0254-6124/2022/42(3)-0396-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GENG Dan, ZHAO Zengliang, WAN Li, ZHAO Chao, PENG Jinxian. Analysis of Data from Near Space Meteorological Rocket Sounding in Northwest China in Winter (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 396–402. DOI:10.11728/cjss2022.03.210527065

冬季西北地区临近空间气象火箭探测数据分析*

耿 丹[1] 赵增亮[2] 万 黎[3] 赵 超[1] 彭进先[1]

1(63611 部队 库尔勒 841000)

2(北京应用气象研究所 北京 100029)

3(江西省国防科学技术工业办公室 620 单位 南昌 330000)

摘 要 在获取冬季西北地区一次临近空间气象火箭探测数据后，将火箭探测温度、密度与 MSIS00 模式和 TIMED/SABER 卫星数据进行对比，并将火箭探测风场与 HWM07 模式和 MERRA 再分析资料进行对比，分析火箭探测温度误差组成，计算各项温度修正量。结果表明：火箭、卫星、MSIS00 模式获取的温度和密度随高度整体变化趋势一致；相对于 MSIS00 模式，火箭和卫星实测数据能够反映出更多的变化细节，且二者在细节上具有较多一致性。火箭实测风场与 MERRA 的一致性较好，而与 HWM07 模式差异较大，在平流层中部火箭探测风场明显强于 HWM07 模式。相对于 HWM07 模式和 MERRA，火箭探测风场能够体现更多细节，在 22 km 和 45 km 附近均探测到较强的风切变。在火箭探测温度的各项修正量中，气动加热、温度滞后、支撑结构热传导及测量电流焦耳效应带来的影响较大，该影响整体上随着高度降低而逐渐减小。分析表明，本次气象火箭获取的探测数据是有效可靠的，但在数据处理方法尤其是温度误差修正等方面还需不断迭代完善。

关键词 临近空间，气象火箭，数据对比，温度修正

中图分类号 P356

Analysis of Data from Near Space Meteorological Rocket Sounding in Northwest China in Winter

GENG Dan[1] ZHAO Zengliang[2] WAN Li[3] ZHAO Chao[1] PENG Jinxian[1]

1(*Unit* 63611 *of PLA*, *Korla* 841000)

2(*Beijing Institute of Applied Meteorology*, *Beijing* 100029)

3(*Unit* 620, *National Defense Office of Science and Industry Technology of Jiangxi Province*, *Nanchang* 330000)

Abstract Data obtained from near space meteorological rocket sounding in northwest China in winter compared with that from empirical model MSIS00, MERRA reanalysis and satellite TIMED/SABER in order to analyze the meteorological rocket data reliability. Different kinds of temperature correction were calculated. Analysis shows temperature and density variation trends from all data sources are almost the

* 国家自然科学基金项目资助（41575031）

2021-05-26 收到原稿，2022-01-21 收到修定稿

E-mail：gengdan89311@163.com

same. However, compared with MSIS00, data from rockets and satellites are more accurate and have many similar details. Meteorological rocket's wind data matches MERRA well. Deviation of these two data sources changes around 0. However, measured wind data is different from HWM07, and obviously stronger in the middle stratosphere. Besides, meteorological rocket observes strong wind changes around 22 km and 45 km. Among all kinds of temperature error, air heating, temperature hysteresis, heat transfer and current heating contributes a lot, reducing as altitude decreases. Comprehensive comparison results show that meteorological rocket data is effective and reliable, but the data processing method especially error correction needs to be improved.

