

太原上空大气风场及风切变特征研究

魏蕾¹, 洪良友², 杨钧烽³, 张荣^{1*}, 胡文豪⁴, 侯团结¹, 吕玉环⁵, 付远⁶

1. 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

2. 北京强度环境研究所, 北京 100076

3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

5. 天津市武清区气象局, 天津 301700

6. 浙江省气象台, 浙江, 310000

摘要 基于 FNL 再分析资料的风场数据, 利用矢量平均法及数理统计理论, 对太原 (112.35°E, 37.37°N) 上空 0.8-47 km 的大气风场垂直分布特征及风切变特性进行了分析。根据太原上空风场特征和对飞行器发射的影响, 本文以风场特征为标准重新划分为四个时期: 4、5、6 月为雨季前期, 7 月和 8 月为雨季, 9、10 月为雨季后期, 11、12、1-3 月为冬季。根据风场时期变化的差异, 垂直结构以 5、20 km 两个高度层为标准分为 3 层。在 20 km 以下, 雨季的平均风速要小于其他三个时期; 在 20 km 以上, 冬季和雨季风速大于雨季前期和雨季后期。利用综合矢量风方法计算了风切变特征, 风切变在冬季 40-47 km 高度范围内强度最大, 其他时期在 12 km 附近出现次大强度值; 最大风引起的风切变主要影响范围在±8km 内。利用新的 λ -PDF 多项式混沌展开法, 有效地拟合出风场参数, 解决了风场分布的不确定性问题, 为复杂的飞行问题提供理论上的支撑。

关键词 风速场 风切变 综合矢量风 λ -PDF

文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2312.23007

Study on characteristics of atmospheric wind field and wind shear over Taiyuan

Wei Lei¹, Hong Liangyou², Yang Junfeng³, Zhang Rong¹, Hu Wenhao⁴, Hou Tuanjie¹, LV Yuhuan⁵, Fu Yuan⁶

1. CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

收稿日期: 2023-01-16 网络预出版日期:

¹ 作者简介: 魏蕾, 女, 1985 年出生, 博士, 主要从事云物理学及数值模式研究,

通讯作者: 张荣, E-mail: zhangrong@cma.gov.cn

资助项目: 基础研究项目

27 2.Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076

28 3.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

29 4.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

30 5.Wuqing Meteorological Observatory of Tianjin, Tianjin 301700

31 6.Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310000

32 **Abstract** Based on the wind field data from FNL reanalysis data, the atmospheric wind field of
33 the height range of 0.8-47 km above Taiyuan (112.35°E, 37.37°N) is investigated. The vertical
34 distribution characteristics and wind shear characteristics are analysed by the method of vector
35 averaging and mathematical statistics. The wind field over Taiyuan is investigated for its effects
36 on aircraft launch, leading to a classification of four periods based on wind characteristics: April,
37 May and June are the early rainy season, July and August are the rainy season, September and
38 October are the late rainy season, and November, December and January to March are the winter.
39 According to the seasonal variation of the wind field, the vertical structure is divided into three
40 layers with two height layers of 5 and 20 km. Below 20 km, the average wind speed in the rainy
41 season is lower than in the other three periods. Above 20 km, the wind speeds in the winter and
42 rainy season are higher than that in the early and late rainy season. The wind shear characteristics
43 are calculated using the integrated vector wind method. The intensity of wind shear is greatest in
44 the height range of 40-47 km in winter, and the maximum intensity value occurs around 12 km in
45 other periods. The primary influence range of the wind shear caused by the maximum wind is
46 within ± 8 km. By using the new λ -PDF polynomial chaotic expansion method, the wind field
47 parameters are effectively fitted and the uncertainty of the wind field distribution is resolved,
48 providing theoretical support for complex flight problems.

49 **Key words** wind velocity, wind shear, synthetical wind vector, λ -PDF

51 1. 引言

52 飞行器的精细化发展及运载能力的提升对其结构设计提出了更高的要求。飞行环境中的
53 风场条件、大气密度等外部环境参数的变化,使得飞行器模型中存在复杂多源不确定性,给
54 飞行器结构设计及运行姿态控制带来困难。大气扰动对飞行的影响,重点在于对风速和风向
55 特性的相关研究。稳定风场主要对飞行起飞和着陆有较大的影响。尽管风切变可能存在于大

气的各个层面，但大气的低空风切变对飞行的影响最大，造成的事故较多（黄仪方，2002；龚强等，2015）。高空风速在 0-200 m/s 之间，风速较大时会严重影响飞行速度（陈凤贵等，2013）。根据之前的标准（Britt et al., 1993），水平风的水平切变值在 2.6 (m/s)/km 以上时就可能对飞行构成危害；锋面天气产生的水平风的风切变要比强对流天气对飞行的危害弱一些（孙一昕和方娟，2012；张培昌等，2001；王丛梅等，2011）。水平方向的阵风，只改变相对气流的速度对飞行影响较小；而垂直方向的阵风既改变相对气流的速度又改变飞机的仰角，易导致颠簸，超载过大和飞机失速等危险（张建荣，2014）。大气环境复杂多变，飞行器原理、结构、功能等多样，其与环境相互作用也不同（童靖宇和向树红，2012）。对空间大气环境的研究，有助于提高飞行器的安全（Hale et al., 2002），这其中最重要的环境因素就是对大气风场的研究（郭建国和周军，2014）。

近地层风场的相关研究发现，近地面层季节平均和年平均风速均呈现逐年减弱的趋势（王遵娅等，2004；任国玉等，2005；王勇等，2012；赵宗慈等，2016）。50 年太原市各季风速分析显示，不同季节平均风速变化趋势与年平均风速变化趋势基本一致，呈递减趋势（牛旭等，2013；裴真等，2014）。目前对风场的研究中，更多的是对风速和风向处理方法的研究，例如：算术平均法、滑动平均法、矢量平均法等（吕明华等，2012）；也有部分文章研究的风场垂直分布特征，然而这些文章主要研究 20 km 以下的风场特征。曹杨等（2021）比较分析了北京城区和远郊区的低层（0~600 m）大气风场特征，水平风速随高度增加而增大；毛文茜等（2019）对淮河流域风场垂直结构特征的分析结果表明，风场有明显的垂直变化，风速随高度增加先增加后减小。在实际工作中，部分卫星发射中心已根据地面风和对流层风场数据取得一定成果，并应用于相应的飞行器设计中。

飞行器需要的大气风场的研究高度范围较高，国内外针对风场特性的研究相对较少（吕明华等，2012；肖存英等，2016；Allen et al., 2006；Roney et al., 2007）。Roney 等（2007）对 18-30 km 高度范围内风场进行研究，用于保障飞行器的运行安全。马瑞平等（1997）发现中国 20-80 km 高度范围内纬向风与国际参考大气的平均纬向风不同，不同地区高空风场特征差别较大。利用 65 次火箭探测试验得到酒泉平流层中的风场特征：固定高度时，风速遵循对数正态分布（李金武，2017）。针对临近空间的大气密度及风场对飞行器的影响，已经有一定的研究（程旋等，2018，2021）。

飞行器对风切变的反应极其复杂，取决于许多因素，包括飞行器类型、飞行阶段、风切变，以及风切变的强度和持续时间。风切变的危害有两方面：（a）飞行器结构可能承受严重载荷，（b）飞行姿态的剧烈变化可能会导致失速或其他情况。杨钧烽等（2016，2019）建立

了临近空间的风切变设计模型,给出了 99%概率的最大风速、平均条件风、最小条件风、最大风切变和综合矢量风分析,评估了临近空间风切变对飞行器的影响。单枚气象火箭多用于研究中小尺度大气结构,如风切变、湍流等,发现中层大气中存在明显的风切变和强重力波扰动(马瑞平,1997)。Jiang 等(2011)研究了风切变、重力波等,发现 30-50 km 风切变强度最大,在对流层顶急流处有次大强度值。利用火箭探测风场发现,在 22 km 和 45 km 附近均探测到较强的风切变(史东波等,2011;耿丹等,2022)。Houchi 等(2010)利用 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)短期模式预报风场数据和高达 30 km 高分辨率的风廓线数据对比分析,发现风场垂直切变在模式中被低估。垂直风切变影响了逆温层中飞行器的加速速度,而方向风切变改变了地面气流方向(Carruthers et al., 2014)。

