

临近空间气象火箭探测资料精度的综合评估*

范志强¹⁾ 盛峰^{1)†} 万黎²⁾ 石汉青¹⁾ 江宇¹⁾

1) (解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2) (江西省国防科学技术工业办公室 620 单位, 南昌 330000)

(2013 年 5 月 8 日收到; 2013 年 6 月 19 日收到修改稿)

为综合分析评估 2004 年 11 月在中国酒泉卫星发射中心的首次临近空间气象火箭探测资料精度, 分别利用经验预报模式资料和卫星遥感资料进行对比. 分析结果表明, 由于经验预报模式时空分辨率低, 同时缺乏中国区域平流层的中上部以上高度的探测数据, 在平流层中上部以上高度与气象火箭探测资料的偏差较大; 相比于经验预报模式, 气象火箭探测资料与卫星资料的偏差明显减小, 偏差主要由两者的系统性误差和对比点在时间及经纬度的差异造成的. 综合对比结果表明, 相比于经验预报模式资料和卫星遥感资料, 气象火箭探测资料的精度较高, 具有较强的可信度, 可对其他方式的探测结果进行标定.

关键词: 临近空间, 气象火箭, 经验预报模式, 精度评估

PACS: 96.60.hd, 93.85.Pq, 93.85.Bc

DOI: 10.7498/aps.62.199601

1 引言

临近空间是指高度位于 20 km 到 100 km 之间的地球大气层^[1,2], 伴随着新一代航空器、浮空器和亚轨道航天器的发展, 临近空间正在成为开展高技术应用和国防安全活动的新领域, 运载火箭、人造卫星、载人飞船等航天器以及导弹武器的研究、试验和应用, 都需要临近空间气象保障. 30 km 以下的低空气象参数可通过气球探测获得, 而对 30 km 到 100 km 临近空间大气的探测, 对气球探测来说太高, 而对卫星探测来说又不能进行原位探测. 时至今日, 气象火箭是可对该高度区间内的大气环境进行原位直接精确测量的唯一手段, 同时气象火箭也可对其他遥感方式的探测结果进行标定. 目前, 世界上已有 20 多个国家建立了 40 多个高空气象探测站, 将气象火箭作为常规探测工具使用, 每周三同时发射气象火箭, 由世界气象组织进行大气参数统计, 建立高空气象图谱, 为科学研究、人造卫星、载人飞船及空间站研制和应用服务, 气象火

箭探测数据也被大量用于导弹武器研制等重要军事领域. 每年消耗气象火箭 3000 多发. 美国 NASA 长期利用探空火箭进行着各种临近空间环境的探测活动, 尤其在近几年, 这种活动更为频繁, 2012 年 9 月其在佛罗里达州空军基地 15 min 内连续发射了 4 枚探空火箭, 以探测中间层顶部的高空风急流, 为导弹发射提供气象保障. 欧洲和日本在临近空间环境探测方面的发展同样较为先进和活跃, 2012 年 12 月 26 日欧洲成功发射学生探空火箭 REXUS11, 这枚探空火箭完成了“地球重力梯度传感器”等多项实验; 2008 年 2 月日本成功发射 S-310-38 探空火箭, 用于探测低电离层(如分散 E 层)内非均匀等离子体密度结构. 我国作为一个航天技术大国, 在全力打造现代化国防的今天, 在利用常规气象火箭进行临近空间气象探测方面明显落后于美国等发达国家, 至今尚未建立气象火箭对临近空间进行气象探测的业务体系.

因此本文基于我国最新研制成功的临近空间气象探测火箭的五次试验数据(目前的有效探测高度为 20—60 km), 综合分析评估临近空间气象火箭

* 国家自然科学基金(批准号: 41105013)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2011122)和江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放课题(批准号: KDXS1205)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 19994035@sina.com

探测资料精度, 通过与经验预报模式和卫星遥感数据的对比分析, 指出基于国外探测数据建立的经验预报模式在中国地区并不适用, 我们国家要基于自己的气象火箭探测数据建立适应中国区域的经验预报模式, 这对于我国航天技术的发展是一项十分急迫的任务.

2 精度综合评估所用的资料

2.1 火箭探测资料

临近空间气象火箭发射后可飞至 70 km 以上高度, 利用探空仪和回收伞在回落过程执行 20—60 km 高度区间的大气参数探测任务, 获取大气温度、压力、密度、风向、风速等数据, 其中大气温度数据是直接测量得到, 压力数据是以 20 km 高度为基点进行换算得到, 密度数据是在已知温度和压力数据的情况下, 通过理想气体状态方程计算得到^[3,4], 风场数据是通过地面跟踪雷达的定位数据计算得到.

2.2 临近空间经验模式资料

MSIS (Mass Spectrometer and Incoherent Scatter empirical model) 是基于卫星上测得的成分资料 (OGO-6, San Marco 3, AEROS-A, AE-C, AE-D, AE-E, ESRO 4, and DE-2), 地面非相干散射雷达 (Millstone Hill, St. Santin, Arecibo, Jicamarca, and Malvern) 测得的温度资料和火箭探测的大气资料创建的高层大气模式. 模式经历了 MSIS-83, MSIS-86, MSIS-90 和 MSIS-00 几个版本, 该系列的模式定义大气温度, 考虑大气的混合、扩散过程, 提供大气成分和密度, 能较好的计算 He, O, N₂, O₂, Ar, H, N 七种气体的数密度和总的数密度以及大气温度. NRLMSISE00 是该系列模式的最新版本^[5].

HWM 是高层大气风场的经验模式, 可给出大气平均风场和大气潮汐波动的信息. 最先的 HWM 模式是基于 AE-E 和 DE-2 卫星的风场数据, 利用有界球谐函数来描述纬向和经向分量. 模式的第一个版本是 HWM87, 模拟 220 km 以上的大气风场. 后来随着地面非相干散射雷达和 Fabry-Perot 光学干涉仪探测数据的增多, 建立了可模拟下延至 100 km 风场的 HWM90 版本. 之后随着 MF 雷达和流星雷达的发展, 建立了可模拟地面风场的 HWM93 模式. 近些年, 各种高空探测方式迅速发展, 卫星、火箭

和地基探测的数据越来越丰富, 经验模式进一步发展为 HWM07 模式, 可模拟 0—500 km 高度范围内的地球大气风场. HWM07 模式在中低纬度与实际比较符合, 它能给出指定纬度、经度、时间和地磁活动指数条件下的纬向风和经向风^[6].

