1	激光测风雷达与多普勒天气雷达的速度对比与分析
2	
3	滕玉鹏 ^{1)*} 李斐斐 ¹⁾ 夏芸洁 ²⁾ 胡姮 ¹⁾ 吴蕾 ¹⁾ 马若赟 ³⁾ 李思腾 ⁴⁾ 方亚芬 ⁵⁾
4	1)(中国气象局气象探测中心,北京 100081)
5	2) (北京市气象探测中心,北京 100176)
6	3) (中国气象局数值模式中心,北京 100081)
7	4) (北京城市气象研究院,北京 100089)
8	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)
9	
10	摘要
11	本研究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、
12	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
13	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
14	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:
15	2023年5月北京大兴天气雷达 CINRAD/SA 径向速度差的平均值为 0.37m/s, 整月差值的标
16	准差为 3.66m s ⁻¹ 。对逐日数据进行分析, 23 天的径向速度差的平均值在±1m s ⁻¹ 以内, 25 天
17	的标准差小于 4m 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
18	现天气雷达径向速度的逐日、逐月分析,及时发现对因设备维护不足、或设备故障引发的径
19	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,
20	天气雷达夜间晴空回波的径向速度可代表大气风场速度。
21	关键词: 天气雷达; 晴空回波; 径向速度; 激光测风
22 23	
24	Speed Comparison and Analysis of Wind Lidar and Doppler Weather Radar
25	
26	TENG Yupeng ^{1*} LI Feifei ¹ XIA Yunjie ² HU Heng ¹ WU Lei ¹
27	MA Ruoyun ³ LI Siteng ⁴ FANG Yafen ⁵
28	1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081
29	2 Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100176
30	3 CMA Earth system modelling and prediction centre, Beijing 100081

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42205145)

滕玉鹏,博士,主要从事雷达生态学、大气物理学及大气遥感相关研究,tengyp@cma.gov.cn

- 31 4 Institute of Urban Meteorology, CMA. Beijing 100089 32 5 Zhejiang Sub-Bureau of East China Air Traffic Management Bureau, CAAC, Hangzhou 311207 33 34 Abstract: This study presents a comparative analysis of wind observations between a Doppler 35 weather radar and a wind lidar. By integrating high-resolution vertical profiles of 36 horizontal/vertical wind speeds and directions from the wind lidar, the radial velocities of the 37 wind profiles relative to the Doppler weather radar are derived, and the consistency of these 38 velocities with radial velocities from nighttime clear-air echoes observed by the weather radar is 39 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 indicate there 40 is a mean radial velocity difference of 0.37 m s⁻¹ between the two systems with a monthly 41 standard deviation of 3.66 m s⁻¹. Daily assessments suggest that the average differences of radial 42 velocities in 23 days between the two systems are within $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$, while their standard 43 deviations in 25 days are below 4 m s⁻¹. The analysis demonstrates that the radial velocity of 44 weather radar can be analyzed day by day and month by month based on wind lidar data 45 46 combined with weather radar clear sky echo, supporting early detection of biases caused by 47 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 48 49 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 50 meteorological characteristics, with their radial velocities accurately representing atmospheric 51 52 wind field. 53 54 Key words: weather radar, clear-air echo, radial velocity, wind lidar 55
- 56

58 59

言

引

我国自上世纪九十年代起,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 60 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 61 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 62 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 63 对流性降雨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 64 同化雷达径向风的方法后,相应的模拟实验结果表明直接同化雷达径向风速后增加了初始场 65 66 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 67 (马吴等, 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 68 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 69 70 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 71 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 72 73 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 74 75 飞区域内的雷达难以实施。通过外部的独立信号源发射特点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。 76 在开展过程中存在一定的限制。 77

78 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
79 测具有显著优势(鄢珅等, 2024;傅军等, 2021)。目前,随着地基遥感垂直观测系统建设的不
80 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,开展实时的风场观测。
81 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
82 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
83 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 84 散率的关系公式。唐云志(2014)描述了 Bragg 散射机制并分析湍流回波的海陆变化及日变化 85 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 86 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 87 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 88 89 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 90 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。 91

