0254-6124/2025/45(4)-1007-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HE Yang, CHEN Tailong, HUANG Jiangping. Analysis and Evaluation of Data from Near Space Meteorological Rocket Detection over Northwest Area in 2023 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 1007–1015. CSTR:32142.14.cjss.2024–0074. DOI:10.11728/cjss2025.04.2024–0074

2023 年西北地区临近空间火箭探测数据分析评估*

何 阳 [1,3] 陈泰龙 [2,3] 黄江平 [1]

1(北京航空气象研究所 北京 100085)

2(南京信息工程大学自动化学院 南京 210044)

3(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘 要 气象火箭是一种获取临近空间大气环境垂直分布精细结构的重要原位探测手段, 其探测结果具有比地基和天基遥感探测更高的精度, 客观评估其数据质量是各部门有效使用该探测数据的重要前提. 利用 2023 年冬季在西北地区进行的一次气象火箭探测, 获取了 20～60 km 高度区间内的气温、风场、密度和气压数据, 对热敏电阻测得的温度进行了偏差修正, 并将探测结果与遥感探测、经验预报模式以及再分析资料等数据进行了比对评估. 结果表明: 火箭探测风场结果与再分析数据吻合得较好, 并且能够更加准确地描述对应区域的精细大气环境; 火箭实测气温偏差在 40 km 以上逐渐凸显, 主要偏差项为电流加热项、温度滞后项以及气动加热项, 修正后的气温与参考数据吻合性较好, 不同来源的气温数据主要差异是平流层顶气温拐点出现的高度不同; 气压和密度结果的偏差随着高度的上升而增加. 分析认为, 本次火箭的探测数据质量较好, 精度较高, 通过对数据的分析评估验证了大气要素反演数学模型有效可靠.

关键词 临近空间, 气象火箭, 测温修正, 多源资料

中图分类号 P356

Analysis and Evaluation of Data from Near Space Meteorological Rocket Detection over Northwest Area in 2023

HE Yang[1,3] CHEN Tailong[2,3] HUANG Jiangping[1]

1(*Beijing Institute of Aeronautics Meteorology*, *Beijing* 100085)

2(*School of Automation*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044)

3(*College of Meteorology and Oceanography*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073)

Abstract Meteorological rocket is an important in-situ detection method to obtain the fine structure

* 国家自然科学基金项目资助 (42405065, 42275060)

2024-06-06 收到原稿, 2024-11-29 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

of vertical distribution of atmospheric environment in near space, the detection results should have higher accuracy than ground-based or space-based remote sensing detection. Objective evaluation of the data quality is an important prerequisite for the effective use of the data. In this paper, the atmospheric temperature, wind field, density, and pressure in the altitude range of 20～60 km are obtained by using a meteorological sounding rocket launched in Qinghai in winter of 2023. The error correction of the temperature measured by thermistors is carried out. The detection results are compared with the data of remote sensing detection, empirical prediction model and reanalysis data. The results show that the rocket wind field results are in good agreement with the MERRA2 data, and the HWM empirical forecast model cannot accurately describe the atmospheric environment in the corresponding region. The measured temperature error of the rocket is gradually prominent when it is over 40 km, and the main error terms are current heating term, temperature hysteresis term and pneumatic heating term. The corrected temperature is in good agreement with the reference data, and the main difference of temperature data from different sources is that the height of the temperature inflection point in the stratosphere is different. The deviation of pressure and density results increases with altitude. The analysis believes that the quality of the rocket's detection data is good and the accuracy is high. Through the analysis and evaluation of the data, the effectiveness and reliability of the mathematical model of atmospheric element inversion are verified.

Key words Near space, Meteorological rocket, Temperature correction, Multi-source data

0 引言

临近空间位于 20～100 km 的高度区间. 近年来, 开发临近空间、加强空间安全成为了国家的重大发展战略. 气象学中的平流层位于对流层顶至海拔约 50 km 的高度之间, 是临近空间飞行器飞行或者驻留的关键区域[1,2]. 临近空间大气中的风场、温度、密度以及气压状态等环境要素的改变, 会对飞行器弹道参数、热环境指标、飞行速度、飞行安全以及瞄准精度造成重要影响[3,4]. 因此, 对临近空间大气环境的准确探测, 有助于掌握对应区域的大气环境情况, 提升对飞行器运行驻留的精细化认知水平, 从而实现对临近空间充分应用的目的.

火箭探空是对 20 km 以上临近空间大气环境进行原位探测的重要手段, 具有精度高、技术成熟、可探测高度范围广的特点[5], 其探测手段主要分为热敏电阻测量[6] 和膨胀落球测量[7] 两种方式, 可分别获取 20～60 km 和 30～100 km 的大气风场、温度、密度以及气压数据. Fan 等[8] 对气象火箭探测资料开展了精度综合评估, 论证了资料的可信度, 并分析了落球探测中科氏力对结果偏差的影响[9]. Ge 等[10] 指出膨胀落球风场数据在 30～60 km 高度上质量较高, 与再分析数据吻合较好. 将不同区域热敏电阻气象火箭探测结果与卫星、再分析以及气球数据等结果作对比评估, 能够验证火箭数据的可靠性, 但同时各种来源的资料在高空依然存在差异[6,11,12]. 不断积累火箭探空数据, 分析不同时空范围内临近空间大气环境的原位探测结果, 进一步探究评估高空气象要素产生偏差的原因, 是值得持续开展的工作.

