

滕玉鹏,李斐斐,夏芸洁,等,2025. 激光测风雷达与多普勒天气雷达的速度对比与分析[J]. 气象,51(5):517-528. Teng Y P, Li F F, Xia Y J, et al, 2025. Speed comparison and analysis of wind lidar and Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 51(5):517-528(in Chinese).

## 激光测风雷达与多普勒天气雷达的速度对比与分析<sup>\*</sup>

滕玉鹏<sup>1</sup> 李斐斐<sup>1</sup> 夏芸洁<sup>2</sup> 胡 姮<sup>1</sup> 吴 蕾<sup>1</sup>  
马若贇<sup>3</sup> 李思腾<sup>4</sup> 方亚芬<sup>5</sup>

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 北京市气象探测中心, 北京 100176

3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

4 北京城市气象研究院, 北京 100089

5 中国民用航空华东地区空中交通管理局浙江分局, 杭州 311207

**提 要:** 基于天气雷达夜间观测到的大气晴空回波, 通过激光测风雷达测得的高精度水平、垂直风速、风向的垂直廓线, 计算得到风廓线相对于多普勒天气雷达的径向速度, 进而实现激光测风雷达与多普勒天气雷达的速度对比与分析。基于该方法对 2023 年 5 月北京大兴 CINRAD/SA 天气雷达的径向速度和激光测风雷达的风廓线产品进行了对比分析。结果表明: 2023 年 5 月北京大兴 CINRAD/SA 天气雷达径向速度差的平均值为  $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 整月差值的标准差为  $3.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对逐日数据进行分析, 23 天的径向速度差的平均值在  $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内, 25 天的标准差小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。研究结果表明, 基于激光测风雷达数据, 结合天气雷达晴空回波可实现天气雷达径向速度的逐日、逐月分析, 及时发现因设备维护不足或设备故障引发的径向速度偏差。同时, 研究结果印证了天气雷达晴空回波主要为气象因素产生的气象晴空回波, 天气雷达夜间晴空回波的径向速度可代表大气风场速度。

**关键词:** 天气雷达, 晴空回波, 径向速度, 激光测风雷达

**中图分类号:** P412, P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.033101

## Speed Comparison and Analysis of Wind Lidar and Doppler Weather Radar

TENG Yupeng<sup>1</sup> LI Feifei<sup>1</sup> XIA Yunjie<sup>2</sup> HU Heng<sup>1</sup> WU Lei<sup>1</sup>  
MA Ruoyun<sup>3</sup> LI Siteng<sup>4</sup> FANG Yafen<sup>5</sup>

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100176

3 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

4 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

5 Zhejiang Sub-Bureau of East China Air Traffic Management Bureau, CAAC, Hangzhou 311207

**Abstract:** This study presents a comparative analysis of wind observations between a Doppler weather radar and a wind lidar. By integrating high-resolution vertical profiles of horizontal/vertical wind speeds and directions from the wind lidar, the radial velocities of the wind profiles relative to the Doppler weather radar are derived, and the consistency of these velocities with radial velocities from nighttime clear-air echoes observed by the weather radar is analyzed. This method was applied to evaluate the May 2023 data from the CINRAD/SA Doppler weather radar and a co-located wind lidar in Daxing, Beijing. The results

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金青年科学基金项目(42205145)资助

2024 年 4 月 17 日收稿; 2025 年 3 月 1 日收修定稿

第一作者: 滕玉鹏, 主要从事雷达生态学、大气物理学及大气遥感相关研究. E-mail: tengyp@cma.gov.cn

indicate that there is a mean radial velocity difference of  $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  between the two systems with a monthly standard deviation of  $3.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Daily assessments suggest that the average differences of radial velocities in 23 days between the two systems are within  $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , while their standard deviations in 25 days are below  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The analysis demonstrates that the radial velocity of weather radar can be analyzed day by day and month by month based on wind lidar data combined with weather radar clear-air echo, supporting early detection of biases caused by equipment malfunctions or inadequate maintenance. Furthermore, the results confirm that the clear-air echo of weather radar is mainly generated by meteorological factors, and the radial velocity of clear-air echo of weather radar at night can represent the atmospheric wind field velocity. The nighttime clear-air echoes observed by the weather radar can predominantly reflect meteorological characteristics, with their radial velocities accurately representing atmospheric wind field.

**Key words:** weather radar, clear-air echo, radial velocity, wind lidar

## 引 言

我国自 20 世纪 90 年代起,逐步建立了以 S 波段和 C 波段多普勒天气雷达为主的新一代天气雷达网,在降水监测中起到了重要的作用。随着数值模式的不断发展,多普勒天气雷达资料在数值模式同化中也发挥了重要作用。已有研究证实,天气雷达数据,尤其是天气雷达多普勒径向速度的同化,能够在数值模式的初始化过程中更好地表现模式的中尺度结构,对对流性降水的模拟产生积极影响(徐广阔等,2009;陈敏等,2014;刘昱辰等,2023)。采用直接同化雷达径向风的方法后,相应的模拟试验结果表明直接同化雷达径向风速后增加了初始场的中小尺度信息,增强了局地风场的辐合辐散特征,对降水等要素预报具有明显的改进作用(马昊等,2016)。

一方面为了更好地利用多普勒天气雷达径向速度,及时发现对因设备维护不足或设备故障引发的径向速度数据错误,需要对径向速度数据进行持续对比、分析;另一方面,为了扩大在模式同化过程中多普勒天气雷达径向速度的可用数据量,需要对大气风场与天气雷达在晴空时观测到的晴空回波的径向速度进行对比、分析,以证实晴空回波的径向速度符合大气风场。探空仪虽然可以准确测量风场信息,但探空仪放球的时间频次过低,难以与天气雷达径向速度数据开展系统性分析。无人机吊飞金属球移动虽然可以精准分析无人机移动速度与天气雷达径向速度的差异,但无人机吊飞金属球需要专门的无人机飞手,费时费力,且对在禁飞区域内的雷达难以实施。通过外部的独立信号源发射特定信号也可测试天气雷达的径向速度,但信号源的安装对环境

要求高。综上,不难发现已有多普勒天气雷达径向速度对比方法在开展过程中存在一定的限制。

激光测风雷达具有测量精度高、分辨率高、探测范围广、响应速度快等特点,对风场观测具有显著优势(鄢坤等,2024;傅军等,2021)。目前,随着地基遥感垂直观测系统建设的不断推进,越来越多的激光测风雷达被布设于各级气象部门的观测场中,开展实时风场观测。但受限于物理特征,激光无法有效穿透降水,因此激光测风雷达仅可用在晴空大气状况。尽管天气雷达在设计之初主要针对于大气中水凝物的观测,但随着对于晴空大气研究的不断深入,天气雷达晴空大气观测到的晴空回波或可成为风场测量的潜在手段。

耿建军(2006)阐述了晴空回波与谱宽的关系,得出了谱宽数据与表征湍流强度的湍流耗散率的关系公式。唐云志(2014)描述了布拉格(Bragg)散射机制并分析湍流回波的海陆变化及日变化原因。管理等(2014)利用多普勒天气雷达晴空回波的径向速度与谱宽数据,对大气的湍能耗散率进行了反演,发现湍能耗散率在降水前 2~3 小时持续加强,并基于湍能耗散率预警强对流天气。赵海军(2017)应用晴空回波的速度产品对对流性降水出现前的大气低层风场信息进行监测,并以此分析降水前的辐合辐散特征。漆梁波等(2006)统计了强对流天气过程中晴空回波的演变特征,提供了一种判断降水是否产生的预报指标。陈亚军等(2022)提出逆温层和高湿区与雷达是否能够探测到晴空回波存在较高的相关性。