Key words　Near space, Meteorological rocket, Data comparison, Temperature error correction

0　引言

临近空间大气温度、气压、密度、风速、风向等大气参数在航天器飞行试验中具有重要的应用。目前，对临近空间大气参数的探测有地基、空基、气象火箭等手段。其中气象火箭多用于 100 km 以下常规大气探测，是十分重要的原位直接测量手段[1]。在各类探空火箭中，气象火箭是发射活动最频繁、发射数量最多的一种火箭。

目前世界上已经有 40 多个气象火箭探测站，发射了大量气象火箭，获取的高空气象数据用于大气模型的建立与修正。中国经过多年的研究，目前气象火箭探测技术已基本成熟，由雷达体制发展到导航定位体制[2]，但目前中国临近空间气象火箭探测业务落后于发达国家，尚未建立定期、高频探测的业务体系。在气象火箭数据分析评估方面，Jiang 等[3] 将子午工程首枚气象火箭探测结果与卫星遥感及模式作了对比，研究了大气风切变、重力波和大气动力学稳定性。Fan 等[4] 对某型气象火箭的多次探测数据进行了综合分析评估，指出气象火箭探测资料具有较强的可信度，可对其他方式的探测结果进行标定。

本文利用 2020 年冬季某型气象火箭在西北地区获取的一次临近空间探测资料，将探测数据与经验模式、卫星遥感数据及再分析资料进行对比，从温度修正模型入手，定量计算各项温度修正量，为气象火箭数据分析评估提供参考。

1　数据来源与对比方法

1.1　气象火箭探测数据

该型气象火箭利用火箭将探空仪送至 70 km 以上高度，在探空仪和降落伞的下落过程中，原位探测下落区域 20～60 km 临近空间的大气温度、气压、密度、风速及风向数据。其中大气温度数据利用热敏电阻直接测量后经过误差修正获得，气压数据利用压高公式通过基点气压求解得到，密度数据利用温度、气压通过理想气体状态方程求解得到，风速风向数据利用探空仪导航定位信息解算得到[5]。本次探测实际获取的有效数据高度范围为 20～58 km。

1.2　MSIS00 大气模式

MSIS 是质谱非相干散射经验高层大气模式，最初是基于卫星上质谱计所测得的成分资料和地面非相干散射雷达测得的温度资料而建立。目前 MSIS 系列模式的最新版是 MSIS00，描述从地面到热层高度范围内（0～1000 km）的中性大气密度、温度等大气物理性质。MSIS00 模式是当前国际上较为广泛使用的中层大气经验模式，可描述大气特性的时空变化。利用 MSIS00 大气模式可获取指定时间、地理位置、地磁活动指数下的大气温度和密度的理论廓线。

1.3　TIMED/SABER 卫星遥感数据

TIMED 卫星于 2001 年 12 月 7 日在美国范登堡空军基地发射，轨道倾角为（74.1±0.1）°，轨道高度为（625±25）km，卫星绕地球周期为 106 h，每天运行约 15 个轨道，大约每 60 天完成一次对地球的覆盖观测。TIMED 卫星搭载的探测仪器 SABER 是一个 10 通道红外辐射计，在卫星飞行过程中，采用临边扫描的方式对大气中的 CO_2 辐射信号进行探测，进而反演出高度方向上的大气温度、密度、气压等大气参数的垂直廓线，可获得 180 km 高度以下的数据。SABER/TIMED 卫星探测的温度数据已大量应用于中间层及低热层大气研究，应用结果显示在 10～100 km 高度

范围, SABER 多通道辐射计探测到的温度可信度很高[6]。

1.4 HWM07 风场模式

HWM 是高层大气风场的经验模式, 目前最新版本为 HWM14。HWM 利用近几十年来的地基、卫星和火箭探测结果及模拟数据, 结合球谐函数拟合方式, 模拟 0～500 km 高度范围内的地球大气风场, 能够给出指定时间、地理位置、高度、地磁活动指数下风场平均意义上的结果。本文使用的版本是 HWM07。

1.5 MERRA 再分析资料

MERRA 再分析资料是由 NASA的全球模拟和同化办公室建立的数据资料库, 应用了 GEOS-5 同化系统。MERRA 是 NASA 为卫星时代提供的大气再分析资料, 其输入的观测资料主要包括地面和上层大气常规观测资料以及卫星遥感资料等。MERRA 的时间分辨率为 6 h, 水平分辨率为(2/3)°(经度)×(1/2)°(纬度), 垂直范围从地面到 78 km, 高度分为 72 层[7]。

