

程胡华, 成巍, 沈洪标, 等. 火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异特征及预报. 应用气象学报, 2022, 33(4): 400-413.

DOI: 10.11898/1001-7313.20220402

火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异特征及预报

程胡华¹⁾ 成巍²⁾ 沈洪标³⁾ 赵亮^{4)*}

¹⁾(中国人民解放军 63729 部队, 太原 030027)

²⁾(北京应用气象研究所, 北京 100029)

³⁾(中国人民解放军 32018 部队, 北京 100094)

⁴⁾(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要

利用 2014 年 12 月—2020 年 12 月时间间隔为 3.5 h 的高空风实况分析火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异, 并利用 WRF 模式和火箭发射前 3 h 高空风建立火箭发射后 0.5 h 高空风预报模型, 结果表明: 火箭发射前后 3.5 h 内高空风速、风向差异特征, 与高度、季节及火箭发射前 3 h 平均高空风速有关。高空风最大风速偏差为 $-24.00 \sim 26.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速偏差在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内达三分之二, 且主要出现在对流层中高层 [6.5 km, 11.5 km] 高度内; 最大风向绝对偏差范围为 $10.00^\circ \sim 180^\circ$, 主要集中在 $[30^\circ, 60^\circ]$ 范围及对流层中低层 [1.5 km, 6.5 km] 高度内。火箭发射前后 3.5 h 内高空风速平均绝对偏差随火箭发射前 3 h 高空风速平均值增大呈增大趋势, 风速相对误差绝对值和风向绝对偏差则表现为减小趋势, 说明高空风强时, 风向不易发生短时变化; 火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异随季节变化与高空风的季节特征有关。利用火箭发射后 0.5 h 高空风预报模型, 有助于降低火箭飞行风险。

关键词: 运载火箭; 高空风速变化; 高空风向变化; 建模预报

引 言

运载火箭发射前, 除需确保运载火箭本身无任何问题外, 还需充分考虑高空风对运载火箭安全飞行的影响, 若高空风过大, 轻则影响火箭发射精度, 重则导致箭体弯曲折断, 造成飞行失败。为提高运载火箭飞行成功率开展的研究主要分为两方面: 一方面是针对运载火箭的飞行控制、发动机特性等的研究^[1-5], 另一方面是针对大气环境产生的气动载荷特征的研究^[6-12], 这些研究取得大量有意义成果, 为持续提高火箭飞行成功率提供有力支撑。

目前, 火箭飞行前较少考虑高空风可能出现急剧变化, 然而实践表明: 虽然高空风在短时间内变化通常较小, 但有时也会出现急剧变化, 如当强对流天

气系统在火箭发射场及其周边发生发展时, 强烈的垂直运动引起大气环境场(风场、温度场等)快速变化^[13-16], 导致高空风在几小时内出现明显变化。另外, 高空急流也会引起高空风急剧变化。高空急流集中在对流层上部或平流层, 具有强水平切变和垂直切变, 有 1 个或多个风速极大值(风速超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 高空急流具有南北摆动、下沉或上升等运动特征, 对其他天气系统存在动力作用^[17-20], 导致高空风在短小时内出现急剧变化。

因此, 鉴于高空风在短小时内可能出现明显时空变化, 若以发射前 3 h 高空风产生的最大气动载荷是否超过阈值判断火箭能否按计划发射, 存在一定决策风险; 但发射前 3 h 高空风能否代表发射时刻的高空风, 尚未见到相关报道。由于缺少火箭发射时刻的高空风资料, 仅有火箭发射后 0.5 h 的高空

2022-02-17 收到, 2022-04-29 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(42075040), 国家自然科学基金-中国民用航空局联合研究基金重点项目(U2033207), 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010105)

* 通信作者, 邮箱: zhaol@lasg.iap.ac.cn

风资料,因此利用2014年12月—2020年12月时间间隔为3.5 h的高空风资料研究火箭发射前后3.5 h内高空风差异,利用WRF(Weather Research and Forecast)模式和发射前3 h的高空风资料,建立火箭发射后0.5 h高空风预报模型,并对发射后0.5 h高空风预报效果进行检验。

1 资料与方法

1.1 资料

高空风资料为2014年12月—2020年12月某地区时间间隔为3.5 h的探空气球风场资料集,共有325组样本,其中0~10 km高度和10~20 km高度范围内的间隔分别为0.20 km和0.50 km。考虑到该地区海拔高度约为1.5 km,因此高空风资料的海拔高度(简称高度,下同)范围为1.5~21.5 km。

NCEP/GFS资料为美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)全球预报系统(Global Forecast System, GFS)模式预报产品,该资料每日发布4次(08:00, 14:00, 20:00和02:00,北京时,下同),可以预报未来8 d的天气,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ, 1^\circ \times 1^\circ, 1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 等,NCEP/GFS预报产品已广泛应用于天气预报、天气机理等方面研究,并取得一系列成果^[21-23]。本文选用水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP/GFS预报场作为WRF模式的初始场和侧边界条件,结合火箭发射前3 h高空风资料,制作未来24 h内的短期高空风预报模型。

1.2 方法

以火箭发射前3 h高空风为基准,对3.5 h内的高空风速偏差、绝对偏差、相对误差绝对值及风向绝对偏差进行统计,相应的计算公式如下:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i), \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |k_i - l_i|. \quad (4)$$

式(1)~式(4)中, D 为风速偏差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), A 为风速绝对偏差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), R 为风速相对误差绝对值(单位:%), C 为风向绝对偏差(单位:

$^\circ$), n 为样本量, x 为发射后0.5 h高空风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), y 为发射前3 h高空风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), k 为发射后0.5 h高空风向(单位: $^\circ$), l 为发射前3 h高空风向(单位: $^\circ$)。占有率为某区间范围内样本量占总样本量的百分比。

WRF模式是目前世界上最先进的中尺度数值天气模式之一,能够客观描述从云尺度到各种不同天气尺度的重要天气特征。目前WRF模式已被广泛应用于天气预报业务、天气机理等研究,利用该模式可较好地预报强对流、高空急流、地面风等变化特征及演变机理,并取得大量成果^[18-19,24-26]。火箭发射前3 h、发射后0.5 h的高空风分别以 V_1 和 V_2 表示,基于发射前3 h高空风 V_1 和WRF模式建立高空风预报模型得到发射后0.5 h的高空风预报,以 V_f 表示。

2 火箭发射前后3.5 h内高空风差异

2.1 最大风速偏差

图1a是火箭发射前后3.5 h内最大风速偏差箱线图,图中上、下黑色横线分别代表风速最大值和最小值,黑色方框的上、下边分别对应上四分位数(75%)和下四分位数(25%),方框内黑色线为中分位(50%)。由图1a可见,最大风速偏差值范围为 $-24.00 \sim 26.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中分位数为 $-5.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,上四分位数为 $8.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,下四分位数为 $-8.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将速度偏差分为 $(-\infty, -20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}), [-20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}), [-10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 0), [0, 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}), [10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ 和 $[20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, +\infty)$ 6个区间,其占有率分别为0.92%,14.15%,40.92%(最大),27.38%,14.46%和2.17%,即位于 $\pm 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的偏差占有率为68.30%,达到总数的三分之二。图1b是最大风速偏差对应高度箱线图,图中“+”表示异常值或离群点(下同)。由图1b可知,高度范围为1.7~19.0 km,中分位数为9.3 km,上四分位数为11.5 km,下四分位数为6.45 km。将高度划分为 $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km}), [6.5 \text{ km}, 11.5 \text{ km}), [11.5 \text{ km}, 16.5 \text{ km})$ 和 $[16.5 \text{ km}, 21.5 \text{ km}]$ 4个区间,其占有率分别为25.85%,49.54%(最大),16.62%和7.99%。图1表明:在火箭发射前后3.5 h内最大风速偏差主要集中在 $[-10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 0)$,在 $\pm 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的占有率达到总数的三分之二,且主要出现在对流层中高层 $[6.5 \text{ km}, 11.5 \text{ km})$ 高度。