Teng et al(2023a)通过将雷达等效为自发自收的通信设备,基于超视距通信的对流层散射理论,开创性地提出天气雷达晴空回波主要由湍流导致,其

本质是对流层中湍流团的 Bragg 衍射机制(对流层散射中的湍流散射机制)和不均匀气象要素反射(对流层散射中的不规则层发射机制)共同作用产生的。这表明,晴空回波的湍流或大气温、压、湿不均匀造成的折射率垂直梯度散射体可作为一种风场的示踪物。同时,通过北京地区 S 波段与 X 波段天气雷达的反射率因子差值分布特征,以及天气雷达反射率因子与风场、生物活动规律的矛盾,也印证了天气雷达晴空回波可作为大气风场的示踪物(滕玉鹏等, 2020a)。因此,多普勒天气雷达晴空回波的径向速度可与激光测风雷达风场数据进行对比,以此分析两种设备观测大气风场速度的一致性和测量结果的有效性。

本文利用激光测风雷达与多普勒天气雷达径向速度数据,对 2023 年 5 月北京大兴 CINRAD/SA 天气雷达的径向速度进行对比、分析。分析结果表明,激光测风雷达与天气雷达的速度对比结果较为一致,天气雷达晴空回波可作为大气风场的示踪物表征大气风场状态。同时,也对某些特殊情况下该方法存在的不足进行阐述。

## 1 理论与方法

天气雷达晴空回波经常在夏秋两季的晴好天气状况下被大量观测到。对于晴空回波的产生原因,目前主要有两种看法(张培昌,1988):一种认为回波是由大气湍流导致的折射指数起伏所引起的 Bragg 散射(物理本质是湍团的 Bragg 衍射)所致,称为晴空大气回波,或湍流回波(Teng et al, 2023b);另一种晴空回波则主要由昆虫、鸟类、蝙蝠等生物在空中飞行时被气象雷达波束照射,生物体产生散射所致,称为生物回波(姚文等, 2022; 赵子杭等, 2024; 滕玉鹏等, 2020b)。由于生物在活动过程中存在一定的运动速度,因此由生物散射体产生的晴空回波往往并不能表征风场速度,而是视为一种被污染的信号。因此,对于晴空回波的正确认识决定了其径向速度可否被正确使用。鉴于目前对于晴空回波认识存在较大的分歧和误区,因此本章节重点对晴空回波的相关理论进行论述。

### 1.1 传统晴空回波理论

天气雷达在夏秋季节的夜晚常常会观测到大面积的晴空回波(Wilson et al, 1994; Kusunoki,

2002)。长期以来,国外部分研究人员认为生物散射体主导了晴空回波。他们的主要论据归因于两个矛盾:晴空回波双偏振特征与湍流局地均匀各向同性的矛盾、大气 Bragg 散射强度与大气折射率结构常数的矛盾。

#### 1.1.1 局地均匀各向同性湍流

科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)假设湍流的性质是均匀和各向同性的(局地均匀各向同性湍流),那么湍流所导致的散射强度在水平方向和垂直方向也应相等(Birnir, 2013)。因此,湍流导致的晴空回波的差分反射率应为零。然而,实际观测结果表明,除部分在边界层顶观测到的晴空回波具有差分反射率为零的特征外,通常观测到的晴空回波均存在较大的差分反射率值,而昆虫扁长的身体形状则似乎可与差分反射率的特征吻合。国内的学者也曾对该观点提出了不同的解释,如黄琴等(2018)曾通过分析南京地区晴空回波的演变特征及大气垂直结构,认为南京地区的 C 波段天气晴空回波是由大气湍流引起的 Bragg 散射所产生,并将湍流回波的双偏振特征解释为湍涡在强水平风的作用下发生形变所致。

需要指出的是,尽管 Kolmogorov 的湍流理论在大气科学的发展中占有重要的地位,但现今大量研究揭示了非 Kolmogorov 湍流的广泛存在(饶瑞中和李玉杰, 2015; Toselli et al, 2008; Li et al, 2015)。实际上 Batchelor and Townsend (1949)观测到湍流在时间上的运动是不连续的,而是存在着间歇性。Siggia (1981)进行了数值模拟,发现小部分空间占能量耗散的 95%。Korotkova and Toselli (2021)在实验室中使用激光束证明了湍流各向异性的存在。Kolmogorov 湍流理论在正确描述大气统计数据方面被发现是不完整的,特别是在对流层和平流层的部分(Toselli et al, 2008)。在国内,胡非(1995)对湍流的间歇性进行了较为领先的系统性研究。

近年来,越来越多的实验也证明了真实大气中湍流空气的各向异性。对激光束在近地大气中水平传播的实验研究表明,大气折射率在不同偏振方向变化近似于椭圆(Wang et al, 2017)。各向异性湍流的折射率的垂直偏振或水平偏振的比值,会在不同时间段 0.6/1~1/0.6 范围内变化(Beason et al, 2018)。这表明,湍流散射的差分反射率因子在-2~2 dB 范围内均为合理。因此,差分反射率非零特征并不能完全否定湍流在晴空回波中的作用。

### 1.1.2 Bragg 散射

Bragg 散射是由湍流导致折射率不均匀引起的 (Richardson et al, 2017)。从本质上讲, 具有折射率梯度的大气湍流形成了偶极子模型而引起散射。Ottersten (1969) 提供了雷达反射率与折射率  $C_n^2$  的大气结构常数和雷达波长  $\lambda$  的关系。雷达反射率  $\eta$  (或单位体积的雷达截面) 在式 (1) 中给出:

$$\eta = 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (1)$$

则雷达反射率因子  $Z$  由式 (2) 获得:

$$Z = \frac{0.38 C_n^2 \lambda^{11/3}}{\pi^5 K^2} \quad (2)$$

式中  $K$  是由散射粒子介电性质决定的常数。

基于式 (2), 两个雷达波长的晴空回波反射率因子的比率 (也称双波长比率, DWR) 可写为

$$\text{DWR} = \frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{11/3} \quad (3)$$

所以, 可以发现 Bragg 散射产生回波的 DWR 仅与波长有关, Wilson et al (1994) 便利用式 (3) 研究了佛罗里达州和科罗拉多州上空的晴空回波, 并得出结论, 这些地区的晴空回波是由生物造成的。然而, 式 (1) 并不是雷达反射率和雷达波长之间的唯一关系。根据不同的湍流理论, 雷达反射率的值是可变的。实际上式 (1) 是基于 Kolmogorov-Obukhov 理论。而根据 Villars-Weisskopf 理论, 雷达反射率与波长的关系如式 (4) 所示:

$$\eta = C \lambda^{1/3} \quad (4)$$

式中:  $C$  是实验测得的常数。研究人员对雷达反射率与波长持有不同的观点, 包括从  $\eta$  正比于  $\lambda^{-1/3} \sim \lambda$ , 因此 DWR 的理论大小也在根据研究人员的不同观点而变化。而更为重要的是, 根据 Bragg 散射公式, 当前观测到的晴空回波反射率因子所计算得到的  $C_n^2$ , 远远大于实际的观测值  $C_n^2$ 。因此, 认为湍流是无法产生日常观测中的晴空回波。例如, 当晴空回波的反射率因子在  $10 \sim 20$  dBz 时, 其对应的  $C_n^2$  应大于  $10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$ , 但这远远大于实际观测中所测得的  $C_n^2$  值。因此, 在夏秋季夜间观测到的大量强晴空回波都被简单地归因于生物散射。

