合研究项目共同资助

2023-07-07 收到原稿, 2023-12-12 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Comparison of FY3D/GNOS Atmospheric Occultation Detection Temperature with TIMED/SABER Temperature and NRLMSISE00 Model Temperature

LIU Hongshan^{1,4} XU Jiyao¹ BAI Weihua² HE Jieying³
SUN Longchang¹ ZHU Yajun¹ YUAN Wei¹ GAO Hong¹

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing Chinese Academy of Sciences, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The accurate detection of atmospheric temperature is of great significance for studying the structural characteristics and dynamic processes of the middle and upper atmosphere. The GNOS (Global Navigation Satellite System Occultation Sounder) mounted on the FY3D has been carrying out atmospheric sounding since 15 November 2017. The purpose of this study is to evaluate the atmospheric temperature data products of the FY3D satellite. This study was conducted to comparatively analyze the atmospheric temperature data within the range of 12~100 km based on FY3D occultation observation data for 3 years from January 2019 to December 2021, with the aid of TIMED/SABER detection data and NRLMSISE00 atmospheric model data. The SABER-FY3D temperature deviation ($T_{\text{SABER}} - T_{\text{FY3D}}$) and NRLMSISE00-FY3D temperature deviation ($T_{\text{NRLMSISE00}} - T_{\text{FY3D}}$) and their distribution with latitude, season, and the difference between the northern and southern hemispheres were analyzed. The results show that the three sets of temperature data have generally consistent trend with change in height. SABER-FY3D temperature deviation is positive (0~1.8 K) in the altitude range of 12~30 km, and as the altitude increases, the temperature deviation increases from 0 K at 30 km to -11.6 K at 77 km. NRLMSISE00-FY3D temperature deviation is positive (0~4.4 K) in the stratosphere, and negative (-2~0 K) in the mesosphere and low thermosphere. Both temperature deviations show significant variations with latitude and season. Below 60 km, SABER-FY3D temperature deviation is smaller in the low-latitude region (-3.8~1.8 K) and larger in the high-latitude region (-12~1.6 K), smaller in summer (-0.5~2.2 K) and larger in winter (-6.2~1 K); NRLMSISE00-FY3D temperature deviation is just the opposite, smaller in the high-latitude region (-1.6~2.4 K) and larger in the low-latitude (-3.9~6.1 K), smaller in winter (-2~2.2 K), and larger in summer (-1.3~7.1 K). The zero deviation lines of the two types of monthly average temperature deviations show characteristics of being higher in spring and summer and lower autumn and winter in both hemispheres. In the winter, in the altitude region of 40~60 km, the negative deviation of the SABER-FY3D average temperature in the northern hemisphere is more obvious than that in the southern hemisphere.

Key words FY3D atmospheric occultation temperature, Temperature deviation, Seasonal variation, Latitude variation

0 引言

中层大气处于低层大气和高层大气之间, 包括平流层和中间层, 是地球中高层大气的重要组成部分. 中层大气环境要素除了随高度、经纬度和季节变化以外, 还存在其他复杂的波流相互作用和一些特殊的物理现象. 其中, 中层大气温度分布及其变化规律是基础性和热点性的研究问题. 温度数据的精确探测对于中层大气结构特征和动力学过程的研究以及大气经验模式的建立都具有重要意义.

在中层大气众多探测手段中, 每一种方法都有其适用范围和优缺点. 例如气象火箭探测具有较高的垂直分辨率, 但无法进行全球探测; 探空气球虽然价格低廉, 但只能探测到较低高度, 无法覆盖中层大气的大部分区域. 要得出全球尺度的大气温度分布和变化特征, 卫星遥感探测是唯一有效的途径. 其大范围探测能力对于大尺度动力过程与全球耦合过程的研究都具有重要意义, 但时间和空间分辨率有限. 且由于卫星运行轨道、探测手段、仪器误差等多方面的原因导致不同卫星探测的大气温度存在不同程度的偏差. 通过对不同探测温度进行交叉验证, 可以加深对探测温度的认识, 为卫星探测大气温度数据的应用提供依据和基础.

卫星探测手段中, 无线电掩星探测技术具有较高的垂直分辨率和全球覆盖的特点, 是一种可探测中性大气、电离层遮挡的高轨道 GNSS 卫星信号的主动探测技术. 无线电掩星探测技术利用局部球面对称假设和 Abel 变换推导出电波弯曲角和大气折射率剖面, 进而获得大气温度、湿度等状态参数廓线. 自美国于 1995 年进行 GPS/MET 卫星掩星测试以来, 许多国家相继发射了多颗卫星, 其中包括德国的 CHAMP 卫星, 阿根廷的 SAC-C 卫星, 美国与中国联合研制的 COSMIC 卫星等. 但这些卫星接收机都只能接收 GPS 信号. 中国风云三号 C 星 (FY3C) 首次实现了能同时接收 GPS 信号和中国北斗二代导航卫星 (BDS) 信号来开展电离层和大气掩星探测. FY3C 在轨运行已有 9 年时间, 观测资料被用于中性大气、电离层参量的反演. Liao 等^[1]和 Wang 等^[2]都证实了 FY3C 在 0~30 km 高度区域的数据精度与 COSMIC 等成熟的掩星数据精度相当. Xu 等^[3]利用 IGRA2 无

线电探空数据和 COSMIC 掩星数据对 FY3C 温度数据进行检验发现: FY3C 卫星在不同高度上温度廓线的检验结果随纬度和季节存在较大变化. 这些对比验证工作检验了 FY3C 温度数据的质量, 为该数据的广泛使用打下基础. Guo 等^[4]利用 FY3C 掩星数据对对流层顶温度进行研究, 发现该高度上温度随经纬度的变化表现为春秋季节变化相似, 冬夏季节变化相反的现象.

风云三号 D 星 (FY3D) 于 2017 年 11 月 15 日发射, 其上搭载的全球导航卫星掩星探测仪 (GNOS) 对大气温度进行系统探测, 至今已经积累了多年观测数据. Wang 等^[2]开展的 FY3D/GNOS 实验室模拟和地面试验表明: FY3D/GNOS 的通道数、天线增益和卫星精密定轨等方面的性能均优于 FY3C/GNOS.

然而, 将 FY3D/GNOS 探测温度与其他卫星探测温度进行系统比较分析的工作较少, 并且该探测温度尚未被广泛应用. 本工作旨在将 FY3D/GNOS 探测温度与 TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetic, and Dynamic)/SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 卫星探测温度和 NRLMSISE00 大气模式温度进行比较研究, 从而对 FY3D/GNOS 探测温度进行评估和适用性分析, 为 FY3D/GNOS 探测温度廓线数据的应用提供参考依据. 此外, 由于在 FY3D 之前, FY3 系列卫星温度数据高度覆盖范围的上限仅到 60 km 附近, 所以此前利用 FY3 系列卫星温度数据开展的大部分研究工作都是针对对流层和平流层区域进行的. 而 FY3D/GNOS 提供的大气温度数据的高度范围为 0~100 km, 对该温度数据进行检验和验证, 有助于拓展 FY3 卫星探测温度应用的高度范围. 将 FY3D/GNOS 探测温度与 TIMED/SABER 探测温度和 NRLMSISE00 大气模式温度进行比较不仅有助于对 FY3D/GNOS 探测温度数据进行评估, 还可以为大气模式的改进提供参考.

本文采用 2019 年 1 月至 2021 年 12 月共 3 年的 FY3D/GNOS 大气掩星观测数据, 结合 TIMED/SABER 探测数据, 以及 NRLMSISE00 模式数据, 开展全球大气温度资料的比较研究. 计算不同温度资料之间的偏差, 并统计其平均温度偏差和标准偏差, 分析温度偏差随高度、纬度和季节的分布特征.

1 数据与方法

1.1 数据介绍

研究所使用的 FY3D/GNOS 温度数据由中国国家卫星气象服务中心 (National Satellite Meteorological Center, NSMC) 提供, 数据名称为 ATP, 时间范围为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日. 风云三号 D 星 (FY3D) 于 2017 年 11 月发射升空, 其上搭载的全球导航卫星掩星探测仪 (GNOS) 平均每天接收 GPS 和 BDS 大气掩星廓线约 570 条和 168 条, GNOS 每接收一次完整的掩星事件信息, 便可生成对应的折射率廓线, 这是用于反演大气温度、压强、密度等其他大气参数的基础.