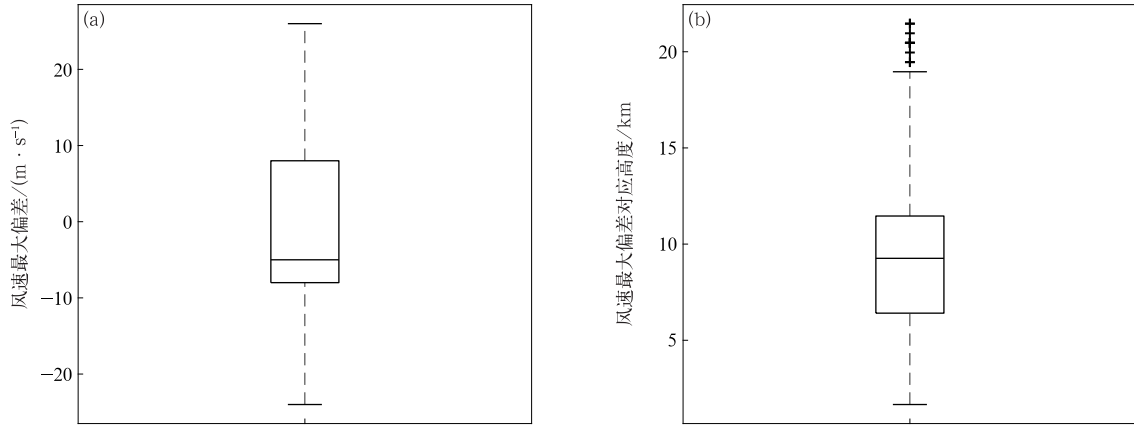


图1 火箭发射前后3.5 h内最大风速偏差(a)及其对应高度(b)箱线图

Fig. 1 Box plot of the maximum wind speed deviation(a) and corresponding height(b) within 3.5 hours before and after rocket launch

2.2 最大风向绝对偏差

图2a是火箭发射前后3.5 h内最大风向绝对偏差箱线图。由图2a可知,风向偏差范围为 $10.00^{\circ} \sim 180^{\circ}$,中位数为 69.00° ,上四分位数为 125.25° ,下四分位数为 40.00° 。将偏差划分为 $[0^{\circ}, 30^{\circ})$, $[30^{\circ}, 60^{\circ})$, $[60^{\circ}, 90^{\circ})$, $[90^{\circ}, 120^{\circ})$, $[120^{\circ}, 150^{\circ})$ 和 $[150^{\circ}, 180^{\circ}]$ 6个区间,其占有率分别为13.54%, 28.31% (最大), 20.92%, 11.08%, 7.69%和18.46%。图2b是最大风向绝对偏差对应高度分布

箱线图,其值范围为1.7~19.5 km,中位数为3.3 km,上四分位数为9.1 km,下四分位数为1.9 km。将高度划分为 $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km})$, $[6.5 \text{ km}, 11.5 \text{ km})$, $[11.5 \text{ km}, 16.5 \text{ km})$ 和 $[16.5 \text{ km}, 21.5 \text{ km}]$ 4个区间,其占有率分别为68.92% (最大), 8.92%, 0.92%和21.24%。图2表明:火箭发射前后3.5 h内最大风向绝对偏差主要集中在 $[30^{\circ}, 60^{\circ})$,且主要出现在对流层中低层 $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km})$ 高度。

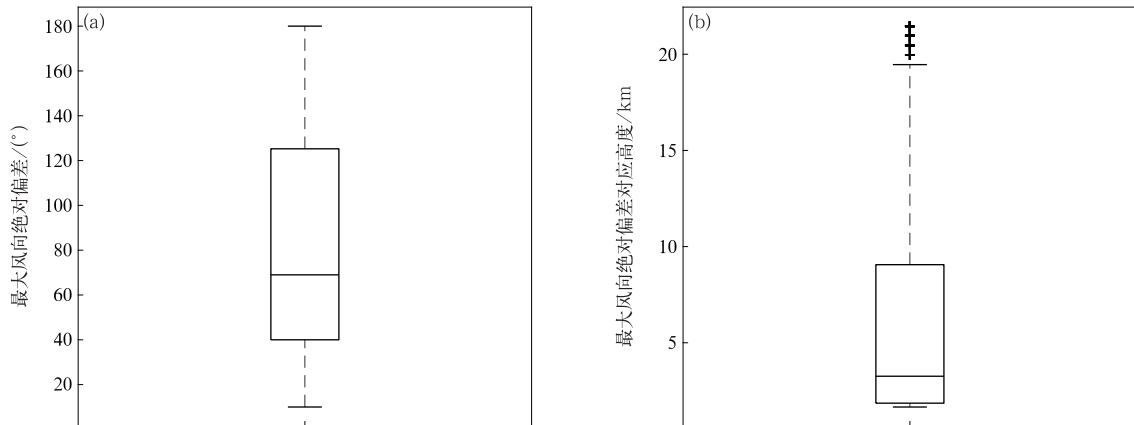


图2 火箭发射前后3.5 h内最大风向绝对偏差(a)及其对应高度(b)箱线图

Fig. 2 Box plot of the maximum absolute wind direction deviation(a) and corresponding height(b) within 3.5 hours before and after rocket launch

2.3 不同高度的火箭发射前后3.5 h内高空风差异

在 $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km})$, $[6.5 \text{ km}, 11.5 \text{ km})$, $[11.5 \text{ km}, 16.5 \text{ km})$ 和 $[16.5 \text{ km}, 21.5 \text{ km}]$ 高度内,火箭发射前后3.5 h内的平均风速偏差、绝对偏差、

相对误差绝对值和风向绝对偏差在不同区间范围内占有率分布如图3所示。由图3a可知,风速偏差占有率随风速偏差增加呈先增大后减小的变化趋势,各高度的最大占有率均位于 $[-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 0)$,分别

为 45.23%,30.15%,37.23%和 41.54%。由风速绝对偏差(图 3b)可知,各高度的最大占有率分别位于区间 $[2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$, $[2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$, $[2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ 和 $[0, 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$,分别为 49.85%,46.15%,54.46%和 49.85%。由风速相对误差绝对值(图 3c)可知,各高度的最大占有率分别位于区间 $[20\%, 30\%)$, $[10\%, 20\%)$, $[0, 10\%)$

和 $[10\%, 20\%)$,分别为 28.00%,40.62%,67.08%和 40.62%。当风速相对误差绝对值超过 20%,各高度的占有率分别为 71.38%(最大),26.15%,6.46%(最小)和 35.69%,即在 $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km})$ 高度明显偏大(71.38%),在 $[11.5 \text{ km}, 16.5 \text{ km})$ 高度明显偏小(6.46%)。由风向绝对偏差(图 3d)可知,各高度的最大占有率分别位于区间 $[10^\circ, 20^\circ)$, $[0^\circ,$