本文利用 2023 年冬季在西北地区开展的一次火箭探空试验, 获取了 20～60 km 的临近空间气象探测资料, 通过分析火箭弹道轨迹特征, 并与其他多源资料进行对比, 评估火箭探测质量, 分析模型修正效果, 为该区域上空的临近空间环境认知与保障提供重要参考.

1 探测原理及数据处理方法

气象火箭探空利用火箭携带探空仪升空, 火箭上升到最高点后, 降落伞携带探空仪与箭体分离, 探空仪牵引降落伞开始下落运动. 在下落过程中利用热敏电阻测量原始温度数据, 利用压力传感器获得气压数据, 利用北斗定位系统获取所处空间位置点的经度、纬度和高度. 通过坐标转换将地心坐标系转换到站心坐标系, 由此获取探空仪位置坐标 (x, y, z). 以发射点作为站心坐标系原点 O, x 轴指向正北, y 轴指向正东, z 轴指向天顶. 设定阈值对明显不合理的数据进行剔除, 采用分段三次 Hermite 插值对剔除数据进行

补点, 然后用 3σ 法剔除粗大偏差, 再用分段三次 Hermite 插值对剔除的粗大偏差数据进行补点.

考虑到降落伞携带探空仪下落过程中会存在钟摆效应[13], 需要选择合适的平滑拟合间隔来消除这一影响. 用整数倍摆动周期作为平滑拟合间隔, 就可以利用摆动的对称性抵偿摆动偏差. 利用平均平滑后位置坐标逐点进行线性拟合求一阶导数获得北向、东向和垂向速度, 四次拟合求二阶导数获得北向、东向和垂向加速度. 基于获取的速度、加速度和位置坐标, 计算得到风速和风向.

在火箭探空仪下落过程中携带热敏电阻传感器实现对大气温度的测量过程中, 由于热敏电阻传感器测温是一个复杂的热交换过程, 需要将测量方式和外部环境对传感器测温的影响考虑进去, 将原始温度中各个环境因素造成的影响排除掉 (也叫温度修正), 才能得到真实的大气温度 (简称气温). 温度修正模型可以写成如下形式:

$$T_\infty = T_{\rm f} - \frac{rv_r^2}{2c_{\rm p}} + \frac{m_T C}{Ah}\frac{{\rm d}T_{\rm f}}{{\rm d}t} - \frac{A_s\alpha_s J}{Ah} - \frac{A_m\rho_m\alpha_s J}{Ah} - \frac{\alpha_t\sigma\left(A_{\rm a}T_{\rm a}^4 + A_{\rm b}T_{\rm b}^4 + A_{\rm c}T_{\rm c}^4\right)}{Ah} + \frac{\varepsilon\sigma T_{\rm f}^4}{h} - \frac{Q_{\rm c}}{Ah} - \frac{W_{\rm f}}{Ah}. \tag{1}$$

式中, 气动加热项 $\frac{rv_r^2}{2c_{\rm p}}$ 反映的是热敏电阻与其附面层热交换对温度示值产生的影响, 温度滞后项 $\frac{m_T C}{Ah}\frac{{\rm d}T_{\rm f}}{{\rm d}t}$ 表示热敏电阻热交换的滞后对温度示值产生的影响, 太阳直接辐射项 $\frac{A_s\alpha_s J}{Ah}$ 反映太阳照射对温度示值产生的影响, 地球表面和云层反射太阳短波辐射项 $\frac{A_m\rho_m\alpha_s J}{Ah}$ 表示地面和云层将太阳光短波辐射反射至探空仪上后对其温度示值产生的影响, 长波辐射项 $\frac{\alpha_t\sigma\left(A_{\rm a}T_{\rm a}^4 + A_{\rm b}T_{\rm b}^4 + A_{\rm c}T_{\rm c}^4\right)}{Ah}$ 表示探空仪所处环境的无线电射频辐射和红外辐射对温度示值的影响, 传感器对环境热辐射项 $\frac{\varepsilon\sigma T_{\rm f}^4}{h}$ 表示传感器的热辐射对热敏电阻温度示值的影响, 结构热传导项 $\frac{Q_{\rm c}}{Ah}$ 表示由于探空仪支架对热敏电阻存在热传导而对热敏电阻示值产生的影响, 测量电流加热项 $\frac{W_{\rm f}}{Ah}$ 表示电阻的温度示值由于电流加热而产生改变的量.