综上,近地面和临近空间风场已经有部分研究,但缺少针对近地面及临近空间风场结合的大气风场的时空分布特点、风切变特性的研究。因此,开展近地面及临近空间大气风场环境科学研究,提升对大气风场的认识水平,具有重要研究意义和应用价值。本文基于 10 年的 FNL (NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis data)再分析资料的风场数据,利用矢量平均法及数理统计理论,对太原上空 0.8-47 km 的大气风场垂直分布特征及风切变特性进行分析,进一步加深高空风场的认识。此外,本文给出了近十年风场统计的最多风向情况下,99%概率的最大风速、最大风切变及综合矢量风的分析结果。最后,针对飞行器总体设计随机风载荷引起的飞行器结构的变形和振动,及其对发射前仪器设备校正和运行过程中姿态控制等产生严重影响,给出一种量化地评估风场参数的模型。通过引入工程中应用的多项式混沌展开法,即基于 λ -PDF (λ -概率密度函数, Probability distribution function)多项式混沌展开求解方法(刘杰等,2015;李建斐,2019)对风场变量进行拟合,解决了风场分布的不确定性问题,为复杂的飞行问题提供理论上的支撑。

2. 数据和分析方法

2.1 FNL 再分析资料

本文处理的风场数据是 2012-2021 年的再分析资料,FNL 数据是美国国家环境预报中心(NECP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的全球再分析资料,每 6 小时一次的格点数据($1^\circ \times 1^\circ$)。FNL 数据分辨率较高融合了大量的观测资料,通过该数据可以做全球性的数据分析。本文中根据位势高度给出的海拔高度。垂直方向上,2012-2015 年风场数据共 21 层,最高高度约 16 km,2016 年风场数据共 26 层,最高高度约 30 km,2017 年之后风场数据共 31 层,最高高度约 47 km。本文统计分析的是每日 08 时和 20 时(北京时)结果。

2.2 分析方法

本文参考孙方林（2008）中的多日风速数据的矢量平均方法，处理 2012-2021 年太原的 FNL 再分析数据。该方法解决了算术平均和滑动平均对风速为零时，风向无法判断的情况。依据以下公式来计算平均风速 (ws) 和风向 (wd)：

$$ws = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$v > 0 \text{ 则: } wd = 180 + \frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2)$$

$$v < 0, \text{ 有以下两种情况: } wd = 360 + \frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (u \geq 0) \quad (3)$$

$$wd = \frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (u < 0) \quad (4)$$

$v = 0$, 也有两种情况:

$$wd = 270, u \geq 0 \quad (5)$$

$$wd = 90, u < 0 \quad (6)$$

其中, wd 的单位是 ($^\circ$), ws 、 u 、和 v 的单位是 m s^{-1} 。

研究风切变特性所涉及的分析方法，主要是参考赵人濂等（1998）高空风场计算方法和杨钧烽等（2019）对风切变特性的研究方法。该方法主要是用于大尺度下高空风的统计分析，不适用于地面风及小尺度阵风的情况。在飞行时，飞行器在不同的高度上，会遇到不同出现概率的最大风干扰，包括最小条件风及风切变。

在给定方向 α_0 时，利用条件分布，在极坐标系中确定风速，此时，在已知逐月的风向 α_0 的情况下，根据杨钧烽等（2019）的计算公式，得到 ω_s ：

$$\omega_s = \sqrt{2 \ln \left(1 - \frac{b}{a}\right) - 2 \ln \left[\frac{0.01 * g_1(\alpha_0)}{\left[\frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2} c^2} \frac{1}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{b}{a}\right)^2}} \right]^2} - \sqrt{2\pi} \frac{b}{a} \right]} \quad (7)$$

$$\text{根据: } \omega_s = a\omega^* - b/a \quad (8)$$

最大风速 ω^* ：

$$\omega^* = \frac{\omega_s + b/a}{a} \quad (9)$$

最多风向平面与对顶锥的交点坐标为：

$$u_* = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (10)$$

$$v_* = m \times u_* \quad (11)$$

式中: u_* 和 v_* 分别为最小条件风的纬向分量和经向分量。

最小条件风 W_* 为：

$$W_* = \sqrt{u_*^2 + v_*^2} \quad (12)$$

条件风切变的计算，本文风切变是最大风和最小条件风的风速差。

其中涉及的概率密度分布：

$$g_1(\alpha) = \frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2}} [1 + \sqrt{2\pi} \frac{b}{a} e^{\frac{1}{2}(\frac{b}{a})^2} \varphi(\frac{b}{a})] \quad (13)$$

式中参数如下：

$$\varphi(\frac{b}{a}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{b/a} e^{-\frac{1}{2}(t)^2} dt \quad (14)$$

$$a^2 = \frac{1}{1-\rho^2} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \cos \alpha \sin \alpha}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\sin^2 \alpha}{\sigma_v^2} \right) \quad (15)$$

$$b = \frac{1}{1-\rho^2} \left(\frac{\bar{u} \cos \alpha}{\sigma_u^2} - \frac{\rho(\bar{u} \sin \alpha + \bar{v} \cos \alpha)}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\bar{v} \sin \alpha}{\sigma_v^2} \right) \quad (16)$$

$$c^2 = \frac{1}{1-\rho^2} \left(\frac{\bar{u}^2}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \bar{u} \bar{v}}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\bar{v}^2}{\sigma_v^2} \right) \alpha_0 \quad (17)$$

$$d_1 = \frac{1}{2\pi \sigma_u \sigma_v \sqrt{1-\rho^2}} \quad (18)$$

$$A = 1 + m^{*2} \quad (19)$$

$$B = -2[E(u|u^*) + m^* E(v|v^*)] \quad (20)$$

$$C = E^2(u|u^*) + E^2(v|v^*) - \lambda_c^2 \sigma_\omega^2, \quad (21)$$

$$\lambda_c = \sqrt{-\ln(1 - P(\lambda_c))} \quad (22)$$

其中： $\bar{u}$ 和 σ_u 分别为纬向风 u_i 的数学期望和标准偏差； $\bar{v}$ 和 σ_v 分别为经向风 v_i 的数学期望和标准偏差； ρ 为纬向风和经向风的相关系数； α 为数学角度，与气象角度 θ 的关系为 $\alpha + \theta = 270^\circ$ ； E 为条件风的数学期望。详见杨钧烽等（2019）的文章。

2.3 风场参数建模方法

采用二次衍生 λ -PDF 对不确定参数进行建模，比传统基于抽样的统计方法计算效率高（Wu et al., 2006；刘杰等，2015）。 λ -PDF 是在任意峰分布下的概率密度函数的总称， λ 决定了分布的形式，其优势在于无论是单峰分布还是多峰分布均可以有效拟合。

利用 λ -PDF 多项式混沌展开法（李建斐，2019），可以得到任意峰分布，采用基于矩信息的方法可以得到对应的正交多项式基底，实现峰分布的不确定分析，得到其统计特征。其表达式如下：

$$f_x(x|\theta_i) = \sum_{i=1}^K \alpha_i f_X^\lambda(x|b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, \lambda_i) \quad (23)$$

式中， α_i 代表第 i 个子模型的权重， $f_X^\lambda(x|b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, \lambda_i)$ 表示二次扩展后的 λ -PDF 函数， $f_x(x|\theta_i)$ 是多峰不确定性变量的表达式， $\theta_i = (b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, \lambda_i)$ ， $i = 1, 2, 3, \dots, K$ 。采用 λ -PDF 建模时，包括 4 个风场参数 λ 、 b_0 、 b_1 、 b_2 ，首先需要确定子模型的数量 K ，本文