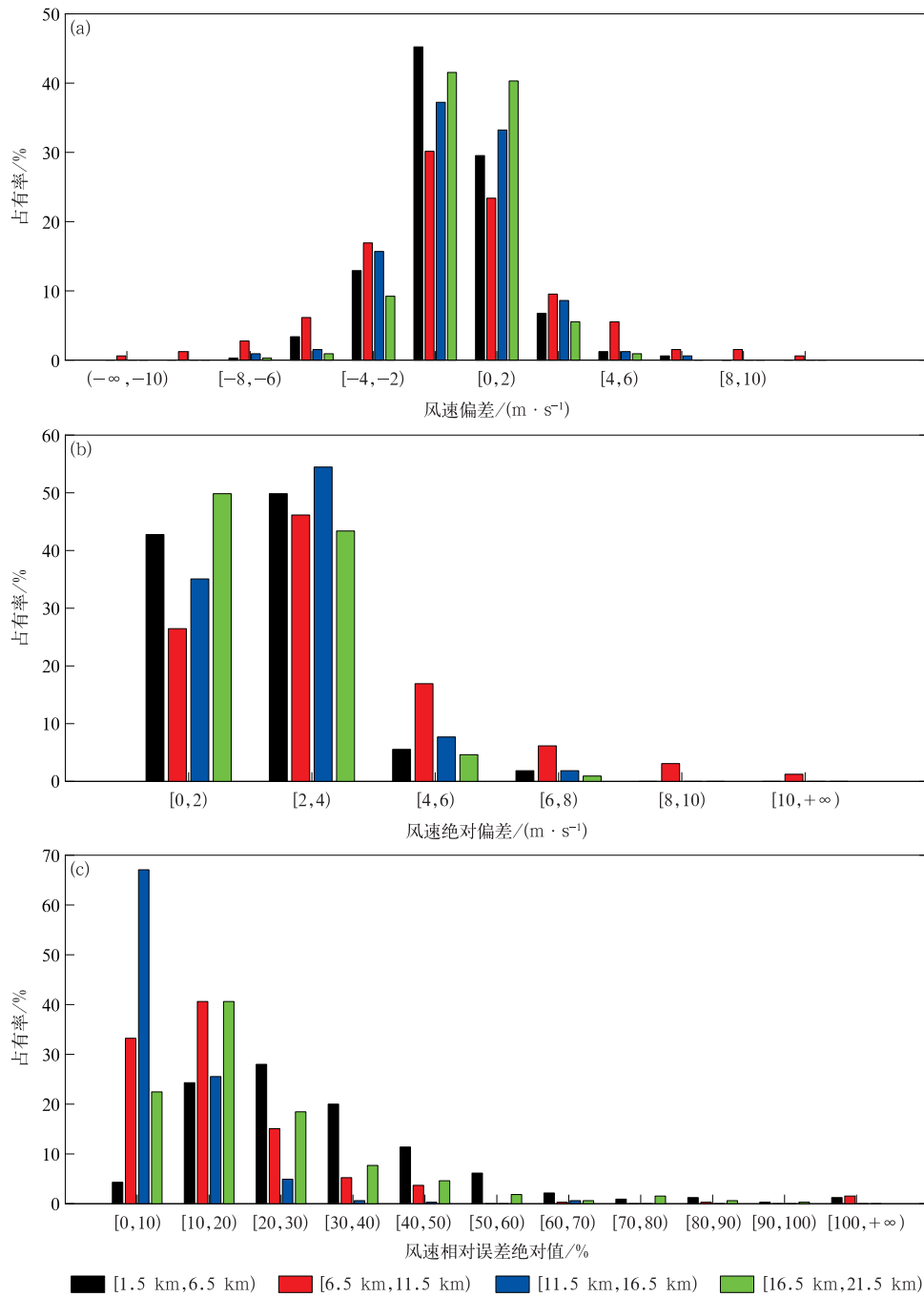
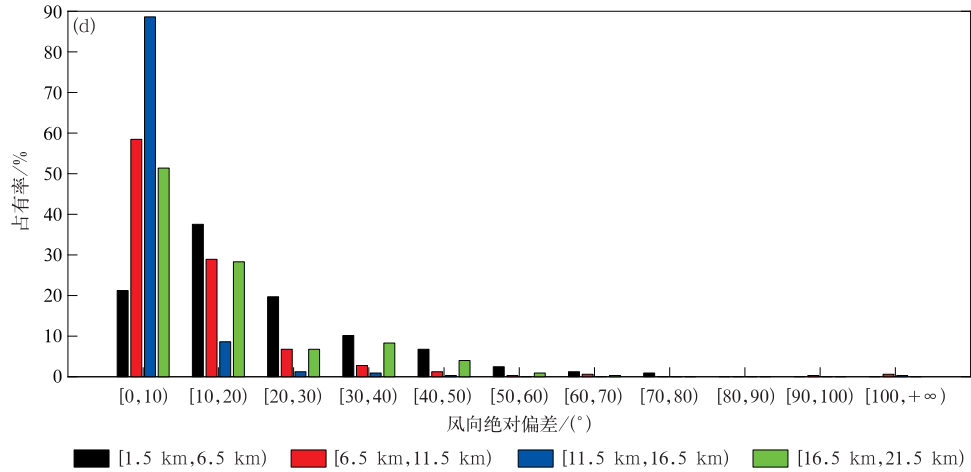


图 3 不同高度范围火箭发射前后 3.5 h 内风速偏差(a)、绝对偏差(b)、相对误差绝对值(c)和风向绝对偏差(d)占有率
 Fig. 3 Occupancy of wind speed deviation(a), absolute deviation(b), absolute relative error(c) and absolute wind direction deviation(d) at different height within 3.5 hours before and after rocket launch



续图 3

10°), [0°, 10°) 和 [0°, 10°), 分别为 37.54%, 58.46%, 88.62% 和 51.38%。当风向绝对偏差超过 20°, 各高度占有率分别为 41.23% (最大), 12.62%, 2.77% (最小) 和 20.31%, 即在 [1.5 km, 6.5 km) 高度明显偏大 (41.23%), 在 [11.5 km, 16.5 km) 高度明显偏小 (2.77%)。由上述分析可知, 风速相对误差绝对值、风向绝对偏差在 [1.5 km, 6.5 km) 高度内均明显偏大, 在 [11.5 km, 16.5 km) 高度内明显偏小。

2.4 火箭发射前 3 h 平均风速对 3.5 h 内高空风差异影响

V_1 是决定火箭能否按计划发射的重要高空风, 计算 V_1 在整个高度范围内的平均风速得到 V_1 平均值, 将其依小到大排序以分析火箭发射前后 3.5 h 内风速偏差、绝对偏差、相对误差绝对值、风向绝对偏差的变化特征具有实际意义, 如图 4 所示。由图 4 可知, 随 V_1 平均值增大, 风速偏差振幅呈增大

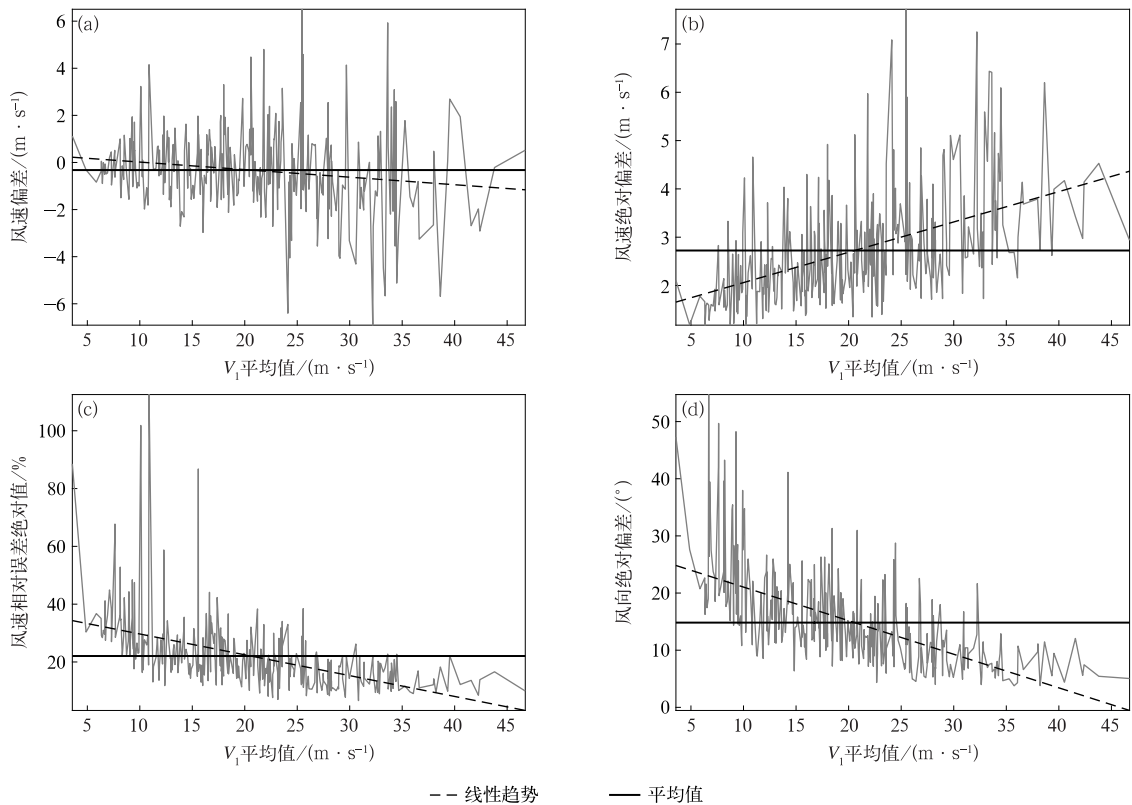


图 4 火箭发射前后 3.5 h 内风速偏差(a)、绝对偏差(b)、相对误差绝对值(c)和风向绝对偏差(d)随 V_1 变化特征
 Fig. 4 Variation of wind speed deviation(a), absolute deviation(b), absolute relative error(c) and absolute wind direction deviation(d) with V_1 within 3.5 hours before and after rocket launch