1.6 数据对比方法

对不同来源的数据进行对比分析时, 先将各组数据在垂直方向按照 100 m 的空间分辨率进行插值, 然后使用偏差、偏差率等数学量来反映不同数据源的差异性[8]。偏差反映两组数据的绝对偏差, 其计算公式为

$$E_i = X_i - Y_i. \tag{1}$$

偏差率反映两组数据的相对偏差, 其计算公式为

$$E_i = \frac{X_i - Y_i}{Y_i}. \tag{2}$$

其中, X_i和Y_i分别表示两组数据在某一高度处的值, $\bar{X}$和$\bar{Y}$分别表示两组数据在统计段内的平均值。

对于温度和风场数据, 由于随高度的变化范围有限, 对比时可计算不同数据源的绝对偏差; 而对于密度数据, 由于其随高度呈指数变化, 因此对比时计算不同数据源的偏差率更合理。

2 火箭温度、密度数据与 MSIS00 模式及 SABER 卫星数据的对比

按照火箭探测数据对应的时间和经纬度, 利用 MSIS00 模式, 获得相同条件下的大气温度、密度的理论值; 在 SABER 卫星探测资料中查找发射当天与火箭探测经纬度接近(经度差<2°, 纬度差<1.5°)的观测时次, 获得相近条件下的大气温度、密度的卫星探测数据。将火箭数据与 MSIS00 模式数据、卫星数据进行对比[9]。

火箭、卫星、MSIS00 模式温度和密度数据对比如图 1 所示。由图 1 可以看出, 火箭、卫星、MSIS00 模式温度和密度随高度变化趋势整体上一致, 能够反映当地大气分层情况, 冬季平流层顶高度约为 45 km。在图 1(a) 中, 火箭和卫星探测数据能够反映出更多的温度变化细节, 且二者反映的细节有较多一致性, 这侧面说明了火箭探测温度的可靠性。

火箭探测温度和密度数据与卫星、MSIS00 模式数据的偏差如图 2 所示。由图 2 可以看出, 火箭探测温度与卫星、MSIS00 模式的偏差整体上小于 20℃, 且随高度降低呈先逐渐减小(44 km 以上)后趋于随机(44 km 以下)的趋势; 火箭探测密度与卫星、MSIS00 模式的偏差率整体上小于 12%, 且随高度降低呈先逐渐增大(44 km 以上)后趋于随机(44 km 以下)的趋势。

火箭探测数据与 MSIS00 模式数据存在差异的原因是 MSIS00 模式时空分辨率低, 由于建立时缺乏中国区域的数据, 特别是缺乏平流层中上部的高空探测数据, 对平流层中上部的大气参数变化描述并不准确。火箭探测数据与卫星数据存在差异的原因是两种探测方式原理以及探测时间、空间上的差异。

3 火箭风场数据与 HWM07 模式及 MERRA 再分析资料数据的对比

按照火箭探测所对应的时间和经纬度, 设定 HWM07 风场模式的时间、经纬度、地磁指数等参数, 获得相同条件下的经向风和纬向风, 并换算成相应的综合风速风向, 其中风向是指风吹来的方向。在 MERRA 再分析资料中查找发射当日经纬度接近、同时段的数据, 按同样的方法获取经向风、纬向风和综合风场。

火箭实测综合风场与 HWM07 模式、MERRA 结果的对比如图 3 所示, 火箭实测经、纬向风与 HWM07 模式、MERRA 结果的对比和偏差分别如图 4 和图 5 所示。实测风场与 MERRA 的一致性较好, 而与 HWM07 模式差异较大。相对于 MERRA,