进行修正温度后, 各高度上的气压由实测基点气压利用压高公式推算, 有

$$P = P_{\rm d}\exp\frac{-g_0\left(H - H_{\rm d}\right)}{RT_{\rm d}}. \tag{2}$$

其中, P 为所求高度上的气压, $P_{\rm d}$ 为邻近下层气压, H 为位势高度, $H_{\rm d}$ 为邻近下层位势高度, R 为干空气气体常数, $T_{\rm d}$ 邻近下层温度. 这里将 20 km 高度处的气压值作为基点气压. 已知温度和气压, 可通过理想气体状态方程计算得到大气密度. 由此, 便得到了整个火箭探测高度区间上的风速、风向、温度、气压和密度.

2　数据质量与轨迹分析

2023 年冬季, 某探空火箭探测系统在中国西北地区进行了探测飞行试验. 根据数据判断, 火箭点火正常, 火箭飞行正常, 分离开伞正常, 试验获取了探空仪/降落伞下落段 (20～60 km 高度) 的探测数据. 探空仪采用北斗导航定位体制, 定位采样频率 2 Hz; 温度传感器为珠状热敏电阻, 气压传感器为硅压阻压力计, 温度采样频率 2 Hz. 数据获取率主要用于反映探测数据发射–接收链路工作状态. 数据获取率为实得数据帧数与应得数据帧数之比. 该发火箭数据获取率列于表 1.

从数据获取率来看, 火箭的数据获取率良好, 不同区段综合获取率均可达到 99% 以上, 为后续数据的分析处理提供了可靠保障.

火箭释放后的时间–高度曲线如图 1 所示. 其最大上升高度达到了 76 km, 上升时间约为 2 min, 下落时间 (从最高点到 20 km 高度处) 为 30 min 38 s.

以发射点为中心点, 将火箭发射的上升段和探空仪/降落伞飘移段的水平运动轨迹绘制如图 2 所示. 红色曲线为火箭上升段, 蓝色曲线为探空仪/降落伞飘移段. 火箭发射时, 基本向正东方向发射上升, 达到最高点后, 探空仪随降落伞下落过程中向东飘移, 这是由当地上空的背景风场所决定的 (轨迹表明整层以西风为主). 此次发射整个过程中 (从开始发射到下落

表 1　原始探测数据不同高度区间的获取率

Table 1　Acquisition rate of the original detection data in different height intervals

探测区段/km	60～50	50～40	40～30	30～20
数据获取率/(%)	99.5	99.6	99.6	99.6

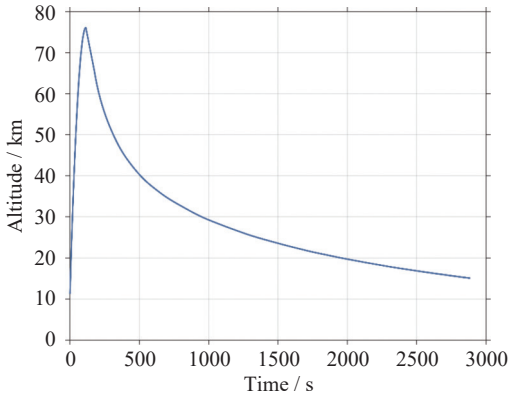

图 1 火箭探测轨迹的时间–高度曲线

Fig. 1 Time-altitude curve of the rocket's detection trajectory

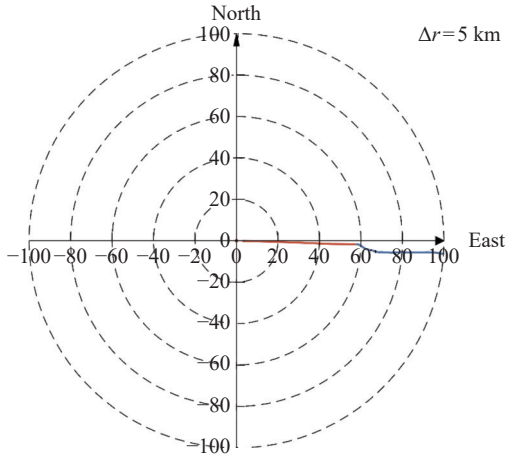

图 2 火箭发上升 (红色) 和下降 (蓝色) 过程的水平运动轨迹

Fig. 2 Horizontal movement trajectory of the rocket during its ascent (red) and descent (blue) process

到 20 km 处), 探空仪均处于发射点周围 100 km 范围以内.

为进一步分析探空仪在下落过程中的轨迹特征, 将其下落过程中东向速度 (v_x)、北向速度 (v_y) 以及垂向速度 (v_z) 随高度的分布绘制如图 3 所示. 在下落到 60 km 附近时, 落速为 135 m·s^{-1}, 下落到 20 km 高度附近时, 落速减小到 6 m·s^{-1}. 水平方向上纬向速度远大于经向速度, 也响应了图 2 中下落轨迹以东向运动为主的轨迹特征.

通过以上对数据质量和轨迹的分析, 认为上升段和下落段火箭的运动轨迹均正常, 同时弹道非常连续且平滑.