$K=2$ 。待定参数利用期望极大 (EM) 算法来计算, 需要使用迭代的方式进行计算。具体 λ -PDF 不确定性计算方法见刘杰等 (2015) 及李健斐 (2019) 论文。

对不确定性因素建立合理的数学模型是目前飞行器设计发展的关键技术 (孙康文等, 2008)。利用 λ -PDF 模型可以有效求解单峰分布和多峰分布混合的不确定性问题, 为复杂的飞行问题提供理论上的支撑 (李健斐, 2019)。新的 λ -PDF 方法效率高, 给出更合理的参数范围和具体分布特征 (刘杰等, 2015)。风场参数主要应用于飞行器六自由度飞行动力学模型及飞行器载荷模型等。量化地评估复杂风场的不确定性对飞行器性能的影响, 可有效提高飞行器的减载设计, 保证设计与运行的可靠性。基于风场不确定性量化和传播方法, 飞行器载荷模型可以获得风场不确定性模型对极端环境下动载荷的影响规律。在不同风场条件下, 分析弹道参数的变化, 将风场模型应用在弹道仿真计算中。

3. 风场数据统计研究

3.1 风场垂直分布特性

从月平均风速垂直廓线来看 (图 1), 2012-2021 年月平均风速在 0.8-20 km 范围内均存在极大值, 极大值约 50-60 m/s。极大值出现的高度和前人的研究 (李银莲和许可文, 2009) 一样, 主要出现在 12-13 km 高度层之间。在 5 km 以下, 太原变化较大, 最大风速可达 20 m/s, 而酒泉风速变化不大, 月平均风速在 2-2.5 m/s 之间 (魏蕾等, 2023), 太原低层风受到大气环流、局地地形等因素影响变化比酒泉更为复杂; 之后随高度的增加, 风速也增加, 到 12-13 km 左右风速达到极大值, 之后平均风速随高度减小; 到 20 km 之后平均风速随高度递增, 不同月份之间 47 km 高度风速极大值差别较大, 风速最大可到 50-60 m/s, 这里和 12 km 高度附近极大值量级一致。

从月平均风向来看, 高度在 5 km 以下, 风向复杂多变, 5-9 月以东南风为主随高度增加逐渐转为西南风, 其他月以南风、西南风为主随高度增加逐渐转为偏西风; 高度在 5-20 km 之间, 受到西风带的影响较大, 该层基本盛行西风, 整体以西风为主导风向, 但在个别年份 7 月受到南风影响, 该月平均风向是南风或者西南风为主; 在 20 km 以上, 在 6-8 月风速基本以东北风为主, 风向复杂多变。分析得出, 风向比较稳定, 最大风层的风向多在 270° 附近变化。本文对 2012-2021 年风向统计的结果 (5-20 km 之间) 基本和李银莲和许可文 (2009) 1985-2005 年文章中的统计结果一致, 这正符合我国高空盛行西风的气候特征。风速风向的时空分布特征, 体现了西风带对对流层和平流层下部的风的重要影响。

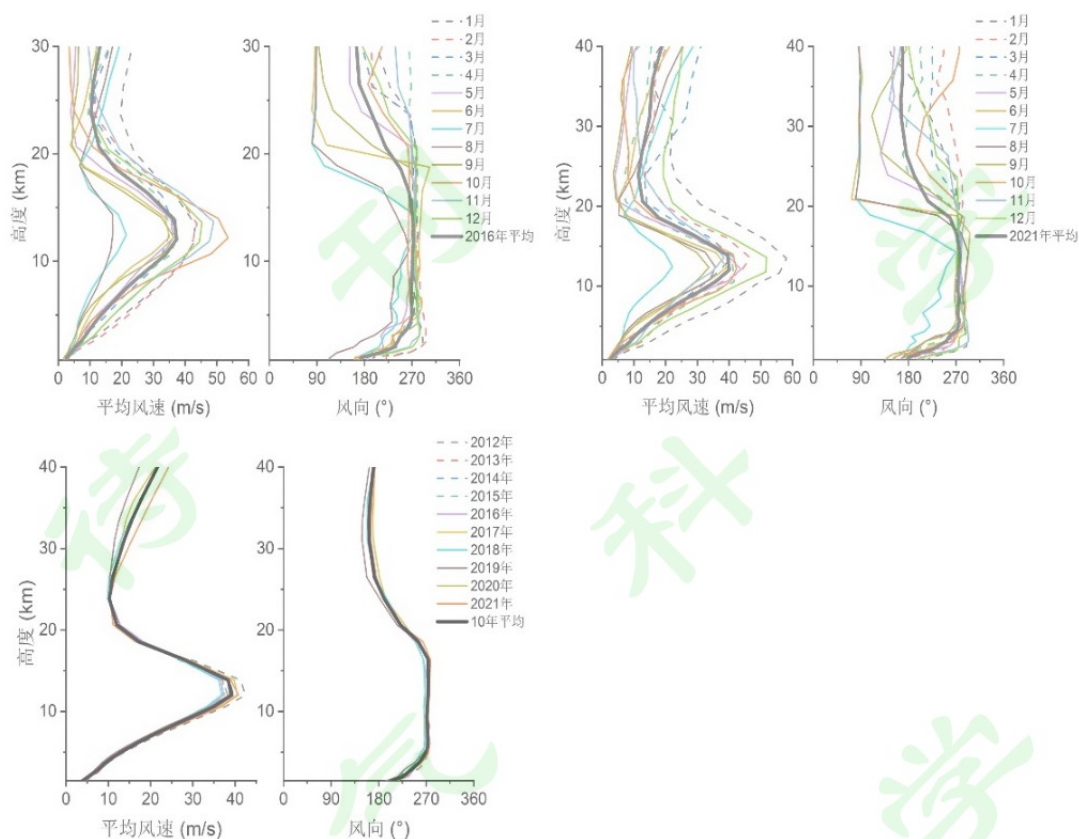


图 1. 太原 2012-2021 年平均风速和风向廓线

Fig.1 Average wind speed and wind direction profile over Taiyuan during the period from 2012 to 2021

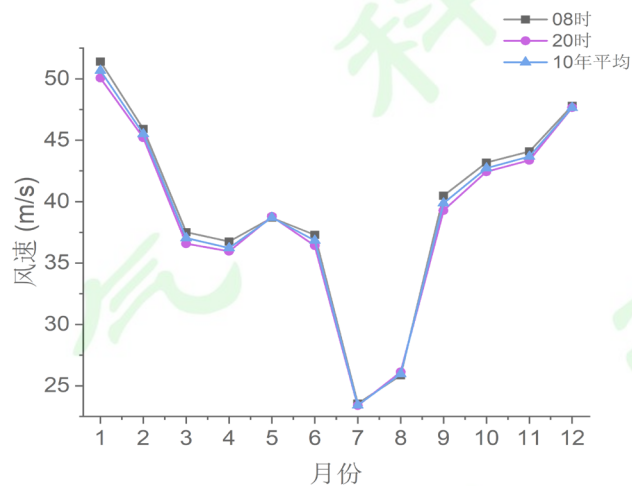


图 2. 太原 12 km 2012-2021 年逐月平均风速

Fig. 2 Monthly average wind speed at 12 km in Taiyuan from 2012 to 2021

本文主要关注最大风层逐月平均风速的变化 (图 2), 对每日 08 时、20 时风场数据进行月统计分析。12 km 处只有 5 月和 8 月, 08 时风速月平均值小于 20 时风速月平均值, 5 月 08 时是 38.7 m/s, 20 时是 38.8 m/s, 8 月 08 时是 25.9 m/s, 20 时是 26.1 m/s; 其他月份, 08

