

ICON/MIGHTI 与 TIMED/SABER 探测温度数据的对比*

牟 霄^{1,2,3} 闫召爱^{1,2,3} 程 旋⁴ 陈志芳^{1,2,3}
杨钧烽^{1,2} 胡 雄^{1,2} 潘蔚琳^{3,5}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(深空探测实验室 北京 100041)

5(中国科学院大气物理研究所 北京 100029)

摘 要 ICON 卫星为临近空间环境特性研究、建模和预报提供了新数据. 通过对 ICON/MIGHTI 与 TIMED/SABER 在 90~105 km 高度探测温度数据的比较, 计算两者的年平均温度偏差和均方根误差, 同时分析月平均温度偏差在不同月份中随高度和纬度的分布情况, 为 MIGHTI 和 SABER 温度探测数据在临近空间大气建模和预报应用提供参考依据. 结果表明, MIGHTI 和 SABER 的温度垂直廓线变化趋势基本吻合, 数值上有所差异. 在 12°S–42°N 范围内, MIGHTI 探测温度与 SABER 相比, 在 90~93 km 时偏低, 偏差最大值约 2.5 K, 在 93~105 km 偏高, 偏差的绝对值最大约 10 K. 在不同季节, 白天的温度偏差通常高于夜晚. SABER 和 MIGHTI 的月平均温度偏差随季节和纬度的变化显著, 夏季时的月平均温度偏差最大, 且温度的均方根误差最大.

关键词 大气温度, 临近空间, 数据比较, ICON/MIGHTI, TIMED/SABER

中图分类号 P352

Comparative between Temperature Data Detected by ICON/MIGHTI and TIMED/SABER

MU Xiao^{1,2,3} YAN Zhaoai^{1,2,3} CHENG Xuan⁴ CHEN Zhifang^{1,2,3}
YANG Junfeng^{1,2} HU Xiong^{1,2} PAN Weilin^{3,5}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190)

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

* 国家自然科学基金项目 (12241101, 42174192, 11872128) 和中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目共同资助

2023-09-01 收到原稿, 2023-11-02 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/>)

4(Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100041)

5(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The ICON satellite provides new data for environmental characterization, modeling, and forecasting in near space. In this paper, the ICON/MIGHTI and TIMED/SABER temperature datasets were compared and analyzed in the range of 90~105 km, and the mean temperature deviation and root-mean-square error of both were calculated. The distribution of monthly mean temperature deviation with altitude and latitude in different months was also analyzed, which is useful for applying the MIGHTI and SABER temperature data in the model and forecast. The results showed that the MIGHTI and SABER vertical profile detections agreed. In the range of 12°S–42°N, the MIGHTI probe temperature is lower than that of SABER in the range of 90~93 km, with a maximum deviation of about 2.5 K, and higher in the range of 93~105 km, with a maximum absolute value of the deviation of about 10 K. The deviation was usually higher during the day than at night. The mean temperature deviation varied significantly with season and latitude and had the largest mean deviation range and the largest root-mean-square temperature error in summer.

Key words Atmospheric temperature, Near space, Data comparison, ICON/MIGHTI, TIMED/SABER

0 引言

临近空间不仅受到来自低层大气波动的影响,还受上部空间环境的影响^[1]. 临近空间主要包含平流层、中间层和低热层,大气温度是进行临近空间环境研究的重要参量. 多年来,随着探测技术的更新迭代,多种技术被用于对临近空间区域温度的探测,例如激光雷达、探空火箭、探空气球和卫星等,开展了大量的温度观测^[2-6],获得了不同地点的大气温度数据,为研究临近空间环境的温度特征提供了多源数据支撑.

为了研究临近空间区域在全球范围的温度特性,通常使用卫星遥感观测获取时空连续的温度数据集. 可以为临近空间提供温度数据的卫星主要有高层大气研究卫星(Upper Atmosphere Research Satellite, UARS),热层-电离层-中层能量学和动力学卫星(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics, TIMED),AURA卫星, GPS 无线电掩星以及电离层连接探索卫星(The Ionospheric Connection Explorer, ICON)等. 不同卫星所处的运行轨道不同,使用的探测技术和仪器也有差异. 通常对不同来源的温度数据集进行对比分析,以掌握温度数据集的可靠性,为数据集在临近空间的应用提供参考依据.

目前,有关多种卫星探测资料的对比分析大多集

中于临近空间 90 km 以下区域. 例如 Wrasse 等^[7]在 15~35 km 高度范围内对 CHAMP 掩星探测数据与 TIMED 数据进行比较,得出 TIMED 的温度数据较 CHAMP 偏高的结论. Gong 等^[8]在 15~60 km 高度范围内对 COSMIC 和 TIMED 探测的大气温度进行了统计分析,提出在 15~38 km 区域 SABER 数据大于 COSMIC 数据,38~60 km 区域 TIMED 数据小于 COSMIC 数据,同时给出了温度差异的时空特征. Schwartz 等^[9]研究了 V2.2 版本的 AURA/MLS 温度数据与多种不同来源的数据差异,AURA/MLS 的温度数据的版本更新至 V4.2 后,Xie 等^[10]对 20~92 km 高度范围内的 TIMED 和 AURA 数据进行对比分析,结果表明 80 km 以上 TIMED 数据高于 AURA 数据,偏差最大达到 10 K,同时给出了温度差异的时空特征.

2019 年发射的 ICON 卫星能提供临近空间上部约 90~105 km 的昼夜温度数据,增加了临近空间顶部区域温度数据集的多样性. Park 等^[11]研究了 100 km 区域附近(Global-scale Observations of the Limb and Disk, GOLD)和 ICON/MIGHTI 的温度数据集的相关性,发现 GOLD 通过远紫外辐射反演得到的温度数据与 ICON/MIGHTI 通过红外辐射获取的温度集相关性较差,指出数据集的差异与粒子运动和太阳辐射有关. 目前,ICON 温度数据与 TIMED

温度数据之间的比较验证研究较少. Hu 等^[12]通过随机挑选两对 TIMED 和 ICON 的温度廓线进行比较, 描述了温度廓线在 92~100 km 的一致性. Stevens 等^[13]通过统计 ICON 和 TIMED 在垂直剖面上的平均温度廓线的差异, 得出 TIMED 的反演温度与 ICON 的温度数据随高度变化具有一致性的结论, 但其仅对 TIMED 和 ICON 温度数据的差异进行了初步分析, 没有开展系统性的定量分析, 缺乏对于两种探测方式在全球范围内不同季节和纬度的差异研究. 因此, 本文采用 2019 年 12 月至 2022 年 10 月的 ICON/MIGHTI 数据, 与相同时间跨度的 TIMED/SABER 的 90~105 km 大气温度数据进行对比, 定量分析温度偏差随月份和纬度的分布情况, 为促进对临近空间时空变化规律的进一步了解以及大气建模和预报研究提供数据支撑, 对为 MIGHTI 和 SABER 的温度数据在科学和工程中的应用提供参考.