趋势,线性趋势呈减小特征,风速绝对偏差呈明显增大趋势,风速相对误差绝对值和风向绝对偏差均呈减小趋势,对应线性趋势方程分别为 $y = -0.0321x + 0.3371$, $y = 0.0628x + 1.4320$, $y = -0.7206x + 36.8890$ 和 $y = -0.5878x + 26.9220$, 即当 V_1 平均值增大 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速偏差减小 $0.321 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速绝对偏差增加 $0.628 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速相对误差绝对值减小 7.206% , 风向绝对偏差减小 5.878° 。因此,高空风强时,风向不易发生短时变化。

2.5 火箭发射前后3.5 h内高空风差异随高度变化

V_1 平均值从小到大排序,选取每20%样本量作为1组样本(共5组),其中样本1为前20%的样本量,依次类推,样本5为最后的20%样本量。5组样本的风速偏差、绝对偏差、相对误差绝对值和风向绝对偏差随高度变化特征见图5。由图5可见,样本1~样本5的风速偏差(图5a)范围分别为 $-1.33 \sim 0.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-1.27 \sim 0.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.82 \sim 1.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.91 \sim 0.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.95 \sim 0.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 $-0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 样

本1~样本5的风速绝对偏差(图5b)均表现为随高度增加先增大后减小的趋势,风速绝对偏差范围分别为 $1.06 \sim 2.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.56 \sim 3.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.62 \sim 3.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.04 \sim 4.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.94 \sim 5.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 $1.98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即 V_1 平均值越大,火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差越大;与风速绝对偏差变化特征相反,样本1~样本5的风速相对误差绝对值(图5c)均表现为随高度增加先减小后增大的趋势,即风速相对误差绝对值在顶层和底层较大,中层较小,风速相对误差绝对值范围分别为 $14.89\% \sim 75.82\%$, $7.94\% \sim 85.26\%$, $6.21\% \sim 68.30\%$, $5.40\% \sim 70.88\%$ 和 $5.20\% \sim 68.00\%$, 平均值分别为 33.16% , 24.53% , 20.09% , 17.53% 和 14.60% , 即 V_1 平均值越大,火箭发射前后3.5 h内风速相对误差绝对值越小;与风速相对误差绝对值类似,样本1~样本5的风向绝对偏差也表现为随高度增加先减小后增大的趋势(图5d),即风向绝对偏差在顶层和底层较大,中层较小,风向绝对偏差范围分别为 $9.34^\circ \sim 51.10^\circ$,

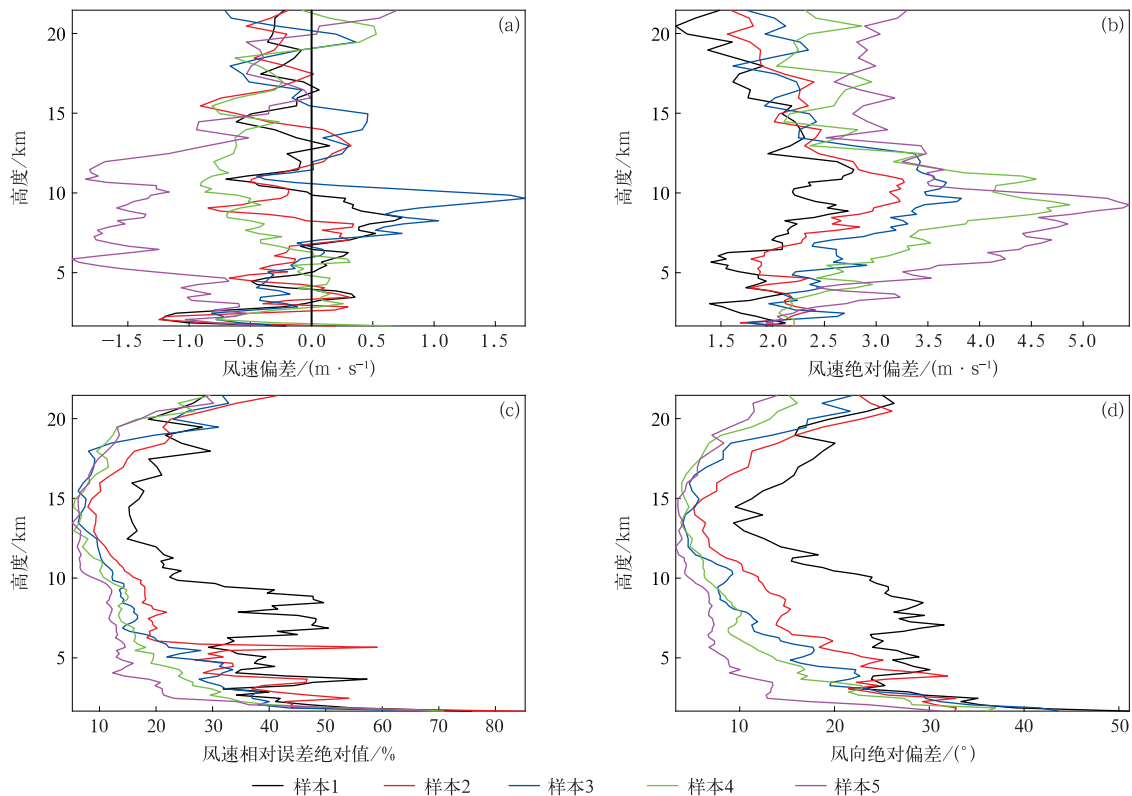


图5 样本1~样本5在火箭发射前后3.5 h内的风速偏差(a)、绝对偏差(b)、相对误差绝对值(c)和风向绝对偏差(d)随高度变化特征

Fig. 5 Variation of wind speed deviation(a), absolute deviation(b), absolute relative error(c) and absolute wind direction deviation(d) with height for sample 1—sample 5 within 3.5 hours before and after rocket launch

5.14°~32.86°, 4.02°~43.61°, 3.78°~36.99°和 3.25°~31.21°, 平均值分别为 23.60°, 16.83°, 13.94°, 11.58°和 8.31°, 即 V_1 平均值越大, 火箭发射前后 3.5 h 内风向绝对偏差越小。由上述分析可知, V_1 平均值越大, 火箭发射前后 3.5 h 内风速绝对偏差越大, 风速相对误差绝对值和风向绝对偏差均越小。

2.6 不同季节火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异

不同季节火箭发射前后 3.5 h 内风速偏差、绝对偏差、相对误差绝对值和风向绝对偏差随高度变化特征如图 6 所示。由图 6 可见, 风速偏差(图 6a)除冬季以负值为主外, 在其他季节均表现为正值、负值交替变化, 春季、夏季、秋季、冬季的风速偏差范围分别为 $-1.48 \sim 0.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-1.11 \sim 1.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-1.08 \sim 0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.26 \sim 0.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 $-0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $-0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-0.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即各季节平均风速偏差均为负值, 且冬季明显偏大、夏季明显偏小; 春季、夏季、秋季、冬季的风速绝对偏差(图 6b)均表现为随高度增加先增大后减小的趋势, 风速绝对偏差

范围分别为 $1.75 \sim 4.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.05 \sim 3.58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.73 \sim 3.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.68 \sim 5.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 $3.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由小到大依次为夏季、秋季、春季、冬季; 与风速绝对偏差变化特征相反, 春季、夏季、秋季、冬季的风速相对误差绝对值(图 6c)均表现为随高度增加先减小后增大趋势, 即风速相对误差绝对值在顶层和底层较大, 中层较小, 风速相对误差绝对值范围分别为 $6.89\% \sim 57.98\%$, $11.34\% \sim 93.39\%$, $6.59\% \sim 76.33\%$ 和 $5.61\% \sim 62.92\%$, 平均值分别为 24.67% , 23.81% , 21.01% 和 15.62% , 由小到大依次为冬季、秋季、夏季、春季; 类似风速相对误差绝对值的变化特征, 春季、夏季、秋季、冬季的风向绝对偏差(图 6d)也表现为随高度增加先减小后增大趋势, 即风向绝对偏差在顶层和底层较大, 中层较小, 风向绝对偏差范围分别为 $5.20^\circ \sim 37.78^\circ$, $9.13^\circ \sim 48.38^\circ$, $4.87^\circ \sim 39.64^\circ$ 和 $3.26^\circ \sim 34.52^\circ$, 平均值分别为 16.33° , 19.33° , 15.33° 和 10.20° , 由小到大依次为冬季、秋季、春季、夏季。由上述分析可见, 冬季火箭发射前后 3.5 h 内风速绝对偏差较大,