## 1.2 广义 Bragg 散射

由于日常天气雷达观测中, 人们不断发现天气雷达晴空回波的非生物特征 (滕玉鹏等, 2020a; 2020b; Teng et al, 2023b; 梁丽等, 2023), 但传统

Bragg 散射模型及公式难以解释晴空回波的强度, 这便造成了对晴空回波认识及应用的混乱。为了解决这个难题, 通过将雷达视为自发射和自接收设备, 引入了超视距通信的对流层散射理论, 来解释气象晴空回波的成因。

在通信中, 国际电信联盟无线电通信部门承认对流层散射是一种有效的传播方法, 是微波无线电系统实现超视距通信的机制 (Li et al, 2016)。根据目前公认的对流层散射理论, 信息传递是这三个模型结合的结果 (张明高, 2004): 反射层模型 (Booker and Gordon, 1950)、湍流散射 (Bullington, 1963) 和指数大气反射 (Friis et al, 1957)。从物理机制来看, 对流层散射中湍流散射与 Bragg 散射完全一致, 而指数大气反射则与非涅尔散射一致。因此, 对流层散射可比单一散射机制产生更强的信号。张明高 (2004) 研究指出, 对流层散射的散射截面如式 (5) 所示:

$$\sigma = B \left( \frac{d\epsilon_r}{dh} \right)^2 \lambda^n \varphi^{-m} \quad (5)$$

式中:  $B$ ,  $n$  和  $m$  是通过实验测量的常数;  $\epsilon_r$  为介电常数;  $h$  为高度;  $\varphi$  为掠射角。事实上, 由于雷达主要检测后向散射信号,  $\varphi$  的值是固定的直角。因此, 除了波长之外的其余项均可被视为受大气影响的常数项, 式 (5) 可以改写为

$$\sigma = C \lambda^n \quad (6)$$

式中

$$C = B \left( \frac{d\epsilon_r}{dh} \right)^2 \varphi^{-m} \quad (7)$$

值得注意的是, 当  $C$  为  $0.38 C_n^2$ ,  $n$  为  $-1/3$  时, 对流层散射方程 [式 (6)] 和 Bragg 散射方程 [式 (1)] 是一致的。因此, 对流层散射从理论上便可视作为一种更为普遍、泛用的广义 Bragg 散射理论。而在实际观测中, 通过建立天气雷达的等效传输损耗, 对 2021 年 5 月 (世界时, 下同) 观测到的北京大兴天气雷达晴空回波 (图 1) 与国际电信联盟无线电通信部门的建议进行对比后发现, S 波段天气雷达观测到的晴空回波经换算, 其传输损耗符合国际电信联盟对于对流层散射通信传输损耗的建议, 且晴空回波换算得到的传输损耗与高度之间也存在线性回归关系, 符合对流层散射理论。因此, 对流层散射理论可以被认为是一般的广义 Bragg 散射。



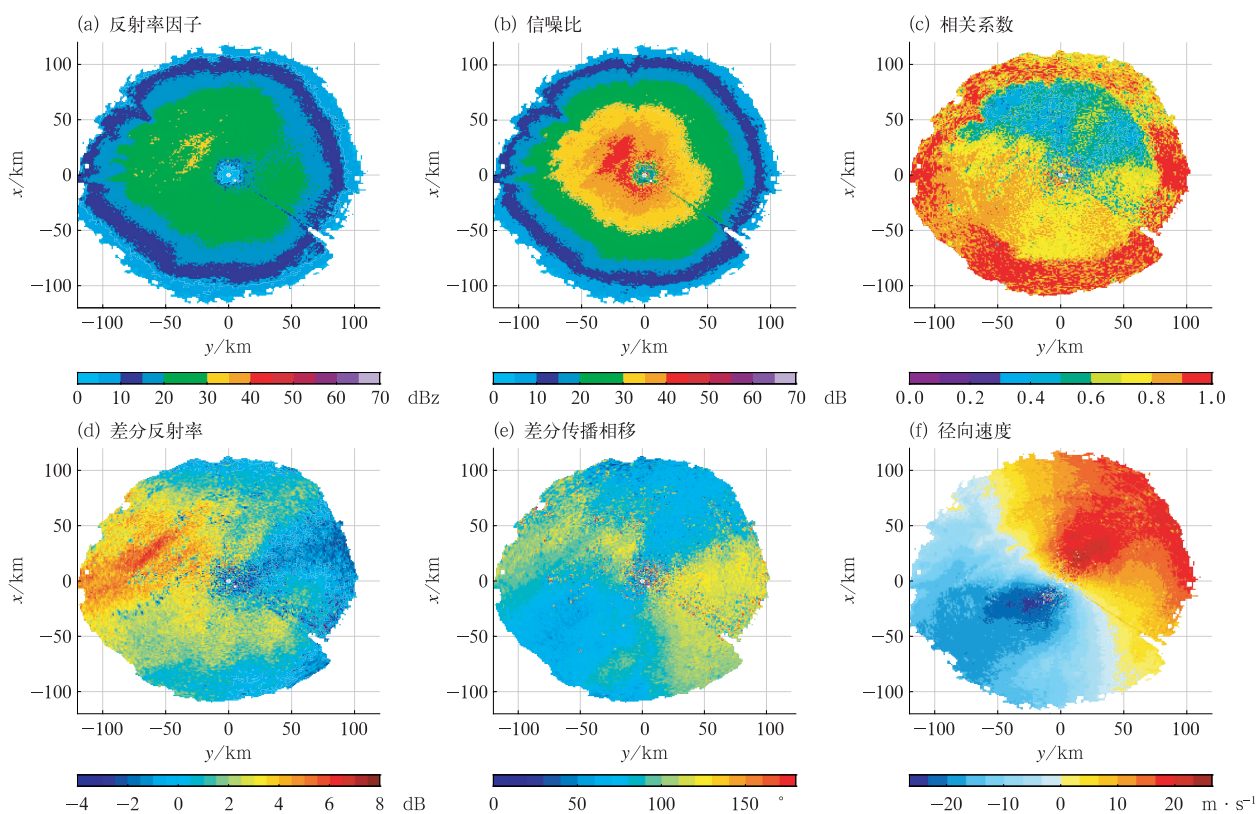


图1 2021年5月2日13:30北京大兴S波段天气雷达1.45°仰角晴空回波

Fig. 1 Clear-air echoes at 1.45° elevation of CINRAD/SA radar in Daxing of Beijing at 13:30 UTC 2 May 2021

## 2 设备与方法

### 2.1 设备

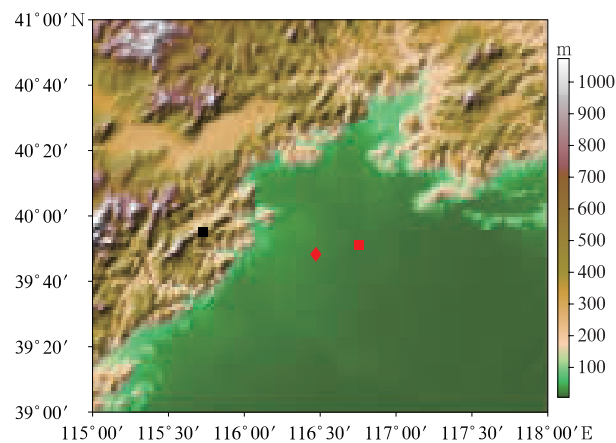
北京地区S波段天气雷达(CINRAD/SA)位于北京市南郊观象台,其产品的径向距离分辨率为250 m,方位角分辨率为1°(图2)。雷达使用VCP21的扫描模式,6 min内扫描9个仰角。该雷达的部分系统特性如表1所示。