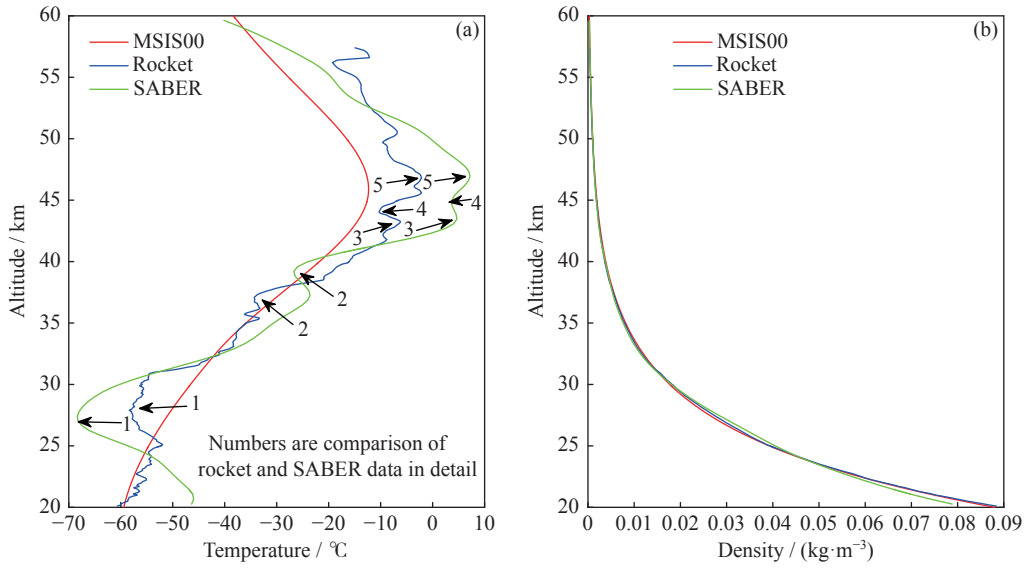


图 1　火箭、卫星、MSIS00 模式温度和密度数据的对比

Fig. 1　Comparison of temperature and density data among meteorological rocket, SABER and model MSIS00

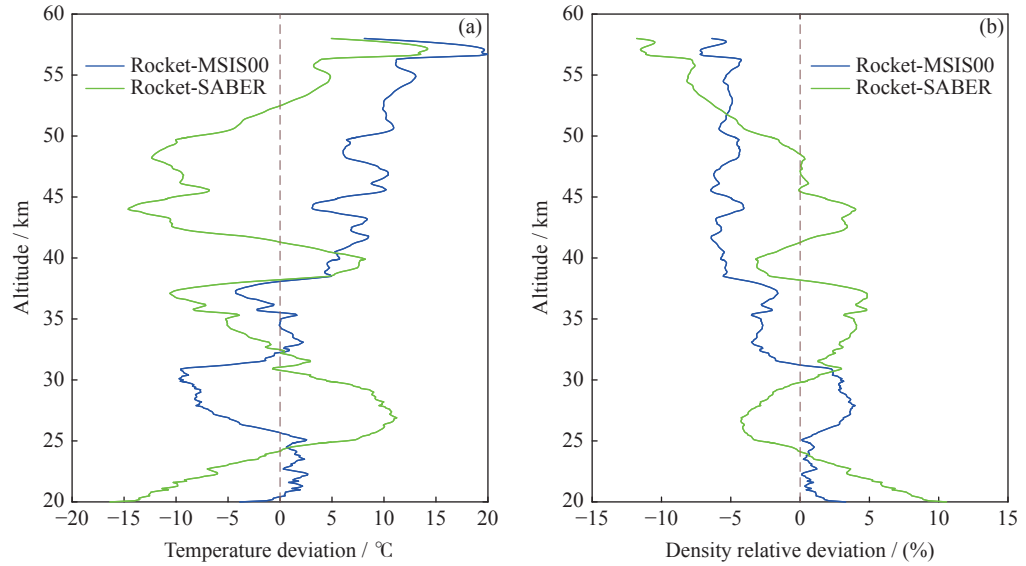


图 2　火箭探测温度和密度数据与卫星、MSIS00 模式数据的偏差

Fig. 2　Temperature and density deviation among meteorological rocket, SABER and model MSIS00

火箭实测风场分辨率更高，体现出更多细节，在 22 km 和 45 km 附近均探测到较强的风切变[10]（见图 3 和图 4）。

由图 4 可以清楚看出，实测经向风和模式值在 45 km 以下均以南风为主，在 45 km 以上均以北风为主，而实测风场明显强于模式值；实测纬向风在 45 km 以下以西风为主，在 45 km 以上以东风为主，而模式值均为西风。