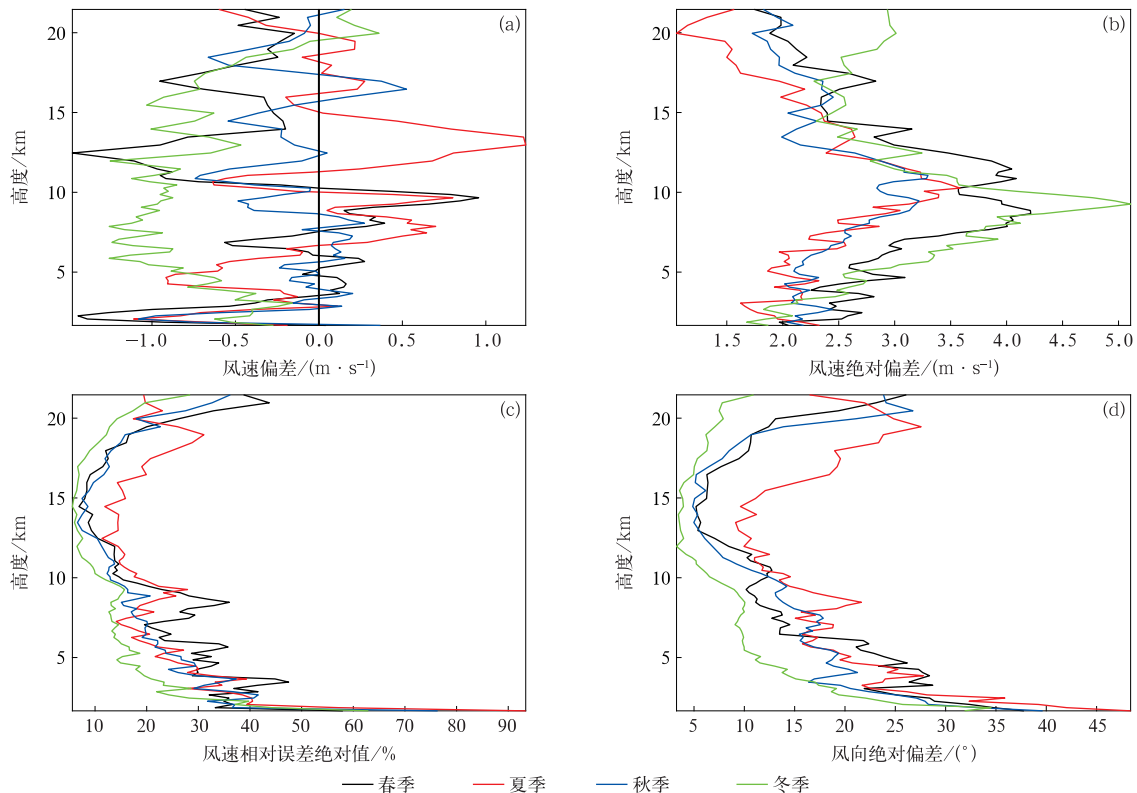


图 6 不同季节火箭发射前后 3.5 h 内风速偏差(a)、绝对偏差(b)、相对误差绝对值(c)和风向绝对偏差(d)随高度变化特征

Fig. 6 Variation of wind speed deviation(a), absolute deviation(b), absolute relative error(c) and absolute wind direction deviation(d) with height within 3.5 hours before and after rocket launch in different seasons

风速相对误差绝对值和风向绝对偏差较小,夏季火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差较小、风速相对误差绝对值和风向绝对偏差较大,鉴于冬季高空风较大、夏季高空风较小,火箭发射前后3.5 h内高空风差异随季节的变化与高空风季节特征有关,该结论与图5基本吻合。

3 建模分析

3.1 个例选取

从2014年12月—2020年12月共325组高空风样本中选取整个高度范围内火箭发射前后3.5 h内风速偏差为正偏差最大值、正偏差次大值、负偏差最大值、负偏差次大值作为研究个例,分析建模效

果。研究个例的 V_1 、 V_2 随高度变化特征如图7所示。由图7a可见,7.5~12.0 km高度内 V_2 明显大于 V_1 ,偏差为 $5.84 \sim 26.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $18.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其他高度层的偏差则表现为正值、负值交替的变化特征。由图7b可见,大部分高度层的 V_1 明显小于 V_2 ,4.1~10.3 km高度内的偏差为 $5.1 \sim 14.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $8.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图7c可见, V_2 在大部分高度层均小于 V_1 ,3.3~12.0 km高度内的偏差为 $-15.00 \sim -6.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值均为 $-10.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图7d可见,2.5~16.0 km高度内 V_2 均明显小于 V_1 ,其他高度层则相反,7.1~13.0 km高度内的偏差为 $-21.00 \sim -5.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $-14.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

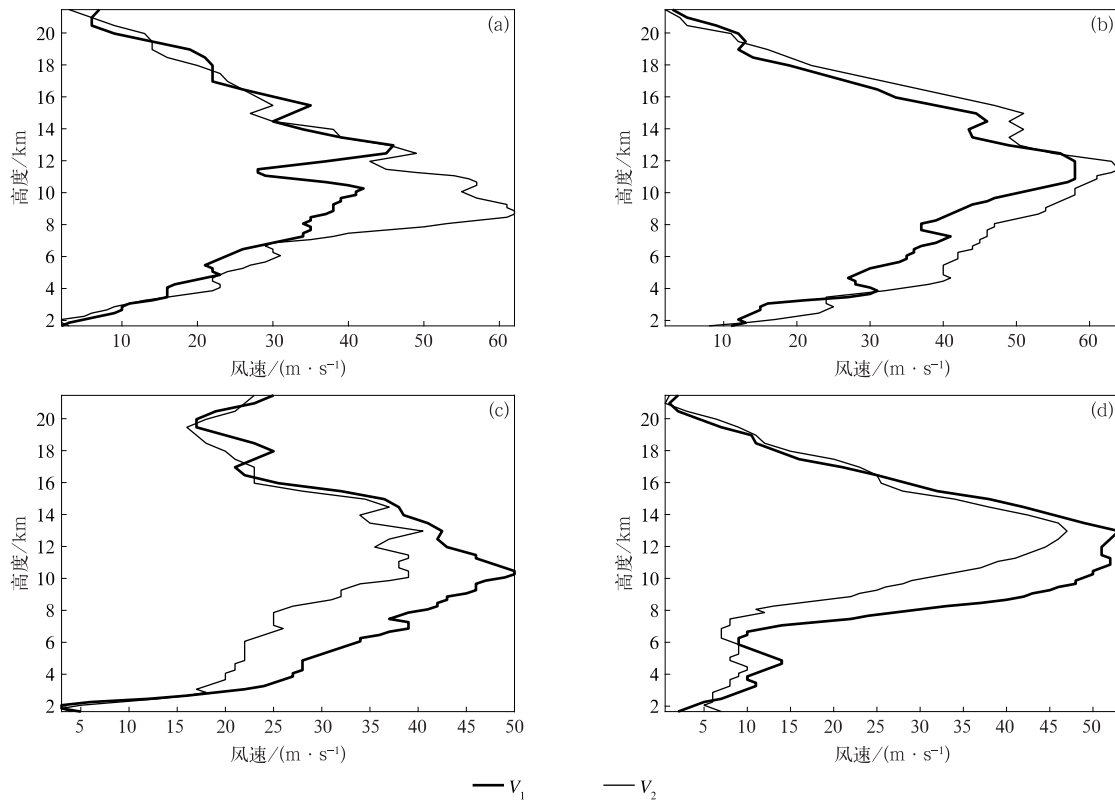


图7 火箭发射前后3.5 h内风速最大正偏差(a)、次大正偏差(b)、最大负偏差(c)和次大负偏差(d)的 V_1 和 V_2 变化特征

Fig. 7 Variation of V_1 and V_2 corresponding to the largest positive deviation(a), the second largest positive deviation(b), the largest negative deviation(c) and the second largest negative deviation(d) of wind speed within 3.5 hours before and after rocket launch