激光测风雷达利用光学多普勒效应测量大气风速,由于该设备具有高时空分辨率,因此在科学研究和工程应用中得到了广泛应用。本文所使用的3D多普勒激光测风雷达(WindCube 100s)位于通州国家气象观测站,距离天气雷达东北方向(方位角80°)直线距离24 km。该型号激光测风雷达测风产品的空间分辨率为25 m,时间分辨率为20 s,具有较高的时空分辨率。由于激光并不像电磁波有较强的穿透和绕射的能力,因此当在激光传播路径上存在生物或降水的影响时,受生物或降水的遮挡,激光测风雷达将直接产生缺测。基于这种特性,恰好可避免激光测风雷达的风场数据被生物活动时自身的

飞行速度污染。因此,本文使用2023年5月1—31日的天气雷达与激光测风雷达数据,对多普勒天气雷达径向速度进行对比与分析。

### 2.2 激光测风数据换算径向速度

大气湍流作为一种理想的风场的示踪物,其产



注:菱形为北京大兴天气雷达,方块为北京通州激光测风雷达,填色为地形高度。

图2 天气雷达与激光雷达位置

Fig. 2 Location of weather radar and lidar

表 1 北京大兴 CINRAD/SA 天气雷达系统参数

Table 1 Parameters of CINRAD/SA weather radar system in Daxing of Beijing

参数	CINRAD/SA
发射频率/MHz	2700~3000 北京大兴 CINRAD/SA:2870
天线直径/m	11.9
极化方式	水平、垂直
体扫模式	VCP21
体扫时间/min	6
距离分辨率/m	250
方位分辨率/(°)	<1
天线增益/dB	>44
最小可探测反射率因子/dBz	50 km 处: -7.5

生的晴空回波的径向速度可视为大气风场在雷达径向向上的速度分量。因此,基于激光测风雷达准确探测的大气风场,可开展与雷达径向速度的对比分析。

由于激光测风雷达获得的是水平风向、水平风速和垂直风速等数据,因此在与天气雷达径向速度(以下简称雷达径向速度)进行比较时,需要将激光测风雷达数据换算为激光测风雷达观测点示踪物相对于天气雷达的径向速度(以下简称模拟径向速度)。因此需要根据天气雷达、激光测风雷达位置及激光测风雷达的观测数据进行换算。

以天气雷达为原点建立水平坐标系,若激光测风雷达在该坐标系中的位置为 $(x, y)$ ,则激光测风雷达所在位置的天气雷达方位角 $\alpha$ 和距离 $r$ 可表示为

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (8)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (9)$$

若此时,激光测风雷达测得的水平风向为 $\beta$ ,水平风速为 $v_H$ ,那么,激光测风雷达观测点的水平模拟径向速度 $v'_H$ 则为

$$v'_H = v_H \cdot \cos(270^\circ - \alpha - \beta) \quad (10)$$

在垂直方向上,若激光测风雷达的观测点坐标为 $(r, h)$ ,观测点相对于天气雷达的仰角为 $\theta$ ,则 $\theta$ 可写为

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{h}{r}\right) \quad (11)$$

此时,观测点的垂直风速为 $v_V$ ,则垂直风速在雷达径向向上的分量 $v'_V$ 则为

$$v'_V = v_V \cdot \sin\theta \quad (12)$$

因此,天气雷达在激光测风雷达的观测点 $(\alpha, r, \theta)$ 位置上的模拟径向速度值 $v'$ 即可写为

$$v' = v_H \cdot \cos(270^\circ - \alpha - \beta) + v_V \cdot \sin\theta \quad (13)$$

在实际应用中,需要注意的是,激光测风雷达的观测数据换算为模拟径向速度存在两个问题。一个是数据样本数量的问题。由于激光测风雷达虽然有很高的时空分辨率,但是其只测量设备正上方一根垂直风廓线,这导致可供对比的数据样本数仍较少。因此,假设激光测风雷达观测的风场示踪物的运动状态在一小段时间内不变(本文中假设为 3 min 内),那么激光测风雷达在 $t_1$ 时刻的观测点 $A_1(x_1, y_1)$ 内的示踪物,在经过 $\Delta t$ 后至 $t_2$ 时刻则移动至新位置 $B_1(x_2, y_2)$ ,且由于 $\Delta t$ 足够小, $t_0$ 时刻的示踪物运动状态 $v_{(x_1, y_1)}$ 与 $t_1$ 时刻示踪物运动状态 $v_{(x_2, y_2)}$ 一致,即

$$v_{(x_1, y_1)} = v_{(x_2, y_2)} \quad (14)$$

且

$$x_1 - x_2 = v_{(x_1, y_1)} \cdot \sin(\beta + 180^\circ) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$y_1 - y_2 = v_{(x_2, y_2)} \cdot \cos(\beta + 180^\circ) \cdot \Delta t \quad (16)$$

因此在 $t_2$ 时刻,除了激光测风雷达在此时直接观测到观测点 $A_2$ 数据外,同时还包含由 $t_1$ 时刻递推的观测点 $B_1$ 数据。而此时,两个观测点对应的天气雷达照射体的坐标分别为 $(\alpha_1, r_1, \theta_1)$ 和 $(\alpha_2, r_2, \theta_2)$ ,进而可拓展数据样本数量。

另一个问题是天气雷达与激光测风雷达在分辨率上的差异。由于天气雷达均采用锥状波束探测,当波束不断远离雷达时,其探测波束的照射体积不断增大,即波束展宽。当波束距离雷达 50 km 时,宽度为 $1^\circ$ 的雷达波束的照射体直径可达 850 m 以上。而相较于天气雷达,激光测风雷达的距离分辨率要小得多,仅为几十米。这就意味着激光测风雷达观测的示踪物运动实际上是天气雷达照射体内的示踪物的一部分,这或使得两者存在一个天然的系统偏差。

通常来说,对于天气雷达而言,降水粒子是最常见的示踪物,而降水粒子的多普勒速度分布一般符合高斯分布,雷达照射体内粒子运动的平均值即为平均径向速度,方差即为速度谱宽。然而这种状况在晴空回波上并不适用。

已有研究表明,晴空回波的功率谱与云雨粒子的功率谱并不存在较大差异,不可视其为高斯分布(滕玉鹏, 2021)。同时,有研究表明水平风切变在垂直方向上的不均匀变化或可激发更多湍流,造成更

强的散射信号(Teng et al, 2023a; 2023b)。这可导致天气雷达晴空回波的径向速度更倾向表征不均匀切变处的运动状态,这也是晴空回波通常拥有较大且离散的谱宽的原因之一。因此,晴空回波的径向速度虽然在一定程度可以表征大气风场,但瞬时的测量结果无法精准代表照射体内的示踪物(湍流)的平均运动状态。

相似状况也同样会出现在激光测风雷达上。与风廓线雷达相似,激光测风雷达采用五波束探测各方向的径向速度并合成水平、垂直风场信息,因此激光雷达的测量在本质上是基于五波束所处的风场是均匀的假设情况下获得的大气风场信息,所以这或会引入一定程度的系统误差。

为了克服散射机制、照射体体积及测量系统误差等误差来源,将天气雷达晴空回波的径向速度与激光测风雷达数据进行对比分析时,若一个雷达照射体内对应于激光测风雷达观测点,则该照射体的径向速度直接与多个激光测风结果进行对比,而不取多个激光测风雷达观测点的平均值以避免人为导致的误差。同时考虑雷达在距离测量和方位角测量上的微小偏差,在避免过度美化数据的基础上为了更大程度保证数据有效性,在径向速度计算时,选择距离激光测风雷达观测点最近的四个照射体的径向速度中位数来代表该观测点的天气雷达径向速度。