由图 5 可以看出，火箭探测风场在平流层中部明显强于 HWM07 模式，平流层中部经向风、纬向风与模式值的最大偏差分别达到了 35 $m\cdot s^{-1}$ 和 75 $m\cdot s^{-1}$。实测经向风、纬向风与 MERRA 的偏差基本以接近 0 轴为中心，且高空偏差（45 km 以上）大于低空（45 km 以下），此外在 22 km 和 45 km 风切变位置附近偏差明显增大。总体上纬向偏差大于经向偏差，侧面反映出模式和再分析资料的纬向风精度低于经向风。

火箭探测风场与 HWM07 模式偏差较大的原因

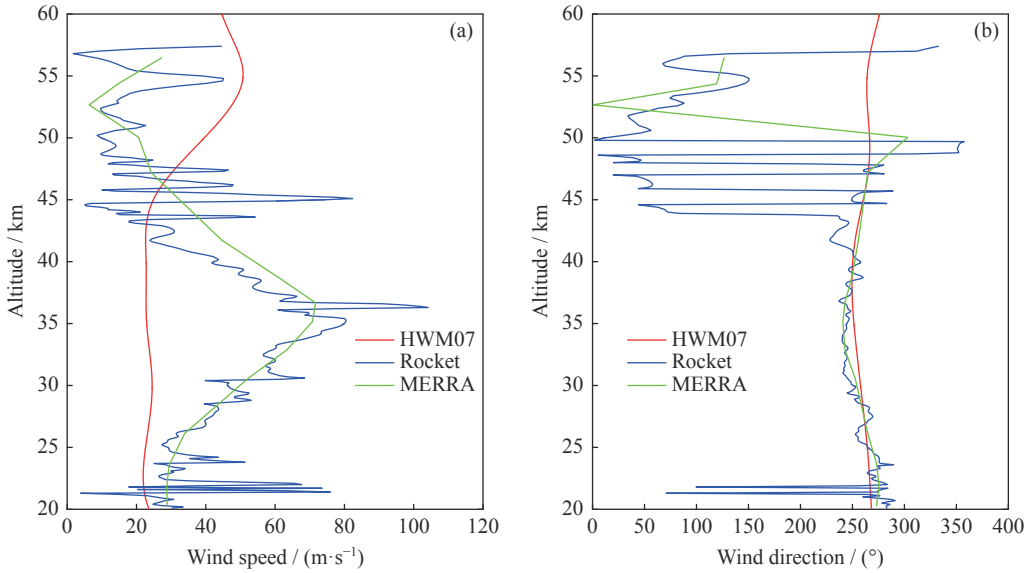


图 3 火箭探测综合风场与 HWM07 模式及 MERRA 风场数据的对比

Fig. 3 Comparison of wind data among meteorological rocket, model HWM07 and MERRA