本文采用的经验模式为国际上最新的 NRLMSISE-00 大气模式及 HWM07 水平风场模式. 两种经验模式具有相同的输入参数, 设置相应的纬度、经度、时间和地磁活动指数等输入参数, 能够获得临近空间内的大气温度、密度、风向、风速等经验值.

2.3 临近空间卫星遥感资料

TIMED 卫星于 2001 年 12 月发射, 其主要科学目标是探索 MLTI (Mesosphere, Lower Thermosphere and Ionosphere) 范围内中高层大气中动力学和能量传输过程. 其轨道高度约为 625 km, 轨道倾角为 74.1°, 卫星绕地球运行一周时间大约为 1.6 h. 它每天在近似相同的地方时飞越相同的纬度, 但是每天有约 12 min 的进动, 因此它完整覆盖地球的 24 h 地方时需要连续 60 天的运行. 搭载在 TIMED 卫星上的 SABER 探测仪是一个 10 通道宽带辐射计, 用它通过临边探测 CO₂ 在 15 μm 波段的辐射信号^[7,8], 通过反演可以获取 15—120 km 的温度数据. SABER 观测范围从主半球的 82° 到副半球的 54°, 60 天为周期交换一次主副半球. 本文将利用 SABER 资料的大气垂直廓线数据, 对气象火箭探测资料的温度、密度和气压等数据进行精度评估.

3 临近空间气象火箭的组成、工作原理和数据处理

3.1 临近空间气象火箭的组成

临近空间气象火箭探测系统由气象火箭、火箭探空仪、地面发射系统和 702 气象雷达及数据处理软件四大分系统组成. 气象火箭主要由箭锥、回收舱、回收伞、分离药盒、定时机构、主发动机、助推器和稳定尾翼等部分组成. 火箭探空仪是新型的数字式火箭探空仪. 地面发射系统由移动式发射架和发控装置两部分组成. 气象火箭和火箭探空仪是整个探测系统的核心. 临近空间气象火箭组成见图 1.

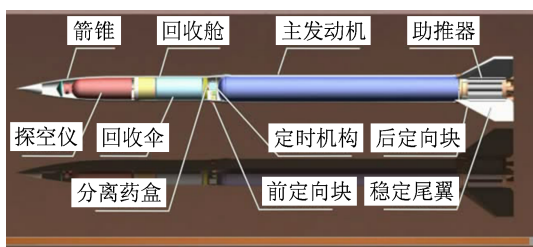


图1 临近空间气象火箭结构示意图

3.2 临近空间气象火箭的工作原理和数据处理

气象火箭发射后可飞至 70 km 以上高度, 利用探空仪和回收伞回落过程执行 20—60 km 空域的大气参数探测任务, 获取大气温度、压力、密度、风向、风速等数据。

其工作过程如下: 操作人员接到发射指令, 按下点火按钮, 主发动机和助推器同时点火工作, 产生预定推力. 在推力作用下, 火箭沿导轨开始运动, 经过大约 0.27 s, 火箭质心离开导轨前端面, 火箭获得 40 m/s 的高轨初速度. 离轨后火箭在推力作用下继续按预定弹道上升飞行, 经大约 0.7 s 助推器熄火; 主发动机继续工作, 约 34 s 熄火, 此时火箭达到最大速度约 1100 m/s. 尔后火箭靠其惯性继续上升飞行, 到 121 s 接近弹道顶点附近, 火箭飞行高度在 70 km 左右, 箭上定时机构发出指令, 弹射分离系统点火工作, 产生弹射推力, 使箭锥、探空仪、回收伞与箭体回收舱分离, 并获得 15 m/s 左右的相对分离速度. 随后回收伞主伞被引导伞牵引逐渐展开, 伞绳拉直, 在空气动压作用下, 数秒钟后回收伞被充满提供升力, 探空仪在其牵引下, 徐徐下落, 并逐渐稳定. 下落过程中, 温度传感器测量大气温度, 压力传感器测量大气压力, 并经发射机传至地面, 由 702 气象雷达接收, 经数据处理系统处理, 可获得大气温度、压力、密度数据. 另利用 702 气象雷达跟踪作为感风元件的回收伞飘落轨迹, 可获得风向、风速数据. 图 2 给出了临近空间气象火箭的工作过程。

4 火箭探测资料与气球探空资料的对比

本文中火箭探测资料来源于 TK-1 气象火箭探测系统的试验数据. TK-1 气象火箭探测系统由江西省国防科工办 620 单位自主研制, 于 2001 年

11 月开始启动, 2004 年 11 月在中国酒泉卫星发射中心进行了火箭定型飞行试验, 五发五成, 获得了 20—60 km 高度范围大量有效的气象数据. 本文利用此次试验数据进行火箭探测资料精度的综合评估。

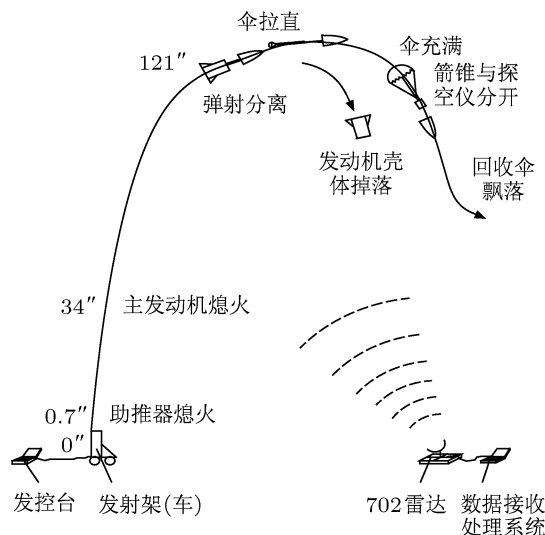


图2 临近空间气象火箭探测系统工作过程

在进行气象火箭飞行试验的同时, 利用气球对低空大气参数进行探测, 获得了 0—25 km 高度范围内有效的气象数据. 通过对比火箭探测数据与同日气球探测数据, 可以发现, 两组数据在同等高度上的曲线基本符合, 火箭探测资料在低高度上精度较高, 满足探测要求. 下面在图 3、图 4 中分别列出了 11 月 8 日、19 日火箭探测数据与气球探测数据的对比结果图. 与气球探空资料的对比, 仅能反应气象火箭探测资料在低高度范围内精度较高, 但更高范围探测资料精度还未知, 下面将利用经验预报模式资料及卫星遥感资料对火箭探测资料精度进行综合评估。