92 Teng et al(2023a)人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
93 射理论,开创性地提出天气雷达晴空回波主要由湍流导致的散射,其本质是对流层中湍流团
94 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
95 的不规则层发射机制)共同作用产生。这表明,晴空回波的湍流或大气温、压、湿不均匀造
96 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
97 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

98 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
99 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
100 大气风场速度的一致性和测量结果的有效性。

101 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
102 CINRAD/SA 的径向速度进行了对比、分析。分析结果表明激光测风雷达与天气雷达的速度对
103 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
104 对某些特殊情况下该方法存在的不足进行了阐述。

105

106 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 107 生原因,目前主要有两种看法(张培昌,1988):一种是认为回波是由大学 **〔**湍流导致的折射指 108 数起伏所引起的布拉格(Bragg)散射(物理本质是湍团的 Brag 109 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 110 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 111 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 112 散射体产生的晴空回波往往并不能表征风场速度, 而是被视为一种被污染的信号。因此, 对 113 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 114 较大的分歧和误区,因此本章节重点 空回波的相关理论进行论述。 115

116 1.1 传统晴空回波理论

117 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;

118 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
119 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、大气布拉格
120 散射强度与大气折射率结构常数的矛盾。

121 1.1.1 局地均匀各向同性湍流

122 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
123 流所导致的散射强度在水平方向和垂直方向也应是相等(Birnir, 2013)。因此,湍流导致的晴
124 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
125 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
126 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
127 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

128 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
129 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 130 现今大量研究揭示了非科尔莫戈罗夫湍流的广泛存在(饶瑞中和李玉杰, 2015; Toselli et al, 131 2008; Li et al, 2015)。实际上早在 1949 年, Batchelor and Townsend(1949)观测到湍流在时间 132 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 133 能量耗散的 95%。Korotkova and Toselli(2021)在实验室实验中使用激光束证明了湍流各向异 134 135 性的存在。Kolmogorov 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 136 先的系统性研究,相关理论可以参考其所著的"湍流、间歇性与大气边界层 137

138 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
139 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,会在不同时间段在 0.6/1 到
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-2dB 到 2dB 范
142 围内均为合理。因此,差分反射率的非零特征并不能完全否定湍流在晴空回波中的作用。

143 1.1.2 布拉格 (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*²_n的大气结构常数和雷达波长λ的关系。雷达反射率η(或单位体积的雷达截面)
在公式(1)中给出:

$$\eta = 0.38C_n^2 \lambda^{-1/3} \tag{1}$$

148 则雷达反射率因子Z跟根据公式(2)获得:

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

149 基于公式(2),两个雷达波长的晴空回波反射率因子的比率(也称为双波长比率,DWR)150 可写为

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

151 所以,可以发现 Bragg 散射产生的回波的 DWR 仅与波长有关,Wilson et al(1994)便利用
152 公式(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

153 回波是由生物造成的。然而,公式(1)并不是雷达反射率和雷达波长之间的唯一关系。根
154 据不同的应用湍流理论,雷达反射率的值是可变的。实际上方程式(1)是基于
155 Kolmogorov-Obukhov理论。而根据 Villars-Weisskopf理论,雷达反射率与波长的关系如公式
(4)中给出:

$$\eta = C\lambda^{1/3} \tag{4}$$

157 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 η 正比 158 于 $\lambda^{-1/3}$ 到 λ 之间,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 159 的是,根据 Bragg 散射公式,当前观测到的晴空回波的反射率因子所计算得到的 C_n^2 ,远远大 160 于实际的 C_n^2 观测值。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 161 波的反射率因子在 10—20 dBZ 时,其对应的 C_n^2 应大于10⁻¹¹ $m^{-2/3}$,但这远远大于实际观测 162 中所测得的 C_n^2 值。因此,在夏秋季节夜间观测到的大量强晴空回波都被简单的归因于生物 163 散射。

164 **1.2 广义布拉格散射**

165 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,
166 2020; Teng et al, 2023b; 梁丽等, 2023),但传统布拉格散射模型及公式难以解释晴空回波的强
167 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
168 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。