### 3 径向速度分析

#### 3.1 数据垂直分布

以5月13日00:00至18日00:00为例,对激光测风雷达经计算获得的模拟径向速度与天气雷达径向速度进行定性对比及分析。如图3所示,激光测风雷达的模拟径向速度与雷达径向速度有较高的时空分布一致性,模拟径向速度与天气雷达观测结果有相近的速度变化。不过也可以发现,在不同时间两者的数据量存在差异,这种差异在图3中体现为速度廓线的有效观测高度不同。

对2023年5月每天各时段的天气雷达与激光测风雷达有效数据的数据样本数量进行统计,结果如图4所示。由于激光测风雷达有着更高的时空分辨率,因此图4a所显示的激光测风雷达在样本数量上远超图4b所显示的天气雷达。天气雷达一方面受限于扫描模式,另一方面也受限于晴空回波的日变化规律,数据的样本数量明显少于激光测风雷达,且具有明显的日变化,样本数量在正午及入夜后出现峰值,而在黄昏及黎明样本数量为谷值。与天气雷达不同的是,激光测风雷达在中午及黎明样本数量相对较少。对时空匹配的激光测风雷达及天气雷

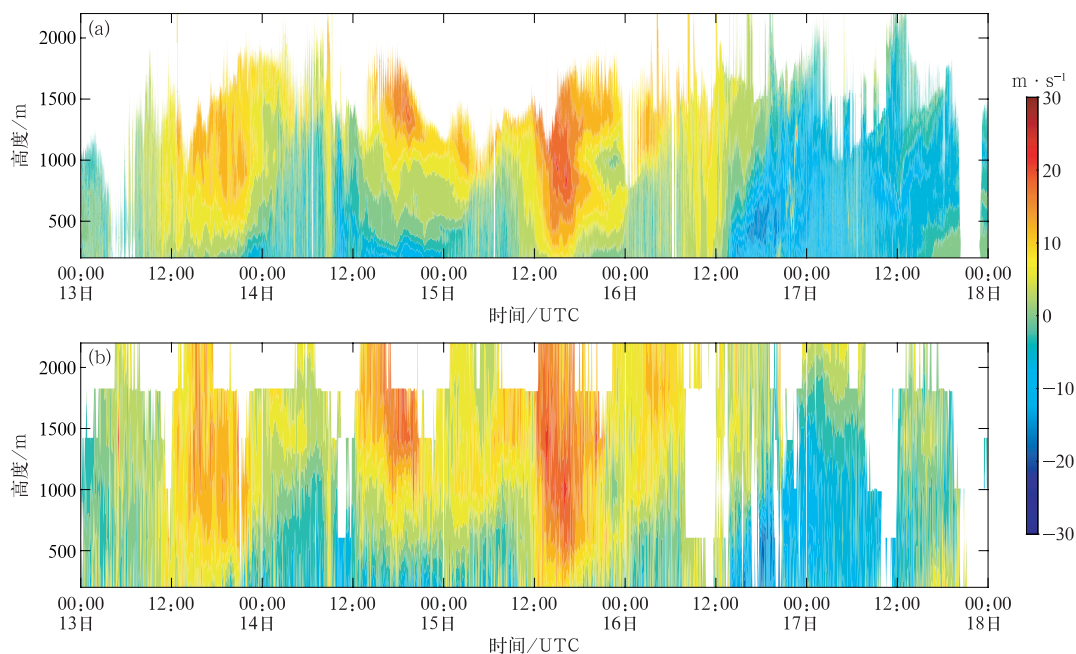


图3 2023年5月13—18日(a)激光测风雷达模拟径向速度与(b)天气雷达径向速度廓线

Fig. 3 Radial velocity profiles (a) simulated by wind lidar and (b) from weather radar from 13 to 18 May 2023

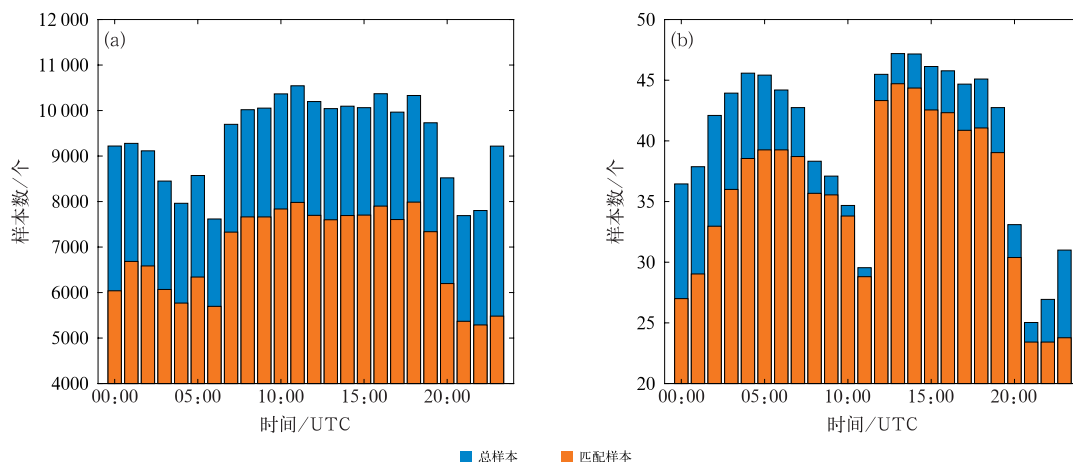


图 4 2023 年 5 月 (a) 激光测风雷达与 (b) 天气雷达有效观测的速度数据样本数量

Fig. 4 Valid number of velocity data samples from (a) wind lidar and (b) weather radar in May 2023

达样本数量进行分析后可以发现,相匹配的样本数量存在一定程度缩减,雷达数据的样本数量在部分时段甚至不足 30 个。

不过,得益于风速外推的数据扩展处理,原本每 20 秒一条激光测风雷达的速度廓线提高至每 20 秒 9 条廓线(3 min 外推),同时在雷达数据与激光测风数据进行匹配时,未经平均处理,使得可供对比分析的匹配数据样本数量有所提高,对比分析结果的有效性和可靠性得以提高。

### 3.2 径向风速偏差

对 2023 年 5 月的天气雷达径向速度与激光测风雷达模拟径向速度进行对比,如图 5 所示。两者

整体分布是一致的,存在强的正相关。从两者差值分布来看,在不同高度上两者的差值均近似于均值为零的高斯分布。

为了更加清晰地分析现有天气雷达径向速度的偏差,分别统计了整个 5 月天气雷达径向速度与激光测风雷达模拟径向速度的径向速度差(以下简称径向速度差)分布及每日径向速度差的标准差、平均值(图 6)。

图 6 清晰地表明,径向速度差近似于高斯分布,其平均值为  $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,标准差为  $3.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从逐日数据看,径向速度差的平均值和标准差存在日变化,径向速度差的平均值的变化范围基本在  $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内(共 23 d),符合天气雷达  $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