FY3D 提供了 0~100 km 高度范围内的大气温度数据. Bi 等^[5]研究表明 FY3 GNOS 掩星温度数据与 ECMWF 再分析资料相比, 在 30 km 以下温度偏差小于 1 K, 在 30~45 km 范围内温度偏差为 0~5 K. 且研究表明 GNOS 掩星折射率和弯曲角在 5~45 km 高度范围内与 Metop/GRAS, COSMIC 和 ECMWF 再分析资料的相对偏差在 0.5% 以内 (详见文献 [6] 中图 4.3-6 和 4.3-8、文献 [7] 中图 6 以及文献 [8] 中图 5). 在 45 km 以上, 由于空气较稀薄, 观测噪声较大, 存在高阶电离层效应不可忽略, 所以 45 km 以上主要参考了气候背景场 MSIS90 和模式预报场 T639 提供的信息^[6]. 虽然公认 GNOS 掩星资料在 5~45 km 范围内较可靠, 但 FY3D 数据也提供了 45 km 以上的大气温度数据. 风云卫星 GNOS 掩星温度反演过程比较复杂, 主要包括: 数据预处理降低观测数据噪音, 反演以碰撞参数为函数的弯曲角, 剔除电离层对中性大气的影响, 利用 Abel 积分变换法将优化后的弯曲角反演成折射率, 最后再采用一维变分方法多次迭代反演出温度廓线数据等一系列过程^[6].

为去除电离层残差引起的系统性偏差, 采用了最优估计方法将 MSIS 模式背景场信息映射到观测场, 得出最优的无电离层影响的中性大气弯曲角廓线; 而后当利用 Abel 积分将弯曲角反演为折射率时, 由于存在上边界初始化问题: 上边界高度越高, 反演精度就越高, 但 FY3D 卫星弯曲角观测高度有限, 所以在无观测数据的高度上便以 MSIS 模式计算的弯曲角代替, 最终选取的最优初始化高度为 150 km; 最后反演温湿廓线时引入了 T639 模式预报场作为背景先验

信息进行多次迭代^[6]. 最终得出的 FY3D 温度数据的误差既包含掩星本身的观测误差, 也包含数据处理时的反演误差. 高度越高, 温度数据误差中的反演误差占比越大. 虽然公认 GNOS 掩星资料在 5~45 km 范围内较可靠, 但 FY3D 数据也提供了 45 km 以上的大气温度数据. 因此, 本研究工作也对 45 km 以上高度区域上的温度数据进行比较评估, 以便给未来使用者提供参考.

本文对 FY3D 温度探测数据的比较验证工作使用了两类参照数据, 一类是 TIMED/SABER 卫星数据. TIMED 卫星于 2002 年在美国发射, 可以同时多种大气参数进行全球观测. 自 TIMED 卫星被发射以来, 一直在轨道倾角为 74.1°, 高度为 625 km 的近太阳同步轨道上运行, 并沿着纬圈缓慢地进动, 探测地方时每天变化约 12 min, 纬度覆盖范围从一个半球的 52°到另一半球的 83°, 大约 60 天可以实现全球 24 小时地方时的全覆盖. 其上搭载的红外发射辐射计 (SABER) 是 TIMED 卫星的四颗载荷之一, 其通过临边扫描的方式, 探测了从低平流层到低热层的中性大气温度及其他大气参量的垂直廓线, 每天约可获得 1400 条大气廓线. SABER 温度数据的反演在 70 km 以下采用局部热力学平衡算法, 在 70 km 以上采用非局部热力学平衡算法, 垂直分辨率约为 2 km, 该温度数据的可靠性已得到大量验证^[9-11]. Gong 等^[12]将 COSMIC 大气掩星探测温度与 TIMED/SABER 卫星探测温度进行比较, 结果发现两者随高度变化的规律基本相同. Xu 等^[13]将 TIMED/SABER 卫星与 NRLMSISE00 经验模式温度数据进行对比, 发现在中间层顶区域, 经验模式与卫星观测值存在着很大的差异. 至今, TIMED/SABER 已经对大气温度进行了 20 余年的连续观测, 探测数据已被广泛应用于中高层大气研究和实际应用中. 本文选用 SABER V2.07 版本温度数据, 使用数据的时间范围与 FY3D 一致. 另一类验证数据是 NRLMSISE00 大气模式温度数据, NRLMSISE00 大气模式是 MSIS 系列模式之一, MSIS 模式是最具代表性的中性大气经验模式之一, 描述了从地面到外逸层高度的地球中性大气温度和密度. NRLMSISE00 大气模式是由美国海军实验室 (Naval Research Laboratory, NRL) 在 MSISE90 大气经验模式的基础上发展的, 是当前世界上广泛使用的中高层大气经验模式之一.

1.2 数据匹配条件的设定与匹配情况

1.2.1 匹配数据的选取

FY3D 大气掩星数据所提供的温度数据高度约为 0~100 km, TIMED/SABER 探测温度数据的高度约为 12~105 km, 因此选用共同高度 12~100 km 进行比较, 该高度范围主要位于中层大气区域. 中层大气与对流层和热层之间有密切关联. 此外, 诸如周期为几天到一个月之间的行星波, 周期为一天的潮汐波及其高次谐波, 高发的大气重力波、大气湍流等大气扰动, 都会对大气温度产生显著的影响, 所以需要对所比较的数据进行时空匹配条件的约束.

已有研究表明大气温度随纬度的变化较经度更加明显, 所以基于以上条件, 将时空匹配条件设置为纬度相差小于 0.5° , 经度相差小于 1° , 时间相差小于 1 h, 与 Gong 等^[12] 的匹配条件一致. 然后按照 TIMED/SABER 和 FY3D 匹配以后得到的匹配数据点的时间和经纬度信息来选取 NRLMSISE00 模式数据.

此外, 尽管掩星资料具有高精度、高垂直分辨率、长期稳定、全天候探测能力的优点, 但是也存在难以消除的误差和少量的异常廓线. 为避免这些异常值对质量分析结果的影响, 所以需要匹配后的数据进行质量控制. 首先对数据中的缺省值和无环境变量值进行剔除, 再进行极值检查, 设定有效温度范围为 $100\text{ K} \leq T \leq 400\text{ K}$, 纬度范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$, 经度范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$, 将阈值范围以外的数据剔除.

1.2.2 匹配数据的分布

通过收集 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日的 FY3D/GNOS 和 TIMED/SABER 温度廓线, 在匹配规则下, 共获得 2335 对匹配数据, 数据对在全球的分布如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 大部分的匹配数据对集中在南北半球 $10^\circ \sim 50^\circ$ 之间. 主要原因, 一方面由于 TIMED 卫星观测的纬度范围每 60 天在 $52^\circ\text{S} \sim 83^\circ\text{N}$ 和 $52^\circ\text{N} \sim 83^\circ\text{S}$ 之间交替变换, 因此高纬地区匹配数据较少; 另一方面 FY3D/GNOS 掩星数据虽然全球均有分布, 但是中纬地区探测密度高, 赤道地区相对较低^[4,6]. 所以匹配数据在南北半球 $10^\circ \sim 50^\circ$ 较多, 赤道地区次之, 高纬最少.

由于大气温度会随着高度、经纬度和时间变化, 所以在统计时还将分析温度偏差廓线和标准偏差廓线随纬度和季节的变化. 纬度和季节的分类标准如表 1 所示, 与文献 [12] 的划分标准一致.