169 在通信中,国际电信联盟无线电通信部门承认对流层散射(也称为对流层散射)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
71 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
172 Gordon, 1950)、湍流散射(Bullington, 1963)和指数大气反射(Friis et al, 1957)。人们普遍认为对
173 流层散射是这三种模型结合的结果。而从物理机制来看,对流层散射中湍流散射与布拉格散
174 射完全一致,而指数大气反射则与菲涅尔散射一致。因此,对流层散射可比单一散射机制产
175 生更强的信号。张明高院士的研究指出,对流层散射的散射截面可以写成如下:

$$\sigma = B \left[\frac{\mathrm{d}\varepsilon_r}{\mathrm{d}h} \right]^2 \lambda^n \varphi^{-m} \tag{5}$$

176 其中 B、n 和 m 是常数,并且是通过实验测量的; ε_r为介电常数; h为高度; φ是掠射角。事
177 实上,由于雷达主要检测后向散射信号,掠入射角的值是固定的(掠入射角是直角)。因此,
178 除了波长之外的其余项均可被视为受大气影响的常数项,等式(5)可以改写为

$$\sigma = C\lambda^n \tag{6}$$

179 其中

$$C = B \left[\frac{\mathrm{d}\varepsilon_r}{\mathrm{d}h} \right]^2 \varphi^{-m} \tag{7}$$

180 值得注意的是,当C等于 0.38C²_n, n等于-1/3 时,对流层散射方程(5)和布拉格散射的
181 方程(6)是一致的。因此,对流层散射从理论中便可视为一种更为普遍、泛用的广义布拉
182 格散射理论。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 月观测到
183 的北京大兴天气雷达晴空回波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
184 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
185 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
186 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布拉格散射。



187 188

图 1 2021 年 5 月 2 日 13:00 (UTC) S 波段天气雷达 1.45° 仰角晴空回波

189 Fig. 1 Clear-air echoes from the CINRAD/SA radar, on May 2, 2021, at 13:30 UTC for an elevation 190 angle of 1.45°.

191

192 2 设备与方法

193 **2.1 设备**



203 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
 204 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

205 (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
206 距离 24km,。该型号激光测风雷达测风产品的空间分辨率为 25 米,时间分辨率为 20s,具
207 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
208 播路径上存在生物或降水的影响,受生物或降水的遮挡,激光测风雷达将直接产生缺测。基
209 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,
210 本文使用 2023 年 5 月 1 日至 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
211 向速度进行对比与分析。

212 2.2 激光测风数据换算径向速度

213 大气湍流作为一种理想的风场的示踪物,其产生的晴空回波的径向速度可视为大气风场
214 在雷达径向上的速度分量。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
215 向速度的对比分析。

216 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
217 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
218 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
219 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。

220 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
221 激光测风雷达所在位置的天气雷达方位角*a*和距离*r*可表示为

$$\alpha = atan(\frac{y}{x}) \tag{8}$$

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

222 若此时,激光测风雷达的测得的水平风向为β,水平风速为v_H,那么,激光测风雷达观测点
223 的水平模拟径向速度v'_H则为

$$v'_{H} = v_{H} \cdot \cos(270 - \alpha - \beta) \tag{1}$$

224 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θ,
225 则θ可写为

$$\theta = atan(\frac{h}{r}) \tag{1}$$

1)

226 此时,观测点的垂直方向速度为vy,则垂直风速在雷达径向上的分量v'y则为

$$v'_V = v_V \cdot \sin(\theta) \tag{1}$$

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

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

3)

(1

1

228 需要注意的是,在实际应用中,激光测风雷达的观测数据换算为模拟径向速度存在两个 229 问题。其一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 230 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,我们假设激 231 光测风雷达观测的风场示踪物的运动状态在一小段内不变(本文中假设为3分钟内),那么 232 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 Δt 后至 t_2 时刻则移动至新位置 233 $B_1(x_2,y_2)$,且由于 Δt 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 234 $v_{(x_2,y_2)}$ 一致,即

$$v_{(x_1,y_1)} = v_{(x_2,y_2)}$$
 (4)