3.2 建模分析

WRF模式的初始场资料为08:00,设置模式输

出预报产品的时间分辨率为15 min,水平分辨率为9 km,垂直方向1000 hPa至50 hPa分为48层。利

用 WRF 模式可获取与研究样本(间隔 3.5 h)时间一致的高空风预报场,该 3.5 h 内高空风预报差异以符号 ΔV_f 表示($\Delta V_f = V_{f2} - V_{f1}$, V_{f1} 和 V_{f2} 分别为 WRF 模式得到的火箭发射前 3 h 和发射后 0.5 h 高空风预报)。利用 V_1 和 ΔV_f , 可得到火箭发射后 0.5 h 高空风预报 V_f ,

$$V_f = V_1 + \Delta V_f. \quad (6)$$

V_f 即为火箭发射后 0.5 h 高空风预报。下面以高空风 V_2 为基准,对高空风预报 V_f 的精度特征进行分析。

在整个高度范围内,3.5 h 风速偏差为正偏差最大值、正偏差次大值、负偏差最大值、负偏差次大值所对应的 V_1, V_2 和 V_f 随高度变化特征见图 8。由图 8 可见,与 V_1 相比, V_f 更接近 V_2 。在图 8a 中,以 V_2 为基准, V_1 和 V_f 的平均偏差分别为 $-6.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-3.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均绝对偏差分别为 $7.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对误差绝

对值分别为 24.77% 和 21.17%, 平均相关系数分别为 0.91 和 0.96; 在图 8b 中, V_1 和 V_f 的平均偏差分别为 $-5.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均绝对偏差分别为 $6.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对误差绝对值分别为 18.88% 和 10.19%, 平均相关系数分别为 0.97 和 0.97; 在图 8c 中, V_1 和 V_f 的平均偏差分别为 $6.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均绝对偏差分别为 $7.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对误差绝对值分别为 28.59% 和 12.98%, 平均相关系数分别为 0.93 和 0.97; 在图 8d 中, V_1 和 V_f 的平均偏差分别为 $6.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均绝对偏差分别为 $7.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对误差绝对值分别为 48.13% 和 12.69%, 相关系数分别为 0.92 和 0.99。以上相关分析均达到 0.01 显著性水平。由上述分析可知,与高空风 V_1 相比,高空风预报 V_f 更接近高空风 V_2 。

从 2014 年 12 月—2020 年 12 月共 325 组高空

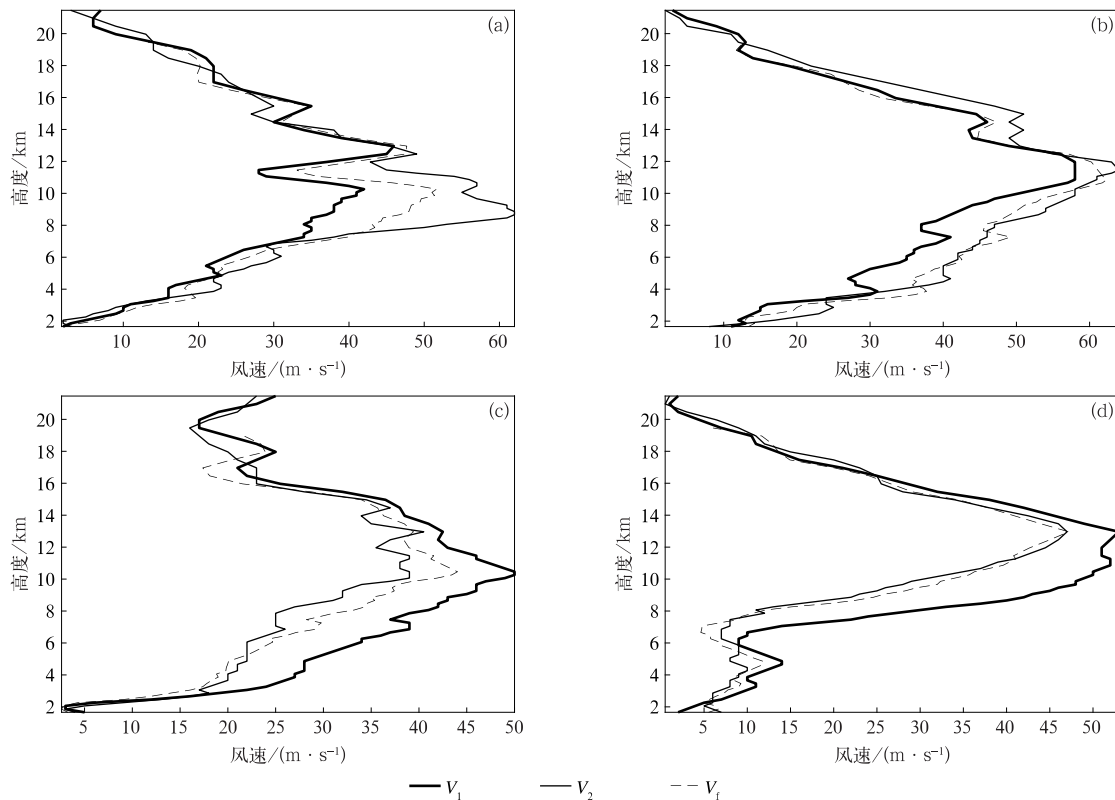


图 8 火箭发射前后 3.5 h 内风速最大正偏差(a)、次大正偏差(b)、最大负偏差(c)和次大负偏差(d)的 V_1, V_2 和 V_f 变化特征

Fig. 8 Variation of V_1, V_2 and V_f corresponding to the largest positive deviation(a), the second largest positive deviation(b), the largest negative deviation(c) and the second largest negative deviation(d) of wind speed within 3.5 hours before and after rocket launch

风样本中挑选火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异最大的 20% 样本,该样本在整个高度范围内的平均绝对偏差为 3.33~7.72 m · s⁻¹。利用上述模型得到所选样本的 V_f,同样以 V₂ 为基准,分别对 V₁ 和 V_f 的精度进行分析。V₁ 和 V_f 的精度随高度变化特征见图 9。对于风速偏差(图 9a),V₁ 和 V_f 的偏差分别为 -0.55~1.58 m · s⁻¹ 和 -1.54~1.05 m · s⁻¹,平均值分别为 0.50 m · s⁻¹ 和 -0.22 m · s⁻¹。与 V₁ 的绝对偏差相比,V_f 的绝对偏差明显偏小(图 9b),V₁ 和 V_f 的绝对偏差分别为 1.92~8.51 m ·

s⁻¹ 和 1.02~4.52 m · s⁻¹,平均值分别为 4.51 m · s⁻¹ 和 3.07 m · s⁻¹。对于相对误差绝对值(图 9c),V₁ 和 V_f 的相对误差绝对值分别为 7.79%~70.28% 和 7.18%~87.24%,平均值分别为 25.39% 和 20.56%。图 9d 为 V₁ 和 V_f 的相关系数随高度的变化,分别为 0.48~0.91 和 0.23~0.99,平均值分别为 0.75 和 0.79。即利用模型得到 V_f 的偏差、绝对偏差、相对误差绝对值均偏小,相关系数偏大,表明相对于 V₁,V_f 更接近 V₂。