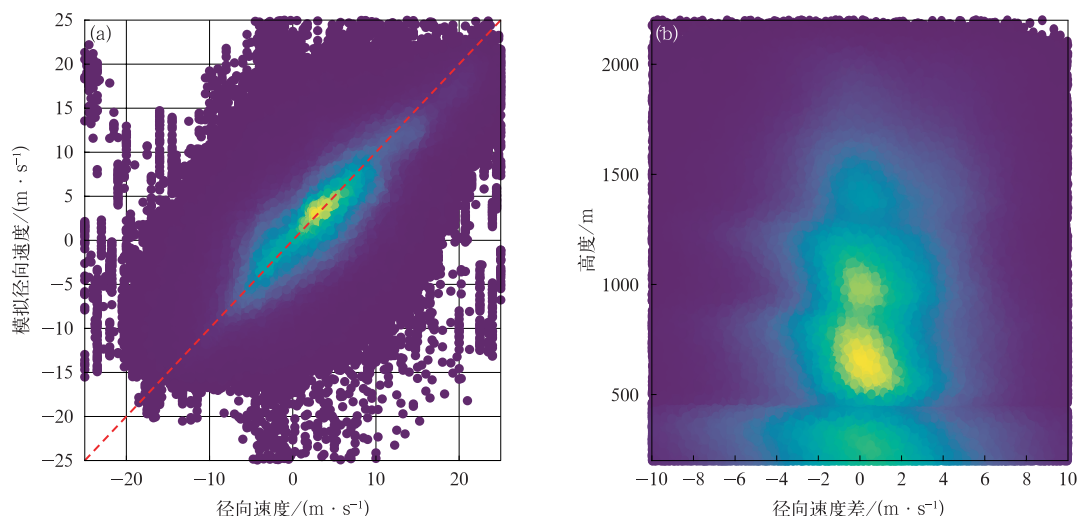


图 5 2023 年 5 月 (a) 天气雷达径向速度与激光测风雷达模拟径向速度及 (b) 两者差值分布

Fig. 5 Distribution of radial velocities (a) from weather radar and simulated by wind lidar and (b) their difference in May 2023



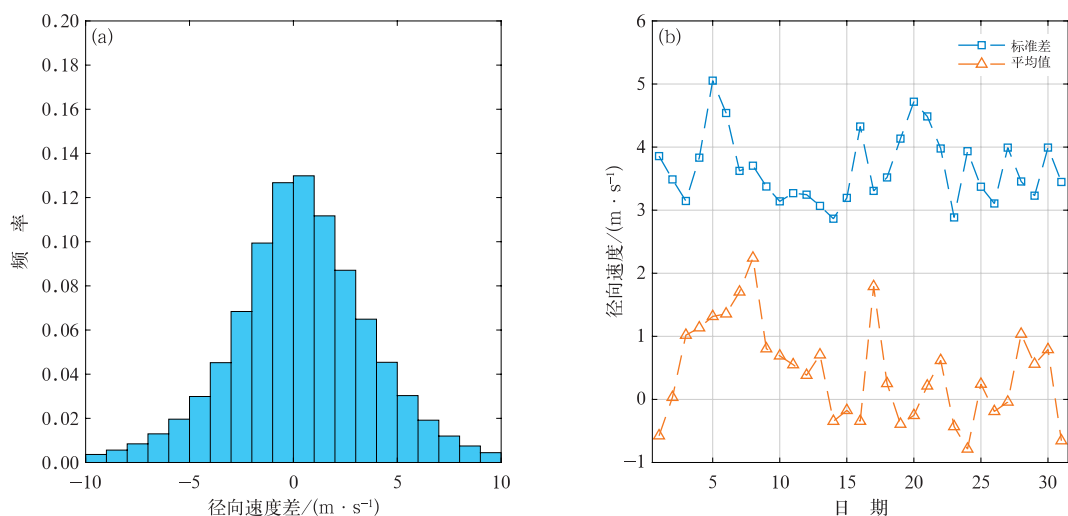


图6 2023年5月(a)天气雷达径向速度与激光测风雷达模拟径向速度的径向速度差分布及(b)每日径向速度差的标准差、平均值

Fig. 6 (a) Distribution of radial velocity difference between weather radar and simulated by wind lidar, and (b) the standard deviation and mean of daily radial velocity difference in May 2023

的速度偏差指标;而径向速度差的标准差基本小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (共25 d)。同时,从图6可见2023年5月4—7日,径向速度差的标准差和平均值出现明显增大。对这段时间进行单独分析,天气雷达径向速度与激光测风雷达模拟径向速度廓线如图7所示。

图7展示了2023年5月4—8日激光测风雷达模拟径向速度与天气雷达径向速度廓线。从图中可

以发现,4—8日,无论模拟径向速度还是雷达径向速度,两者均基本小于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且天气雷达有效数据明显减少。7日12:00之后,天气雷达径向速度略大于激光测风雷达模拟径向速度。这表明在弱风背景下,受晴空回波散射机制影响,算法的对比能力有所下降。

有趣的是,雷达最终给出的径向速度是从多个

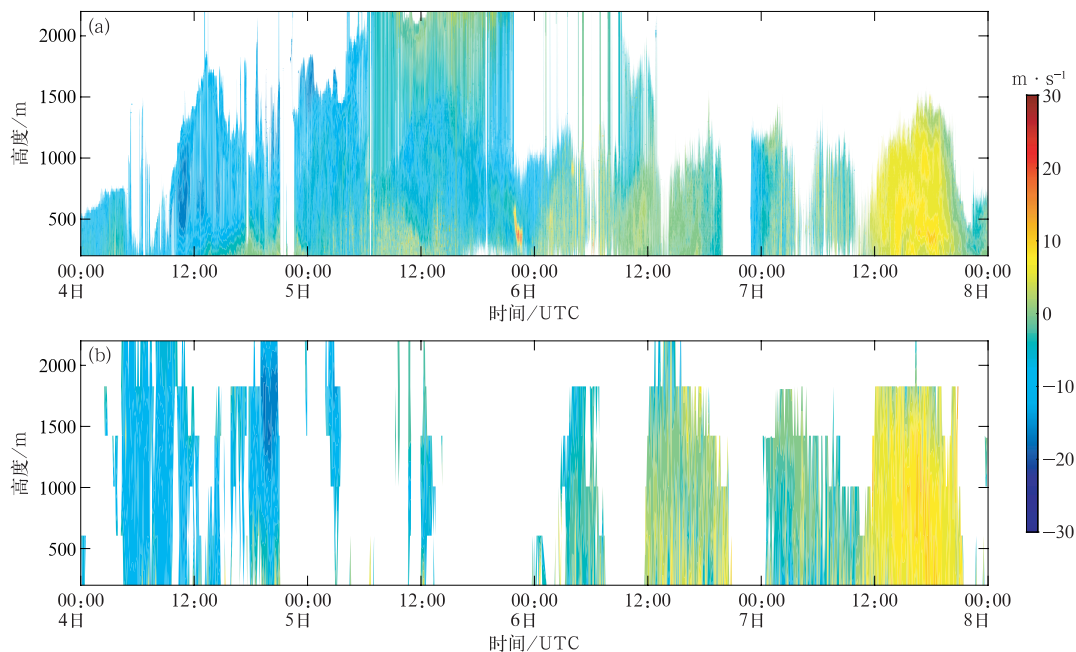


图7 2023年5月4—8日(a)激光测风雷达模拟径向速度与(b)天气雷达径向速度廓线

Fig. 7 Radial velocity profiles (a) simulated by wind lidar and (b) from weather radar from 4 to 8 May 2023

脉冲对得到的径向速度的平均值,是平均径向速度,而相应的标准差称为谱宽,即天气雷达基础观测产品之一的速度谱宽产品,因此本质上图 6 中的径向速度差的标准差应与天气雷达谱宽产品相近。因此,图 8 给出了径向速度差的标准差与天气雷达谱宽的逐日变化。由图 8 可见,两者的值较为接近,天气雷达的谱宽稍小于径向速度差的标准差。因此,可以认为激光测风雷达与天气雷达多普勒速度的对比分析是有效和可靠的。同时可以发现,基于激光测风雷达对比分析方法在本质上仍会引入一小部分系统偏差,从而造成径向速度差的标准差略大于天气雷达谱宽。该结果也从一个层面说明,天气雷达晴空回波总体来说是由随风运动的湍团产生的,其运动状态表征了大气风场,因此其天气雷达晴空回波的径向速度可用于数值模式同化中。