时的月平均风速均大于 20 时的月平均风速。太原大多数情况下，每日 20 时太原大气层结要比 08 时稳定。

总的来看，太原地区最大风层多年平均风速月分布曲线接近 V 字型，在 7、8 月比其他月份月平均风速值要小很多。高空风的月际变化与大气活动中心的移动和强度变化密切相关。对流层中、下层南北温度差存在季节变化。冬季南北温差最大，气压梯度力相应最大，西风风速也最大；季风期南北温差比冬季小，气压梯度力相应减小，西风风速比冬季小。

3.2 风场特性时期变化

孙方林（2008）博士论文中根据近地层风受局地环流、季风等影响的年变化特征把一年分为 5 个时期，西风影响期，西风减弱期、季风前干期、雨季、季风后干期；Lai 等（2023）中青藏高原受南亚夏季风影响，分为季风爆发期、季风期和非季风期。本文参考孙方林（2008）和 Lai 等（2023）根据风划分季节的方法，根据上一节太原上空风场垂直分布特征（风速及风向）在不同月份的变化规律，把一年分为 4 个时期：4、5、6 月为雨季前期，7 月和 8 月为雨季，9、10 月为雨季后期，11、12、1-3 月为冬季。从图 3 可知，在 20 km 以下，雨季的平均风速远小于其他三个时期，雨季风速极大值小于 25 m/s，而其他三个时期均大于 35 m/s，可以得到年平均风速：雨季 < 雨季前期 < 雨季后期 < 冬季；在 20 km 以上，冬季和雨季风速大于雨季前期和雨季后期，随着高度的增高，在 30 km 之上，雨季风速大于其他三时期。根据新的划分方法，雨季和其他三个时期差异明显。在 20 km 以下，雨季大风天日数在全年最少，而冬季大风天日数则最多。冬季受强冷空气影响，大风天数持续时间长，风力较大，伴有明显的降温过程，且风向和冷空气路径有关。在冬季亚洲上空经向环流发展旺盛且稳定情况下，冷空气带来的大风天可影响数日。

本文参考田庆明等人（2009）的研究方法，根据风场季节变化的差异，对风场特征统计分析将太原上空大气风场分为 3 层结构：第 1 层高度是在 5 km 以下，在这层内，风速随高度增加迅速增加，冬季更为显著，冬季在 5 km 高度附近风速甚至达到 20 m/s，不同月份的风向差别较大，近地层逐月平均风向转换多，风速波动较强；第 2 层是高度在 5-20 km 之间的大气风场，风速先随高度增加直至 12 km 高度附近达到风速极大值，之后风速随高度的增加而递减，风向在不同时期变化不大，雨季个别年份西南风为主导风向，其他时期是 270°左右的西风为该层主导风向；第 3 层是在高度 20 km 之上，风速随高度增加而递增，但增长的速度没有下层快，雨季风向多在 90°附近，其他时期风向复杂多变。第 2、3 层以上，风速大时且波动幅度较大。

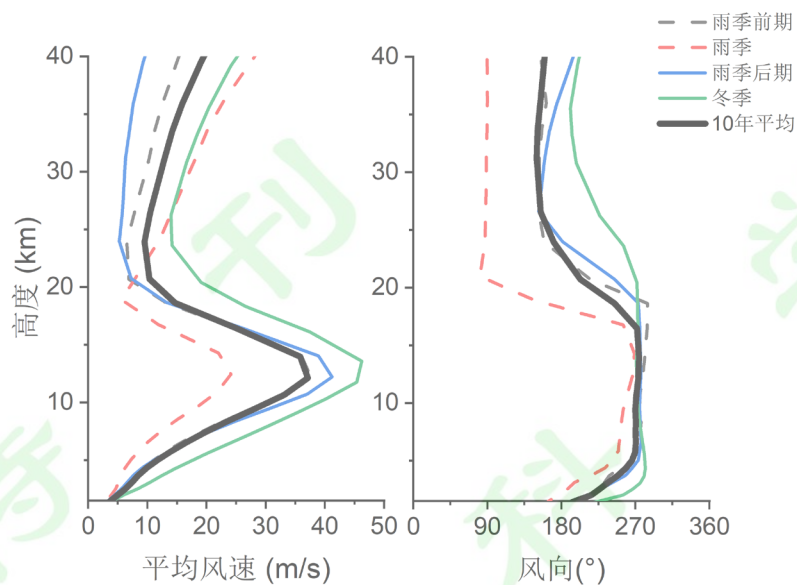


图 3. 太原 10 年四季平均风速和风向廓线

Fig.3 Four season average wind speed and wind direction profile of Taiyuan in 10 years

3.3 风场特性年变化

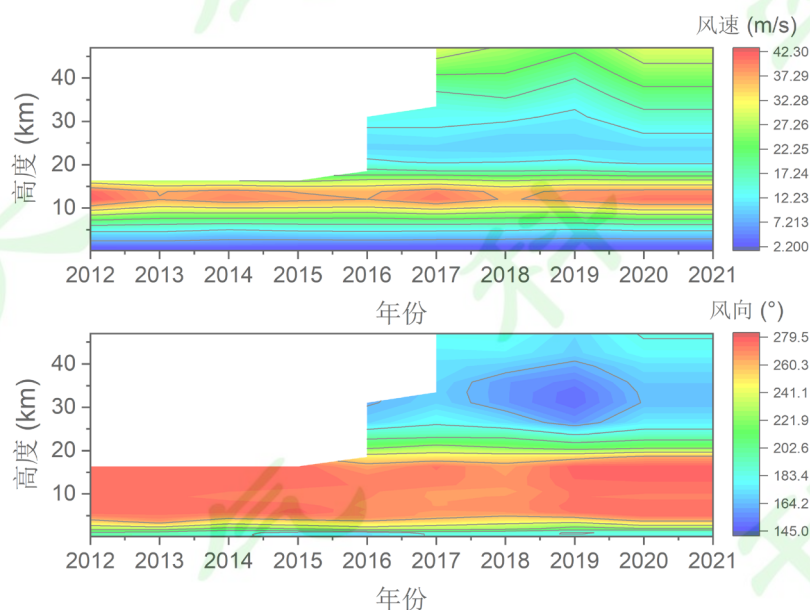


图 4. 2012-2021 年太原上空风速和风向年际变化

Fig.4 Variation of average annual upper-air wind velocity and wind direction over the Taiyuan region during the period from 2012 to 2021

近地面风和高空风相比较，近地面风在不同的时期对飞行器发射任务影响都比较小，年际变率较小，故这里我们需要关注高空风场特征分析对飞行器任务的影响。从风速年际变化来看（图 4），2012-2017 年 12 km 年平均高空风速呈下降趋势，2017 年风速达到极大值，

2018 年略减小后, 2019-2021 年 12 km 年平均高空风速呈上升趋势, 最大年份为 2012 年, 风速值为 42.37 m/s, 最小年份为 2018 年, 风速值为 36.88 m/s。45 km 由于数据限制, 可以看到 2020-2021 年略有增加。高度在 10-15 km 之间, 风速有一定的差异, 说明在这两个高度层上风速年变化较大; 而在其他高度层上的风速逐年平均基本接近 10 年平均风速, 其年变化较小其他高度层。高空风年平均风速, 第一最大风层呈先下降后增长再下降后又增长的趋势; 而其他高度层高空风则随年际变化具有很高的一致性。

4 风切变特性分析

针对某一地点风向在某段时间内, 一般都有一定的风向。在每个参考高度上的最多风向时, 有一定出现概率的最大风速; 在最多风向已知的情况下, 利用条件风分布计算最大风速 (杨钧烽等, 2019)。图 5 给出了 1-12 月份的 99% 概率最大风速随高度的变化, 和图 1 的实际风速垂直分布类似。在 20 km 之上, 风速随高度的增加而增加, 但是在冬季 (即 11、12、1-3 月份) 风速大小随高度增加要远大于其他时期 (4-9 月份), 其他时期的高空风速最大风速小于 60 m/s, 太原 12 月份最大风速超过 120 m/s。在 12 km 高度附近, 1 月的 99% 概率最大风速最大, 而 45 km 高度附近 12 月的 99% 概率最大风速最大。