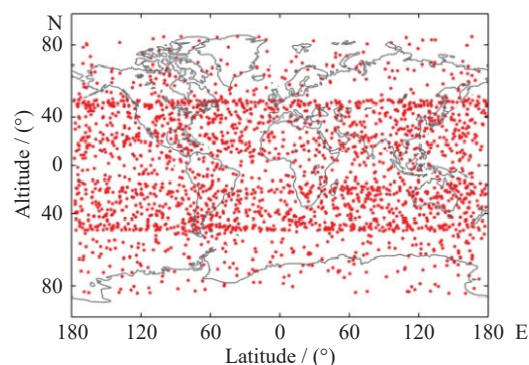


图 1 FY3D/GNOS 与 TIMED/SABER 卫星在 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日期间匹配数据的全球分布

Fig. 1 Global distribution of matching data between FY3D/GNOS and TIMED/SABER satellites from 1 January 2019 to 31 December 2021

表 1 纬度和季节划分标准

Table 1 Latitude and seasonal criteria

分类		北半球	南半球
纬度	低纬	$0^\circ \sim 30^\circ\text{N}$	$30^\circ\text{S} \sim 0^\circ$
	中纬	$30^\circ \sim 60^\circ\text{N}$	$60^\circ \sim 30^\circ\text{S}$
	高纬	$60^\circ \sim 90^\circ\text{N}$	$90^\circ \sim 60^\circ\text{S}$
季节	春季	3—5月	9—11月
	夏季	6—8月	12—2月
	秋季	9—11月	3—5月
	冬季	12—2月	6—8月

将全球匹配结果按照季节、纬度和年份划分, 数据分布情况如表 2 所示. 可以看出, 中纬地区匹配数据最多, 为高纬地区的三倍以上, 低纬地区匹配量次之, 如前所述, 这与两颗卫星探测数据的纬度覆盖特点相关. 按照季节划分来看, 夏秋两季的匹配数据较多, 冬季次之, 春季最少. 并且数据匹配量从 2019 至 2021 年逐年增加.

1.3 数据处理方法

对于符合时空匹配条件的每一组数据对, 按照三次样条函数插值到 1 km 间隔的高度格点上, 对于每一个高度格点 h , 求出不同温度数据间的绝对偏差 ΔT_i 和相对偏差 δ_i , 其定义为

$$\Delta T_i(h) = T_i(h) - T_i^0(h), \quad (1)$$

$$\delta_i(h) = \frac{T_i(h) - T_i^0(h)}{T_i^0(h)}. \quad (2)$$

表 2 FY3D/GNOS 与 TIMED/SABER
匹配数据分布情况

Table 2 Distribution of FY3D/GNOS and
TIMED/SABER matching data

分类		匹配数目
纬度	低纬	839
	中纬	1194
	高纬	302
季节	春季	470
	夏季	688
	秋季	643
	冬季	534
年份	2019年	737
	2020年	779
	2021年	819
	总共	2335

其中, 用 T_i 表示参考温度数据 (即 TIMED/SABER 温度数据或者 NRLMSISE00 大气模式温度数据), T_i^0 表示待评估温度数据 (即 FY3D 温度数据), 下标 i 表示第 i 个匹配样本.

对于两种温度偏差廓线, 找出同一高度平面 h 上的 n 个绝对温差廓线进行统计, 借鉴 Xu 等^[3] 研究中平均温度偏差、平均相对偏差和温度偏差的标准偏差等统计量的定义方式, 本文做出如下定义, 平均温度偏差定义为

$$\overline{\Delta T}(h) = \left[\sum_{i=1}^n \Delta T_i(h) \right] / n, \quad (3)$$

平均相对偏差定义为

$$\overline{\delta}(h) = \left[\sum_{i=1}^n \delta_i(h) \right] / n, \quad (4)$$

温度偏差的标准偏差 (本文中简称为标准偏差) 定义为

$$\sigma(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\Delta T_i(h) - \overline{\Delta T}(h) \right]^2}{n-1}}. \quad (5)$$

式 (3)~(5) 中, 下标 i 表示同一高度上数组中的第 i 个元素; $\overline{\Delta T}(h)$ 为高度 h 处的平均温度偏差; σ 为平均温度偏差的标准偏差, 表示温度数据的离散程度, 以 3σ 为限差剔除每一个高度上偏离平均值 $\overline{\Delta T}(h)$ 超过 3σ 的数据.

2 结果与讨论

将匹配上的每一对温度数据廓线进行比较, 并计算不同温度数据间的绝对偏差 ΔT_i 和相对偏差 δ_i . 图 2(a) 给出了一组匹配上的 FY3D 和 TIMED/SABER 温度廓线以及相应的 NRLMSISE00 大气模式温度廓线, 图 2(b) 为 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差廓线. 在图 2 个例中, FY3D 掩星探测数据的地理位置为 (24.15°S, 92.89°E), 与之匹配的 TIMED/SABER 数据的地理位置是 (24.55°S, 92.98°E), 二者世界时 (UT) 时间相差 0.14 h, NRLMSISE00 模式选取的地理位置为 FY3D 和 SABER 匹配上的地理位置的平均值 (24.35°S, 92.94°E), 观测时间为 2019 年 1 月 2 日 19:27 UT. 从图中可以看出三种温度随高度的变化趋势大体一致, 并且在 12~50 km 范围内偏差较小, 在 10 K 以内. 在 50 km 以上, 三种温度廓线开始出现较大差异, SABER 温度廓线存在大幅度且频繁的波动, 而 FY3D 和 NRLMSISE00 的温度廓线则比较平滑. 这可能是因为大气中存在丰富的波动和扰动, 由于大气密度随高度呈指数递减, 因此各类波动和扰动的幅度在破碎之前会随着高度的升高而增大. TIMED/SABER 温度数据在 MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere) 区域质量较高^[9,10], 对发生在该区域的各种大气扰动都有较好响应, 所以单条温度廓线会存在大幅度波动. 而在该高度区域内 FY3D 掩星观测噪声较大, 探测数据质量不高, 且反演温度数据时借鉴了 MSIS90 经验大气模式和 T639 模式的信息^[6], 然而经验模式反映的是大气长期统计的平均状态, 在表征瞬时扰动方面具有局限性, 所以该区域内 FY3D 温度数据对于各种扰动没有较好的响应.

在对每一对匹配上的温度数据廓线进行分析的基础上, 对全球平均温度偏差的高度分布特征, 温度偏差的纬度分布特征和季节变化特征以及南北半球异同进行统计分析.

2.1 全球平均温度偏差的高度分布

将三年内 FY3D/GNOS, TIMED/SABER 和 NRLMSIE00 在全球范围内所有匹配上的温度廓线进行平均, 并将温度偏差按照式 (3)~(5) 进行统计分析, 得到的平均温度、平均温度偏差、标准偏差和相对偏差的高度分布剖面如图 3 所示.

图 3(a) 给出了温度随高度的分布情况, 可以看

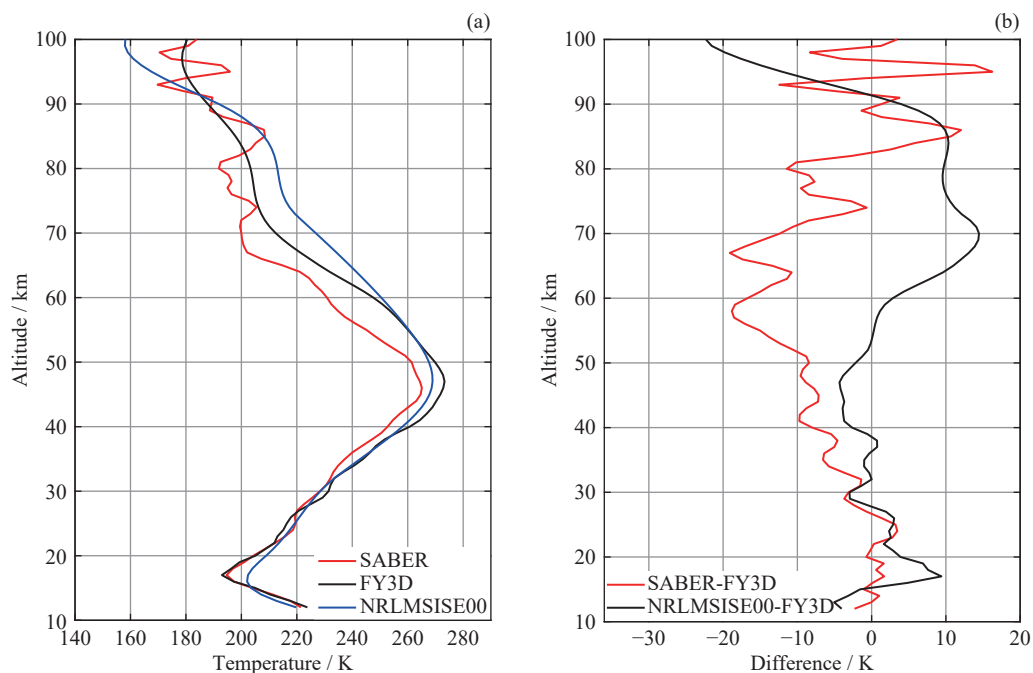


图 2 2019 年 1 月 2 日 19:27 UT 在 (24.35°S, 92.94°E) 附近匹配上的 FY3D/GNOS, TIMED/SABER 和 NRLMSISE00 温度廓线以及温度偏差廓线