## 4 讨 论

长期以来,受限于基础理论的限制与深入研究的缺乏,尽管大量气象工作者倾向于天气雷达晴空回波是气象因素产生的观点,但并没有有效的理论基础去证明自己的观点。同时由于美国部分学者在该领域率先表达了一部分学术观点,导致我国学者在晴空回波的研究中受阻。尽管在先前的研究中引入通信领域的对流层散射理论作为基础,来解决已有大气遥感领域对于晴空回波认识的不足,但不可否认的是,受限于研究资源的限制,目前学界并未对晴空回波的气象学意义产生足够的重视。

在图 3、图 4 和图 7 中可以发现,天气雷达径向速度样本数量存在明显的日变化,而这一变化与晴

空回波的规律十分相符。结合已有研究成果,对这种规律进行推测:在日出后,随着地表加热的增强,不均匀的地面产生了许多热泡,致使湍流强度持续增强,并在正午达到高峰,天气雷达可在此时能观测到一定数量的晴空回波;而较强的湍流使得大气混合作用较强,致使空气受混合作用影响,各气团的气象要素分布相对均匀,造成对流层散射三种机制中仅湍流散射生效;随着太阳高度角下降,地表加热逐渐减缓,至日落后,完全消失,混合作用随之迅速减弱,不均匀下垫面产生的不均匀气团未经充分混合,形成了大量具有不均匀层反射结构的气团,此时对流层散射三种机制中湍流散射与不均匀层反射同时生效,致使天气雷达监测到大量强晴空回波信号,且由于人类活动地面加剧了下垫面的不均匀性,因此在现阶段有限的研究中存在一种现象,位于大型工业城市的天气雷达会比位于小型农业城市天气雷达观测到更强的晴空回波。

本研究结果也在一定程度上证明了晴空回波的非生物特性。生物在迁飞、迁徙等活动过程中存在一定的自主运动速度。一些大型昆虫的自主运动速度能达到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,鸟类则会更快(Stepanian et al, 2016; Gauthreaux and Belser, 2003; Gauthreaux et al, 2003)。由于激光的特性,激光测风雷达的数据并不存在被生物活动污染的可能性,而本研究结果表明,经由激光测风雷达数据计算得到的模拟径向速度与天气雷达晴空回波径向速度基本一致,这表明天气雷达晴空回波的散射体可视为风场示踪物,晴空回波在大体上是由气象因素所导致。当然,本研究并不否认天气雷达对于生态监测的能力,不过需要提醒开展相关研究的研究者,现有的部分关于生态回波的规律是基于错误的生物回波认识之上的,在开展相关研究过程时应深入甄别、理性思考。

## 5 结 论

本研究利用天气雷达晴空回波的最新观点,通过晴空回波对激光测风雷达与多普勒天气雷达径向速度进行了对比、分析。分析结果表明,对 2023 年 5 月北京大兴 CINRAD/SA 天气雷达径向速度与通州激光测风雷达 WindCube 100 s 的风场测量结果平均偏差为  $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,两者在 2023 年 5 月的差值标准差为  $3.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对逐日数据进行分析,两者的径向速度差的平均值基本在  $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以

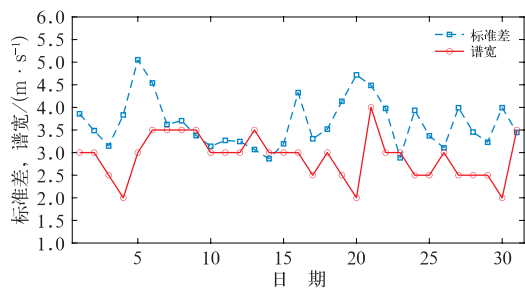


图 8 2023 年 5 月径向速度差的标准差与天气雷达谱宽产品

Fig. 8 Standard deviation of radial velocity difference and the weather radar spectrum width products in May 2023

内,标准差基本小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对于存在较大偏差的数据进行分析后发现,基于晴空回波的对比,分析结果在弱风及晴空回波较少时会存在较大偏差,在对比、分析及进一步应用过程中需要对结果进行深入分析。本研究同时印证了天气雷达晴空回波主要为气象因素产生的气象晴空回波,天气雷达晴空回波可体现大气风场状态,晴空回波的径向速度受昆虫、鸟类等具有自主飞行能力的散射体的影响有限,因此晴空回波径向速度可用于数值模式同化。

## 参考文献

- 陈敏,陈明轩,范水勇,2014. 雷达径向风观测在华北区域数值预报系统中的实时三维变分同化应用试验[J]. 气象学报,72(4):658-677. Chen M, Chen M X, Fan S Y, 2014. The real-time radar radial velocity 3DVar assimilation experiments for application to an operational forecast model in North China[J]. Acta Meteor Sin, 72(4):658-677(in Chinese).
- 陈亚军,梁海河,张乐坚,等,2022. 新一代天气雷达晴空回波反射率因子特征分析[J]. 气象科技,50(3):303-313. Chen Y J, Liang H H, Zhang L J, et al, 2022. Characteristic analysis of reflectivity factor of clear air echoes of Doppler weather radars[J]. Meteor Sci Technol, 50(3):303-313(in Chinese).
- 傅军,李洁,吴强,2021. 激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望[J]. 空气动力学学报,39(4):172-179. Fu J, Li J, Wu Q, 2021. Application and prospect of Doppler lidar in the wind field observation[J]. Acta Aerodynam Sin, 39(4):172-179(in Chinese).
- 耿建军,2006. 天气雷达晴空回波特征分析及其应用初步研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Geng J J, 2006. Analysis of weather radar clear-air echo character and its elementary application[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 管理,魏鸣,吴昊,2014. 晴空湍流在强天气过程临近预报中的应用研究[J]. 科学技术与工程,14(31):6-13. Guan L, Wei M, Wu H, 2014. Study of clear-air turbulence to the nowcasting forecast of severe convective weather[J]. Sci Technol Eng, 14(31):6-13(in Chinese).
- 胡非,1995. 湍流、间歇性与大气边界层[M]. 北京:科学出版社. Hu F, 1995. Turbulence, Intermittency and the Atmospheric Boundary Layer[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 黄琴,魏鸣,胡汉峰,等,2018. 晴空回波的大气风温湿结构及双偏振雷达参量分析[J]. 气象,44(4):526-537. Huang Q, Wei M, Hu H F, et al, 2018. Analysis of atmospheric wind, temperature and humidity structure and dual-polarization radar parameters of clear air echo[J]. Meteor Mon, 44(4):526-537(in Chinese).
- 梁丽,马舒庆,滕玉鹏,等,2023. 天气雷达空中生态监测系统建设和应用[J]. 应用气象学报,34(5):630-640. Liang L, Ma S Q, Teng Y P, et al, 2023. Construction and application of weather radar aerial ecological monitoring system[J]. J Appl Meteor Sci, 34(5):630-640(in Chinese).
- 刘昱辰,刘佳,李传哲,等,2023. WRF-3DVAR 逐小时雷达同化系统在华北地区降雨径流预报中的应用[J]. 遥感学报,27(7):1590-1604. Liu Y C, Liu J, Li C Z, et al, 2023. An hourly updated WRF-3DVar weather radar data assimilation system and its application for rainfall-runoff prediction in North China[J]. Nat Remote Sens Bull, 27(7):1590-1604(in Chinese).
- 马昊,梁旭东,罗义,等,2016. GRAPES\_3Dvar 中雷达径向风同化改进观测算子的应用[J]. 气象,42(1):34-43. Ma H, Liang X D, Luo Y, et al, 2016. Application of advanced observation operator of Doppler radar radial velocity assimilation in GRAPES\_3Dvar[J]. Meteor Mon, 42(1):34-43(in Chinese).
- 漆梁波,陈春红,刘强军,2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用[J]. 气象学报,64(1):112-120. Qi L B, Chen C H, Liu Q J, 2006. Application of narrow-band echo in severe weather prediction and analysis[J]. Acta Meteor Sin, 64(1):112-120(in Chinese).
- 饶瑞中,李玉杰,2015. 非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响[J]. 光学学报,35(5):0501003. Rao R Z, Li Y J, 2015. Light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering[J]. Acta Opt Sin, 35(5):0501003(in Chinese).
- 唐云志,2014. 晴空回波的散射机理与回波分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Tang Y Z, 2014. The scattering mechanism and analysis of clear-air echo[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 滕玉鹏,2021. 多波段雷达观测的晴空回波识别方法研究[D]. 北京:中国科学院大学. Teng Y P, 2021. Research on the recognition method of clear-air echoes by multi-band radar observation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- 滕玉鹏,陈洪滨,马舒庆,等,2020a. 北京 S 波段天气雷达夜间晴空回波产生原因[J]. 应用气象学报,31(5):595-607. Teng Y P, Chen H B, Ma S Q, et al, 2020a. The cause of night clear air echo of S-band weather radar in Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 31(5):595-607(in Chinese).
- 滕玉鹏,陈洪滨,马舒庆,等,2020b. 天气雷达监测生物跨海迁飞方法[J]. 气象,46(7):938-947. Teng Y P, Chen H B, Ma S Q, et al, 2020b. Weather radar identification of directional biological migrations across the sea[J]. Meteor Mon, 46(7):938-947(in Chinese).
- 徐广阔,孙建华,雷霆,等,2009. 多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响[J]. 应用气象学报,20(1):36-46. Xu G K, Sun J H, Lei T, et al, 2009. Impacts of Chinese Doppler radar on the severe heavy rainfall forecast during Meiyu season[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1):36-46(in Chinese).
- 鄢琨,时晓曦,傅刚,等,2024. 测风激光雷达在青岛低能见度天气下的适用性[J]. 应用气象学报,35(1):33-34. Yan S, Shi X M, Fu G, et al, 2024. Wind lidar applicability in low visibility weather in Qingdao[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1):33-34(in Chinese).
- 姚文,张晶,余清波,等,2022. 辽河三角洲湿地鸟类活动的双偏振天