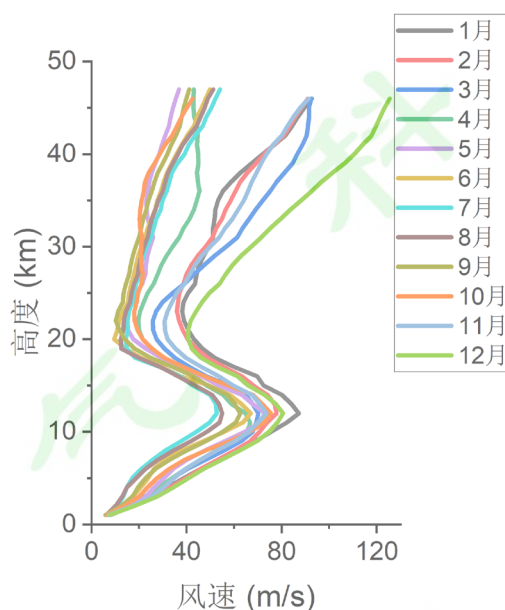
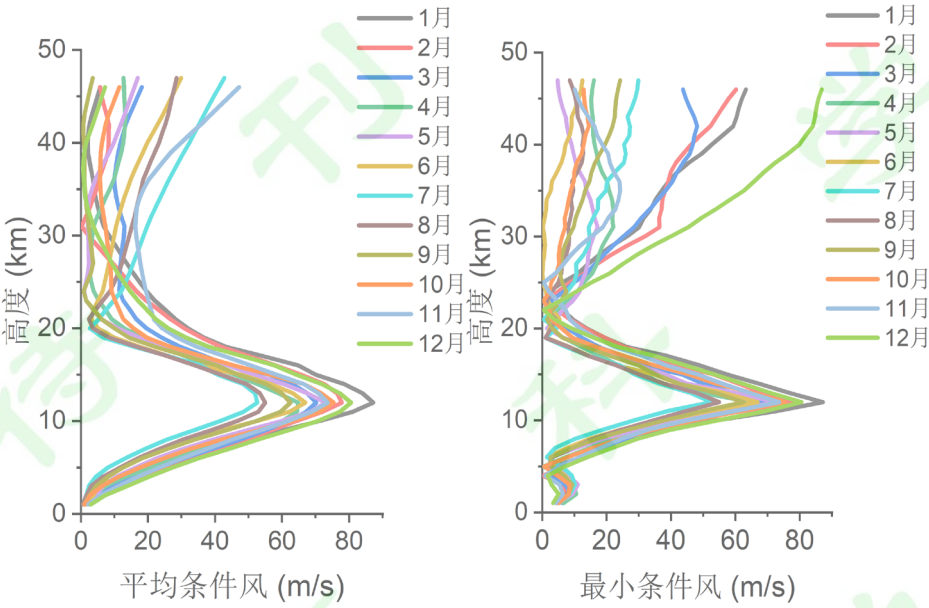


图 5. 太原 99% 概率最大风

Fig.5 Maximum wind speed over Taiyuan with 99% probability

根据研究分析, 可以得到风速极大值一般是双峰型, 一个是在西风带的影响下, 12 km 高度附近风速极大值可达 80 m/s; 另一个极大值主要是在高空, 随着高度的增加风速也增大, 和酒泉的研究 (杨钧烽等, 2019) 类似。由于本研究只到 47 km, 按照酒泉第二个风速极大值

270 一般出现在 50-70 km，但是这里太原 47 km 高度的风速最大值接近 125.5 m/s，太原的 50-70
271 km 可能会更大风速。



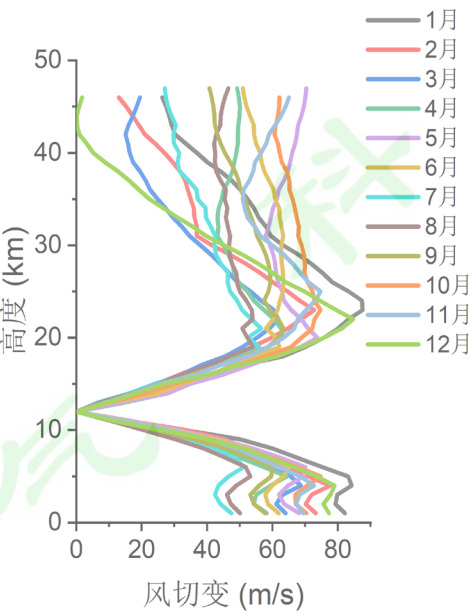
272

273

图 6. 太原 12 km 最大风速引起的平均条件风和最小条件风

274

Fig.6 Minimum and mean conditional wind caused by maximum wind speed at 12 km over Taiyuan



275

276

图 7. 太原 12 km 99% 概率最大风速引起的最大风切变

277

Fig.7 Maximum wind shear caused by maximum wind speed at 12 km over Taiyuan with 99% probability

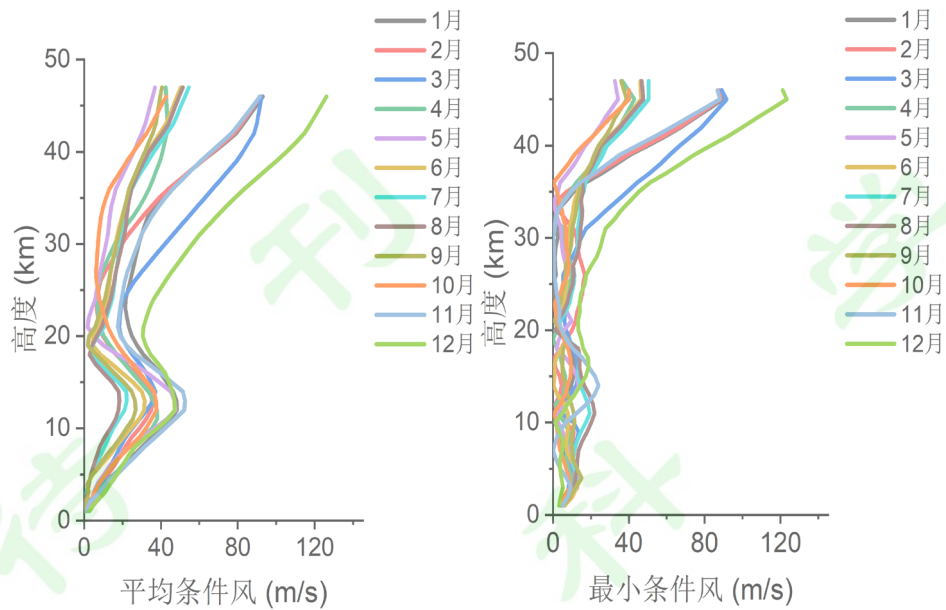


图 8. 太原 45 km 最大风速引起的平均条件风和最小条件风

Fig.8 Minimum and mean conditional wind caused by maximum wind speed at 45 km over Taiyuan

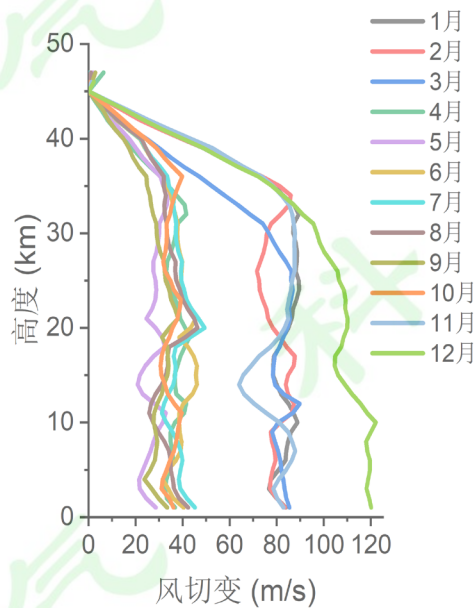


图 9. 太原 45 km 99%概率最大风速引起的最大风切变

Fig.9 Maximum wind shear caused by maximum wind speed at 45 km over Taiyuan with 99% probability