5 火箭探测资料与经验预报模式资料的对比

火箭探测资料的精度评估将综合分析试验数据相对于标准值的最大偏差、平均误差、平均绝对误差及均方根误差^[9,10]. 下列式子中, S 为火箭探测资料, S_0 表示设定的标准值, E 为误差, R 为误差率, $i(1, 2, 3, \dots, N)$ 为数据的序号, N 为总的数据个数, 见 (1) 式; E_{\max} 为最大偏差, 见 (2) 式; \bar{E}_{abs} 为平均误差, \bar{R}_{abs} 为平均误差率, 见 (3) 式; RMS 为均方

根误差, 见 (4) 式.

$$E_i = S_i - S_{0i}, R_i = \frac{S_i - S_{0i}}{S_{0i}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

$$E_{\max} = \max(E_i), \quad (2)$$

$$\bar{E}_{\text{abs}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - S_{0i}|, \quad \bar{R}_{\text{abs}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_i - S_{0i}}{S_{0i}} \right|, \quad (3)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - S_{0i})^2}{N}}. \quad (4)$$

5.1 火箭探测资料与 NRLMSISE-00 经验模式资料的对比

按照火箭探测资料所对应的时间和经纬度, 利用 NRLMSISE-00 经验预报模式, 设置相应的时间、经纬度以及高度范围, 获得与火箭探测资料相同条件下的大气温度、密度的预报值, 并以之为标准值, 评估火箭探测资料与 NRLMSISE-00 经验预报模式资料的偏差. 下面在图 5 列出大气温度、密度资料的对比分析结果.

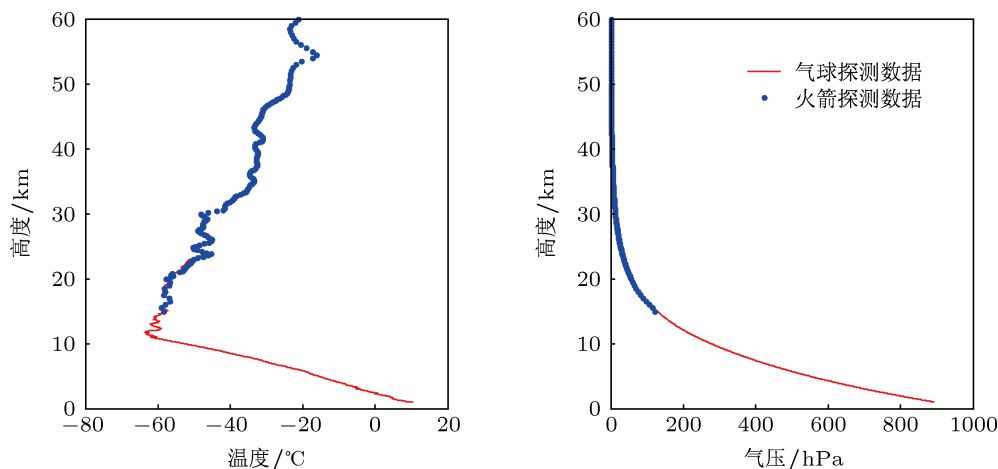


图 3 2004 年 11 月 8 日火箭探测数据与气球探测数据对比图

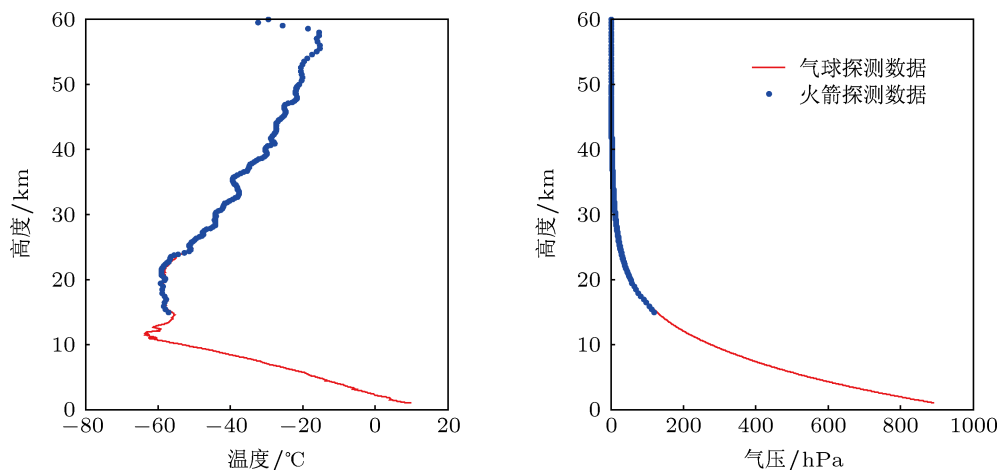


图 4 2004 年 11 月 19 日火箭探测数据与气球探测数据对比图

由图 5 可知, 火箭探测资料的温度与 NRLMSISE-00 经验模式存在一定的偏差, 尤其从平流层的中上部开始, 温度的变化趋势存在明显的不同, 偏差普遍超过 10°C . 大气密度的偏差较小, 仅在 20 km 以下有一定的差异. 对数据进一步分析可知, 火箭探测资料与 NRLMSISE-00 经验模式温度的最大偏差为 18.13°C , 平均误差率为 31.1% ; 空气密度

的最大偏差为 7.12 g/m^3 , 平均误差率为 6.0% . 说明 NRLMSISE-00 经验模式由于缺乏中国区域的探测数据, 特别是缺乏平流层的中上部以上高度的探测数据, 难以描绘中国区域平流层的中上部大气参数的变化特征. 下面在表 1 中列出火箭探测资料与 NRLMSISE-00 经验模式资料的详细对比数据.