Fig. 2 Matched FY3D/GNOS, TIMED/SABER, and NRLMSISE00 temperature profiles and temperature difference profiles around (24.35°S, 92.94°E) at 19:27 UT on 2 Jan. 2019

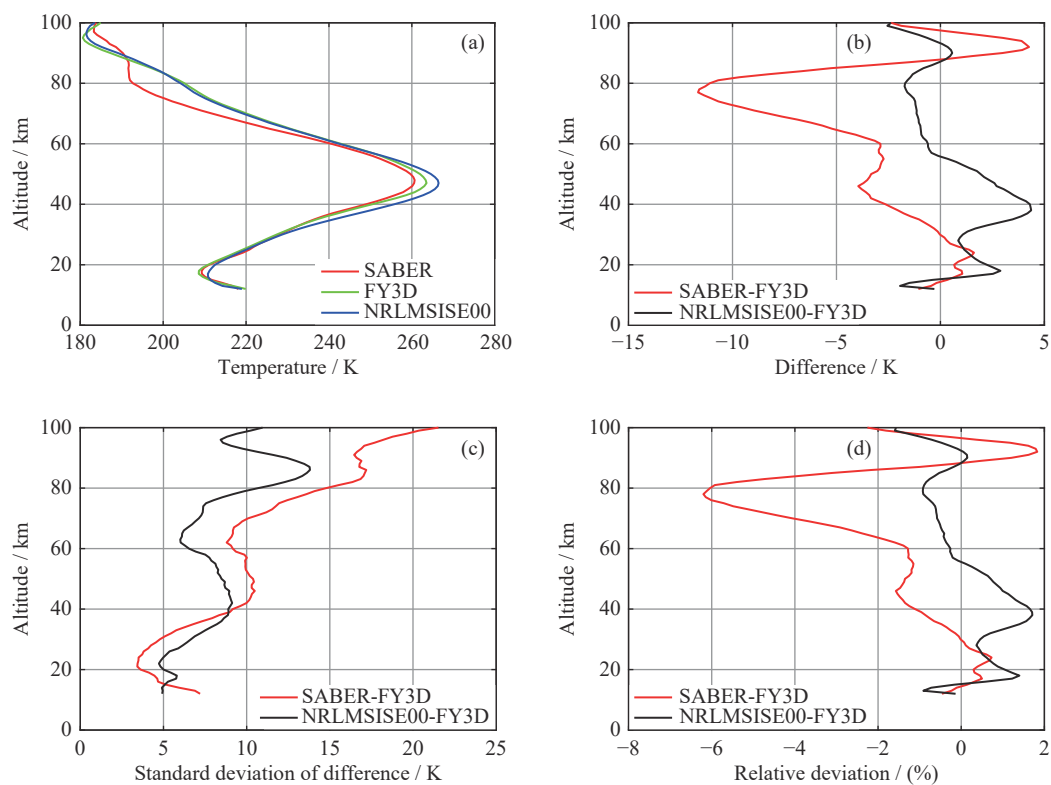


图 3 FY3D, SABER, 和 NRLMSISE00 的全球平均温度、平均温度偏差、标准偏差和相对偏差

Fig. 3 Mean temperature, average temperature difference, standard deviation, and relative deviation of SABER, NRLMSISE00 and FY3D

出三种温度随高度的变化趋势大体一致. 大气温度先随着高度的升高而减小, 在约 18 km 处达到极小值 (对流层顶附近, 约 210 K), 之后随着高度的升高而增大, 在约 47 km 处达到极大值 (平流层顶附近, 约 263 K), 最后随着高度的升高而减小. 同时, 三种温度数值之间存在一定差别, 例如在 60 km 以上, 相比于 SABER 探测温度, FY3D 温度数据与 NRLMSISE00 模式温度更为相近. 主要原因是在该高度上为去除 FY3D 电离层效应产生的残差影响, 参考了 MSIS 大气模式的信息, 且由弯曲角反演为折射率廓线时, 在没有观测弯曲角的高度上也参考了 MSIS 模式计算的弯曲角^[6], 所以最终 FY3D 温度数据与 NRLMSISE00 温度较为接近.

图 3(b) 给出了平均温度偏差的垂直廓线. 整体上看, 全球范围内 SABER-FY3D 温度偏差仅在低平流层 (0~1.8 K) 和低热层 (0~4.4 K) 为正值, 其他高度上都为负值 (-11.6~0 K). 这与 Remsberg 等^[9]将 SABER 观测与激光雷达探测相比得出的 SABER 温度在平流层下层偏高 (高 1~3 K), 但在平流层上层偏低 (低 1~3 K) 的结论一致. Mlynarczyk 等^[14]也比较了 15~35 km 高度范围内的 SABER 探测温度与 COSMIC 掩星温度数据, 结果表明 SABER 的温度高约 0.3~2.5 K. 已知掩星温度在平流层大部分区域 (5~45 km) 内质量较高, 所以该高度区域内 SABER-FY3D 温度偏差可能主要是由于 SABER 温度误差引起的. SABER-FY3D 温差廓线约在 30 km 高度处接近于 0 K, 这与文献 [12] 的研究结果相似. Gong 等^[12]对 COSMIC 大气掩星探测温度和 TIMED/SABER 温度数据做了全球统计分析, 结果表明二者之间的温差在 38 km 接近 0 K. 本文中平均温度偏差接近 0 K 所对应的高度与 Gong 等^[12]所给高度相差 8 km, 这可能是由于 COSMIC 探测温度和 FY3D 探测温度有所差异导致的. 60 km 以上, SABER-FY3D 温度负偏差随着高度急剧增大, 在 77 km 处最大达到 -11.6 K. 一方面, 这与 Remsberg 等^[9]表明 SABER 探测温度在中间层偏低的结论相符, 同时还与本研究中所使用的 SABER V2.07 版本温度数据有关, Mlynarczyk 等^[15]的研究表明 SABER V2.07 版本提供的中间层和低热层温度在 2019 年 12 月至 2022 年期间与预期相比偏低 2~6 K. 另一方面, 在该高度上大气折射信号比较弱, 对仪器捕捉信号的灵敏性有较高

的要求, 然而 FY3D/GNOS 的天线方位角覆盖范围仅在 $\pm 45^\circ$ 以内, 且强天线增益在边缘探测时会衰减, 导致了 GNOS 信噪比较低, 探测能力欠佳^[16]. 再加上中间层顶区域热力结构不稳定, 综合以上因素, 可能最终导致了该高度范围内 SABER-FY3D 温度偏差较大且随高度变化较为剧烈.

相比之下, NRLMSISE00-FY3D 温度偏差较小, 全高度范围均在 -2~5 K 以内, 且随高度的变化没有 SABER-FY3D 温度偏差的剧烈; 这可能是因为 FY3D 在较高高度上大量借鉴了模式背景场信息, 而模式反映的是大气长期变化规律^[6]. NRLMSISE00-FY3D 温度偏差在平流层区域为正值, 最大为 4.4 K, 在其他高度区域为负值 (-2~0 K). 同上所述, NRLMSISE00-FY3D 在平流层区域的温度正偏差可能与 NRLMSISE00 模式温度在该高度上模拟结果不佳有关.

图 3(c) 给出标准偏差随高度的变化, 该图可以表征中层大气多种复杂波动导致的大气温度的变化程度. SABER-FY3D 温度标准偏差随高度的升高而增大, 在 12~60 km 范围内, 温度标准偏差为 3.4~10.4 K, 在 60~100 km 范围内, 温度标准偏差为 9~22 K. NRLMSISE00-FY3D 温度标准偏差在整个高度范围内为 5~13.8 K.