3 结果对比评估

3.1 数据对比方法

上文所述是按照火箭探空原理和方法, 正向求解获得的探测结果, 以下利用遥感探测、经验预报模式以及再分析资料等数据对火箭探测获得的大气密度、气压、气温和风场等大气环境参数进行综合比对验证. 用于对比分析的卫星遥感资料为 TIMED 卫星上的 SABER 观测数据[14], 经验预报模型包括国际上最新的 NRLMSISE-00 大气模式[15]、HWM07 水平风场模式[16], 再分析资料为 MERRA2 再分析数据[17].

为了让验证数据尽可能可靠准确, 需要将其和火箭探测数据的时间地点进行有效匹配. 以火箭上升到最高点后开始下落的时刻为基准, 选择与之时刻接近、经纬度区域在一定偏差范围内的验证数据, 并且插值到和火箭处理后数据相同的垂直高度上. SABER 卫星数据主要用于大气温度、密度和气压的比对验证; MERRA2 再分析数据主要用于纬向风、经向风、温度、气压和密度的比对验证; NRLMSISE-00 大气模式主要用于气压、温度和密度的比对验证; HWM07 水平风场模式主要用于风向和风速的比对验证. 将火箭原始数据和进行比对的数据按海拔高度等间隔插值, 50 km 以上高度间隔取 200 m, 50 km 以下高度间隔取 100 m.

3.2 风场数据对比结果

火箭测量得到的风速风向与 HWM07 和 MERRA2 数据的比对情况如图 4 所示. 火箭结果与 MERRA2 再分析数据的风速风向对比吻合均较好, 但 HWM07 模式与前两者均存在显著差异, 表明经验模式并不能反映当天的风场状况. MERRA2 数据在火箭探测点位置±0.5°范围内取区域平均, 选择与之最接近的时刻. 20～45 km 高度区间内火箭探测和 MERRA2 数据的风速和风向变化趋势一致, 火箭实测风速和风向能展现更加显著的波动特征. 实测风速在 45～55 km 高度区间风速最强, 能达到 60 m·s^{-1}. 在 20～60 km 高度上的风向均在 300°附近, 比较稳定. 考虑到模式输出气候态更多地反映的是平均趋势, 而单次探测的瞬态结果更为凸显, 所以火箭探测结果与模式存在差异也是合理的.

为进一步分析 MERRA2 数据和火箭实测数据之间的细节差异特征, 给出二者按照纬向和经向分解后

的风速分量以及分量之差, 如图 5 所示. 火箭探测的纬向风极大值在 45～55 km 之间, 能够达到 55 m·s^{-1}, 经向风极大值在 57 km 附近, 达到 40 m·s^{-1}, 反映在图 2 所示的轨迹图中, 红线与蓝线相接段, 由偏东突然转向东南, 证明分离后下落初段, 高空风经向分量 (北风分量) 较大. 相比经向风, MERRA2 和火箭探测在纬向风上的结果吻合性更好, 风速分量偏差更小. 在 20～45 km 的高度区间, 实测纬向风与 MERRA2 数据的平均偏差 (绝对值) 为 3.8 m·s^{-1}, 经向风为 5.5 m·s^{-1}. 在 45 km 以上, 风速偏差开始变得显著, 这是因为再分析资料在更高高度上缺乏用于同化的观测资料, 区域风场的表征能力减弱.

3.3　温度数据对比结果

由热敏电阻直接测量得到的原始温度数据 (修正前) 如图 6(a) 中的蓝色曲线所示, 但这并不是最终真实的温度数据, 需要根据式 (1) 进行各个子项的修正, 得到修正后的温度数据, 如图 6(a) 中的红色曲线所示. 包含气动加热项 (Pneumatic Heating)、温度滞后项 (Temperature Hysteresis)、地球表面和云层反射太阳短波辐射项 (Reflected Radiation)、长波辐射项 (Longwave Radiation)、传感器对环境热辐射项 (External Radiation)、结构热传导项 (Structural Heat Conduction)、测量电流加热项 (Current Heating) 在内的 7 个子项修正量如图 6(b) 所示, 由于探空仪采用了遮阳结构设计, 太阳直接辐射 (Direct Solar Radiation) 的修正可以忽略. 温度的总修正量从 40 km 往上开始逐渐变得明显, 温度最大修正量为 12℃, 且修正后的温度均比修正前的温度偏小. 各修正子项的温度修正量有正有负, 最为明显的 3 项为气动加热项、电流加热项和温度滞后项, 这是由火箭探空特殊的下投式探空方式引起的, 其从上往下探 (区别于气球探空从下往上, 且低速上升), 在探测初期, 探空仪运动速度较大、周围空气稀薄造成这三项偏大. 传感器相对大气运动速度较大时, 气动加热占主导地位, 这也解释了该项修正量随高度减小而递减的特点. 温度滞后效应在高度 50 km 以上变得显著, 并且在整个高度区间 (20～60 km) 呈现正负振荡变化的特点. 随着高度的减小, 电流加热项先增加后减小, 这一变化与电阻值密切相关.