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

ICON 由美国宇航局研制, 于 2019 年 10 月发射, 搭载迈克尔逊全球高分辨率热层成像干涉仪 (Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging, MIGHTI), 通过多普勒非对称空间外差光谱技术进行大气成像, 测量大气与空间过渡区的风场和温度等环境要素^[13-15]. 其主要科学目的是探索临近空间环境的可变性, 更好地理解近地空间区域内的太阳强迫和地球大气之间的持续作用所产生的极端和无法预测的变化^[16,17]. ICON 卫星轨道高约 590 km, 轨道倾角为 27°, 垂直分辨率为 3 km, 探测范围覆盖 12°S—42°N 之间, 每 48 天覆盖探测范围的所有地方时. ICON 有两个 MIGHTI 传感器单元, 对 O₂-A 波段的辐射强度进行测量, 彼此独立地反演温度数据. 根据 Stevens 等^[18]的研究, ICON 探测目前只公布了 90~125 km 的白天温度数据以及 90~105 km 的夜晚温度数据, 白天的探测数据在 90~105 km 之间的测量不确定度为 1 K, 夜间 105 km 处探测到的 O₂-A 辐射信息较弱, 且在利用 MIGHTI 数据反演温度时, 采用大气球对称假设, 因此在 95~105 km 之间, 增加约 3 K 的系统不确定性, 夜间探测数据的测量不确定度从 90 km 的 1 K 增加到 105 km 的 3 K. 总体而言, ICON 探测温度的不确定

度在 12 K 以内, 本文采用的数据为 2019 年 12 月至 2022 年 10 月 ICON/MIGHTI V5.0 版本二级温度数据.

多通道宽带辐射计 (Sounding of The Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry, SABER), 搭载在美国国家航空航天局研制的 TIMED 卫星上, 于 2001 年 12 月发射, 通过临边扫描的方式对大气中 15 μm 和 4.3 μm 谱带的 CO₂ 辐射信息进行探测来反演垂直方向上的温度、气压等大气参数. 其主要科学目的是探索 (the Mesosphere-Lower Thermosphere-Ionosphere, MLTI) 范围内大气变化情况, 探测数据多用于研究 MLTI 区域内的能量平衡、大气动力学、大气结构以及大气辐射能量的传输过程^[19]. TIMED 卫星轨道高约 625 km, 轨道倾角为 74.1°, 轨道周期约 97 min, 垂直分辨率约 2 km, 扫描范围是从主半球 83°至副半球 53°, 因 TIMED 卫星沿纬圈缓慢进动, 地方时每天迁移约 12 min, 因此需要 60 天才能覆盖全球 24 h 地方时, 同时每 60 天扫描的主副半球交替变换. TIMED 卫星数据时间跨度长, 在临近空间科学研究和建模方面具有广泛应用^[20-25]. 由于临近空间 70 km 以上的大气通常处于非局地热力平衡状态, TIMED 在此区域的温度数据的不确定度因此受到关注. Rezac 等^[19,26]和 Dawkins 等^[27]分析提出, 90 km SABER 温度的不确定度约为 5 K, 100 km 时约为 13 K, 在 110 km 时增至 25 K. 本文采用的数据为 2019 年 12 月至 2022 年 10 月 TIMED/SABER V2.0 版本二级温度数据.

1.2 数据分析方法

1.2.1 数据预处理

为避免质量较差的探测数据对结果造成影响, 对 MIGHTI 和 SABER 卫星的原始探测数据进行数据预处理、质量控制等步骤, 获得可靠的数据. 参考 Gong 等^[8], Xie 等^[10]以及 Cheng 等^[28]的数据预处理和质量控制方法. 利用卫星数据中质量标识去除数据中的错误值和缺省值; 设定温度、经纬度及压强的合理阈值范围, 对温度数据进行极值检查; 依据气压随高度指数递减的规律, 对每个剖面进行垂直一致性检查, 去除不符合物理规律的剖面, 以此获得质量较高的数据.

TIMED 卫星每天测量的轨道数为 15 条, 每天可探测到约 1400 条温度廓线. ICON 每天测量的轨道

数为 15 条, 每天可获得约 1800 条温度廓线. 由于两颗卫星覆盖探测范围以及卫星进动速度不同, 存在两颗卫星探测的地点不处于同一纬度带以及多条 ICON 温度廓线匹配同一条 TIMED 温度廓线的情况. 为了减少探测的地方时和空间不同带来的影响, 应设定数据匹配条件以避免引入其他干扰, 提高对比结果的可信度. 匹配条件设定为纬度相差小于 1° , 经度相差小于 1° , 时间相差不超过 45 min.

1.2.2 统计方法

对每一组匹配数据, 定义每个高度上温度偏差为

$$\Delta T_i(h) = T_{i_saber}(h) - T_{i_mighti}(h). \quad (1)$$

其中, $T_{i_mighti}(h)$ 表示高度 h 上第 i 组匹配数据中的 ICON 卫星的探测数据, $T_{i_saber}(h)$ 表示高度 h 上第 i 组匹配数据中的 TIMED 卫星的探测数据.

定义每个高度上的平均温度偏差为

$$\overline{\Delta T}(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i(h). \quad (2)$$

定义温度的均方根误差为

$$E_{rms}(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta T_i(h)]^2}{n}}. \quad (3)$$

定义温度的标准偏差为

$$\sigma(h) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{i=1}^n [\Delta T_i(h) - \overline{\Delta T}(h)]^2 \right\}}. \quad (4)$$

将温度偏差数据插值到均匀网格, 高度分辨率为 1 km, 纬度、经度的分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$, 进行复合年的计算分析, 统计大气温度的平均温度偏差、均方根误差及标准偏差.

2 结果分析

2.1 数据匹配结果

每月匹配得到的数据在 300 条左右, 2019 年 12 月至 2022 年 10 月共得到匹配数据 10033 条. 2021 年 1 月和 2021 年 7 月的数据匹配分布情况如图 1 所示, 可以看出数据基本分布在 $10^\circ\text{S} - 40^\circ\text{N}$ 之间, 并且在不同的月份数据集中分布的地理位置范围不同, 这是 MIGHTI 和 SABER 的探测运动速率不同的结果. 此外, ICON 在南大西洋异常区域不能准确探测温度廓线^[14,29], 此区域的数据在质量控制时被剔除.