- 气雷达回波特征[J]. 气象, 48(9):1162-1170. Yao W, Zhang J, Yu Q B, et al, 2022. Dual-polarization weather radar echo characteristics of avian activities in the Liaohe River Delta Wetland [J]. Meteor Mon, 48(9):1162-1170(in Chinese).
- 张明高, 2004. 对流层散射传播[M]. 北京: 电子工业出版社. Zhang M G, 2004. Tropospheric Scatter Propagation[M]. Beijing: Electronic Industry Press(in Chinese).
- 张培昌, 1988. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, 1988. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 赵海军, 2017. 晴空回波特征与风场信息应用[J]. 气象科技, 45(3): 477-484. Zhao H J, 2017. Characteristics of clear air echoes and application of wind field information[J]. Meteor Sci Technol, 45(3):477-484(in Chinese).
- 赵子杭, 庄庭, 李建勇, 等, 2024. 天津区域鸟类活动的双偏振天气雷达回波分析[J]. 气象, 50(9):1142-1152. Zhao Z H, Zhuang T, Li J Y, et al, 2024. Analysis of dual-polarization weather radar echoes of bird activity in Tianjin Region[J]. Meteor Mon, 50(9):1142-1152(in Chinese).
- Batchelor G K, Townsend A A, 1949. The nature of turbulent motion at large wave-numbers[J]. Proc Roy Soc London Ser A Math Phys Sci, 199(1057):238-255.
- Beason M, Smith C, Coffaro J, et al, 2018. Near ground measure and theoretical model of plane wave covariance of intensity in anisotropic turbulence[J]. Opt Lett, 43(11):2607-2610.
- Birnir B, 2013. The Kolmogorov-Obukhov statistical theory of turbulence[J]. J Nonlinear Sci, 23(4):657-688.
- Booker H G, Gordon W E, 1950. A theory of radio scattering in the troposphere[J]. Proc IRE, 38(4):401-412.
- Bullington K, 1963. Reflections from an exponential atmosphere[J]. Bell Syst Tech J, 42(6):2849-2867.
- Friis H T, Crawford A B, Hogg D C, 1957. A reflection theory for propagation beyond the horizon[J]. Bell Syst Tech J, 36(3):627-644.
- Gauthreaux Jr S A, Belser C G, 2003. Radar ornithology and biological conservation[J]. Auk, 120(2):266-277.
- Gauthreaux Jr S A, Belser C G, van Blaricom D, 2003. Using a network of WSR-88D weather surveillance radars to define patterns of bird migration at large spatial scales[C]// Avian Migration. Berlin: Springer-Verlag:335-346.
- Korotkova O, Toselli I, 2021. Non-classic atmospheric optical turbulence: review[J]. Appl Sci, 11(18):8487.
- Kusunoki K, 2002. A preliminary survey of clear-air echo appearances over the Kanto Plain in Japan from July to December 1997 [J]. J Atmos Ocean Technol, 19(7):1063-1072.
- Li L, Wu Z S, Lin L K, et al, 2016. Study on the prediction of troposcatter transmission loss[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 64(3):1071-1079.
- Li Y J, Zhu W Y, Wu X Q, et al, 2015. Equivalent refractive-index structure constant of non-Kolmogorov turbulence[J]. Opt Express, 23(18):23004-23012.
- Ottersten H, 1969. Atmospheric structure and radar backscattering in clear air[J]. Radio Sci, 4(12):1179-1193.
- Richardson L M, Cunningham J G, David Zittel W, et al, 2017. Bragg scatter detection by the WSR-88D. Part I: algorithm development[J]. J Atmos Ocean Technol, 34(3):465-478.
- Siggia E D, 1981. Numerical study of small-scale intermittency in three-dimensional turbulence[J]. J Fluid Mech, 107:375-406.
- Stepanian P M, Horton K G, Melnikov V M, et al, 2016. Dual-polarization radar products for biological applications[J]. Eco-sphere, 7(11):e01539.
- Teng Y P, Li T Y, Chen H B, et al, 2023a. Clear-air Bragg scattering observed above the convective boundary layer in the morning [J]. Remote Sens, 15(9):2241.
- Teng Y P, Li T Y, Ma S Q, et al, 2023b. Turbulence: a significant role in clear-air echoes of CINRAD/SA at night [J]. Remote Sens, 15(7):1781.
- Toselli I, Andrews L C, Phillips R L, et al, 2008. Free-space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[J]. Opt Eng, 47(2):026003.
- Wang F, Toselli I, Li J, et al, 2017. Measuring anisotropy ellipse of atmospheric turbulence by intensity correlations of laser light [J]. Opt Lett, 42(6):1129-1132.
- Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al, 1994. Boundary layer clear-air radar echoes: origin of echoes and accuracy of derived winds[J]. J Atmos Ocean Technol, 11(5):1184-1206.

(本文责编:俞卫平)