图 3(d) 表示平均相对偏差随高度的变化, 其高度分布特征与图 3(b) 给出的平均温度偏差相同. 与平均温度偏差类似, NRLMSISE00-FY3D 平均相对偏差较小, 在 -1.6%~1.7% 之间; SABER-FY3D 平均相对偏差较大, 在 -6.1%~1.8% 之间.

2.2 不同纬度区域的平均温度偏差比较

为了分析 FY3D/GNOS 探测温度与 TIMED/SABER 探测温度以及 NRLMSISE00 模式温度的偏差随纬度的变化特征, 对三年内的三种温度按照低纬、中纬和高纬进行统计分析. SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 在三个纬度区域的平均温度偏差和标准偏差随高度的分布如图 4 所示. 为了和全球平均结果进行比较, 全球平均温度偏差和标准偏差也在图 4 中给出.

从图 4(a)(b) 可以看出, SABER-FY3D 温度偏差在低纬和中纬地区与全球平均温度偏差比较相近; NRLMSISE00-FY3D 温度偏差则在中纬和高纬地区与全球平均温度偏差更为接近. 在 12~60 km

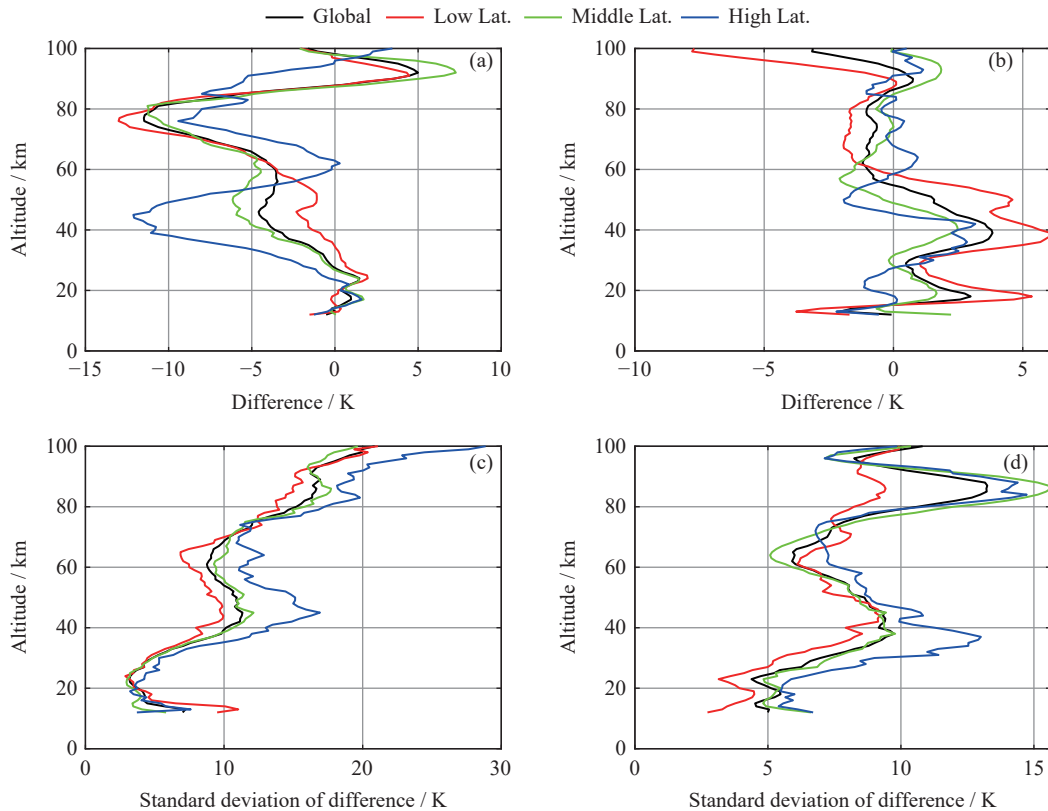


图4 不同纬度区域的 SABER-FY3D(a) 和 NRLMSISE00-FY3D(b) 平均温度偏差以及 SABER-FY3D(c) 和 NRLMSISE00-FY3D(d) 温度标准偏差

Fig. 4 Temperature difference of SABER-FY3D (a) and NRLMSISE00-FY3D (b), standard deviations of difference of SABER-FY3D (c) and NRLMSISE00-FY3D (d) at different latitudes

范围内, SABER-FY3D 温度偏差在低纬地区最小 ($-3.8 \sim 1.8$ K), 高纬地区最大 ($-12 \sim 1.6$ K); 在此高度范围内 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差则与 SABER-FY3D 温度偏差正好相反, 在高纬地区最小 ($-1.6 \sim 2.4$ K), 低纬地区最大 ($-3.9 \sim 6.1$ K). 在 60~85 km 范围内, SABER-FY3D 温度偏差随高度先急剧增大而后急剧减小, 各纬度上温度负偏差最大值可达 -12 K; 而 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差则很小, 中高纬地区基本接近于 0 K. 85 km 以上, SABER-FY3D 温度偏差在低纬和中纬地区先增至温度正偏差最大值, 分别约为 4.5 K 和 7.3 K, 随后温度偏差逐渐减小, 在 100 km 左右减小到 0 K; NRLMSISE00-FY3D 温度偏差则在低纬地区随高度升高而急剧增大, 最大温度负偏差可达 -7.8 K; 而在中高纬地区温度偏差很小, 呈现正偏差, 在 100 km 处温差减小至 0 K. 从图 4(c)(d) 可以看出, 在多数高度上, 两类温度标准偏差廓线均在中、高纬地区比全球平均标准偏差大, 在低纬地区比全球平均标准偏差小.

Gong 等^[12] 研究了 15~60 km 高度范围内 COSMIC 大气掩星观测数据与 SABER 探测数据的温度偏差随纬度的变化, 发现其不同纬度区域存在系统性偏差^[12]. 此外, 有研究表明, 0~30 km 的 CHAMP, COSMIC 等掩星探测数据, 在不同纬度并不存在明显的差异^[17,18]. Gong 等^[12] 依此推断, 15~30 km 高度范围上 SABER 和 COSMIC 的温度偏差在不同纬度存在系统性偏差的可能原因是, 由于 SABER 数据本身的探测精度具有随纬度的依赖性^[12]. 由此可推, 本文图 4(a) 中 12~30 km 高度区域内不同纬度 SABER-FY3D 温度偏差之间的差异可能是由于 SABER 数据的观测精度随纬度存在依赖性导致的. 目前, 鲜有研究 30 km 以上的掩星观测精度随纬度的变化. 在图 4(a) 中, 高纬地区 SABER-FY3D 温度偏差在 30~50 km 高度区域内为负值且明显偏离全球平均值. 然而 Gong 等^[12] 的研究表示, 高纬区域平流层上部的 SABER-COSMIC 温度偏差大约为 $-2 \sim 0$ K, 且与全球统计结果并无较大区别. 这与本文结果不同, 可能

说明高纬区域平流层上部 FY3D 探测温度偏高。

为了更加具体地分析温度偏差随纬度和高度的变化,在纬度方向上以 4° 为间隔建立起固定格点,将 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差插值到每一个格点内,然后对温度偏差进行纬向平均,计算出同一纬度所对应的所有经度网格内的平均温度偏差。由此得到的平均温度偏差和标准偏差的高度-纬度分布如图 5 所示。SABER-FY3D 温度偏差在全球低平流层主要表现为正偏差,随着高度增加出现温度负偏差,且温度负偏差随高度增大,温度最大负偏差主要出现在中低纬度地区 $60\sim 80$ km 之间的中间层顶区域,在此高度区域以上的中低纬度地区主要表现为温度正偏差。SABER-FY3D 温度偏差的标准偏差随高度增加逐渐增大。此外,可以看到在约 $35\sim 60$ km 高度范围内,北半球高纬区域的温度负偏差比其他纬度明显,标准偏差也比其他纬度大。其产生原因将在 2.4 部分做简要说明。NRLMSISE00-FY3D 温度偏差在全球平流层高度区域内均表现为正偏差,正偏差峰值出现在赤道上空 35 km 附近,约

为 5.6 K; 在平流层顶以上温度偏差较小,在中间层主要为负偏差,在低热层高纬度区域出现正偏差。NRLMSISE00-FY3D 温度标准偏差在高度方向上呈现出三段式分布,温度标准偏差随高度变化呈现出先增大后减小再增大,最后减小的趋势。