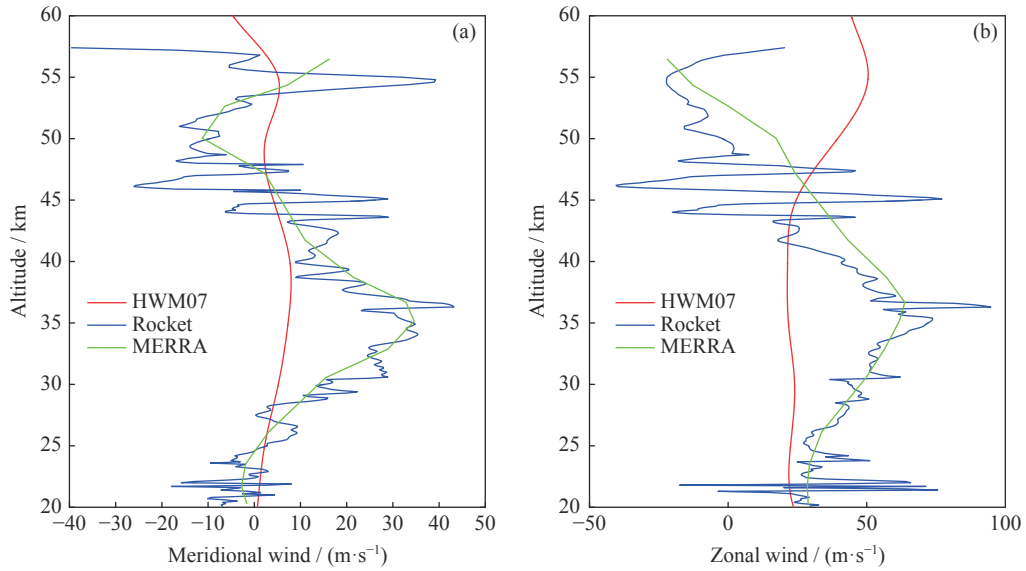


图 4 火箭实测经向风和纬向风与 HWM07 模式及 MERRA 数据的对比

Fig. 4 Comparison of meridional and zonal wind among meteorological rocket, model HWM07 and MERRA

可能与火箭本身探测的时次有关。单次火箭探测影响因素较多,而 HWM07 模式风场为平均结果且缺少中国高空实测风场数据。平流层中部存在的剧烈偏差可能与西风急流有关[11]。

4 火箭探测温度误差

气象火箭由热敏电阻对大气温度进行探测。但是由于环境对流、辐射、热传导和电流加热等效应的影响,热敏电阻获取的温度并不是真实的大气温度,需要对原始数据进行误差修正[12]。根据世界气象组织推荐的温度修正模型,温度修正公式可表示为

$$T_{\mathrm{e}}=T-\frac{rV^2}{2c_{\mathrm{p}}}+\frac{mC}{Ah}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}-\frac{a_{\mathrm{s}}JA_{\mathrm{s}}}{Ah}-\frac{a_{\mathrm{s}}J\rho_{\mathrm{m}}A_{\mathrm{m}}}{Ah}-\frac{\alpha_l\sigma\sum_1^i A_iT_i^4}{Ah}+\frac{\varepsilon T^4}{h}-\frac{K}{Ah}-\frac{W}{Ah}. \tag{3}$$

其中:T_{e}为修正后温度;T为热敏电阻测得的原始温

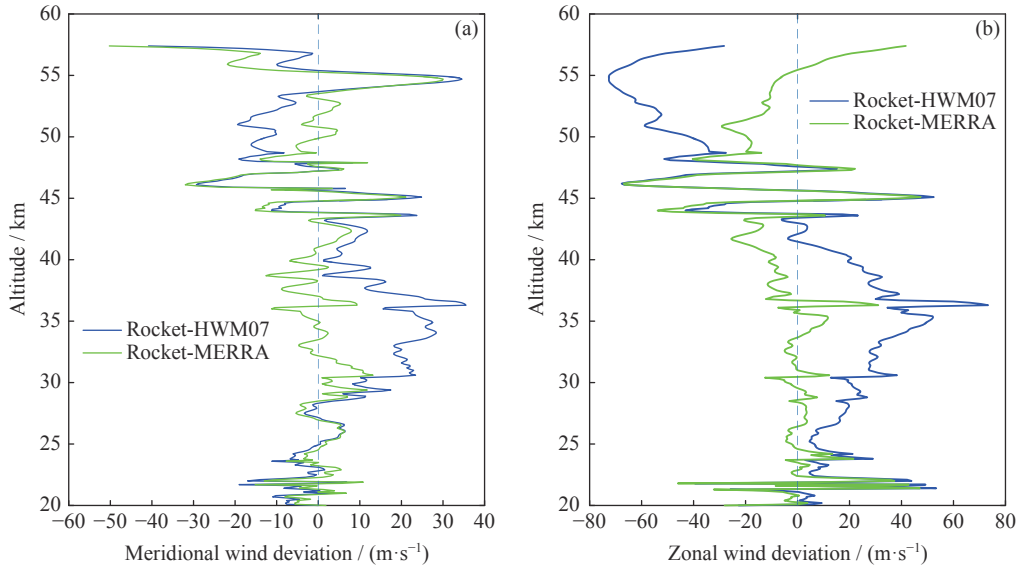


图 5　火箭实测经向风和纬向风与 HWM07 模式及 MERRA 数据的偏差

Fig. 5　Meridional and zonal wind deviation among meteorological rocket, model HWM07 and MERRA