2.2 个例比较

图 2 给出了 ICON/MIGHTI 和 TIMED/SABER

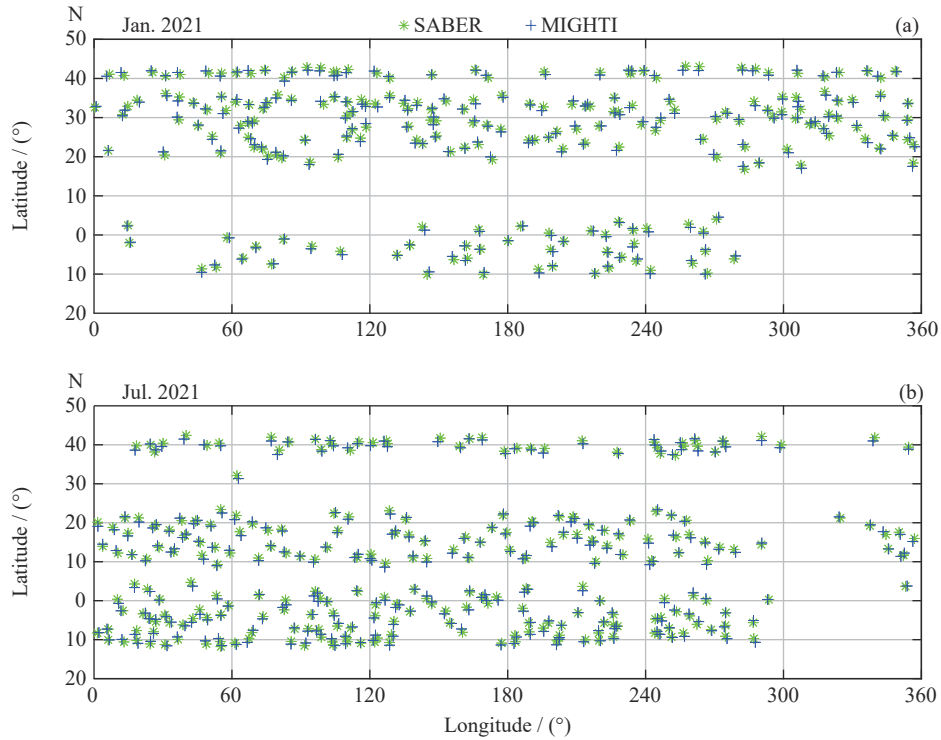


图 1 ICON/MIGHTI 与 TIMED/SABER 温度匹配数据分布

Fig. 1 Distribution of matched data for ICON/MIGHTI and TIMED/SABER temperatures

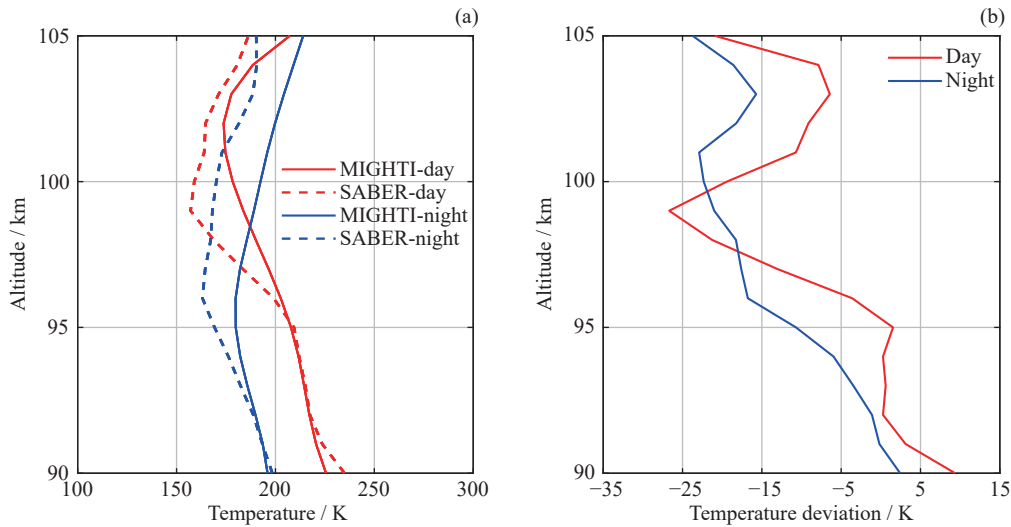


图2 MIGHTI与SABER探测温度个例比较结果及温度偏差. MIGHTI (4.46°N, 25.44°W, 16:06 LT), SABER (4.57°N, 26.13°W, 15:42 LT), MIGHTI (39.95°N, 167.13°E, 02:12 LT), SABER (39.74°N, 166.87°E, 02:48 LT)
Fig. 2 Comparison of individual profiles of temperatures detected and temperature deviation by ICON/MIGHTI and TIMED/SABER. MIGHTI (4.46°N, 25.44°W, 16:06 LT), SABER (4.57°N, 26.13°W, 15:42 LT), MIGHTI (39.95°N, 167.13°E, 02:12 LT), SABER (39.74°N, 166.87°E, 02:48 LT)

探测的温度廓线的个例差异. 图2(a)为随机挑选的2组匹配数据的垂直廓线, 实线和虚线分别代表MIGHTI和SABER的温度探测数据, MIGHTI/ICON探测数据所在的地理位置为(4.46°N, 25.44°W), 观测时间为2022年第283天16:06 LT, 与之匹配的SABER的探测位置是(4.57°N, 26.13°W), 时间为同一天的15:42 LT. 虚线表示夜晚的探测数据, ICON/MIGHTI探测数据所在的地理位置为(39.95°N, 167.13°E), 观测时间为2022年第274天当地凌晨02:12 LT, 与之匹配的SABER的探测数据所在位置为(39.74°N, 166.87°E), 观测时间为同一天的凌晨02:48 LT. 图2(b)为图2(a)所示温度匹配数据的温度偏差.

从图2可以看出, 在90~105 km的高度范围内, TIMED与ICON卫星的温度探测数据随高度变化的趋势大体一致, 变化特征基本吻合, 白天的温度偏差随高度变化比夜晚更剧烈. 在96 km以下, 温度偏差的绝对值在10 K以内, 高度超过96 km后温度偏差的绝对值迅速增大, 这是因为卫星在96 km之上探测温度的不确定度增大, 获得的温度数据的误差不断增大.

2.3 季节差异

将温度偏差 ($T_{\text{SABER}} - T_{\text{MIGHTI}}$) 和均方根误差以

复合年的方式, 除高度和季节外不考虑其他维度的差异, 求取月平均, 以研究MIGHTI和SABER温度数据的平均温度偏差随高度和月份的分布情况. 如图3(a)所示, 结果表明, 平均温度偏差的零偏差线出现在9月的90 km处以及其他月份的93~94 km之间. 随高度增加, 平均温度偏差呈现负值, 最小值达到-20 K, 这说明在90~94 km时, SABER的探测温度比MIGHTI的温度高, 93~105 km时, SABER的探测温度逐渐低于MIGHTI的探测温度. 同时, 在96 km以上, 平均温度偏差随高度增加在不同月份上呈现明显的季节变化, 于10月的100~105 km处及4月的102~105 km处出现极小值, 7月的103 km处出现极大值.