2.3 不同季节的平均温度偏差比较

不同季节的和全年平均的 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 平均温度偏差和标准偏差如图 6 所示。从 6(a) 可以看出,四个季节的 SABER-FY3D 温度偏差廓线相对于全年统计结果都有所偏移。其中春季的偏差与全年平均偏差较为贴近,夏季偏移尤为明显。夏季温度偏差廓线在 $12\sim 60$ km 范围内相对全年统计廓线存在明显的正向偏移,在 70 km 以上,则表现出负向偏移,最大可达 -14.8 K。秋季温度偏差廓线在平流层上部和中间层顶区域相对全年统计结果偏大。冬季温度偏差廓线在绝大部分高度上相对全年统计结果都存在负向偏移。从图 6(c) 可以看出, SABER-FY3D 温度标准偏差在夏季最小,冬季最大,春秋两季与全年结果最为接近。该

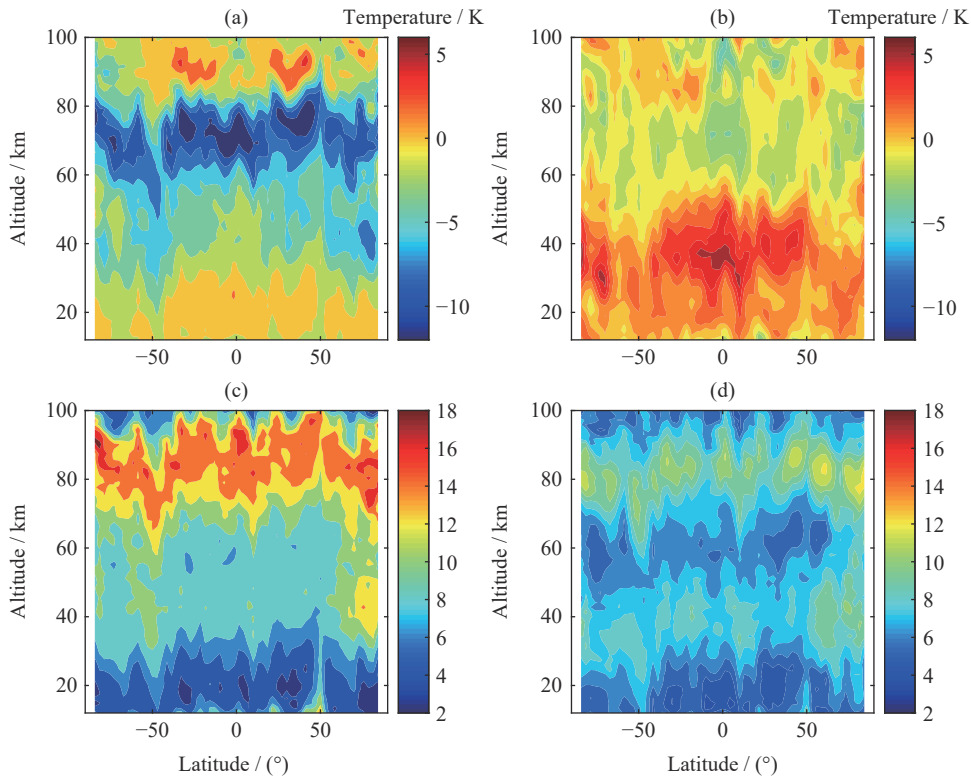


图 5 SABER-FY3D(a) 和 NRLMSISE00-FY3D(b) 平均温度偏差和 SABER-FY3D(c) 和 NRLMSISE00-FY3D(d) 标准偏差随纬度和高度的变化

Fig. 5 Mean temperature deviation of SABER-FY3D (a) and NRLMSISE00-FY3D (b), standard deviations of SABER-FY3D (c) and NRLMSISE00-FY3D (d) with latitude and altitude

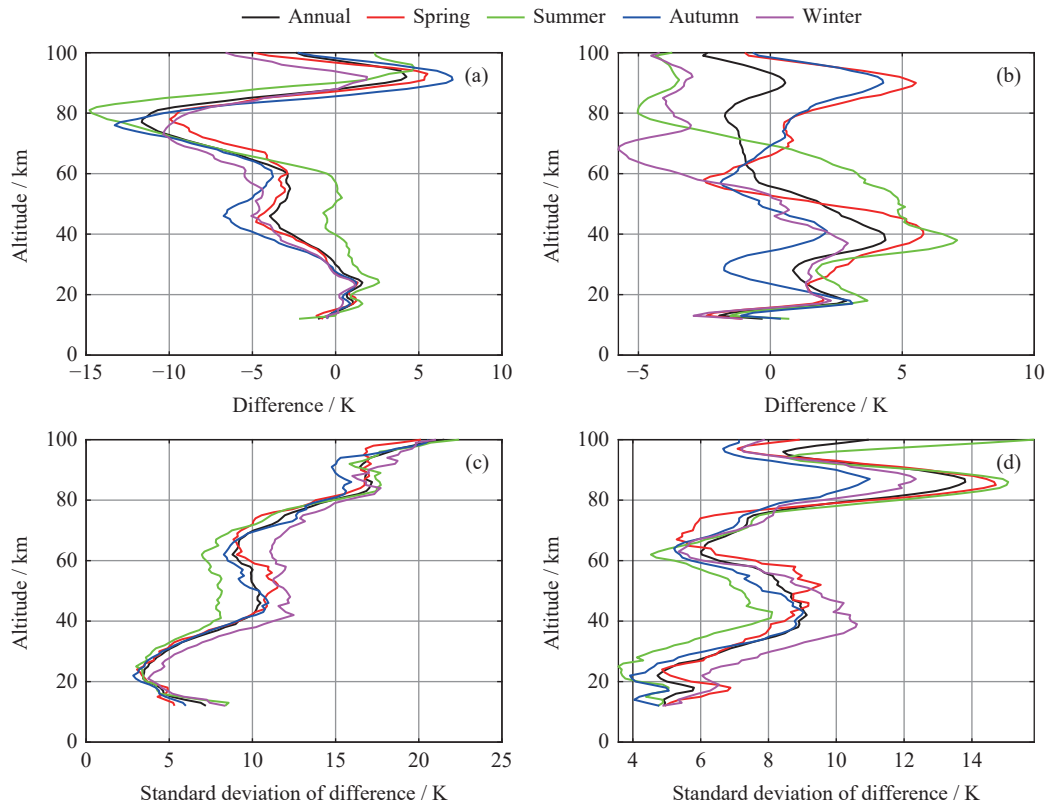


图6 不同季节的 SABER-FY3D(a) 和 NRLMSISE00-FY3D(b) 平均温度偏差以及 SABER-FY3D(c) 和 NRLMSISE00-FY3D(d) 温度标准偏差

Fig. 6 Temperature difference of SABER-FY3D (a) and NRLMSISE00-FY3D (b), standard deviations of SABER-FY3D (c) and NRLMSISE00-FY3D (d) at different seasons

结论与 Gong 等^[12] 给出的 SABER 测量温度和 COSMIC 大气掩星探测温度的季节差异一致. 从图 6(b) 可以看出, NRLMSISE00-FY3D 平均温度偏差随季节变化非常大, 且同一季节内不同高度区域上的温度偏差之间的差别也非常大. 整体来看, 冬季的温度偏差相对全年统计结果存在负向偏移; 春季的温度偏差相对全年统计结果存在正向偏移. 在 12~60 km 以内, 大部分高度上 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差在各季节均为正偏差; 70 km 以上, 夏冬两季为温度负偏差, 春秋两季为温度正偏差. 在图 6(d) 中, NRLMSISE00-FY3D 温度标准偏差在 60 km 以下表现为冬季最大, 夏季最小, 春秋两季介于冬季和夏季之间; 60~80 km 范围内标准偏差在春季较小, 在其他季节和全年统计结果都比较接近; 80 km 以上的温度标准偏差在夏季最大, 秋季最小.