度; $\frac{rV^2}{2c_p}$为气动加热修正量; $\frac{mC}{Ah}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$为温度滞后修正量; $\frac{a_s J A_s}{Ah}$为太阳直接辐射修正量, 探空仪采用了遮阳设计, 因此可忽略; $\frac{a_s J \rho_m A_m}{Ah}$为地面和云层反射太阳辐射修正量; $\frac{\alpha_1 \sigma \sum_1^i A_i T_i^4}{Ah}$为环境长波辐射修正量; $\frac{\varepsilon T^4}{h}$为传感器辐射修正量; $\frac{K}{Ah}$为支撑结构热传导修正量; $\frac{W}{Ah}$为测量电流焦耳效应修正量。

热敏电阻测得的原始温度和修正后温度对比如图 6 所示, 根据式(3)计算得出的各项温度修正量如图 7 所示。由图 7 可看出, 各项温度误差中, 气动加热、温度滞后、支撑结构热传导及测量电流焦耳效应带来的影响较大, 且这些影响整体上随着高度降低而逐渐减小, 这也解释了图 2(a) 中火箭探测温度与其他数据源的偏差随高度降低呈先逐渐减小(44 km 以上)后趋于随机(44 km 以下)的现象。温度误差修正是数据处理中的关键技术, 需要根据积累的探测数据, 不断迭代、完善温度修正模型或修正参数。

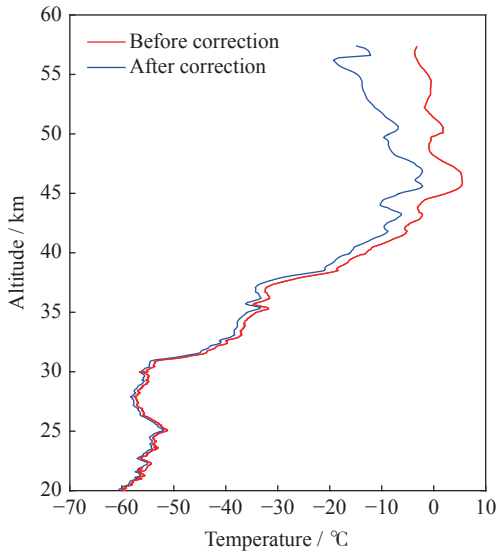


图 6　传感器温度与修正后温度的对比

Fig. 6　Comparison of the sensor temperature before and after correction

5　结论

气象火箭是目前临近空间十分重要的大气参数原位探测手段, 可获取 20～60 km 高度的大气温度、气压、密度、风速及风向。本文将冬季西北地区获取的一次临近空间探测数据与 MSIS00 模式、SABER 卫星探测数据以及 HWM07 风场模式、MERRA 再分析资料进行对比, 分析了火箭探测温度误差组成, 计算了各项温度修正量, 主要结论如下。

(1)火箭、卫星、MSIS00 模式获取的温度和密度随高度整体变化趋势一致, 而火箭、卫星实测数据反映出更多的变化细节, 且二者在细节上比较一致。

(2)火箭实测风场与 MERRA 的一致性较好, 而

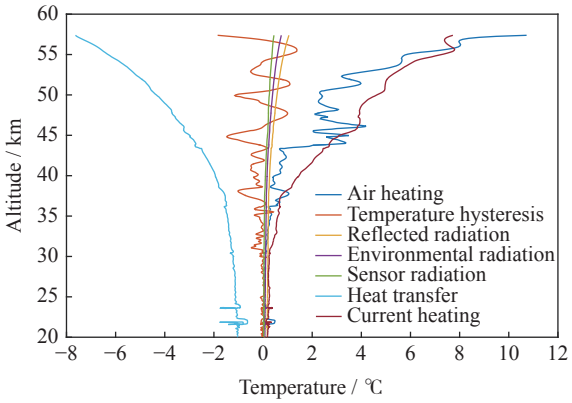


图 7 各项温度修正量

Fig. 7 Different kinds of temperature correction

与 HWM07 模式差异较大，平流层中部的火箭探测风场明显强于 HWM07 模式。相对于 HWM07 模式和 MERRA，火箭探测风场能够体现更多细节，在 22 km 和 45 km 附近均探测到较强的风切变。