235 且

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

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

236 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 237 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雷达照射体的坐标分别为 238 (α_1, r_1, θ_1)和(α_2, r_2, θ_2),进而拓展数据样本数量。

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 239 另--个问题在天/ 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 240 离雷达 50km时,宽度为1°的雷达波束的照射体直径可达 850 米以上。而相较于天气雷达, 241 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 242 243 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。 244 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 245 246 谱宽。然而这种状况在晴空回波上并不适用。

247 已有研究表明,晴空回波的功率谱并不与云雨粒子的功率谱存在较大差异,不可视为高
248 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
249 更多湍流,造成更强的散射信号(Teng et al, 2023)。这可导致天气雷达晴空回波的径向速度更

250 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。
251 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
252 代表照射体内的示踪物(湍流)的平均运动状态。

253 相似状况也同样会出现在激光测风能雷达上。与风廓线雷达相似,激光测风雷达采用五
254 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
255 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
256 系统误差。

257 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
258 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
259 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
260 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,
261 在避免过度美化数据的基础上为了更大程度保证数据有数性,在径向速度计算时,选择距离
262 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
263 速度。

264 3 径向速度分析

265 3.1 数据垂直分布

266 以 5 月 13 日零时至 18 日零时为例,对激光测风雷达经计算获得的模拟径向速度与天气
267 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
268 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
269 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
270 观测高度不同。



图 3 5 月 13 日至 18 日激光测风雷达模拟径向速度 (a) 与天气雷达径向速度 (b) 廓线

273 Fig. 3 Radial velocity profile of (a) lidar and (b) weather radar from May 13th to 18th, 2023. 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 274 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 275 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 276 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,且在日内 277 具有明显的变化,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 278 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 279 雷达及天气雷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 280 数据的样本数量在部分时段甚至不足 30。 281

282 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
283 高至每 20 秒 9 条廓线(3 分钟外推),同时在雷达数据与激光测风数据进行匹配时,未经
284 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
285 性得以提高。



290 3.2 径向风速偏差

291 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
292 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
293 差值均近似于均值为零的高斯分布。



- 294
- 295

图 5 (a) 天气雷达径向速度与激光测风能雷达模拟速度分布及(b) 两者差值分布

Fig. 5 Distribution of radial velocity from weather radar and simulated velocity from (a) lidar,
and (b) the distribution of their differences

298 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
299 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



04 00:00

04 12:00

05:00:00

05 12:00

06:00:00

时间 (dd hh:mm UTC)

06 12:00

07 00:00

07 12:00

08 00;00

图75月4日至8日激光测风雷达模拟径向速度(a)与天气雷达径向速度廓线(b)
Fig.7 Radial velocity profile of (a) lidar and (b) weather radar from May 4th to 8th, 2023.
图7展示了5月4日至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日至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10m/s,
且天气雷达有效数据明显减少。7日12时之后,天气雷达径向速度略大于激光测风雷达模
拟径向速度结果。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。



200

320 321

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

有趣的是, 雷达最终给出的径向速度是从多个脉冲对得到的径向速度的平均值, 是平均 324 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 325 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 绘制了径向速 326 度差的标准差与天气雷达谱宽的逐日变化。图8可见,两者的值较为接近,天气雷达的谱宽 327 328 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 329 330 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闭产生的,其运动状态表征了大气风场, 331 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。 332

333 4 讨论

334 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

335 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
336 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
337 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
338 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
339 空回波的气象学意义产生足够的重视。

在图 3、图 4 和图 7 中可以明显发现,天气雷达径向速度样本数量存在明显的日变化, 340 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 341 342 后,随着地表加热的增强,不均匀的地面产生了许多的热泡,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 343 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 344 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 345 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 346 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, 347 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, 348 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 349 城市天气雷达观测到更强的晴空回波。 350

本研究的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 351 些大型昆虫的自主运动速度能达到 6m/s,而鸟类则会 过程中存在一定的自主运动速度。 352 更快(Stepanian et al, 2016, Gauthreaux and Belser, 2003; Gauthreaux et al, 2003)。由于激光的 353 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 354 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 355 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, 356 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 357 358 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。 359