为更好地比较气象火箭探测资料与 NRLMS-

ISE-00 模式资料, 下面在图 6、图 7 中列出另外 4 次火箭探测资料与其相对应的 NRLMSISE-00 模式资料的对比图, 其结果进一步证明 NRLMSISE-00 经验模式在中国区域的不适应性. 同时, 通过比较四次 NRLMSISE-00 经验模式的温度随高度变化图, 可以发现四次变化图大致相同, 说明经验模式的时间分辨率较低, 不能实时反映大气参数变化.

5.2 火箭探测资料与 HWM07 经验模式资料的对比

按照火箭探测资料所对应的时间和经纬度, 利用 HWM07 经验预报模式, 设定 HWM07 经验模式

的时间、经纬度和地磁活动指数等条件, 获得与火箭探测资料相同条件下的经向风和纬向风, 并由下面 (5) 式、(6) 式和 (7) 式分别计算得到相应的风速、风向.

$$W = \sqrt{\text{Mer}^2 + \text{Zon}^2}, \quad (5)$$

$$\theta = 360^\circ - \arctan\left(\frac{\text{Zon}}{\text{Mer}}\right), \quad (\text{Mer} > 0, \text{Zon} > 0), \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\text{Zon}}{\text{Mer}}\right) + 270^\circ, \quad (\text{Mer} < 0, \text{Zon} > 0), \quad (7)$$

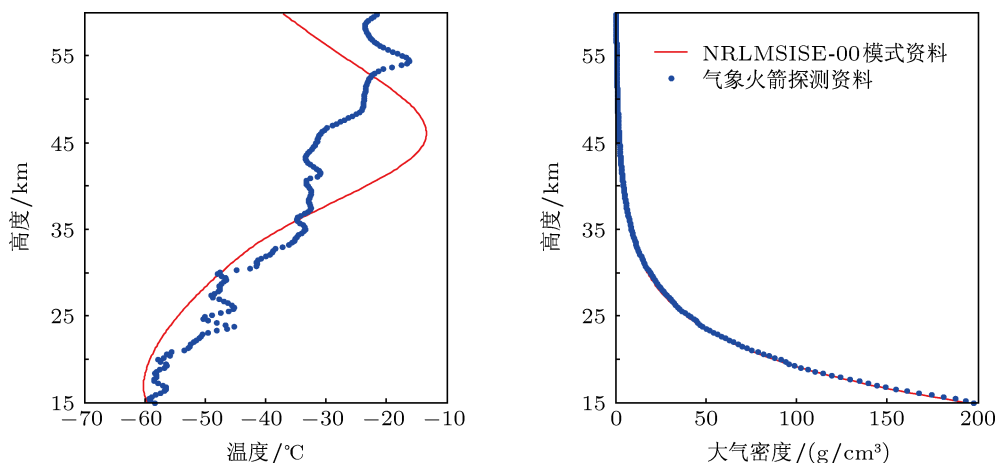


图 5 2004 年 11 月 8 日 11:00(41° 16' N, 100° 18' E) 火箭探测资料与相应时间、经纬度的 NRLMSISE-00 经验模式资料对比

表 1 2004 年 11 月 8 日火箭探测资料与 NRLMSISE-00 经验模式资料数据对比

| 气象要素 | E_{\max} | \bar{E}_{abs} | \bar{R}_{abs} | RMS |
|------------------------|------------|------------------------|------------------------|------|
| 温度/°C | 18.13 | 6.95 | 31.1% | 8.57 |
| 密度/(g/m ³) | 7.12 | 0.95 | 6.0% | 1.56 |

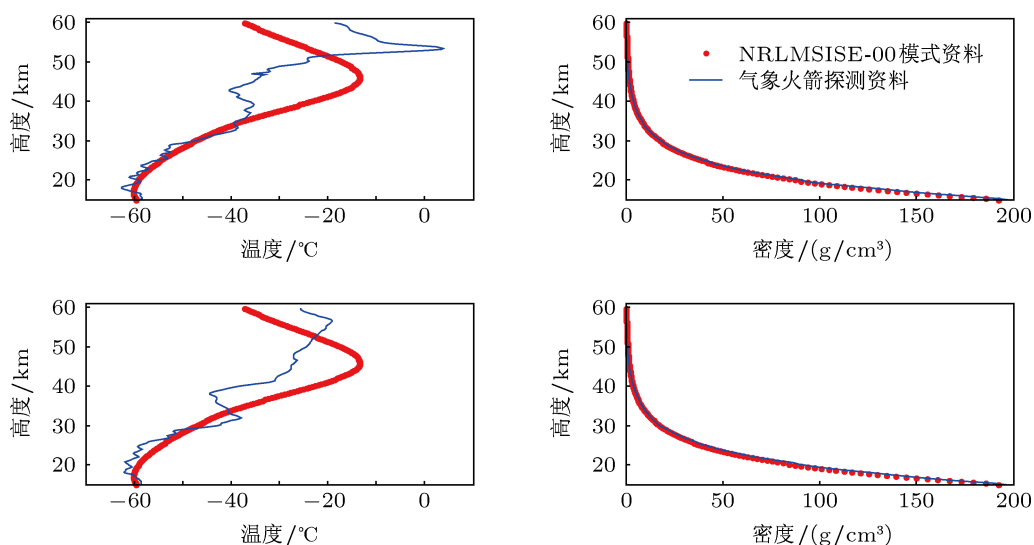


图 6 2004 年 11 月 15 日(上)、16 日(下)两天气象火箭探测资料与 NRLMSISE-00 模式资料的对比

其中, W 为风速, Mer 和 Zon 分别是 HWM07 经验模式的经向风与纬向风, θ 为风向. 下面在图 8 列出风速、风向的对比分析结果.

由图 8 可知, 火箭探测资料的风速和风向与 HWM07 经验预报模式资料均有一定的偏差, 风速最大的偏差集中在 25—40 km 高度区间, 风向最大的偏差集中在 30—35 km 高度区间. 通过分析可发现, 出现偏差的原因是在 25 km 到 35 km 高度左右出现平流层准零风层的现象, 此时火箭探测资料很好体现平流层准零风层这一变化特征, 而 HWM07

经验预报模式由于时空分辨率低, 对这种中小尺度的大气变化特征无法描绘, 未能体现出这一平流层风场特有的现象. 下面在表 2 列出火箭探测资料与 HWM07 经验模式资料的详细对比数据, 其中风速、风向的均方根误差分别为 10.44 m/s 和 86.74 °.