采用类似的方法,依次挑选出 3.5 h 内高空风

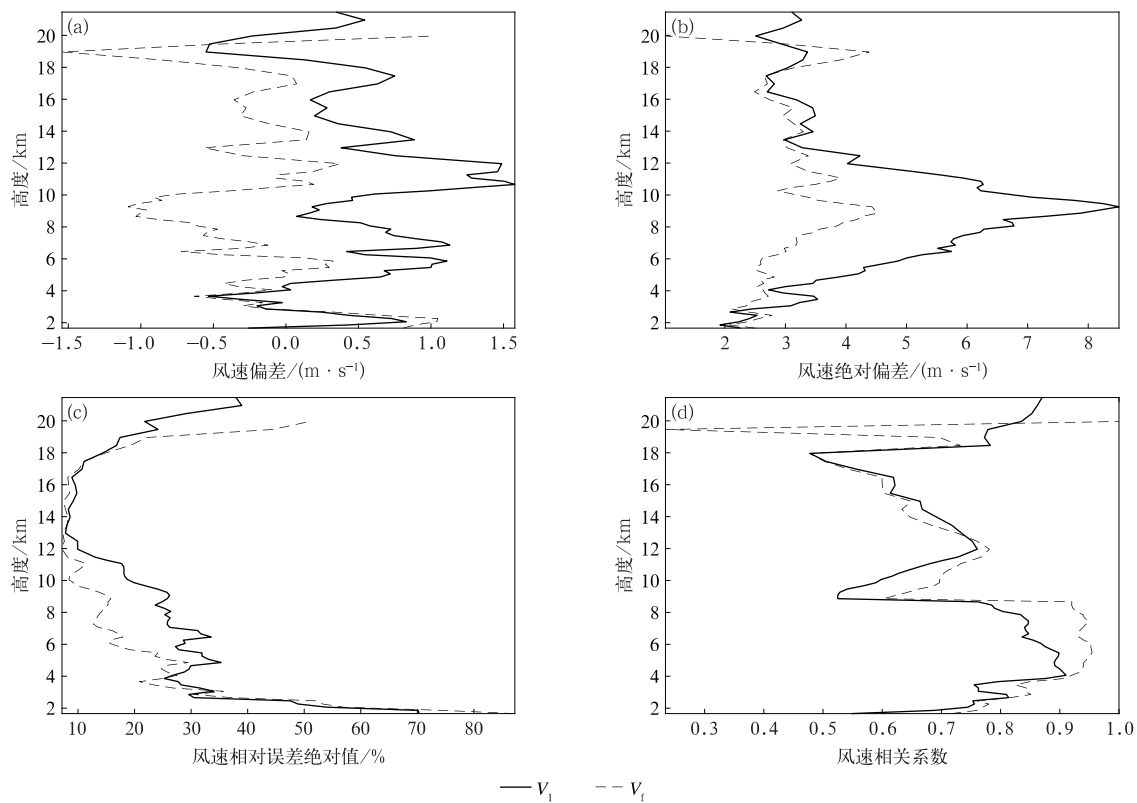


图 9 火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异最大的 20% 样本的 V₁ 和 V_f 的偏差(a)、绝对偏差(b)、相对误差绝对值(c)、相关系数(d)随高度变化特征

Fig. 9 Variation of deviation(a), absolute deviation(b), absolute relative error(c), correlation coefficient(d) with height for 20% samples of V₁ and V_f with the largest difference with 3.5 hours before and after rocket launch

差异最小的 20% 样本,差异次小的 20% 样本,⋯,差异最大的 20% 样本(共 5 组),分别记为资料 1,资料 2,⋯,资料 5,5 组资料的 V₁,V_f 与 V₂ 间的数理统计结果见表 1,其中相关系数均达到 0.01 显著性水平。由表 1 可见,相对于 V₁,除资料 1、资料 2 的 V_f

偏差略大外,其他情况下的 V_f 偏差、绝对偏差、相对误差绝对值均偏小,相关系数偏大,即 V_f 更接近 V₂。对比表 1 的数理统计结果可见,火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异越大,V_f 绝对偏差、相对误差绝对值减小更明显,即改进的效果越好。

表1 资料1~资料5的 V_1, V_f 与 V_2 数理统计结果Table 1 Mathematical statistics between V_1, V_f and V_2 of data 1 to data 5

资料	高空风	风速偏差/($m \cdot s^{-1}$)	风速绝对偏差/($m \cdot s^{-1}$)	风速相对误差绝对值/%	与 V_2 相关系数
1	V_1	-0.13	2.03	30.27	0.66
	V_f	0.15	1.94	29.51	0.73
2	V_1	-0.04	2.13	21.04	0.75
	V_f	0.05	1.93	20.46	0.83
3	V_1	-0.89	2.56	20.48	0.81
	V_f	-0.14	2.17	19.64	0.89
4	V_1	-0.88	3.52	19.00	0.76
	V_f	-0.63	2.84	16.29	0.84
5	V_1	0.50	4.51	25.39	0.75
	V_f	-0.22	3.07	20.56	0.79

4 小 结

采用2014年12月—2020年12月间隔3.5 h高空风资料集对火箭发射前后3.5 h内的高空风差异进行统计分析,并利用WRF模式和 V_1 建立火箭发射后0.5 h高空风预报模型,得到主要结论如下:

1) 火箭发射前后3.5 h内高空风速、风向偶尔会出现非常明显的差异特征,且该差异特征与高度层有关。在325组高空风样本中,高空最大风速偏差范围为 $-24.00 \sim 26.00 m \cdot s^{-1}$,位于 $\pm 10 m \cdot s^{-1}$ 范围内占有率为68.30%,达到总数的三分之二,主要出现在对流层中高层的 $[6.5 km, 11.5 km)$ 高度(49.54%)。高空最大风向偏差范围为 $10.00^\circ \sim 180^\circ$,在 $[30^\circ, 60^\circ)$ 区间内占有率最高(28.31%),主要出现在对流层中低层的 $[1.5 km, 6.5 km)$ 高度(68.92%)。

2) 火箭发射前后3.5 h内高空风速、风向差异特征与高度层有关。 $[11.5 km, 16.5 km)$ 高度的风速相对误差绝对值在 $[0, 10\%)$ 的占有率和风向绝对偏差在 $[0^\circ, 10^\circ)$ 的占有率均明显高于其他高度层,对应的 $[1.5 km, 6.5 km)$ 高度则明显低于其他高度层。

3) 随着 V_1 平均值增大,火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差表现为增大趋势,但相对误差绝对值和风向绝对偏差均表现为减小特征,且大部分高度层均表现出类似特征,说明高空风强时,风向不易发生短时变化。

4) 不同季节火箭发射前后3.5 h内高空风差异特征不同。冬季火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差较大、风速相对误差绝对值和风向绝对偏差较

小,夏季火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差较小、风速相对误差绝对值和风向绝对偏差较大,鉴于冬季高空风较大、夏季高空风较小,火箭发射前后3.5 h内高空风差异随季节变化与高空风的季节特征有关。

5) 与高空风 V_1 相比,基于WRF模式和高空风 V_1 建立模型得到的发射后0.5 h高空风预报 V_f ,在多种不同情况下均更接近高空风 V_2 ,且火箭发射前后3.5 h内高空风差异越大,模型订正的提升效果越明显。

通过上述分析可知,火箭发射前后3.5 h内高空风速、风向偶尔出现明显差异,且随 V_1 平均值增大,火箭发射前后3.5 h内风速绝对偏差呈现增大趋势,考虑到 V_1 平均值越大,越不利于火箭安全飞行,因此,若 V_1 平均值较大(如超过 $30 m \cdot s^{-1}$),不建议以 V_1 作为判断运载火箭能否安全飞行的依据。利用WRF模式和 V_1 建模得到的 V_f ,在多种不同情况下均更接近 V_2 ,且火箭发射前后3.5 h内高空风差异越大,模型订正的提升效果越明显。因此,若以模型得到的 V_f 为判断依据,有利于降低决策风险,提高运载火箭的安全飞行保障能力。

参 考 文 献

- [1] 李东,杨云飞,胡鹏翔,等.运载火箭多体动力学建模与仿真技术研究.宇航学报,2021,42(2):141-149.
Li D, Yang Y F, Hu P X, et al. Research on multibody dynamic modeling and simulation technology for launch vehicles. *J Astronautics*, 2021, 42(2): 141-149.
- [2] 程修妍,荣吉利,阿尼苏,等.火箭发动机超声速过膨胀射流气动噪声特性研究.宇航学报,2020,41(9):1204-1211.
Cheng X Y, Rong J L, A N S, et al. Aerodynamic noise characteristics of supersonic over expanded jet in rocket engine. *J*