图3(b)给出了ICON/MIGHTI和TIMED/SABER温度探测数据的均方根误差随高度和月份的变化情况. 随着高度的增加, 均方根误差逐渐增大, 1~5月及10~12月的91~93 km处均方根误差最小, 约10 K, 最大值则出现在5~8月的105 km处, 达到40 K.

2.4 纬度差异

为深入分析温度偏差存在的显著季节变化, 以1, 4, 7, 10月分别代表春季、夏季、秋季及冬季, 统计不同季节的温度偏差在纬度上的分布情况, 此时不考虑

高度变化带来的影响, 直接计算纬向平均. MIGHTI/ICON 和 TIMED/SABER 在不同季节的温度探测数据的匹配情况列于表 1, 冬夏两季匹配数据较多, 春秋两季匹配数据较少.

图 4 给出了不同季节 ICON/MIGHTI 和 TIMED/SABER 的平均温度偏差随纬度和高度的分布情况. 在图 4 中可以看到, 95 km 以下, 四个季节的平均温度偏差的变化值基本在 10 K 以内. 随着高度增加以及纬度的变化, 平均温度偏差在所有季节的变化较为强烈. 夏季温度偏差在纬度上的结构分布变化更剧烈, 正偏差和负偏差的绝对值最大, 最小值出现在 20°N 处, 于 100 km 时达到最小, 约 -43 K, 最大值出现在 5°S 处, 在海拔为 104 km 时达到最大, 约 40 K,

这也反映出在所有季节中, 夏季平均温度偏差的正偏差和负偏差的增大速度最快. 除此之外, 随着纬度的变化, 平均温度偏差呈现一定的波动特征. 夏季和冬季, 同一高度上, 平均温度偏差在 10°S-10°N 范围内先增大后减小, 10°N-30°N 范围内先减小后增大, 最后在 30°N-40°N 呈减小趋势. 在春季, 平均温度偏差在 95~105 km 高度范围内, 在同一高度上随纬度变化趋势呈现先减小后增大的趋势, 90~95 km 范围内的平均温度偏差在各个纬度上的变化不显著. 秋季时, 90~97 km 范围内, 平均温度偏差在同一高度上, 从 10°S-40°N, 呈现先减小后增大的趋势, 最小值达到 -20 K, 最大值为 0 K. 对比各个季节的平均温度偏差在 10°S-10°N 范围内的分布情况, 可以发现没有

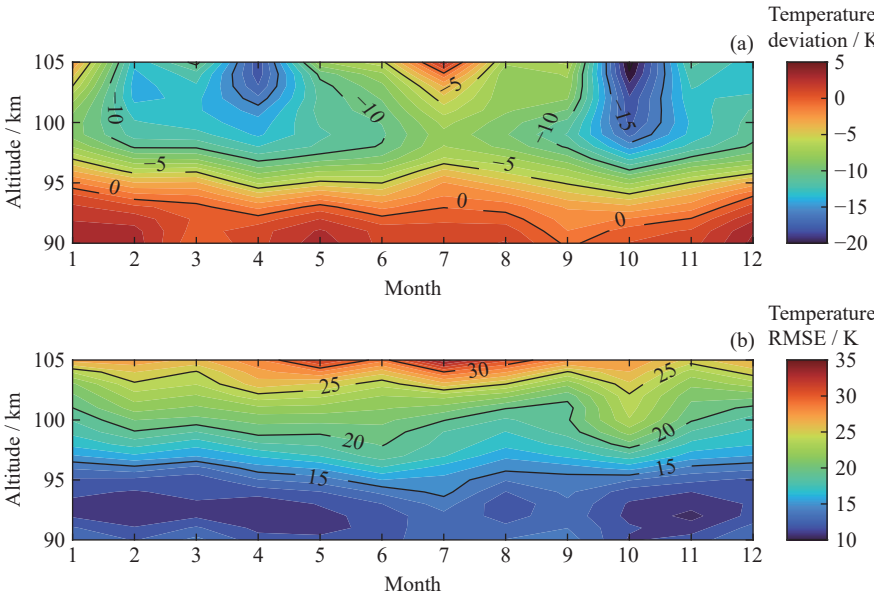


图 3 MIGHTI 与 SABER 探测温度偏差 (a) 和均方根误差 (b) 随季节变化的统计结果
Fig. 3 Statistical results of deviation (a) and root mean square error (b) of MIGHTI and SABER detection temperatures with seasonal variations

表 1 MIGHTI/ICON 和 TIMED/SABER 温度探测数据匹配情况
Table 1 Numbers of matching data of ICON/MIGHTI and TIMED/SABER

纬度分布	1月	4月	7月	10月
10°S-0°	267	193	214	334
0°-10°N	93	182	41	223
10°N-20°N	64	176	223	166
20°N-30°N	140	231	80	136
30°N-40°N	195	367	231	330
总数	759	1149	789	1075