360 5 总结

361 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
362 雷达径向速度进行了对比、分析。分析结果表明对 2023 年 5 月北京大兴天气雷达 CINRAD/SA
363 径向速度与通州激光测风雷达 WindCube 100s 的风场测量结果平均偏差 0.37m/s,两者在
364 2023 年 5 月的差值标准差为 3.66m/s。对逐日数据进行分析,两者的径向速度差的平均值基

365 本在±1m/s 以内,标准差基本小于 4m/s,对于存在较大偏差的数据进行分析后发现,基于
366 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
367 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
368 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
369 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
370 同化中。
371
372

参考文献

373

374

第279 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].
第2033-313. 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).

383 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
 384 学报, 39(4): 172-179. Fu J, Li J, Wu Q, 2021. Application and prospect of Dopplar lidar in the
 385 wind field observation[J]. Acta Aerodynam Sin, 39(4): 172-179 (in Chinese).

386 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
 387 大学. Geng J J, 2006. Analysis of weather radar clear-air echo character and its elementary
 388 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).

392 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,
393 Intermittency and the Atmospheric Boundary Layer[M]. Beijing: Science Press (in Chinese). (查
394 阅网上资料,未找到本条文献的英文信息,请确认)

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).

 403
 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

 404
 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).

407 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
408 [J]. 气象,42(1): 34-43. Ma H, Liang X D, Luo Y, et al, 2016. Application of advanced
409 observation operator of Doppler radar radial velocity assimilation in GRAPES_3Dvar[J]. Meteor
410 Mon, 42(1): 34-43 (in Chinese).

411 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
412 象学报,64(1): 112-120. Qi L B, Chen C H, Liu Q J, 2006. Application of narrow-band echo in
413 severe weather prediction and analysis[J]. Acta Meteor Sin, 64(1): 112-120 (in Chinese).

414 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].
415 光 学 学 报, 35(5): 0501003. Rao R Z, Li Y J, 2015. Light propagation through
416 non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering[J]. Acta Opt
417 Sin, 35(5): 0501003 (in Chinese).

相云志, 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).

421 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
422 气象学报,20(1): 36-46. Xu K G, Sun J H, Lei T, et al, 2009. Impacts of Chinese Doppler radar on
423 the severe heavy rainfall forecast during Meiyu season[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1): 36-46 (in
424 Chinese).

425 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
426 [J]. 气象,48(9): 1162-1170. Yao W, Zhang J, Yu Q B, et al, 2022. Dual-polarization weather radar
427 echo characteristics of avian activities in the Liaohe River delta wetland[J]. Meteor Mon, 48(9):
428 1162-1170 (in Chinese).

429 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.
430 Tropospheric Scatter Propagation[M]. Beijing: Electronic Industry Press (in Chinese). (查阅网上
431 资料,未找到本条文献的英文信息,请确认)

432 张培昌, 1988. 雷达气象学[M], 北京: 气象出版社. Zhang P C, 1988. Radar
433 Meteorology[M]. Beijing. China Meteorological Press (in Chinese). (查阅网上资料,未找到本
434 条文献的英文信息,请确认)

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).

442 鄢珅, 时晓曚, 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
443 气象学报, 35(1): 33-34. Yan S, Shi X M, Fu G, et al, 2024. Wind Lidar applicability in low
444 visibility weather in Qingdao[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1): 33-34 (in Chinese).

445 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].
446 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
447 clear air echo of S-band weather radar in Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 31(5): 595-607 (in
448 Chinese).