- Astronautics, 2020, 41(9):1204-1211.
- [3] 魏宗康, 高荣荣. 惯性测量系统火箭橇试验一维运动约束方法. 导弹与航天运载技术, 2020, 6(6):39-45.
Wei Z K, Gao R R. A constrained method for one-dimension motion of inertial measurement system based on rocket sled testing. *Missiles and Space Vehicles*, 2020, 6(6):39-45.
- [4] 马列波, 聂万胜. 隔板片数量对液体火箭发动机燃烧不稳定性影响. 导弹与航天运载技术, 2020, 6(6):27-32.
Ma L B, Nie W S. The influence of baffle number to the combustion instability of liquid rocket engine. *Missiles and Space Vehicles*, 2020, 6(6):27-32.
- [5] 李文清, 王俊峰, 张志国, 等. 火箭适应发动机推力下降故障的弹道制导策略优化分析. 导弹与航天运载技术, 2020, 6(4):73-78.
Li W Q, Wang J F, Zhang Z G, et al. Optimization analysis of trajectory planning and guidance strategy of launch vehicle adapting to engine thrust declining fault. *Missiles and Space Vehicles*, 2020, 6(4):73-78.
- [6] 程镇煌. 大型火箭风载试验. 上海航天, 1996(4):3-9.
Chen Z H. Wind load test for large rocket. *Aerospace Shanghai*, 1996(4):3-9.
- [7] 赵人灏, 陈振官, 付维贤. 风切变与运载火箭设计. 宇航学报, 1998, 19(2):105-108.
Zhao R L, Chen Z G, Fu W X. Wind shear and rocket design. *J Astronautics*, 1998, 19(2):105-108.
- [8] 余梦伦. CZ-2E火箭高空风弹道修正. 导弹与航天运载技术, 2001(1):9-15.
Yu M L. CZ-2E ballistic correction for high altitude wind. *Missiles and Space Vehicles*, 2001(1):9-15.
- [9] 李效明, 许北辰, 陈存芸. 一种运载火箭减载控制工程方法. 上海航天, 2004(6):7-14.
Li X M, Xu B C, Chen C Y. An engineering method on the control of decreasing load for a launch vehicle. *Aerospace Shanghai*, 2004(6):7-14.
- [10] 耿光有, 李东. 由火箭一级飞行弹道分析底部力等动力参数. 导弹与航天运载技术, 2014(5):10-13.
Geng G Y, Li D. Analysis of dynamic parameters such as base-force for 1st stage of a launch vehicle via the trajectory. *Missiles and Space Vehicles*, 2014(5):10-13.
- [11] 程胡华, 王益柏, 蔡其发, 等. 大气密度对运载火箭飞行的 $q_{\alpha_{\max}}$ 精度影响及建模分析. 宇航学报, 2021, 42(3):378-389.
Cheng H H, Wang Y B, Cai Q F, et al. Influence of atmospheric density on $q_{\alpha_{\max}}$ accuracy of launch vehicle flight and modeling analysis. *J Astronautics*, 2021, 42(3):378-389.
- [12] 程胡华, 李娟, 肖云清, 等. 风偏差对火箭最大气动载荷精度的影响与分析. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(10):2034-2042.
Cheng H H, Li J, Xiao Y Q, et al. Influence and analysis of wind deviation on rocket maximum aerodynamic load accuracy. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(10):2034-2042.
- [13] 马淑萍, 王秀明, 俞小鼎. 极端雷暴大风的环境参量特征. 应用气象学报, 2019, 30(3):292-301.
Ma S P, Wang X M, Yu X D. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(3):292-301.
- [14] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因. 应用气象学报, 2020, 31(5):513-526.
He L F, Chen S, Guo Y Q. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5):513-526.
- [15] 高拴柱, 张胜军, 吕心艳, 等. 南海台风生成前48 h环流特征及热力与动力条件. 应用气象学报, 2021, 32(3):272-288.
Gao S Z, Zhang S J, Lü X Y, et al. Circulation characteristics and thermal and dynamic conditions 48 hours before typhoon formation in South China Sea. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3):272-288.
- [16] 王冀, 李英, 文永仁. 川藏高原一次混合型强对流天气的观测特征. 应用气象学报, 2021, 32(5):567-579.
Wang H, Li Y, Wen Y R. Observational characteristics of hybrid severe convective event in the Sichuan-Tibet Region. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(5):567-579.
- [17] 杨忠恩, 陈淑琴, 黄辉. 舟山群岛冬半年灾害性大风的成因与预报. 应用气象学报, 2007, 18(1):80-85.
Yang Z E, Chen S Q, Huang H. The causes of catastrophic gales in Zhoushan Islands with their forecasting. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(1):80-85.
- [18] 全美兰, 刘海文, 朱玉祥, 等. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用. 气象学报, 2013, 71(6):1012-1019.
Quan M L, Liu H W, Zhu Y X, et al. Study of the dynamic effects of the upper-level jet stream on the Beijing rainstorm of 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 71(6):1012-1019.
- [19] 杨舒楠, 端义宏. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析. 应用气象学报, 2020, 31(3):290-302.
Yang S N, Duan Y H. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3):290-302.
- [20] 王冀, 李英, 宋丽莉, 等. 川藏地区雷暴大风活动特征和环境因子对比. 应用气象学报, 2020, 31(4):435-446.
Wang H, Li Y, Song L L, et al. Comparison of characteristics and environmental factors of thunderstorm gales over the Sichuan-Tibet Region. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4):435-446.
- [21] 李娜, 冉令坤, 孙建华, 等. 基于NCEP/GFS资料的中国东部地区雷暴预报研究. 气象学报, 2015, 73(3):459-470.
Li N, Ran L K, Sun J H, et al. Research of the thunderstorm forecast in east China based on the NCEP/GFS data. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 73(3):459-470.

- [22] 邹振操, 邓院昌. 基于 NCEP GFS 与 JMA GSM 预报场的 WRF 模式风速预测效果对比. 水电能源科学, 2016, 34(1): 194-197.
Zou Z C, Deng Y C. Comparison of wind speed prediction in WRF model based on NCEP GFS and JMA GSM forecasting fields. *Water Resources and Power*, 2016, 34(1): 194-197.
- [23] 姜文静, 梁旭东. 物理滤波初始化四维变分在临近预报中的应用. 应用气象学报, 2020, 31(5): 543-555.
Jiang W J, Liang X D. Application of PFI-4DVar data assimilation technique to nowcasting of numerical model. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 543-555.
- [24] 付焯, 刘晓莉, 丁伟. 一次冰雹过程及雹云物理结构的数值模拟研究. 热带气象学报, 2016, 32(4): 546-557.
Fu Y, Liu X L, Ding W. A numerical simulation study of a severe hail event and physical structure of hail cloud. *J Trop Meteor*, 2016, 32(4): 546-557.
- [25] 朱莉, 王曼, 李华宏, 等. 基于 WRF 模式的云南短时强降水物理量特征. 大气科学学报, 2019, 42(5): 755-768.
Zhu L, Wang M, Li H H, et al. Analysis of physical quantity features of Yunnan short-time severe rainfall based on WRF model. *Trans Atmos Sci*, 2019, 42(5): 755-768.
- [26] 刘郁珏, 苗世光, 刘磊, 等. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响. 应用气象学报, 2019, 30(1): 70-81.
Liu Y J, Miao S G, Liu L, et al. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(1): 70-81.

Upper Wind Difference Characteristics and Forecast Within 3.5 Hours Before and After Rocket Launch

Cheng Huhua¹⁾ Cheng Wei²⁾ Shen Hongbiao³⁾ Zhao Liang⁴⁾

¹⁾ (63729 Troops of the PLA, Taiyuan 030027)

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

³⁾ (32018 Troops of the PLA, Beijing 100094)

⁴⁾ (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The upper wind has a major impact on the safety of the launch vehicle, and the wind speed 3 hours before launching is a determinant for the eventual schedule. If the maximum aerodynamic load generated by the upper wind does not exceed the threshold, the rocket can be launched as planned, otherwise it will be considered to postpone the launch. The deviation of the upper wind 3 hours before and at the launch time should be investigated. Taking the upper wind dataset with an interval of 3.5 hours (December 2014 to December 2020) to analyze the wind difference, and a forecast model for the wind of 0.5 hours after the launch is established using WRF model and the wind data of 3 hours before the launch. It shows that the characteristics of upper wind speed and direction difference within 3.5 hours are related to altitude, season, and the average upper wind speed. Although the maximum wind speed deviation range is $-24.00-26.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, for two-thirds of the cases the deviation is within $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which mainly occur in the middle and upper troposphere with altitude of $[6.5 \text{ km}, 11.5 \text{ km})$. The absolute value of the maximum wind direction deviation range is $10.00^\circ-180^\circ$, mainly in the $[30^\circ, 60^\circ)$ interval, and this mostly occurs in the middle and lower troposphere with altitude of $[1.5 \text{ km}, 6.5 \text{ km})$. The average absolute deviation of the upper wind speed within 3.5 hours shows an increasing trend with the increase of average upper wind speed 3 hours before the launch, but the relative error and the wind direction deviation decreases, indicating that when the upper wind is strong, the wind direction is less prone to short-term changes. The upper wind deviation within 3.5 hours varies with the seasons, for example, the absolute deviation of winter wind speed is greater than that of summer, but the absolute deviation of wind direction in winter is smaller than that of summer. Using the forecast model results of wind 0.5 hours after the launch can help to avoid the risk of rocket launch in advance.

Key words: launch vehicle; upper wind speed changes; upper wind direction change; modeling forecast