利用 SABER, NRLMSISE-00 和 MERRA2 数据与火箭修正后温度数据进行比对, 结果如图 7 所示.

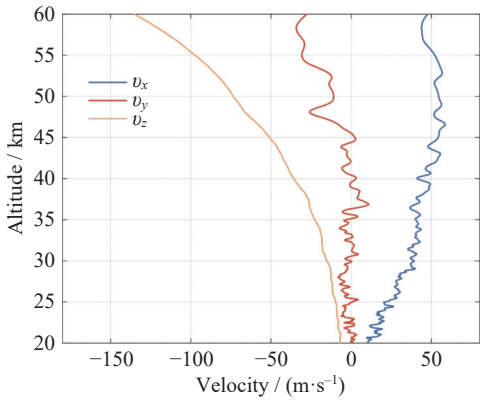

图 3　火箭下落过程中探空仪的速度–高度分布

Fig. 3　Velocity-altitude distribution of the radiosonde during the rocket's descent

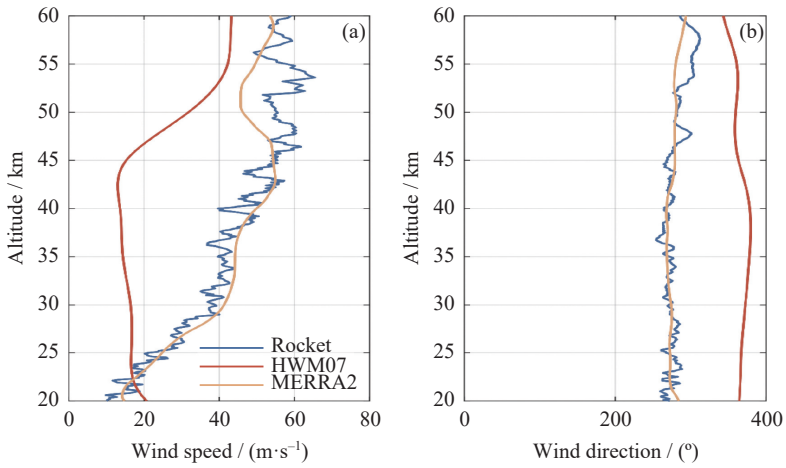

图 4　火箭、HWM07 和 MERRA2 数据风速风向的垂直分布

Fig. 4　Vertical distribution of wind speed and direction in rocket, HWM07, and MERRA2 data

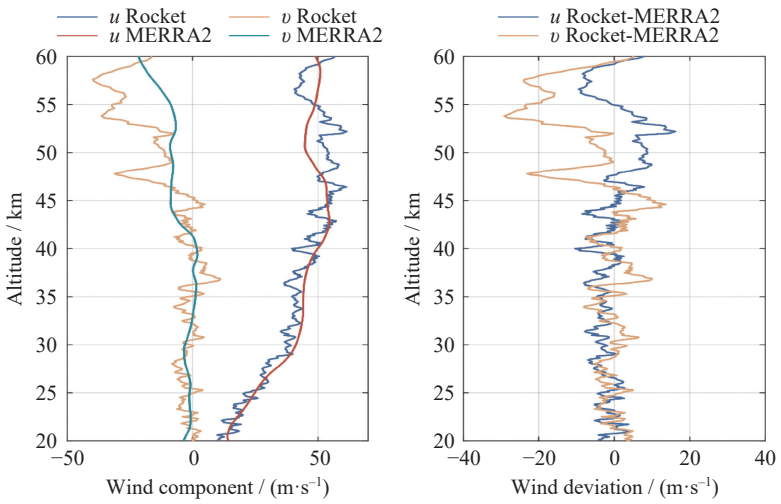

图 5 火箭和 MERRA2 数据纬向风、经向风的垂直分布以及速度分量之差

Fig. 5 Vertical distribution of zonal and meridional winds from the rocket and MERRA2 data, and the difference between the two velocity components