对于每个参考高度，连接条件风的圆心可以得到平均条件风。考虑最大风切变，计算最小条件风。平均条件风可供精度分析使用，最小条件风可供姿态控制系统设计和载荷计算使用。从最大风图中，本文可以将风速的极大值在 12 km 高度（2012-2021 年数据）和 45 km 高度（2017-2021 年数据）作为参考高度，计算相对应的平均条件风和最小条件风；参考高度的最大风速与此最小条件风的差即最大风速引起的最大风切变，见图 6-9。在高空最大风

切变在一定范围内随着与参与高度的距离逐渐增大,但超过该范围后基本保持不变(杨钧烽等, 2019)。45 km 高度最大风引起的最大风切变影响范围约是在 ± 8 km, 超过范围后基本保持不变;但 12 km 最大风引起的最大风切变,在某高度大于 12 km, 且在距离超过 10 km 之后,随着距离的增加风切变又逐渐减小。

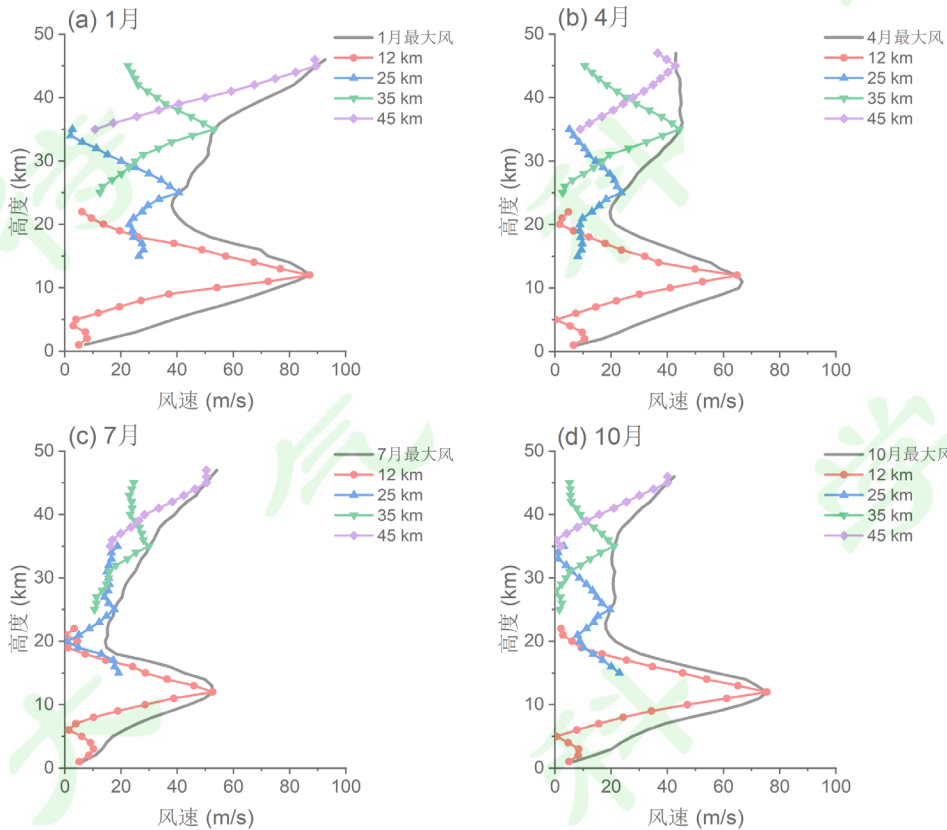


图 10. 太原综合矢量风剖面图(最大风和 12km、25km、35km 和 45km 高度引起最小条件风)

Fig.10 Synthetical wind vector profile over Taiyuan (Maximum wind and minimum conditional wind caused by 12km, 25km, 35km and 45km altitude)

综合矢量风是以各个高度 99%概率时的最大风为包络,各参考高度引起的最小条件风而得到的一个风矢量剖面。选取 12、25、35 和 45 km 为参考高度,给出高度 ± 10 km 高度范围的最小条件风和 99%概率最大风图(图 10)。在 5 km 以上,12、25、35、45 km 各个高度引起的最小条件风,最小条件风随高度的变化趋势基本一致。1 月 12 km 和 45 km 高度上风速较大,而 4、7 和 10 月风速的影响均小于 1 月。引起风场强烈变化和风切变的原因主要是,12 km 高度层内大气中存在急流和各种尺度的波动,尤其是重力波(马瑞平, 1997; Jiang et al., 2011)。太原冬季和海南的研究类似,在 30-50 km 高度处风场变化强烈,海南最大风切变出现在 40 km 处(Jiang et al., 2011);其他时期太原在 12 km 附近,有最大风切变,风

场变化大。

5. 风场参数计算

本文模型的不确定性主要是指模型和实际风场的差异，给出了一种风场不确定性的统一度量标准。选取了五个高度层上的十年风场数据（图 11），利用飞行器不确定参数统一概率度量模型计算风场参数，该模型能对复杂不确定性及多学科耦合下飞行器总体载荷不确定性进行精细量化。

给出统计矩信息的设计参数使用二阶衍生的 λ -PDF 函数进行统一度量，采用新的 4 个参数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 λ 来重新描述风场参数的不确定性，拟合结果见表 1。对存在多峰分布或者单个 λ -PDF 函数无法表征的风场参数使用混合 λ -PDF 函数进行统一度量。各个高度层的混合 λ -PDF 拟合设计参数分布图（图 11）可见，在 1 km 和 5.5 km 高度层上，近地面层风场年变化较小，该方法拟合效果很好；12、20、45 km 高度层上，风速差较大，虽然存在个别风速极大值，总的来看，拟合效果也比较好。最大风速出现在 12 km，有极大值大于 94.3 m/s；其次是在 45 km，极大值大于 87.68 m/s。

表 1 风场参数拟合结果

Table 1: Fitting results of wind field parameters

高度层	K	b_0	b_1	b_2	λ	权重
1km	1	2.46	6.06	3.03	8.24	0.18
	2	2.69	6.50	3.25	8.63	0.82
5.5km	1	16.68	35.93	17.97	8.74	0.77
	2	7.68	11.07	2.84	3.04	0.23
12km	1	43.90	74.48	37.24	12.72	0.54
	2	32.27	-30.64	-1.72	1.54	0.46
20km	1	11.79	22.23	11.11	1.70	0.44
	2	10.04	24.31	12.16	5.91	0.56
45km	1	29.85	69.32	34.66	6.03	0.42
	2	18.40	28.99	12.54	1.69	0.58

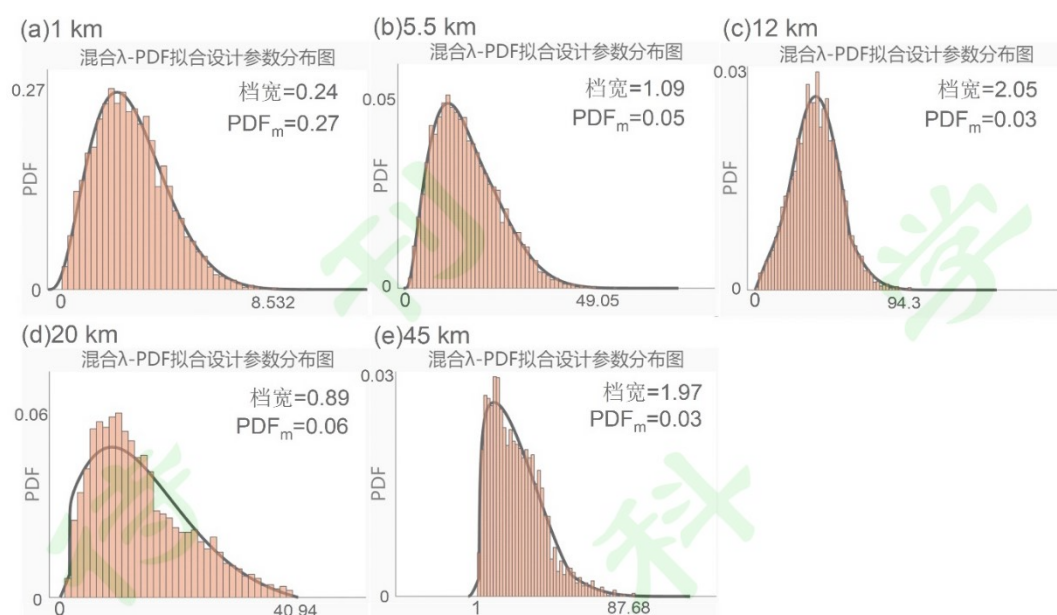


图 11. 各个高度层的混合 λ -PDF 拟合设计参数分布图 (横坐标: 风速, 单位 m/s; 纵坐标: 概率密度。PDF_m 是概率密度最大值。)