表 2 火箭探测资料与 HWM07 经验模式资料数据对比

| 气象要素 | E_{max} | \bar{E}_{abs} | \bar{R}_{abs} | RMS |
|----------|-----------|-----------------|-----------------|-------|
| 风速/(m/s) | 26.86 | 8.22 | 35.6% | 10.44 |
| 风向/(°) | 277.39 | 44.91 | 16.4% | 86.74 |

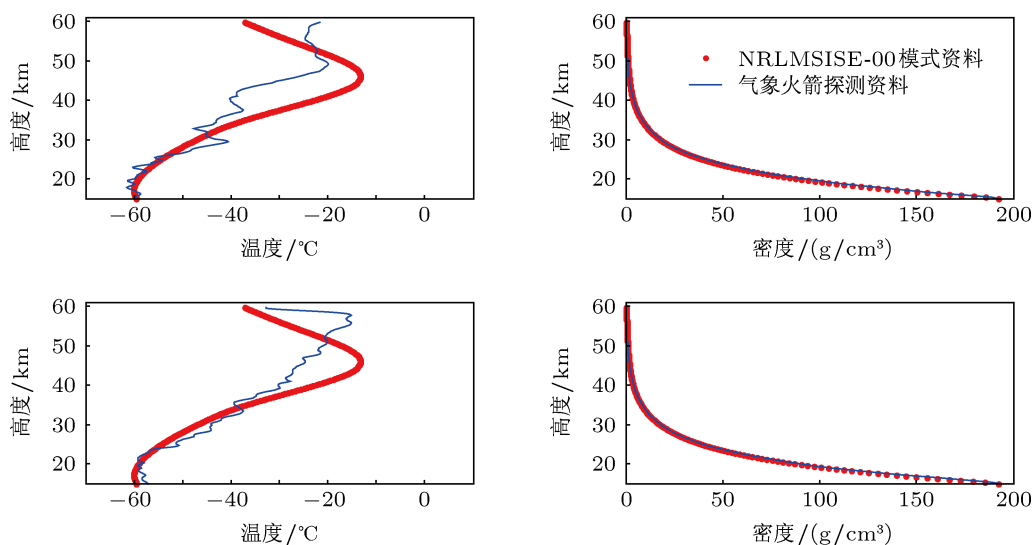


图 7 2004 年 11 月 17 日(上)、19 日(下)两天气象火箭探测资料与 NRLMSISE-00 模式资料的对比

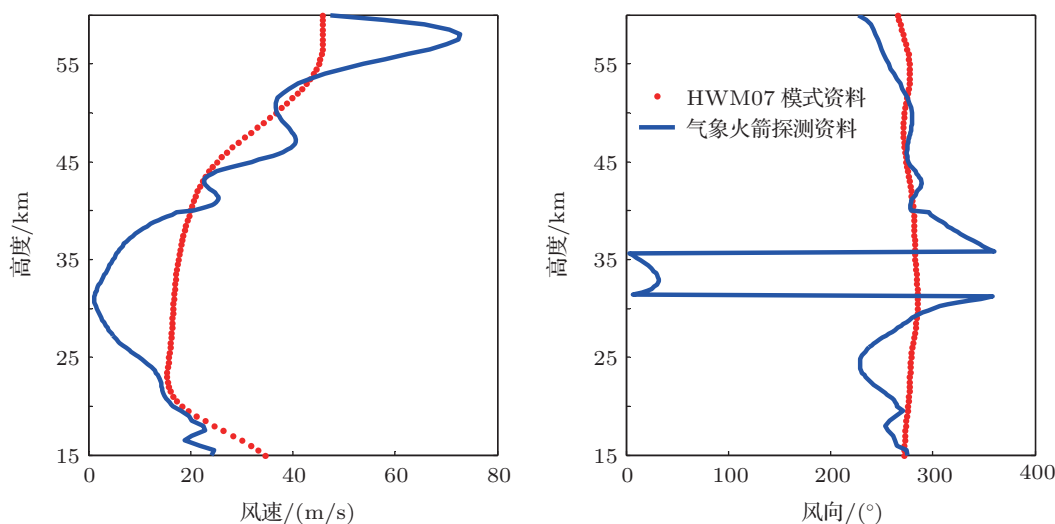


图 8 2004 年 11 月 8 日 11:00 (41° 16' N, 100° 18' E) 火箭探测资料与相应时间、经纬度的 HWM07 经验模式资料对比

下面在图 9、图 10 列出另外四次火箭探测资料与其相对应的 HWM07 经验模式资料的对比图. 很明显的发现, 四次火箭探测资料均未出现平流层准零风层现象, 但火箭探测资料与 HWM07 经验模式资料仍存在较大的偏差. 因此, 类似于

NRLMSISE-00 经验模式, HWM07 经验模式也不能实时反映大气风场参数的变化.

通过将火箭探测资料与 NRLMSISE-00 和 HWM07 两种经验预报模式资料的对比分析, 可以明显发现, 气象火箭探测资料与经验预报模式

资料在大气温度、风速及风向等气象要素上均存在较大的偏差, 只有在大气密度方面偏差较小, 这主要是由于大气密度自身变化较稳定造成的. 说明 NRLMSISE-00 与 HWM07 两种经验预报模式资料由于时空分辨率低, 又缺少中国区域的观测数

据, 无法描绘中国区域临近空间大气参数变化的细节特征和中小尺度的大气现象, 整体误差较大, 不能准确地分析气象火箭探测资料的精度, 所以需要一种更为准确的资料来评估气象火箭探测资料精度.