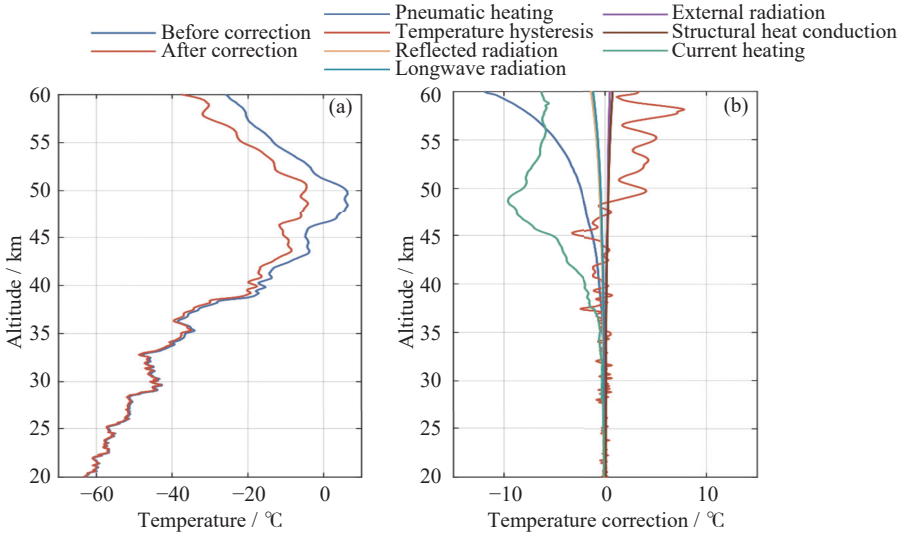

图 6 温度修正前后的垂直分布及各修正子项

Fig. 6 Vertical distribution of temperature before and after correction, and each correction sub-item

SABER 数据在火箭探测点位置±5°范围内进行廓线匹配, 选择与之最接近的时刻. 根据温度最大值推断, 火箭测得的平流层顶高度 (温度曲线拐点高度) 在 50 km 附近, 高于其余 3 种资料的平流层顶高度. 4 种资料的温度廓线在高度 20～40 km 内的趋势较为一致, 温度偏差较小, 在 40～50 km 的平流层顶区域, 温度偏差变大, 与火箭实测温度相比, MERRA2 和 SABER 资料这一区域温度偏高, NRLMSISE-00 资料在这一区域温度偏低. 这一差异的存在是因为模式在该地区同化的实测资料较少, 导致该地区模式表征大气要素准确率较差, 这表明模式和再分析等资料对中国西北地区冬季平流层顶附近温度的反映并不准确, 对温度拐点的描述还需要进一步完善. 在 50～60 km 的高度范围, 4 条廓线的趋势又逐渐恢复一致, 偏差变小. 通过多源资料比对, 可以认为在整个火箭探测高度 (20～60 km) 范围内, 修正后的温度廓线是合理可信的, 而在平流层顶区域内 4 种资料的偏差为不同资料间的固有偏差.

3.4 气压、密度数据对比结果

利用热敏电阻实测数据经修正得到真实大气温

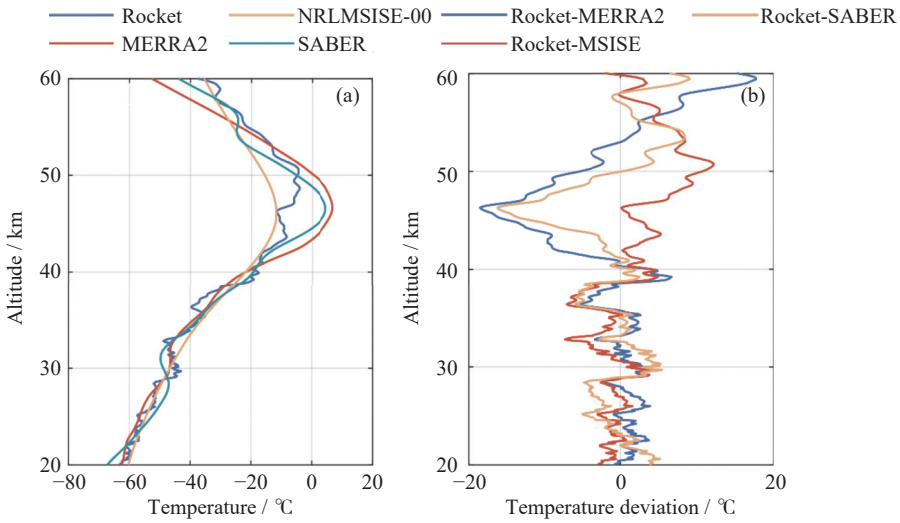

图 7　火箭、MERRA2、NRLMSISE-00、SABER 数据的温度垂直分布以及温度偏差

Fig. 7　Vertical distribution of temperature from rocket, MERRA2, NRLMSISE-00, and SABER, and the deviation between the rocket and the other three types of data

度数据后, 利用压高公式 20 km 附近的实测气压迭代反算更高高度层上的气压数据, 由此得到 20～60 km 的大气压力, 再进一步根据理想气体状态方程计算大气密度. 火箭和 MERRA2, NRLMSISE-00, SABER 数据的密度垂直分布如图 8(a) 所示, 密度随高度的增加呈指数递减. 但是 4 条廓线很难看出具体差异, 因此绘制火箭测量与 MERRA2, NRLMSISE-00, SABER 三种资料的密度相对偏差结果, 如图 8(b) 所示. 整体上看, 火箭与 SABER 和 NRLMSISE-00 的密度偏差明显小于 MERRA2, 在高度 46 km 处火箭与 3 种数据均存在密度偏差的极大值, 这是由于反算密度时对应高度上温度偏差存在极小值造成的.