Fig.11 Mixing of different levels λ -PDF fitting parameter distribution (abscissa: wind speed, unit: m/s; ordinate: probability density. PDF_m is the maximum probability density.)

6. 结论

本文利用 FNL 再分析资料 2012-2021 年的 10 年风场数据开展了太原上空 0.8-47 km 的风场垂直分布统计特征和风切变特性的分析研究。根据风场垂直分布特征,把太原重新划分为四个时期,在 20 km 以下,雨季的平均风速小于其他三个时期,年平均风速:雨季<雨季前期<雨季后期<冬季;在 20 km 以上,冬季和雨季风速大于雨季前期和雨季后期。根据太原上空风场的变化将风场分为 3 层结构:第 1 层高度在 5 km 以下,风速随高度增加迅速增加,不同时期的风向差别较大,风向在 135-315° 之间变化;第 2 层是高度在 5-20 km 之间的大气风场,风速随高度增加先增加后递减,270° 左右的西风为该层主导风向;第 3 层在高度 20 km 之上,风速随高度增加而增加,雨季风向多在 90° 附近,其他时期风向复杂多变。此外,太原地区 10 年极大风速层 (12 km) 曲线接近 V 字型,在 7 月达到极小值。

以太原 (112.35°E, 37.37°N) 为例分析了风切变特性。99% 最大风速极大值一般是双峰型,一个极大值出现在 12 km 附近,另一个极大值主要在 30-50 km 之间。风切变在冬季 40-47 km 高度范围内强度最大,其他时期在 12 km 附近出现次大强度值。12 km 高度最大风速引起的风切变,在向下的 12-4 km 及向上的 12-20 km 范围内逐渐增大;而高空 45 km 高度引起的风

切变,在超出 10 km 的高度以外基本不变。引入新的 λ -PDF 混合模型的多项式混沌展开法,该方法可以有效地拟合出风场参数,解决风场分布下的不确定性问题。结果显示在 12 km 和 45 km 高度层风速的 PDF 值最小,表明这两层风速存在更多的不确定性,结合对应的综合矢量风,需更多关注其对飞行影响。

本文将大气风场风切变特性分析方法和 λ -PDF 多项式混沌展开法应用于大气风场研究,充分考虑了风的时间及空间分布特征,为飞行器飞行的姿态等提供了理论上的参考。本文目前用的是一天 4 个时次的再分析资料,有一定的局限性。未来计划通过高分辨率的数值模式对实际三维风场进行模拟,给出包括时间和空间的四维的飞行轨迹上的风场结果,这对精确飞行具有重要的意义。下一步工作计划是进行高分辨率的精细化风场模拟研究。

致谢:衷心感谢匿名审稿专家的宝贵意见及具体指导,切实提高了本文的质量和水平。

参考文献 (Reference)

- Allen D R, Coy L, Eckermann S D, et al. 2006. NOGAPS-ALPHA simulations of the 2002 southern hemisphere stratospheric major warming[J]. Mon. Wea Rev, 134:498–518.
- Britt C L, Harrah S D, Crittenden L H. 1993. Microburst hazard detection performance of the NASA experimental windshear radar system[C]//AIAA93-3943: AIAA Aircraft Design, Systems and Operations Meeting Monterey, CA:AIAA:1-13.
- Carruthers D, Ellis A, Hunt J, et al. 2014. Modelling of wind shear downwind of mountain ridges at Hong Kong International Airport[J]. Meteorol. Appl., 21: 94–104.
- 曹杨, 何文英, 施红蓉, 等. 2021. 2018 年北京城区和远郊区低层大气风场特征分析[J]. 气候与环境研究, 26(4): 403–412. Cao Y, He W Y, Shi H R, et al. 2021. Analysis of wind field characteristics within the lower atmosphere in urban and suburban areas of Beijing in 2018 [J]. Climatic and Environmental Research, 26 (4): 403–412.
- 陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 2013. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 10(4): 71–75. Chen F G, Chen G M, Liu K H. 2013. Analysis of near space environment and its effect[J]. Equipment environmental engineering, 10(4) :71–75.
- 程旋, 肖存英, 胡雄. 2018. 临近空间大气环境对高超声速飞行器气动特性的影响研究进展[J]. 飞航导弹, 5:22–28. Cheng X, Xiao C Y, Hu X. 2018. Advance in impacts of near space atmosphere environment on hypersonic vehicles aerodynamic characteristics[J]. Aerodynamic Missile Journal, 5:22–28.

程旋, 肖存英, 杜涛, 等. 2021. 临近空间大气密度扰动对高超声速飞行器气动热环境的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 47(4): 754–764. Cheng X, Xiao C Y, Du T, et al. 2021. Influence of atmospheric density disturbance on aerothermodynamic environment of hypersonic vehicles in near space[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 47(4):754–764.

耿丹, 赵增亮, 万黎, 等. 2022. 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, 42(3):396–402. Geng D, Zhao Z L, Wan L, et al. 2022. Analysis of data from near space meteorological rocket sounding in northwest China in winter[J]. Chinese Journal of Space Science, 42(3):396–402.

龚强, 汪宏宇, 朱玲, 等. 2015. 辽宁省近地层风切变特征研究[J]. 自然资源学报, 30(9):1560–1569. Gong Q, Wang H Y, Zhu L, Lin N, et al. 2015. Study on the near surface wind shear characteristics in Liaoning Province[J]. Journal of Natural Resources, 30(9):1560–1569.

郭建国, 周军. 2014. 临近空间低动态飞行器控制研究综述[J]. 航空学报, 35(2):320–331. Guo J G, Zhou J. 2014. Review of the control of low dynamic vehicles in near space [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 35(2):320–331.

Hale N, Lamotte N, Garner T. 2002. Operational experience with hypersonic flight of the space shuttle[C]//AIAA/AAAF 11th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston: AIAA, 17_5259.

黄仪方. 2002. 航空气象[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 131–138. Huang Y F. 2002. Aeronautical meteorology[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 131–138.

Houchi, K., A. Stoffelen, G. J. Marseille, et al. 2010. Comparison of wind and wind shear climatologies derived from high-resolution radiosondes and the ECMWF model[J]. J. Geophys. Res., 115, D22123.

Jiang G Y, Xu J Y, Shi D B, et al. 2011. Observations of the first meteorological rocket of the Meridian Space Weather Monitoring Project[J]. Chinese Sci Bull, 56(20):2131–2137.

Lai Y, Chen X L, Ma Y M, et al, 2023. Variation of atmospheric boundary layer height over the northern, central, and southern parts of the Tibetan Plateau during three monsoon seasons[J]. J Geophys Res, 128(9): e2022JD038000.

李建斐. 2019. 基于多项式混沌展开法的不确定性分析研究[D], 湖南大学. Li J F., 2019 Research on the method of uncertainty analysis based on polynomial chaos expansion[D]. Hunan University.