同样, Gong 等^[12] 也研究了 15~60 km 高度区域内 COSMIC 大气掩星观测数据与 SABER 探测数据的温度偏差随季节的变化, 发现其在不同季节也存在

系统性偏差. 然而, Xu 等^[19] 的研究表明, 在 0~30 km 范围内掩星探测温度数据在不同季节并无明显差异. 所以 Gong 等^[12] 推测, 15~30 km 高度区域上 COSMIC 大气掩星与 SABER 探测温度偏差在不同季节之间存在系统性偏差的原因可能是 SABER 数据本身的探测具有随季节的依赖性^[12]. 依此类比, 本文图 6(a) 中 12~30 km 高度范围内, SABER-FY3D 温度偏差在不同季节的系统性偏移可能也是由于 SABER 数据探测精度可能具有随季节的依赖性引起的. 很少有对 30 km 以上的掩星温度数据精度进行验证的研究工作, 该高度范围内温度偏差在不同季节产生的系统性偏差的原因还需进一步确认.

2.4 南北半球的平均温度偏差对比

为了比较温度偏差的南北半球异同, 图 7 分别给出了北半球和南半球 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 温度平均偏差随高度和月份的变化. 如图 7(a) 所示, 北半球 SABER-FY3D 温度偏差随季节和高度的变化较为明显, 零偏差线所在高度在 4~6 月较高,

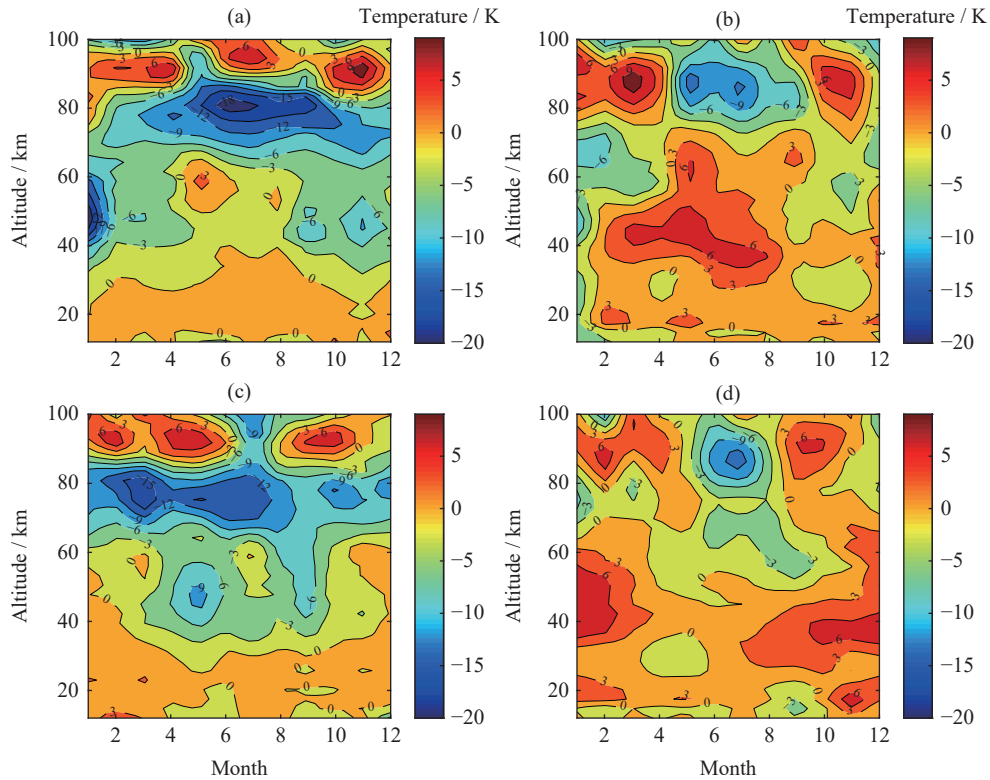


图 7 北半球 SABER-FY3D(a) 和 NRLMSISE00-FY3D(b) 月平均温度偏差以及南半球 SABER-FY3D(c) 和 NRLMSISE00-FY3D(d) 月平均温度偏差随月份和高度变化

Fig. 7 Monthly mean temperature difference in the northern hemisphere of SABER-FY3D (a) and NRLMSISE00-FY3D (b) with month and altitude. Monthly mean temperature difference in the southern hemisphere of SABER-FY3D (c) and NRLMSISE00-FY3D (d) with month and altitude

约在 50~65 km 处, 在 11 月最低, 约为 20 km; 最大温度负偏差出现在 1 月的 50 km 和 7 月份的 80 km 左右, 可达近 -20 K; 最大温度正偏差出现在低热层区域, 且存在三个正温度偏差峰值中心, 分别出现在 4 月、7 月和 11 月。值得注意的是, 在北半球 40~60 km 高度区域内, 春末和夏季表现为温度正偏差, 即 SABER 探测温度大于 FY3D 探测温度; 其他季节为温度负偏差, 尤其在 1 月温度负偏差较大, 即在 40~60 km 高度区域内, 春末和夏季表现为温度正偏差, 即 SABER 探测温度大于 FY3D 探测温度; 其他季节为温度负偏差, 尤其在 1 月温度负偏差较大, 即在 40~60 km 高度区域内, 春末和夏季表现为温度正偏差, 即 SABER 探测温度大于 FY3D 探测温度。图 7(c) 表示南半球 SABER-FY3D 月平均温差随高度的变化, 零偏差线所处高度在 11~12 月最高, 大约在 61 km 高度上, 在 5 月最低, 大约在 20 km 高度上; 温度负偏差最大值出现在 3 月的 75 km 处, 约为 -17.5 K。与北半球相似, 在南半球的低热层区域主要为温度正偏差, 且温度正偏差随月份的分布也存在三峰结构。

图 7(b) 中北半球 NRLMSISE00-FY3D 月平均温度偏差随季节和高度有较大的变化。在 50 km 以

下, 基本全年 NRLMSISE00-FY3D 月平均温度偏差均为正偏差; 在 50~80 km 范围内, 4~9 月表现出温度正偏差, 其他月份表现为温度负偏差; 在 80~100 km 范围内则正好相反, 4~9 月表现为温度负偏差, 其他月份表现出温度正偏差。图 7(d) 中, 南半球 50 km 以下 NRLMSISE00-FY3D 月平均温度偏差分布与北半球基本一致, 基本都为温度正偏差; 50 km 以上, 温度正偏差最大值可达 7.5 K, 显示出双峰结构, 峰值分别出现在 2 月和 9 月。温度最大负偏差出现在 7 月的 80 km 高度处, 约为 -13.3 K。

将图 7(a)(c) 联系起来后发现: 零偏差线所在高度都在春夏季节较高, 秋冬季节较低, 温度负偏差最大值都处在中间层顶附近, 温度正偏差最大值都处在低热层区域, 且存在明显的三峰结构。在 40~60 km 范围内, SABER-FY3D 温度偏差在冬季为负值, 在夏季为正值。这表明在南、北半球的 40~60 km 高度范围内, FY3D 探测温度在冬季比 SABER 探测温度高, 在夏季比 SABER 探测温度低。

同时,南北半球的温度偏差之间存在差别.南半球 SABER-FY3D 温度最大正偏差和最大负偏差都没有北半球的明显.在 40~60 km 高度范围内,SABER-FY3D 温度最大负偏差在北半球冬季可达到 -20 K,在南半球冬季约为 -7.9 K.这主要因为冬季北半球高纬区域的温度偏差较大,导致北半球的半球平均温度偏差也较大.对比分析 SABER-FY3D 温度偏差在南、北半球的冬季(北半球 1 月,南半球 7 月)随高度-纬度的分布(该图在本文中未展示),结果表明在 40~60 km 高度范围内北半球高纬区域存在明显的温度负偏差,而且负偏差的绝对值显著高于其他纬度的数值.这主要因为北半球高纬度区域的海陆结构比南半球复杂,以致该区域内与地形相关的大气波动和大气现象更为丰富.例如,与行星波相关联的平流层爆发性增温事件在北半球冬季通常比南半球冬季更丰富和剧烈.剧烈的大气温度变化给温度的探测带来挑战,从而会引起不同探测方式测量温度之间有较大差别.这也会导致图 5 中 35~55 km 高度范围内北半球高纬区域的温度偏差和标准偏差比其他纬度大.