(3)火箭探测温度的各项修正量中，气动加热、温度滞后、支撑结构热传导及测量电流焦耳效应带来的影响较大，且这些影响整体上随着高度降低而逐渐减小。

综上分析可以看出，气象火箭本次获取的数据是有效可靠的，但还需不断积累数据，从而在数据处理方法尤其是温度误差修正等方面，不断迭代完善修正模型或修正参数。

参考文献

[1] 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分析[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(5): 547-553)

[2] GU Yidong, WU Ji, CHEN Hu, *et al.* Review of the 40-year development of China's space exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 10-21 (顾逸东, 吴季, 陈虎, 等. 中国空间探测领域40年发展[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(1): 10-21)

[3] JIANG Guoying, XU Jiyao, SHI Dongbo, *et al.* Observations of the first meteorological rocket of the meridian space weather monitoring project[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(20): 2131-2137 (姜国英, 徐寄遥, 史东波, 等. 子午工程首枚气象火箭大气探测结果分析[J]. 科学通报, 2011, **56**(20): 2131-2137)

[4] FAN Zhiqiang, SHENG Zheng, WAN Li, *et al.* Comprehensive assessment of the accuracy of the data from near space meteorological rocket sounding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(19): 199601 (范志强, 盛峥, 万黎, 等. 临近空间气象火箭探测资料精度的综合评估[J]. 物理学报, 2013, **62**(19): 199601)

[5] SUN Yu, CHEN Shuchi, SHAO Shengli, *et al.* Method for evaluating uncertainty of wind measurements for meteorological sounding rocket[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2021, **49**(2): 174-183 (孙宇, 陈书驰, 邵胜利, 等. 气象探空火箭测风不确定度评估方法[J]. 气象科技, 2021, **49**(2): 174-183)

[6] CHENG Xuan. Researches on Atmospheric Modeling and Applications in Near Space[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020 (程旋. 临近空间大气建模及其应用研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2020)

[7] YANG Junfeng. Researches on the Variations of Atmospheric Winds in Near Space at Mid-Latitude[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2016 (杨钧烽. 中纬度临近空间大气风场变化特性研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2016)

[8] CHENG Huhua, WU Shuai, SU Xingtao, *et al.* Preliminary study on precision of HWM07 and modeling at an altitude of 60～100 km[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **63**(1): 86-100 (程胡华, 武帅, 宿兴涛, 等. HWM07模式风场在高度60-100 km的精度及建模初步研究[J]. 地球物理学报, 2020, **63**(1): 86-100)

[9] FAN Zhiqiang. Analysis and Research of Atmospheric Sounding Data in Near Space[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2018 (范志强. 临近空间大气环境探测资料分析研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018)

[10] SHI Dongbo, WEI Feng, ZHANG Yu, *et al.* Meteorological rocket sonde of meridian project and its detection results[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(4): 492-497 (史东波, 韦峰, 张宇, 等. 子午工程气象火箭探空仪及其探测结果[J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4): 492-497)

[11] LI Jinwu. Analysis of the Wind Field and Temperature in Near Space Based on Rocket Sounding Data and the Study on Turbopause[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2017 (李金武. 基于火箭探空的临近空间大气风场、温度场分析及湍流层顶的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017)

[12] LIU Shushi, CHEN Guangming, CHEN Shuchi, *et al.* The effect of positioning accuracy on rocket sounding[C]//Proceedings of the 11th Symposium on National Security Geophysics. Xi'an: Chinese Geophysical Society, 2015

(责任编辑: 孙伟英)