403 李金武. 2017. 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:
404 国防科技大学. Li J W. 2017. Analysis of the wind field and temperature in near space based on
405 rocket sounding data and the study on turbopause[D]. Changsha: Graduate School of National
406 University of Defense Technology.

407 李银莲, 许可文. 2009. 浅谈太原市高空最大风层特征[C].第 26 届中国气象学会年会. Li Y L,
408 Xu K W. 2009. Discussion on the characteristics of the maximum wind layer at high altitude in
409 Taiyuan City[C]. The 26th Annual Conference of Chinese Meteorological Society.

410 刘杰, 许灿, 李凡, 等. 2015. 基于 λ -PDF 和一次二阶矩的不确定性反求方法[J].机械工程学
411 报, 51(20):135–143. Liu J, Xu C, Li F, et al. 2015. The uncertainty calculation inverse method
412 based on λ -PDF and first order second moments[J]. Journal of Mechanical Engineering,
413 51(20):135–143.

414 吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 2012. 风向的统计方法研究[J].气象与环境学报, 28(3):83–89.
415 Lv M H, Yan J Y, Yao R T, et al. 2012. Study on the statistical method of wind direction[J]. Journal
416 of Meteorology and Environment, 28(3):83–89.

417 马瑞平. 1997. 用织女一号火箭在海南站探测的高空风和风切变.空间科学学报, 17:70–74. Ma
418 R P. 1997. Wind and wind shear observed by ZN-1 Rocket at Hainan[J]. Chin J Space Sci, 17: 70–74.

419 毛文茜, 冷文楠, 樊旭, 等. 2019. 淮河流域风场垂直结构特征分析[J]. 气候与环境研究, 24(3):
420 324–332. Mao W Q, Leng W N, Fan X, et al. 2019. Analysis of the vertical structure of wind fields
421 in Huaihe River valley [J]. Climatic and Environmental Research, 24(3): 324–332.

422 牛旭, 李洪建, 严俊霞. 2013. 1951—2012 年太原市气候变化基本特征研究[J].山西农业科学,
423 41(12):1352–1357. Niu X, Li H J, Yan J X. 2013. Characterization of general climate change
424 patterns from 1951 to 2012 in Taiyuan, Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,
425 41(12):1352–1357.

426 裴真, 杨永龙, 姚佳林. 2014. 1951—2010 年太原市气候变化中风速特征分析[J].沙漠与绿洲
427 气象, 8:34–38. Pei Z, Yang Y L, Yao J L. 2014. Wind speed characteristics in climate change in
428 Taiyuan City from 1951 to 2010[J]. Desert and Oasis Meteorology, 8:34–38.

429 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,
430 63(6):942–956. Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over
431 the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 63: 943–956.

432 Roney J A. 2007. Statistical wind analysis for near-space applications[J]. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.,
 433 69(13):1485–1501.

434 史东波, 韦峰, 张宇, 等. 2011. 子午工程气象火箭探空仪及其探测结果[J]. 空间科学学报,
 435 31(4):492–497. Shi D B, Wei F, Zhang Y, et al. 2011. Meteorological rocket sonde of meridian
 436 project and its detection results[J]. Chinese Journal of Space Science, 31(4):492–497.

437 孙方林. 2008. 珠峰地区大气边界层特征及其演变规律研究[D].中国科学院研究生院. Sun F L.
 438 2008. The study on the structure and evolution over atmospheric boundary layer in mount everest
 439 region[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences.

440 孙康文, 黄俊, 熊雯. 2008. 飞行器设计中不确定性因素分析[J]. 飞行力学, 26(3):1–4. Sun K W,
 441 Huang J, Xiong W. 2008. Analysis of uncertainty factors in aircraft design [J]. Flight Dynamics,
 442 26(3):1–4.

443 孙一昕, 方娟. 2012. 2010 年 5 月 6 日重庆强对流过程的天气学分析[J]. 气象科学,
 444 32(6):609–621. Sun Y X, Fang J. 2012. Synoptic analysis of the severe convection event on 6 May
 445 2010 in Chongqing[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 32(6): 609–621.

446 田庆明, 马廷德, 杜岩. 2009. 酒泉地区高空风速分布特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 26(5):
 447 671–675. Tian Q M, Ma T D, Du Y. 2009. Analysis on spatial distribution and affecting factors of
 448 high altitude wind velocity over the Jiuquan region[J]. Arid Zone Research, 26(5): 671–675.

449 童靖宇, 向树红. 2012. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 9(3): 1–4. Tong J Y, Xiang
 450 S H. 2012. Near space environment and environment tests[J]. Equipment environmental engineering,
 451 9(3): 1–4.

452 王丛梅, 景华, 王福侠, 等. 2011. 一次强烈雹暴的多普勒天气雷达资料分析[J]. 气象科学,
 453 2011, 31(5):659–665. Wang C M, Jing H, Wang F X, et al. 2011. Analysis of an intensive hailstorm
 454 with Doppler weather radar data[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 31(5):659–665.

455 王勇, 王澄海, 陶健红, 等. 2012. 甘肃酒泉地区近地层风场特征[J]. 干旱气象, 30(3):393–403.
 456 Wang Y, Wang C H, Tao J H, et al. 2012. Characteristics of wind field near ground layer in Jiuquan
 457 of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 30(3):393–403.

458 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,
 459 62(2):228–236. Wang Z Y, Ding Y H, He J H, et al. 2004. An updating analysis of the climate change
 460 on China in recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, (2):229–236.

461 魏蕾, 张冬梅, 张荣, 等. 2023. 酒泉地区大气风场分布特征的研究分析[J]. 强度与环境, 50(1):

462 57–63. Wei L, Zhang D M, Zhang R, et al. 2023. Research and analysis on the distribution
 463 characteristics of atmospheric wind fields[J]. Structure & Environment Engineering, 50(1): 57–63.

464 Wu C., X. Ma, T. Fang. 2006. A complementary note on Gegenbauer polynomial approximation for
 465 random response problem of stochastic structure[J]. Probabilistic Engineering Mechanics.
 466 21(4):410–419.

467 肖存英, 胡雄, 王博等. 2016. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究[J].地球物理学报,
 468 59(4):1211–1221. Xiao C Y, Hu X, Wang B, et al. 2016. Quantitative studies on the variations of
 469 near space atmospheric fluctuation [J]. Chinese J. Geophys., 59(4):1211–1221.

470 杨钧烽. 2016. 中纬度临近空间大气风场变化特性研究[D].中国科学院国家空间科学中心.
 471 Yang J F. 2016. Study on the variation characteristics of atmospheric wind field in the mid-latitude
 472 adjacent space[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences.

473 杨钧烽, 肖存英, 胡雄, 等. 2019. 临近空间风切变特性及其对飞行器的影响[J].北京航空航
 474 天大学学报, 45(1):57–65. Yang J F, Xiao C Y, Hu X, et al. 2019. Wind shear characteristics in near
 475 space and their impacts on air vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and
 476 Astronautics, 45(1):57–65.

477 张建荣. 2014. 气象条件对飞机及其飞行的影响分析[J].航空科学技术, 25(05):54–56. Zhang J R.
 478 2014. Impact analysis of weather conditions on aircraft and its flight[J]. Aeronautical Science &
 479 Technology, 25(05):54–56.

480 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学[M].北京:气象出版社, 122–128. Zhang P C, Du B
 481 Y, Dai T P. 2001. Radar meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 122–128.

482 赵人濂, 陈振官, 付维贤. 1998. 风切变与运载火箭设计[J].宇航学报, 19(2):105–108. Zhao R
 483 L, Chen Z G, Fu W X. 1998. Wind shear and rocket design[J]. Journal of Astronautics,
 484 19(2):105–108.

485 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 黄建斌. 2016. 近 50 年中国风速减小的可能原因[J].气象科技进展,
 486 6(3):106–109. Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y, et al, 2016. Possible causes of wind speed decrease in
 487 China in recent 50 years[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):106–109.

488