3 结论

于 2017 年 11 月发射的 FY3D/GNOS 卫星对大气温度进行了系统探测,并给出 0~100 km 高度区域的大气温度数据.然而目前尚缺乏将该数据与其他卫星探测结果和模式结果进行系统比较分析的验证性工作,该数据也尚未在科学研究中得到广泛应用.本文将 FY3D/GNOS 探测温度与 TIMED/SABER 卫星探测温度和 NRLMSISE00 模式温度进行比较分析,从而对 FY3D/GNOS 探测温度进行检验,详细分析了 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差及其随高度、纬度、季节的分布以及南北半球的差异,得到以下结论.

(1) 整体上看, FY3D, TIMED/SABER 以及 NRLMSISE00 提供的三种温度数据随高度的变化趋势大体一致,但因为探测手段、探测精度以及数据反演方式不同等原因,温度数值之间存在不同程度的差别.

(2) SABER-FY3D 的全球平均温度偏差在 12~30 km 高度上为正偏差 (0~1.8 K),在 30 km 左右接近于 0 K,随着高度增加出现负偏差且温度负偏差整

体随高度增大,最大温度负偏差出现在 77 km 左右,约为 -11.7 K,随后温度负偏差又迅速减小,在约 87 km 处达到 0 K. NRLMSISE00-FY3D 温度偏差在平流层为正值 (0~4.4 K),在中间层和低热层为负值 (-2~0 K),最大温度偏差出现在 38 km 处,约为 4.4 K.

(3) SABER-FY3D 温度偏差和 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差都会随着纬度和季节的变化而变化.总体来看, SABER-FY3D 温度偏差在 60 km 以下在低纬地区较小 (-3.8~1.8 K),高纬地区较大 (-12~1.6 K),夏季较小 (-0.5~2.2 K),冬季较大 (-6.2~1 K); 60~80 km 范围内, SABER-FY3D 温度偏差在夏季和高纬地区变化较为剧烈.而 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差则正好相反,在 60 km 以下在高纬地区较小 (-1.6~2.4 K),低纬地区较大 (-3.9~6.1 K),冬季较小 (-2~2.2 K),夏季较大 (-1.3~7.1 K); 60~80 km 高度上 NRLMSISE00-FY3D 温度偏差随纬度变化较小,但随季节变化比较大.

(4) 温度偏差在南、北半球的分布存在一定的异同点.如南北半球 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 月平均温度偏差随高度和月份的变化均存在零偏差线所在高度在春夏季节较高,秋冬季节较低的现象.南北半球 SABER-FY3D 温度负偏差最大值都处在中间层顶附近,温度正偏差最大值都处在低热层区域,且存在明显的三峰结构.但南、北半球的 SABER-FY3D 平均温度偏差之间仍存在一些差别,如 40~60 km 范围内,北半球冬季存在较大的温度负偏差,而南半球冬季的温度负偏差则较小.且对于 SABER-FY3D 和 NRLMSISE00-FY3D 两种温度偏差而言,北半球的最大正、负偏差的绝对值均比南半球的大.

本文的研究结果不仅为以后充分利用国内自主探测温度数据 (FY3D/GNOS 探测温度) 开展中层大气温度的研究提供了一定的参考依据,还有助于将来 MSIS 大气经验模式的改进.

致谢 全球大气温度数据由 TIMED/SABER 研究组提供. FY3D/GNOS 温度数据由中国国家卫星气象服务中心提供.在本研究工作中还得到中国科学院国家空间科学中心宫晓艳老师、国家卫星气象中心杨光林老师以及俄罗斯科学院西伯利亚分院沙费尔空间物理和高层大气物理研究所 Koltovskoi Igor 老师的帮助.

参考文献

- [1] LIAO M, ZHANG P, YANG G L, *et al.* Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(2): 781-792
- [2] WANG D W, TIAN Y S, SUN Y Q, *et al.* Preliminary in-orbit evaluation of GNOS on FY3D satellite[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Valencia, Spain: IEEE, 2018
- [3] XU Xiaohua, ZHU Zhouzong, LUO Jia. Quality analysis of the neutral atmospheric products from FY-3C radio occultation based on IGRA2 Radiosonde data and COSMIC radio occultation products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(3): 384-393 (徐晓华, 朱洲宗, 罗佳. 利用 IGRA2 探空数据和 COSMIC 掩星资料对 FY-3C 掩星中性大气产品进行质量分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, **45**(3): 384-393)
- [4] GUO Jiabin, JIN Shuanggen. Variations of tropopause parameters over China from FY-3C GNSS radio occultation observations[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, **41**(1): 21-26 (郭佳宾, 金双根. 利用 FY-3C 卫星 GNSS 掩星数据分析中国区域对流层顶参数变化 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, **41**(1): 21-26)
- [5] BI Y M, YANG Z D, ZHANG P, *et al.* An introduction to China FY3 radio occultation mission and its measurement simulation[J]. *Advances in Space Research*, 2012, **49**(7): 1191-1197
- [6] LIAO Mi. Study on the Retrieval and Error Analysis of Radio Occultation Data on FY Series[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020 (廖蜜. 风云 GNOS 大气掩星资料处理方法与误差分析研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2020)
- [7] DU Q F, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* The on-orbit performance of FY-3D GNOS[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019: 7669-7671
- [8] BORMANN N, DUNCAN D, ENGLISH S, *et al.* Growing operational use of FY-3 data in the ECMWF system[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(8): 1285-1298
- [9] REMSBERG E E, MARSHALL B T, GARCIA-COMAS M, *et al.* Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D17): D17101
- [10] GARCÍA-COMAS M, LÓPEZ-PUERTAS M, MARSHALL B T, *et al.* Errors in Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) kinetic temperature caused by non-local-thermodynamic-equilibrium model parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D24): D24106
- [11] MERTENS C J, MLYNCZAK M G, LÓPEZ-PUERTAS M, *et al.* Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μ m Earth limb emission under non-LTE conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(7): 1391-1394
- [12] GONG Xiaoyan, HU Xiong, WU Xiaocheng, *et al.* Comparison of temperature measurements between COSMIC atmospheric radio occultation and SABER/TIMED[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(7): 2152-2162 (宫晓艳, 胡雄, 吴小成, 等. COSMIC 大气掩星与 SABER/TIMED 探测温度数据比较 [J]. 地球物理学报, 2013, **56**(7): 2152-2162)
- [13] XU Jiyao, JI Qiao, YUAN Wei, *et al.* Comparison between the TIMED observed global temperature distribution and the NRLMSISE-00 empirical atmospheric model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26**(3): 177-182 (徐寄遥, 纪巧, 袁韡, 等. TIMED 卫星探测的全球大气温度分布及其与经验模式的比较 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(3): 177-182)
- [14] MLYNCZAK M G, DANIELS T, HUNT L A, *et al.* Radiometric stability of the SABER instrument[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **2**(7): e2019EA001011
- [15] MLYNCZAK M G, MARSHALL B T, GARCIA R R, *et al.* Algorithm stability and the long-term geospace data record from TIMED/SABER[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(5): e2022GL102398
- [16] BAI W H, SUN Y Q, DU Q F, *et al.* An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(6): 1817-1823
- [17] KUO Y H, SCHREINER W S, WANG J, *et al.* Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(5): L05817
- [18] XU Xiaohua, LUO Jia. Statistical validation of COSMIC radio occultation refractivity profiles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, **34**(2): 214-217 (徐晓华, 罗佳. COSMIC 掩星折射指数廓线的统计验证 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, **34**(2): 214-217)
- [19] XU Xiaohua, WANG Haihong. Comparison of precision of GPS Radio occultation profiles in different seasons[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(6): 639-643 (徐晓华, 汪海洪. 不同季节 GPS 掩星廓线精度的比较研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, **35**(6): 639-643)

作者简介



刘红珊 女, 1999 年 5 月出生于云南省昆明市, 硕士研究生。硕士就读于中国科学院大学国家空间科学中心, 专业为空间物理学, 主要研究方向为中高层大气物理与化学。

E-mail: hsliu6688@126.com



高红 (通信作者) 女, 1981 年 11 月出生于云南省大理州, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为中高层大气光化学过程和辐射过程, 以及空间天气变化和低层大气扰动的高层大气效应等。

E-mail: hgao@spaceweather.ac.cn