449	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):
450	938-947. Teng Y P, Chen H B, Ma S Q, et al., 2020b. Weather radar identification of directional
451	biological migrations across the sea[J]. Meteor Mon, 46(7): 938-947 (in Chinese).
452	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.
453	Teng Y P, 2021. Research on the recognition method of clear-air echoes by multi-band radar
454	observation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese). (査阅网上资
455	料,未找到本条文献的英文信息,请确认)
456	Batchelor G K, Townsend A A, 1949. The nature of turbulent motion at large
457	wave-numbers[J]. Proc Roy Soc London. Ser A. Math Phys Sci, 199(1057): 238-255.
458	Beason M, Smith C, Coffaro J, et al, 2018. Near ground measure and theoretical model of
459	plane wave covariance of intensity in anisotropic turbulence[J]. Opt Lett, 43(11): 2607-2610.
460	Birnir B, 2013. The Kolmogorov-Obukhov statistical theory of turbulence[J]. J Nonlinear Sci,
461	23(4): 657-688.
462	Booker H G, Gordon W E, 1950. A theory of radio scattering in the troposphere[J]. Proc IRE,
463	38(4): 401-412.
464	Bullington K, 1963. Reflections from an exponential atmosphere[J]. Bell Syst Tech J, 42(6):
465	2849-2867.
466	Friis H T, Crawford A B, Hogg D C, 1957. A reflection theory for propagation beyond the
467	horizon[J]. Bell Syst Tech J, 36(3): 627-644.
468	Gauthreaux Jr S A, Belser C G, 2003. Radar ornithology and biological conservation[J]. Auk,
469	120(2): 266-277.
470	Gauthreaux Jr S A, Belser C G, Van Blaricom D, 2003. Using a network of WSR-88D
471	weather surveillance radars to define patterns of bird migration at large spatial scales[C]//Avian
472	Migration. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 335-346.
473	Korotkova O, Toselli I, 2021. Non-Classic atmospheric optical turbulence: review[J]. Appl
474	Sci, 11(18): 8487.
475	Kusunoki K, 2002. A preliminary survey of clear-air echo appearances over the Kanto plain
476	in Japan from July to December 1997[J]. J Atmos Ocean Technol, 19(7): 1063-1072.
477	Li L, Wu Z S, Lin L K, et al, 2016. Study on the prediction of troposcatter transmission
478	loss[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 64(3): 1071-1079.
479	Li Y J, Zhu W Y, Wu X Q, et al, 2015. Equivalent refractive-index structure constant of
480	non-Kolmogorov turbulence[J]. Opt Express, 23(18): 23004-23012.
481	Ottersten H, 1969. Atmospheric structure and radar backscattering in clear air[J]. Radio Sci,
482	4(12): 1179-1193.
483	Richardson L M, Cunningham J G, David Zittel W, et al, 2017. Bragg scatter detection by the
484	WSR-88D. Part I: Algorithm development[J]. J Atmos Ocean Technol, 34(3): 465-478.
485	Siggia E D, 1981. Numerical study of small-scale intermittency in three-dimensional
486	turbulence[J]. J Fluid Mech, 107: 375-406.
487	Stepanian P M, Horton K G, Melnikov V M, et al, 2016. Dual-polarization radar products for
488	biological applications[J]. Ecosphere, 7(11): e01539.
489	Teng Y P, Li T Y, Chen H B, et al, 2023a. Clear-air Bragg scattering observed above the
490	convective boundary layer in the morning[J]. Remote Sens, 15(9): 2241.
491	Teng Y P, Li T Y, Ma S Q, et al, 2023b. Turbulence: a significant role in clear-air echoes of
492	CINRAD/SA at night[J]. Remote Sens, 15(7): 1781.

 493 494 495 496 497 498 499 500 501 	 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.
502	Speed comparison and analysis of wind
503	lidar and Doppler weather radar
504 505	Teng Yupeng ^{1)*} Xia Yunjie ²⁾ Hu Heng ¹⁾ Wu Lei ¹⁾ Ma Ruoyun ³⁾ Li Siteng ⁴⁾ Fang Yafen ⁵⁾
506	¹⁾ (Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)
507	²⁾ (Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100088)
508	³⁾ (Earth system modelling and prediction centre, China Meteorological Administration, Beijing
509	100029)
510	⁴⁾ (Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100029)
511	⁵⁾ (Zhejiang Sub-bureau of East China Air Traffic Management Bureau CAAC, Hangzhou 311207)
512	Abstract
513	Since the 1990s, China has gradually established a new generation of weather radar networks based on
514	S-band and C-band Doppler weather radars, which play an important role in precipitation monitoring. With the
515	continuous development of numerical models, Doppler weather radar also plays an important role in numerical
516	model assimilation. In order to better utilize the Doppler weather radar radial velocity, the data error needs to be
517	assessed, however, the existing Doppler weather radar radial velocity assessment methods have certain
518	limitations in the process of carrying out.
519	Wind lidar has the characteristics of high measurement accuracy and high resolution, which has significant
520	advantages for wind field observation. In the process of existing research, it is found that the weather radar
521	clear-air echoes in Beijing are mainly produced by atmospheric turbulence and other meteorological factors,
522	indicating that the weather radar clear-air echoes can be used as a tracer of the atmospheric wind field. The radial