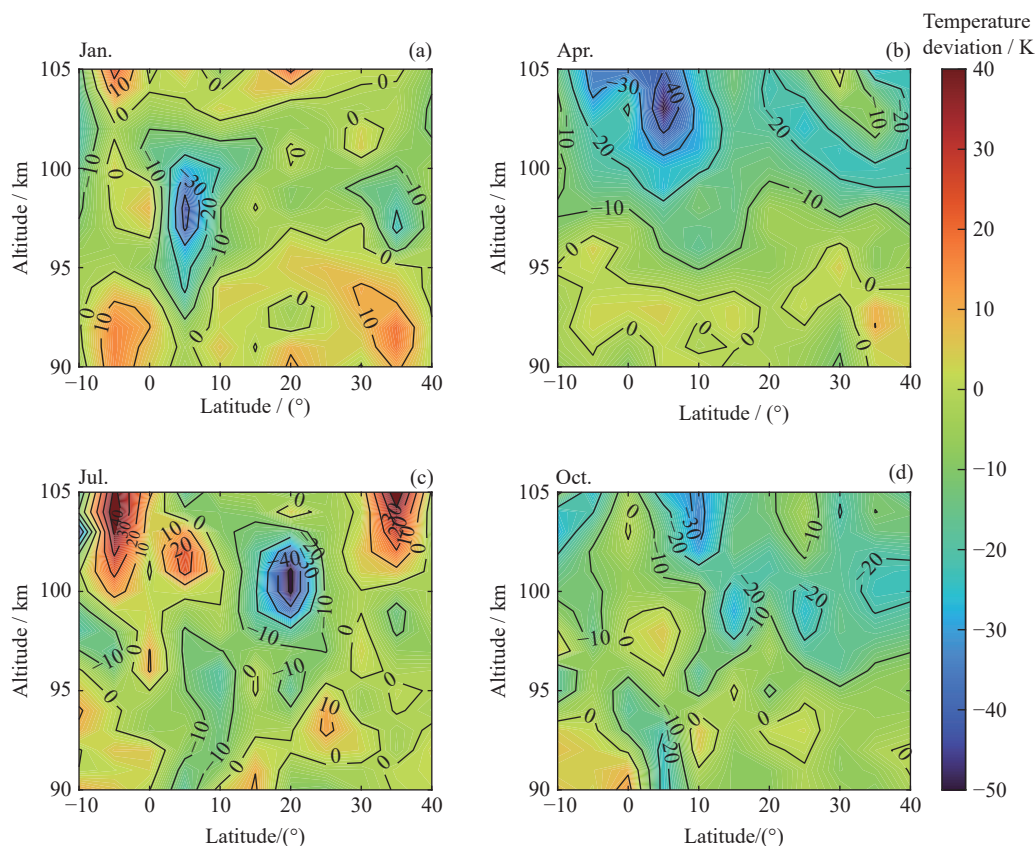


图4 MIGHTI与SABER探测温度在不同季节的偏差随纬度变化的统计结果

Fig. 4 Statistical results of the deviation of MIGHTI and SABER probe temperatures with latitude in different seasons

看到平均温度偏差相对于赤道存在明显的对称分布,除了温度廓线在此范围内分布不均之外,南大西洋异常区域探测数据的缺乏也对此区域的统计结果造成一定的影响。

图5给出了不同季节ICON/MIGHTI和TIMED/SABER温度均方根误差随纬度和高度的结构分布。同样可以看到,夏季温度的均方根误差比其他季节的变化更剧烈,在 35°N 附近以及 $0^{\circ}-10^{\circ}\text{S}$ 纬度带的100 km以上出现最大值。在所有季节,均方根误差均随高度的增加而增大。均方根误差的最小值出现在春季和秋季的 10°N 附近,高度约为93 km,最小值约为8 K。

2.5 高度差异

为分析ICON卫星与TIMED卫星的温度观测数据在不同季节的平均温度偏差随高度的变化,分别对1, 4, 7, 10月的温度偏差数据在各个高度上所有纬度的数据进行统计分析,平均温度偏差和均方根误差的结果如图6和图7所示。图6展示了全球范围内的

平均温度偏差在不同月份随高度变化的统计结果,同时也给出了白天和夜晚的平均温度偏差随高度变化的垂直廓线。图7给出温度的均方根误差在不同时间随高度变化的统计分布情况。

从图6(a)可以看出, MIGHTI和SABER在全球范围的平均温度偏差的绝对值小于10 K。全年数据的平均温度偏差在92 km时接近0 K,超过92 km,平均温度偏差逐渐负向增大,在99 km时达到最小值,约-10 K,在99~104 km维持稳定值。图6(a)中,同一高度上,白天的平均温度偏差大于夜晚的平均温度偏差,这说明MIGHTI和SABER的温度探测数据在夜晚时更具有一致性。分析图6(b)~(e)得出,冬季和夏季的平均温度偏差在垂直剖面的变化相似,白天、夜晚以及季节平均温度偏差在高度上先减小后增大。在春季和秋季,白天的平均温度偏差随高度增加一直减小,最小值为-26 K,夜晚的平均温度偏差则先减小后增大,最小值约-12 K。

图7给出了全年以及四个季节的温度的均方根

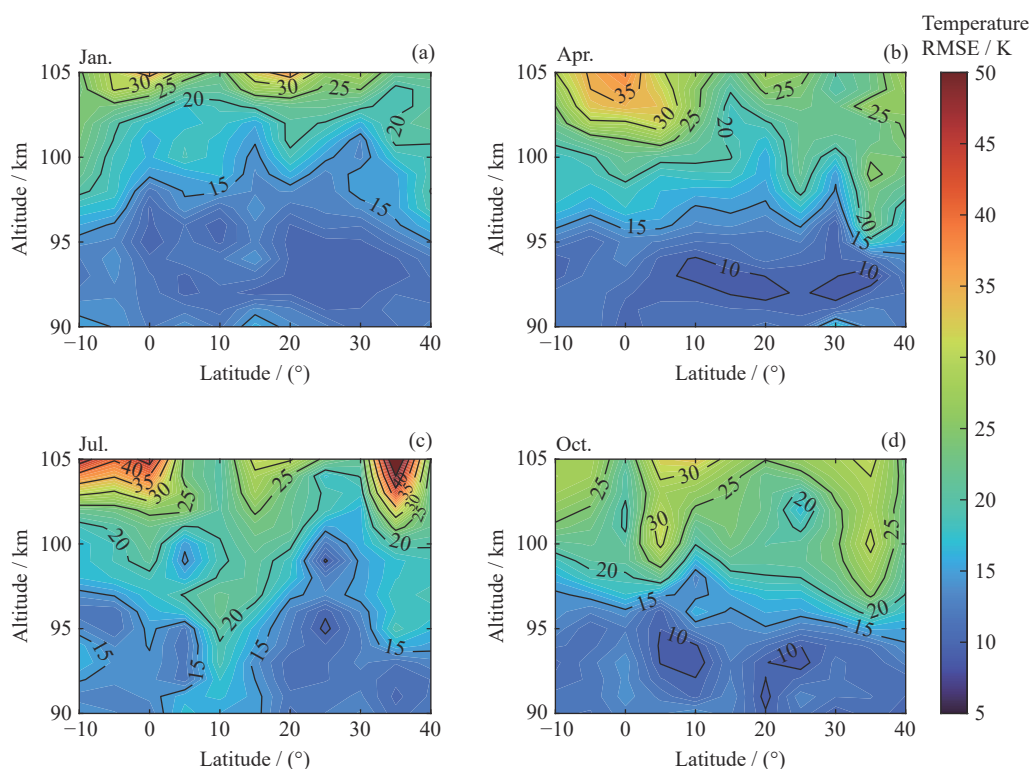


图 5 MIGHTI 与 SABER 探测温度在不同季节的均方根误差随纬度变化的统计结果

Fig. 5 Statistical results on the variation of root mean square error with latitude for MIGHTI and SABER probe temperatures in different seasons