利用同样的方式绘制气压的垂直分布以及气压偏差, 结果如图 9 所示. 火箭与 SABER 和 NRLMSISE-00 的气压偏差明显小于 MERRA2, 整个高度上 SABER 与火箭结果吻合得更好.

图 8 和图 9 表明, 随着高度的增加, 密度偏差和气压偏差整体上逐渐增大, 这是因为气压反算是从 20 km 高度往上逐层迭代的, 导致气压和密度数据偏差随着高度的上升而下降.

4　结论

利用 2023 年冬季在中国西北地区的火箭探测数据, 对数据质量和探测结果进行评估分析. 根据探空仪下落过程中的运动学特征及受力情况, 通过计算获取了大气温度、风速、风向、气压以及密度廓线. 通过与 MERRA2 再分析资料、NRLMSISE-00 经验模式、HWM 风场模型以及 SABER 卫星多源资料进行对比, 发现大气要素廓线吻合程度较好, 并且火箭能够测量更加精细的大气结构, 能够有效提升对临近空间的精细化认知水平. 通过本文研究, 形成主要结论如下.

(1) 该发火箭数据获取率理想, 上升段和下落段火箭的运动轨迹均正常, 且弹道平滑. 是一次比较成功的飞行试验, 获取了 20～60 km 区间较好质量的气象数据.

(2) 火箭探测风场与 MERRA2 风场廓线基本一致, 吻合性较好, 并且能够反映瞬时的细节扰动特征. 这是其他模式资料所不能比拟的, 因为输出结果都在一定程度上进行了平滑滤波以及时空平均.

(3) 对于各温度修正子项, 40 km 以下温度修正较小, 40 km 以上温度修正量逐渐增大. 主要修正项为电流加热项、温度滞后项以及气动加热项. 修正后的温度廓线与四种资料吻合性均较好, 只是在平流层顶附近不同数据温度差异较大.

(4) 由于气压和密度数据来自 20 km 高度向上的反算结果, 数据偏差会随着高度的上升而整体增加, 垂直廓线结构也和实测温度廓线密切相关.

分析认为, 本次火箭的探测结果理想可靠, 数据

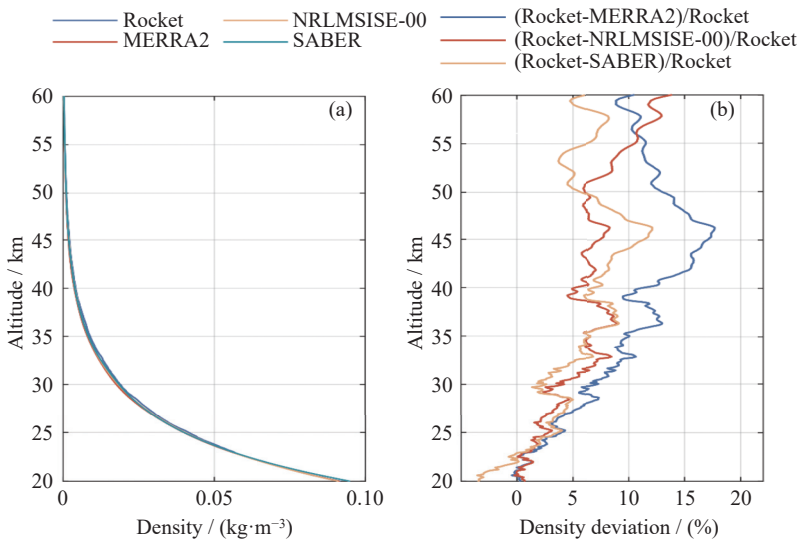

图 8 火箭和 MERRA2, NRLMSISE-00, SABER 数据的密度垂直分布以及密度偏差分布

Fig. 8 Vertical distribution of density from rocket, MERRA2, NRLMSISE-00, and SABER, and the deviation between the rocket and the other three types of data

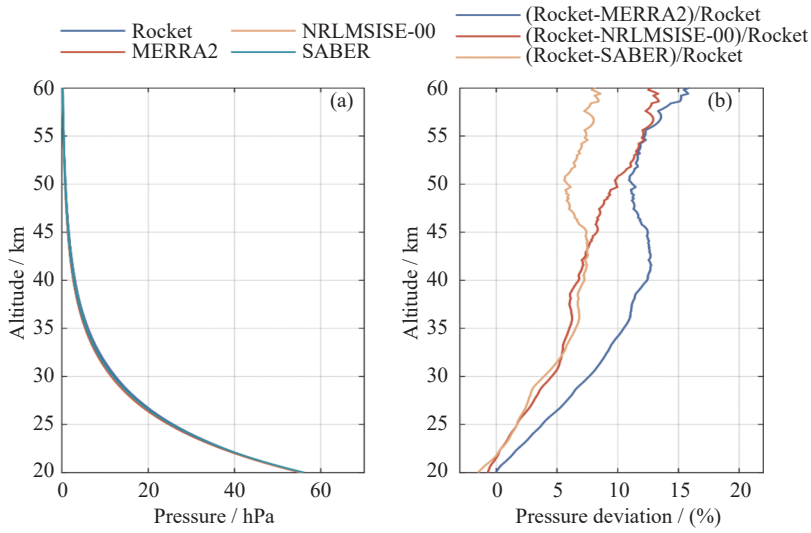

图 9 火箭和 MERRA2, NRLMSISE-00, SABER 数据的气压垂直分布以及气压偏差分布

Fig. 9 Vertical distribution of pressure from rocket, MERRA2, NRLMSISE-00, and SABER, and the deviation between the rocket and the other three types of data