523 velocities of Doppler weather radar clear-air echoes can be compared and analyzed with laser wind measurement

524 radar wind field data to assess the bias of clear-air echoes radial velocities.

525 Since atmospheric turbulence serves as an ideal tracer of the wind field, the radial velocity of the clear-air 526 echoes generated by it can be regarded as the velocity component of the atmospheric wind field in the radial 527 direction of the radar. Therefore, based on the atmospheric wind field accurately detected by the wind lidar, a 528 comparative analysis of radar radial velocities can be carried out by converting the wind lidar data into the radial 529 velocities of the tracer at the wind lidar observation point with respect to the weather radar, which in turn can be 530 used to assess the bias of the radial velocities of the weather radar clear-air echoes. Using this method, the radial 531 velocities of CINRAD/SA at Daxing, Beijing, in May 2023 were evaluated. 532 The results show that the mean value of the radial velocity difference of the weather radar CINRAD/SA at

533 Beijing Daxing in May 2023 is 0.37 m/s, and the standard deviation of the difference for the whole month is 3.66

534 m/s. Analyses of the day-by-day data show that the mean value of the radial velocity difference for the 23-day

period is within ±1 m/s, and the standard deviation for the 25-day period is less than 4 m/s. The results show that,

based on the laser wind measurement radar data, the day-by-day and month-by-month evaluation of weather

537 radar radial velocity can be achieved by using weather radar clear-air echoes. Meanwhile, the results of this

538 study confirm that the weather radar clear-air echoes are mainly meteorological clear-air echoes generated by

539 meteorological factors and the clear-air echoes are representative of the atmospheric wind field, and radial

540 velocities of clear-air echo can be used in numerical model assimilation.

541 Key words: weather radar; clear-air echo; radial velocity; wind lidar

542

543 (中文翻译)

544 我国自上世纪九十年代起,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,
545 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,多普勒天气雷达在数值模式同化中也发挥
546 了重要的作用。为了更好的利用多普勒天气雷达径向速度,需要对数据误差进行分析,然而已有多普勒
547 天气雷达径向速度分析方法在开展过程中存在一定的限制。

548 激光测风雷达具有测量精度高、分辨率高的特点,对风场观测具有显著优势。在已有的研究过程中,
549 发现北京地区天气雷达晴空回波主要由大气湍流等气象因素产出,表明天气雷达晴空回波可作为大气风
550 场的示踪物。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分析,以此分析
551 晴空回波径向速度的偏差。

552 由于大气湍流作为一种理想的风场的示踪物,其产生的晴空回波的径向速度可视为大气风场在雷达 553 径向上的速度分量。因此,基于激光测风雷达准确探测的大气风场,通过将激光测风雷达数据换算为激 554 光测风雷达观测点示踪物相对于天气雷达的径向速度,可开展雷达径向速度的对比分析。利用该方法, 555 对 2023 年 5 月北京大兴 CINRAD/SA 的径向速度进行了分析。研究结果表明: 2023 年 5 月北京大兴天气 556 雷达 CINRAD/SA 径向速度差的平均值为 0.37m/s, 整月差值的标准差为 3.66m/s。对逐日数据进行分析, 557 23 天的径向速度差的平均值在±1m/s 以内, 25 天的标准差小于 4m/s。研究结果表明, 基于激光测风雷达 558 数据,利用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。同时,本研究的结果从侧面 559 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代表大气风场,晴 560 空回波径向速度可用于数值模式同化中。