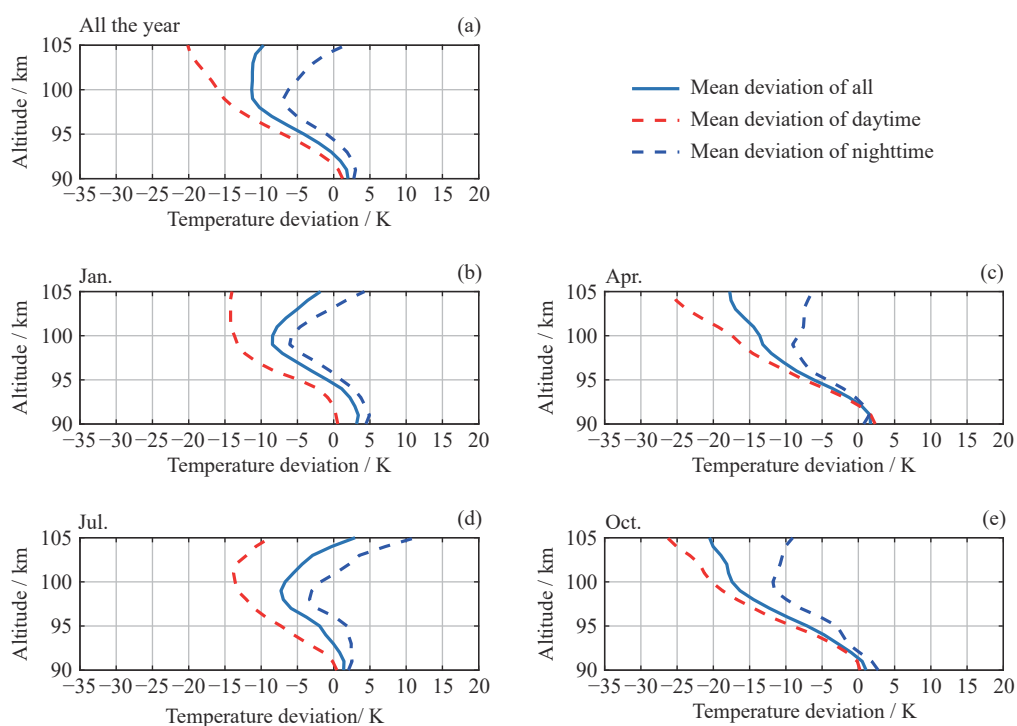


图 6 MIGHTI 与 SABER 温度数据在不同季节的平均温度偏差随高度变化的统计结果

Fig. 6 Statistical results of mean temperature deviation with altitude for MIGHTI and SABER temperature data in different seasons

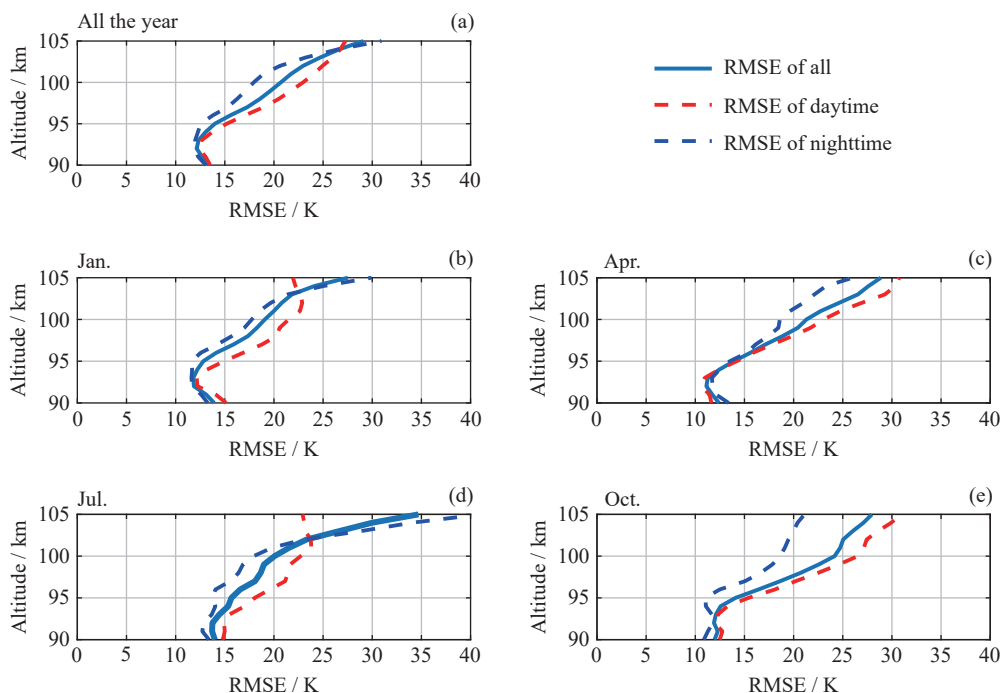


图7 MIGHTI与SABER温度数据在不同季节的均方根误差随高度变化的统计结果

Fig. 7 Statistical results of root mean square error variation with altitude for MIGHTI and SABER temperature data in different seasons

误差垂直廓线. 可以看出, 所有匹配数据的均方根误差, 包括白天和夜晚, 变化趋势可以概括为在 92 km 以下随高度的增加而减小, 最小值约 11.8 K, 在 92 km 以上随高度的增加而增大, 105 km 时达到最大. 在不同季节, 均方根误差的最小值出现在各个季节的 93 km 以下, 约 10 K; 在 93 km 之上 MIGHTI 与 SABER 温度的均方根误差均随高度增加而增大, 在 105 km 时达到最大. 夜晚温度均方根误差的最大值出现在 7 月, 海拔为 105 km 处达到了 39.7 K, 白天温度均方根误差的最大值则出现在 10 月, 约 30.8 K. 白天的均方根误差存在显著的季节特征, 春季和秋季的变化较为相似, 93 km 以上时, 均方根误差随高度的增加而增加. 冬季和夏季较为相似, 93~101 km 呈增加趋势, 101~105 km 呈现减小趋势.

3 讨论

MIGHTI 与 SABER 探测温度之间的差异可能由于探测原理之间的差异导致. Stevens 等^[13]对 MIGHTI 与 SABER 温度数据进行对比的结果与本文中的统计结果整体一致. Yuan 等^[29]对比了

MIGHTI 观测的温度数据与地基激光雷达观测数据的差异, 结果表明 MIGHTI 和激光雷达在 90~100 km 的观测结果具有一致性. 100 km 以上, 由于地基 Na 多普勒激光雷达所观测的 Na 原子数密度降低, 观测结果不确定性增大, 温度偏差因此随高度逐渐增大, 104 km 处 MIGHTI 的观测结果比激光雷达的观测值高约 4 K, 整体结果较为一致, 一定程度上验证了 MIGHTI 数据质量较为可靠. 本文使用的 MIGHTI 和 SABER 数据组共有 10033 对, 大量廓线数据的平均消除了统计上的不确定性, 因此, 温度偏差的原因可能来自 MIGHTI 和 SABER 温度观测数据之间的系统偏差. Stevens 等^[13]指出, MIGHTI 的温度反演采取了球对称大气假设, 且对 140 km 以上的大气辐射缺乏精确的了解, MIGHTI 观测数据反演温度的不确定度因此受到影响. 在 SABER 的温度反演算法中, 75 km 以上的温度取决于非局部热力学平衡的精确计算, CO₂ 体积混合比的浓度在非局部热力学平衡的计算中占据重要地位^[19]. 在临近空间顶部, CO₂ 体积混合比具有较大的海拔和季节变化^[30,31], Rezac 等^[19,26]对 SABER 温度反演算法相关影响因素的深入分析, 给出了 70~130 km 高度范围内 CO₂ 体

积混合比的季节和纬度的分布趋势,同时指出 CO_2 体积混合比在 90~130 km 随高度下降显著. 这种时空变异性导致 SABER 的反演温度不稳定性有所增加,两颗卫星的温度数据偏差变化速度也因此增大. 图 3 中能看到平均温度偏差随纬度和季节的显著变化,除了可能与 SABER 和 MIGHTI 的数据质量有关外,还与图 1 所给出的匹配数据对在纬度上的分布具有不均匀性有关,尽管复合月的统计分析在一定程度上减轻了这种影响,但仍有待进一步分析. 在各个维度进行差异分析时,采用了将其他维度数据在网格上进行平均的统计方法,也可能引起数据偏差,而针对温度偏差与各个维度的相关系数分析,有待将来进一步深入研究.