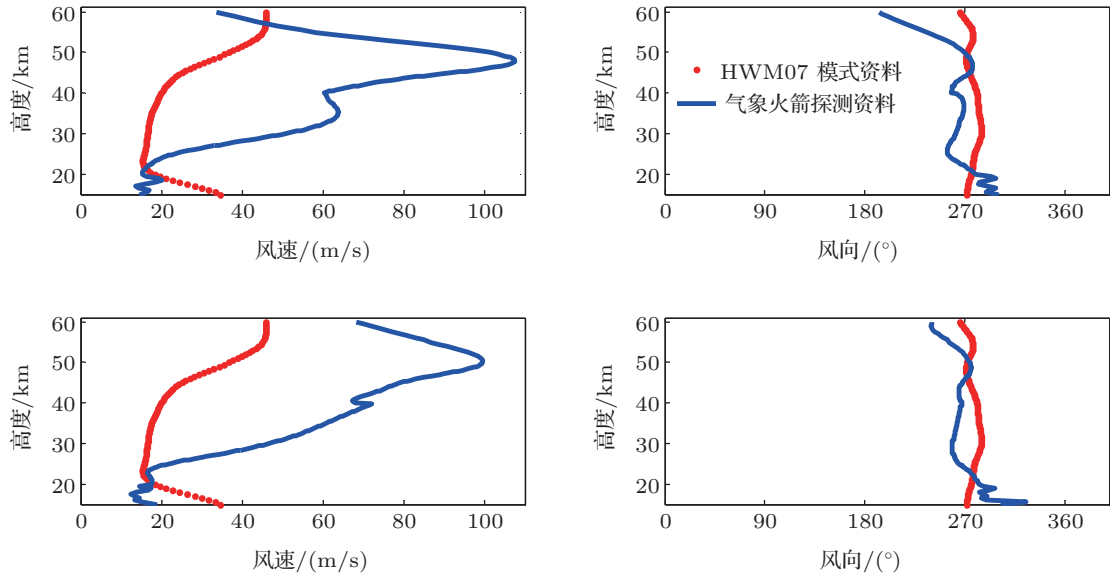


图9 2004年11月15日(上)、16日(下)两天气象火箭探测资料与HWM07模式资料的对比

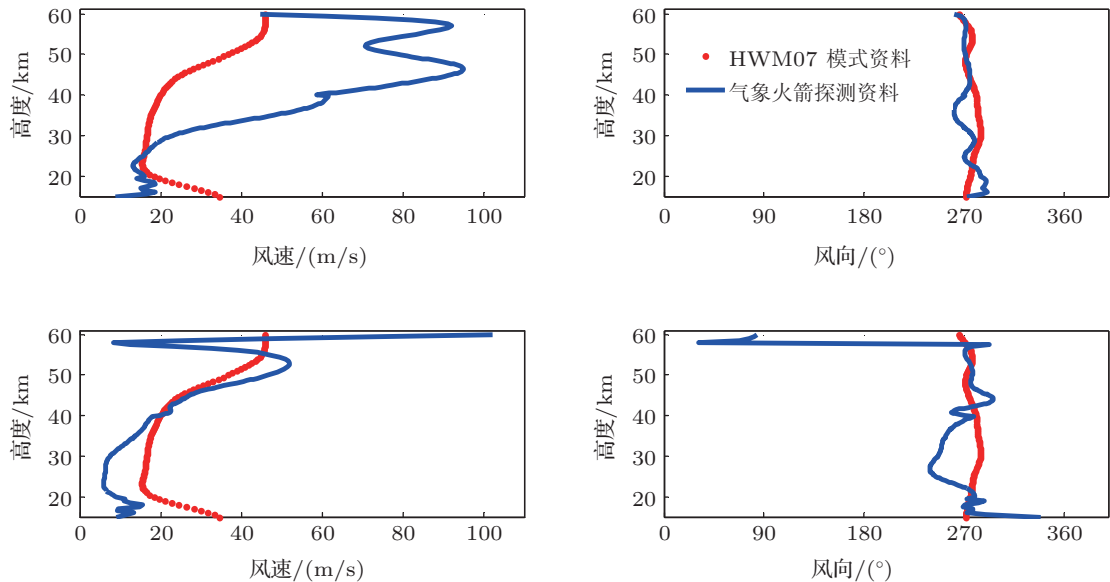


图10 2004年11月17日(上)、19日(下)两天气象火箭探测资料与HWM07模式资料的对比

6 火箭探测资料与 SABER 卫星资料的对比

本文中气象火箭五次发射的时间均在2004年11月, 通过在SABER资料中找到时间、经纬度相对应的观测时次. 对卫星资料进行预处理, 获得各

气象要素的数据, 提取出与火箭探测资料时间、经纬度相对应的大气温度、气压、密度等数据. 由于TIMED卫星扫描全球时, 不能全面覆盖, 没有与火箭探测资料经纬度相同的位置, 所以选取经纬度 $\pm 5^\circ$ 范围内的卫星遥感数据, 以其范围内平均值为对比的标准值^[11,12], 评估火箭探测资料的精度. 下

面在图 11 列出 11 月 8 日火箭探测资料与经纬度 $\pm 5^\circ$ 范围内 SABER 卫星资料的对比图.

对两种资料的数据进行对比分析, 以 SABER 资料数据为标准值, 分析火箭探测数据的误差. 通过对比可知, 火箭探测资料的温度误差较大, 其最大偏差为 15.05°C , 平均绝对误差率为 8.5%; 相对而言, 火箭探测资料的气压及空气密度的误差较小, 其平均绝对误差分别为 1.06 hPa , 0.67 g/m^3 , 平均绝对误差率分别为 7.3%与 2.3%.

表 3 仅为 11 月 8 日一次火箭探测资料的对比分析结果, 不能够充分的评估探测资料的精度, 需对多次探测的精度进行综合分析. 利用 5 次气象火箭探测资料, 分别与相对应的 SABER 卫星资料进行对比分析, 可知气象火箭探测资料与标准值之

间均存在一定的偏差. 其中, 温度的偏差最大, 最大偏差达到 24.82°C , 绝对误差率最大能为 24.6%, 均方根误差最大为 8.69°C , 气压及密度偏差较小, 均方根误差最大仅为 2.21 hPa , 1.97 g/m^3 . 下面在表 4 列出 5 次气象火箭探测资料与 SABER 卫星资料的详细对比结果, 其中 Tem 是指温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; Pre 是指气压, 单位为 hPa ; Den 是指大气密度, 单位为 g/m^3 .