质量较好. 气象火箭作为重要的原位探测装备, 是对临近空间大气环境进行有效探测的重要手段之一. 目前临近空间大气的温度和风场结构的精细化特征极度匮乏, 火箭下投探空自身具有高分辨率、高精度的特点, 可以实现对全球覆盖的卫星资料探测结果的进一步补充, 也可作为其他手段的重要评估参考. 利用气象火箭进行临近空间探测, 有助于提高对临近空间大气中 特例现象 (与气候态不一致的典型结果) 和精细结构的认识. 有必要持续积累火箭探空数据, 继续优化处理模型, 完善对我国上空临近空间大气精细结构的认知, 为提升临近空间大气环境模型精度, 保障飞行器运行驻留任务提供有效支撑.

参考文献

[1] DENG Xiaolong, YANG Xixiang, ZHU Bingjie, *et al.* Simulation research and key technologies analysis of intelli-

gent stratospheric aerostat Loon[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, **44**(8): 127412 (邓小龙, 杨希祥, 朱炳杰, 等. 智能平流层浮空器 Loon 关键技术分析与仿真 [J]. 航空学报, 2023, **44**(8): 127412)

[2] WANG Zihao, JIANG Yi, HUANG Wanning, *et al.* Research on in-situ detection technology of near space environment[J]. *Aerospace Technology*, 2023(4): 70-79 (王梓皓, 姜毅, 黄宛宁, 等. 基于气球平台的临近空间环境原位探测技术研究 [J]. 空天技术, 2023(4): 70-79)

[3] HUANG Wanning, ZHANG Xiaojun, LI Zhibin, *et al.* Development status and application prospect of near space science and technology[J]. *Science & Technology Review*, 2019, **37**(21): 46-62 (黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 等. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景 [J]. 科技导报, 2019, **37**(21): 46-62)

[4] XIONG Junhui, LI Keyong, LIU Yi, *et al.* Study on near space defense technology development and penetration strategy[J]. *Air & Space Defense*, 2021, **4**(2): 82-86 (熊俊辉, 李克勇, 刘燚, 等. 临近空间防御技术发展态势及突防策略 [J]. 空天防御, 2021, **4**(2): 82-86)

[5] 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)

[6] GENG Dan, ZHAO Zengliang, WAN Li, *et al.* Analysis of data from near space meteorological rocket sounding in northwest China in winter[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 396-402 (耿丹, 赵增亮, 万黎, 等. 冬季西北地区临近空间气象火箭探测数据分析 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(3): 396-402)

[7] SHI Dongbo, HU Xiong, TU Cui, *et al.* Near space environment detection technology—sounding rocket falling sphere[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, **15**(7): 89-92 (史东波, 胡雄, 涂翠, 等. 临近空间环境探空火箭膨胀落球探测技术 [J]. 装备环境工程, 2018, **15**(7): 89-92)

[8] FANG 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)

[9] FAN Zhiqiang, SHENG Zheng, ZHAO Zengliang, *et al.* Impact of Coriolis force in the falling-sphere detection of near-space atmospheric environment[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 103-116 (范志强, 盛峥, 赵增亮, 等. 临近空间大气环境落球探测中的科氏力影响 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(1): 103-116)

[10] GE W, SHENG Z, ZHANG Y Y, *et al.* The study of in situ wind and gravity wave determination by the first passive falling-sphere experiment in China's northwest region[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **182**: 130-137

[11] ZHOU L S, SHENG Z, FAN Z Q, *et al.* Data analysis of the TK-1G sounding rocket installed with a satellite navigation system[J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(10): 199

[12] SONG Y Y, HE Y, LENG H Z. Analysis of atmospheric elements in near space based on meteorological-rocket soundings over the East China Sea[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(2): 402

[13] KRÄUCHI A, PHILIPONA R, ROMANENS G, *et al.* Controlled weather balloon ascents and descents for atmospheric research and climate monitoring[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(3): 929-938

[14] 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)

[15] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): SIA15

[16] DROB D P, EMMERT J T, CROWLEY G, *et al.* An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12304

[17] ERN M, PREUSSE P, GILLE J C, *et al.* Implications for atmospheric dynamics derived from global observations of gravity wave momentum flux in stratosphere and mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D19): D19107

作者简介

何　阳　男, 1996 年生, 四川成都人, 北京航空气象研究所工程师, 主要研究方向为临近空间和电离层大气环境.
E-mail: heyang12357@sina.com