此外,探测原理和方式之间的差异导致所含波动信息的差异也可能是 MIGHTI 与 SABER 之间差异的原因之一. 在 90~105 km 的中低纬度区域,重力波对总扰动的贡献最大,传播性行星波也有重要贡献,其次是潮汐波和定常行星波^[32]. 图 8 给出对 MIGHTI 与 SABER 匹配数据计算得到的标准偏差随月份变化的统计结果,标准偏差可以表征大气波动的整体水平,代表大气的扰动程度. 从图 8 可以看出,在 90~105 km,相比 SABER 温度标准偏差, MIGHTI 温度标准偏差存在更为显著的季节变化,冬夏季的扰

动较强,春秋季节较弱. 尤其在春季和秋季 90~95 km, SABER 的标准偏差显著高于 MIGHTI 的标准差,即 SABER 比 MIGHTI 高估了大气的波动水平.

4 结论

基于 2019 年 12 月至 2022 年 10 月的 ICON/MIGHTI 和 TIMED/SABER 的温度数据,在 90~105 km 高度范围内按照经纬度相差不超过 1° 、时间相差不超过 45 min 的限定条件,对数据进行匹配挑选后,计算 MIGHTI 和 SABER 温度探测数据的偏差,统计各高度两者探测数据的全球平均温度偏差、均方根误差及白天和夜晚的平均温度偏差,并得到了全球平均温度偏差随高度、月份以及纬度变化的分布特征,主要结论如下.

(1) ICON/MIGHTI 和 TIMED/SABER 的全球温度观测数据的平均温度偏差具有随高度变化的分布特征. 虽然全球平均温度偏差最小约 -10 K,但是通过白天和夜晚温度偏差的统计以及季节温度偏差的统计可以看到,不同时间的温度偏差变化很大. 夜晚的温度偏差往往比白天更小一些,夏季的温度偏差在所有季节里变化最大,考虑到 SABER 和 MIGHTI 的探测原理,不难得出, SABER 和 MIGHTI 的温度

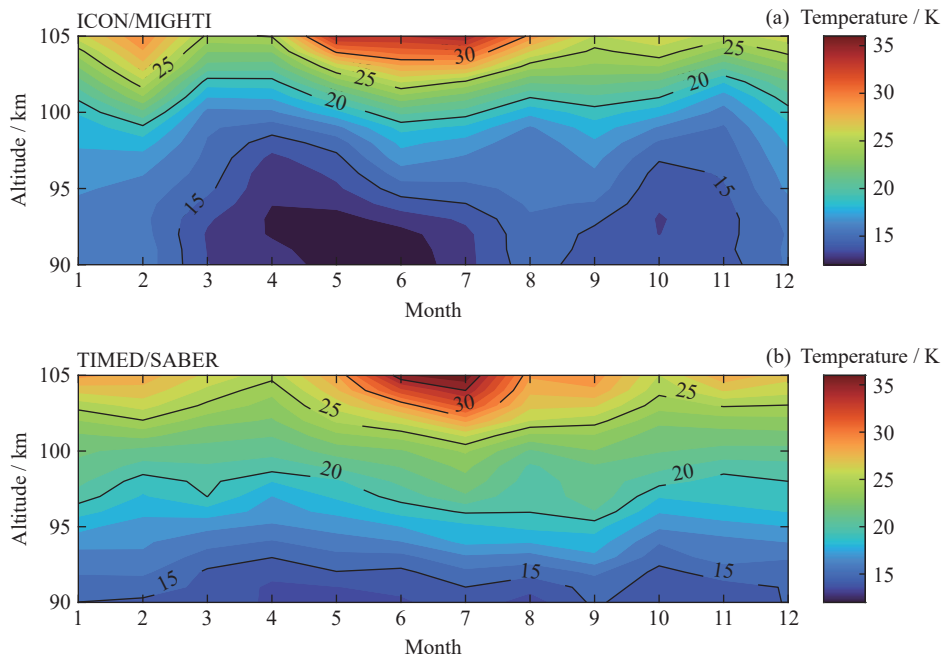


图 8 MIGHTI 与 SABER 匹配数据的温度标准差

Fig. 8 Standard deviation of temperature of MIGHTI and SABER

探测数据的差异可能是来自于不同时间, 探测物质(O_2 和 CO_2 的辐射强度)的不确定性.

(2) MIGHTI 和 SABER 的平均温度偏差具有明显的时空特征. 整体上, 93 km 以下, MIGHTI 的探测温度低于 SABER 的探测温度, 93~105 km MIGHTI 的探测温度则高于 SABER 的探测温度. 在季节变化方面, 平均温度偏差的极大值出现在 4 月和 10 月, 极小值则出现在 1 月和 7 月. 在纬向结构中, 夏季时, 温度偏差的变化范围最大. 同时, 夏季温度的均方根误差变化最显著.

(3) 90~98 km 白天和夜晚的温度偏差趋势一致; 98~105 km, 1 月和 7 月白天和夜晚的温度偏差趋势一致. 4 月和 10 月以及全年则呈现白天温度偏差增大而夜晚温度偏差减小的趋势. 不同季节的夜晚平均温度偏不超过 10 K. 这说明不同季节中, MIGHTI 和 SABER 的白天温度探测数据差异更大, 而夜晚的温度探测数据则趋于一致.

对 MIGHTI 的观测数据与 SABER 的观测数据进行比较分析, 可为两种温度数据在 90~105 km 的应用提供参考依据, 同时对中间层顶至低热层大气之间温度参数的建模提供数据支撑.