表 3 2004 年 11 月 8 日火箭探测资料与 SABER 探测资料数据对比

| 气象要素 | E_{\max} | \bar{E}_{abs} | \bar{R}_{abs} | RMS |
|----------------------|------------|------------------------|------------------------|------|
| 温度/ $^\circ\text{C}$ | 15.05 | 2.81 | 8.5% | 4.39 |
| 气压/ hPa | 7.64 | 1.06 | 7.3% | 1.98 |
| 密度/ (g/m^3) | 7.27 | 0.67 | 2.3% | 1.42 |

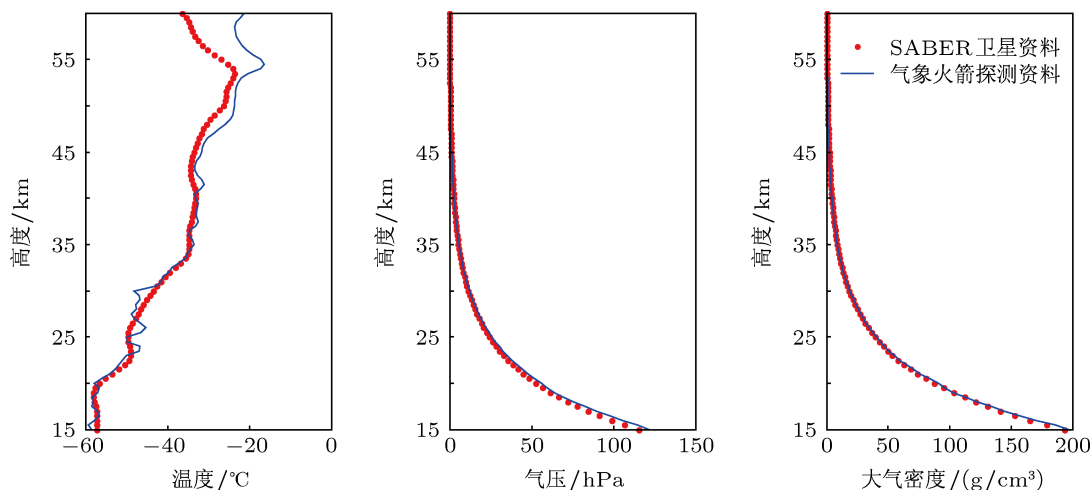


图 11 2004 年 11 月 8 日 11:00 (世界时 3 时) 火箭探测资料与 SABER 探测资料对比

表 4 五次火箭探测资料与 SABER 资料的综合对比

| 日期 11 月 | E_{\max} | | | \bar{E}_{abs} | | | \bar{R}_{abs} | | | RMS | | |
|---------|------------|------|------|------------------------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------|
| | Tem | Pre | Den | Tem | Pre | Den | Tem | Pre | Den | Tem | Pre | Den |
| 8 日 | 15.05 | 7.64 | 7.27 | 2.81 | 1.06 | 0.67 | 8.5% | 7.3% | 2.3% | 4.39 | 1.98 | 1.42 |
| 15 日 | 22.23 | 7.79 | 7.46 | 5.95 | 1.04 | 0.88 | 24.6% | 3.8% | 3.4% | 7.88 | 2.14 | 1.97 |
| 16 日 | 13.62 | 6.18 | 5.06 | 3.66 | 1.26 | 0.96 | 10.4% | 8.1% | 3.7% | 5.05 | 2.21 | 1.72 |
| 17 日 | 14.63 | 4.27 | 2.38 | 3.20 | 0.80 | 0.44 | 9.1% | 4.6% | 1.7% | 4.41 | 1.44 | 0.83 |
| 19 日 | 24.82 | 4.09 | 7.78 | 5.43 | 0.54 | 0.47 | 14.5% | 5.3% | 1.4% | 8.69 | 1.01 | 1.24 |

由图 12、图 13 的分析图可知, 气象火箭探测资料中大气密度数据的绝对误差率最小, 在 1%—4%之间, 且大气密度的均方根误差均小于 2 g/m^3 ; 气象火箭中气压数据的绝对误差率在 3%—8%之间, 均方根误差在 $1\text{—}2.2\text{ hPa}$ 之间; 显然, 大气密度与气压的探测误差的波动较小. 气象火箭中温度

数据的绝对误差率变化较大, 在 11 月 15 日达到 24.6%, 19 日为 14.5%, 其他时间均在 10%左右; 温度的均方误差在 11 月 19 日达到 8.69°C , 15 日为 7.88°C , 其他时间温度均方误差在 $4\text{—}5^\circ\text{C}$ 之间, 造成误差的主要原因应该是火箭探测资料和 SABER 卫星资料的系统性偏差, 以及火箭探测与卫星探测

的对比点在时间和经纬度均有较大差异. 相比于国外经验预报模式 NRLMSISE-00 和 HWM07, 气象火箭探测资料与 SABER 卫星资料的偏差明显减小, 说明气象火箭探测资料的精度较高, 具有较强的可信度.

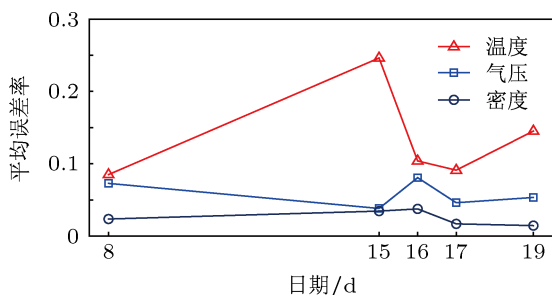


图 12 绝对误差率分析图

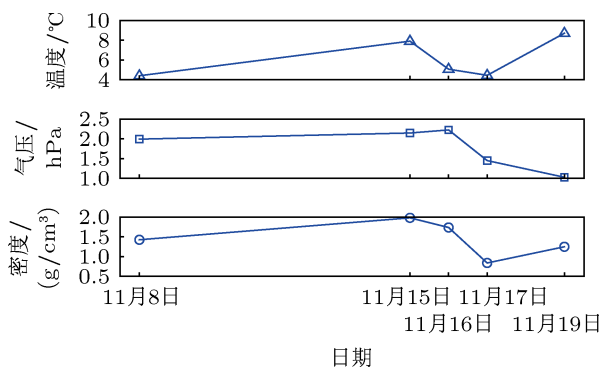


图 13 均方根误差分析图

7 结论

临近空间气象火箭能够获取 15—60 km 空间内的大气参数——温度、气压、大气密度、风速和风向等. 经过与 NRLMSISE-00 预报经验模式对温度、密度的对比, 与 HWM07 预报经验模式对风速、风向的对比, 与 SABER 卫星资料对温度、气压、大气密度的对比^[11,12], 可以发现, 临近空间气象火箭获取的气象资料均为有效的数据, 可以作为