参考文献

- [1] XIAO Cunying, HU Xiong, WANG Bo, *et al.* Quantitative study of atmospheric disturbance variation characteristics in the near space[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(4): 1211-1221 (肖存英, 胡雄, 王博, 等. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(4): 1211-1221)
- [2] SHE C Y, LIU A Z, YUAN T, *et al.* MLT science enabled by atmospheric lidars[M]//WANG W B, ZHANG Y L, PAXTON L J. Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. Hoboken: Wiley-American Geophysical Union, 2021: 395-450
- [3] YAN Zhaoai, HU Xiong, GUO Wenjie, *et al.* Near space Doppler lidar techniques and applications (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(3): 20210100 (闫召爱, 胡雄, 郭文杰, 等. 临近空间多普勒激光雷达技术及其应用 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, **50**(3): 20210100)
- [4] SOX L, WICKWAR V B, YUAN T, *et al.* Simultaneous rayleigh-scatter and sodium resonance lidar temperature comparisons in the mesosphere-lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(18): 10688-10706
- [5] DABAS A, DENNEULIN M L, FLAMANT P, *et al.* Correcting winds measured with a Rayleigh Doppler lidar from pressure and temperature effects[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2008, **60**(2): 206-215
- [6] WANG Bo, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al.* Characteristics of quasi-monochromatic inertia gravity waves revealed by first meteorological rocket data of the meridian space weather monitoring project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 547-553 (王博, 胡雄, 肖存英, 等. 子午工程首次火箭探空数据准单色惯性重力波特性的分析 [J]. 空间科学学报, 2017, **37**(5): 547-553)
- [7] WRASSE C M, FECHINE J, TAKAHASHI H, *et al.* Temperature comparison between CHAMP radio occultation and TIMED/SABER measurements in the lower stratosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(9): 1423-1428
- [8] 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)
- [9] SCHWARTZ M J, LAMBERT A, MANNEY G L, *et al.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D15): D15S11
- [10] XIE Yanxin, XIAO Cunying, HU Xiong, *et al.* Comparison between temperature data of TIMED/SABER and AURA/MLS[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(3): 361-367 (谢衍新, 肖存英, 胡雄, 等. TIMED/SABER 与 AURA/MLS 临近空间探测温度数据比较 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(3): 361-367)
- [11] PARK J, EVANS J S, EASTES R W, *et al.* Exospheric temperature measured by NASA-GOLD under low solar activity: comparison with other data sets[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA030041
- [12] HU Xiangrui, LI Faquan, WANG Houmao, *et al.* Retrieval and verification of mid-upper atmospheric temperature from MIGHTI/ICON satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(12): 1201006 (胡向瑞, 李发泉, 王后茂, 等. MIGHTI/ICON 卫星的中高层大气温度反演与验证 [J]. 光学学报, 2023, **43**(12): 1201006)
- [13] STEVENS M H, ENGLERT C R, HARLANDER J M, *et al.* Temperatures in the upper mesosphere and lower thermosphere from O_2 atmospheric band emission observed by ICON/MIGHTI[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(8): 67
- [14] ENGLERT C R, HARLANDER J M, MARR K D, *et al.* Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI) on-orbit wind observations: data analysis and instrument performance[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(3): 27
- [15] HARDING B J, CHAU J L, HE M S, *et al.* Validation of ICON-MIGHTI thermospheric wind observations: 2. Green-

- line comparisons to specular meteor radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(3): e2020JA028947
- [16] IMMEL T J, ENGLAND S L, MENDE S B, *et al.* The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 13
- [17] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1/2): 553-584
- [18] STEVENS M H, ENGLERT C R, HARLANDER J M, *et al.* Retrieval of lower thermospheric temperatures from O₂ a band emission: the MIGHTI experiment on ICON[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 4
- [19] REZAC L, KUTEPOV A, RUSSELL J M, *et al.* Simultaneous retrieval of $T(p)$ and CO₂ VMR from two-channel non-LTE limb radiances and application to daytime SABER/TIMED measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **130-131**: 23-42
- [20] BIZUNEH C L, JAYA PRAKASH RAJU U, NIGUSSIE M, *et al.* Long-term temperature and ozone response to natural drivers in the mesospheric region using 16 years (2005–2020) of TIMED/SABER observation data at 5°–15°N[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(7): 2095-2111
- [21] ZHAO X R, SHENG Z, SHI H Q, *et al.* Long-term trends and solar responses of the mesopause temperatures observed by SABER during the 2002–2019 period[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(11): e2020JD032418
- [22] FAN Z Q, ZHOU Y F, GU C L, *et al.* Temperature fusion of TIMED/SABER data and COSMIC data in stratosphere[J]. *Radio Science*, 2023, **58**(2): e2022RS007560
- [23] EMMERT J T, DROB D P, PICONE J M, *et al.* NRLMSIS 2.0: a whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities[J]. *Earth and Space Science*, 2021, **8**(3): e2020EA001321
- [24] DAS U. Spatial variability in long-term temperature trends in the middle atmosphere from SABER/TIMED observations[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(7): 2890-2903
- [25] LÓPEZ-GONZÁLEZ M J, GARCÍA-COMAS M, RODRÍGUEZ E, *et al.* Ground-based mesospheric temperatures at mid-latitude derived from O₂ and OH airglow SATI data: comparison with SABER measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(17/18): 2379-2390
- [26] REZAC L, JIAN Y, YUE J, *et al.* Validation of the global distribution of CO₂ volume mixing ratio in the mesosphere and lower thermosphere from SABER[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(23): 12067-12081
- [27] DAWKINS E C M, FEOFILOV A, REZAC L, *et al.* Validation of SABER v2.0 operational temperature data with ground-based lidars in the mesosphere-lower thermosphere region (75–105 km)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9916-9934
- [28] CHENG Xuan, XIAO Cunying, HU Xiong, *et al.* Evaluation of atmospheric empirical model based on TIMED/SABER satellite temperature data[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, **48**(10): 104701 (程旋, 肖存英, 胡雄, 等. 基于 TIMED/SABER 卫星温度数据对大气经验模型的评估 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, **48**(10): 104701)
- [29] YUAN T, STEVENS M H, ENGLERT C R, *et al.* Temperature tides across the mid-latitude summer turbopause measured by a sodium lidar and MIGHTI/ICON[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(16): e2021JD035321
- [30] GARCIA R R, LÓPEZ-PUERTAS M, FUNKE B, *et al.* On the distribution of CO₂ and CO in the mesosphere and lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(9): 5700-5718
- [31] FOMICHEV V I, BLANCHET J P, TURNER D S. Matrix parameterization of the 15 μ m CO₂ band cooling in the middle and upper atmosphere for variable CO₂ concentration[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D10): 11505-11528
- [32] OFFERMANN D, GUSEV O, DONNER M, *et al.* Relative intensities of middle atmosphere waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D6): D06110

作者简介



牟 宵 女, 1997 年 2 月出生于四川省成都市, 现为中国科学院国家空间科学中心学生, 主要研究方向为临近空间飞行环境等。

E-mail: muxiao0221@163.com



闫召爱 (通信作者) 男, 1981 年 10 月出生于山东省巨野县, 现为中国科学院国家空间科学中心正高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为临近空间大气探测技术与应用研究。

E-mail: yanza@nssc.ac.cn