气象预报的使用数据. 然而, 气象火箭探测资料与两种经验预报模式之间均存在较大的偏差, 分析其原因, 可以归结为两点: 第一, 大气环境变化较快, 经验模式并不能精确的反应实时的大气参数, 其本身以及存在一定的误差, 并且不能预报出突发的情况; 第二, NRLMSISE-00 与 HWM07 是基于国外探测数据建立的经验预报模式, 在中国地区并不适用. 所以, 与两种经验模式的对比结果并不能正确反应出气象火箭探测资料的精度. 同时, 可以发现我国缺乏自己的经验预报模式, 不能通过国外经验预报模式来评估探测资料的精度. 另一方面也说明我们国家迫切地需要基于自己的气象火箭探测数据建立适应中国区域的经验预报模式, 这对于我国航天技术的发展是意义重大的任务.

在与 SABER 卫星资料的对比过程中, 利用了五次气象火箭探测资料的试验数据进行了综合分析, 可以发现火箭探测资料仍存在误差, 但误差较小, 说明气象火箭探测资料与 SABER 卫星资料的大气参数较为接近, 其探测精度较高; 同时, 对五次气象火箭探测资料之间进行比较, 可知气象火箭对空间大气参数的探测具备一定的稳定性, 能够作为长期用于探测空间大气环境的一种有效的手段, 为天气预报提供准确有效的数据.

经过对临近空间气象火箭探测资料精度的综合评估, 得知气象火箭探测手段的精度较高, 能够获取一定空间范围内精确的大气参数. 但气象火箭探测资料仍存在一些问题, 需要进一步改进探测仪器的性能, 完善气象火箭探测资料的处理方法. 同时, 气象火箭探测资料仍存在以下问题: 一是此次气象火箭探测的有效大气参数仅在 15—60 km 之间, 对于 60 km 以上空间, 不能有效的进行探测; 二是气象火箭探测资料为单个剖面的数据, 不能综合反映较大范围内的气象条件; 三是气象火箭探测资料成本较高, 不利于连续探测. 这些问题都将是下一步努力的方向.

[1] Ling C, Chen Z Y, Chen H B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 249201 (in Chinese) [凌超, 陈泽宇, 陈洪滨 2012 物理学报 **61** 249201]
 [2] Wu Z, Chen Z Y, Peng Y G, Chen H B, Wang Z H, Lu D R 2008 *Chinese J. Geophys.* **51** 44 (in Chinese) [吴振, 陈泽宇, 彭勇刚, 陈洪滨, 王振会, 吕达仁 2008 地球物理学报 **51** 44]
 [3] Sheng Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 219401 (in Chinese) [盛峥 2012 物理学报 **61** 219401]

[4] Sheng Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 029302
 [5] Drob D P, Emmert J T, Growley G, Picone J M, Shepherd G G, Skinner W, Hays P, Niciejewski R J, Larsen M, She C Y, Meriwether J W, Hernandez G, Jarvis M J, Sipler D P, Tepley C A, O'Brien M S, Bowman J R, Wu Q, Murayama Y, Kawamura S, Reid I M, Vincent R A 2008 *J. Geophys. Res.* **113** A12304
 [6] Picone J M, Hedin A E, Drob D P 2002 *J. Geophys. Res.* **107**

- (A12)1468
- [7] Sheng Z, Fang H X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029301
- [8] Jiang Y, Sheng Z, Shi H Q 2013 *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.* **98** 31
- [9] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S V, Lenschow D H 2011 *J. Atmos. Sci.* **68** 1703
- [10] Guo P, Xu X, Zhang G X 2011 *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.* **73** 839
- [11] Wang Z H, Wang Z, Kang S F, Zhang Y S, He X J 2010 *Chinese Journal of Radio Science* **25** 913 (in Chinese) [王振会, 王喆, 康士峰, 张玉生, 赫晓静 2010 电波科学学报 **25** 913]
- [12] Wei M, Ouyang S C 2011 *Engineering Sciences* **13** 49 (in Chinese) [魏鸣, 欧阳首承 2011 中国工程科学 **13** 49]

Comprehensive assessment of the accuracy of the data from near space meteorological rocket sounding*

Fan Zhi-Qiang¹⁾ Sheng Zheng^{1)†} Wan Li²⁾ Shi Han-Qing¹⁾ Jiang Yu¹⁾

1) (Institute of Meteorology and Oceanology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

2) (Unit 620, National Defense Office of Science and Industry Technology of Jiang Xi Province, Nanchang 330000, China)

(Received 8 May 2013; revised manuscript received 19 June 2013)

Abstract

We use the data obtained from empirical forecast model and satellite remote sensing to analyze and assess the accuracy of the data obtained from first near space meteorological rocket sounding in Jiuquan Satellite Launch Center (JSLC) in November 2004. Analysis shows that the data of empirical forecast model has great difference from meteorological rocket sounding data for the middle-upper stratosphere. Because the empirical forecast model has low spatial and temporal resolution, especially it lacks of the sounding data for the middle-upper stratosphere in China, the deviation between the data of meteorological rocket and the satellite data is obviously lower than the empirical forecast model gave. The deviation is caused by the systematic error between the two and the difference of time, latitude and longitude. Comprehensive comparison results show that the data of meteorological rocket is of high accuracy and credibility compared to the data of the empirical forecast model and satellite remote sensing. These data can be used to specify the probe's results from other ways.

Keywords: near space, meteorological rocket, empirical forecast model, accuracy assessment

PACS: 96.60.hd, 93.85.Pq, 93.85.Bc

DOI: 10.7498/aps.62.199601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41105013), the Natural Science Foundation of Jiangsu, China (Grant No. BK2011122), and the Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing Scientific Research Fund, China (Grant No. KDXS1205).

† Corresponding author. E-mail: 19994035@sina.com