

测风激光雷达资料质量控制和湍流探测性能研究

程志刚 权建农 李炬 张鑫宇 张京江 王倩倩 潘昱冰

Controlling data quality and assessing turbulence detection capability of a Doppler wind lidar

CHENG Zhigang, QUAN Jiannong, LI Ju, ZHANG Xinyu, ZHANG Jingjiang, WANG Qianqian, PAN Yubing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究

A study on turbulence and three-dimensional wind field based on observations of three wind lidars

气象学报. 2020, 78(6): 1021–1036 doi: [10.11676/qxxb2020.070](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.070)

青藏高原区域资料同化的变分质量控制研究：参数优化及其有效同化

A study on variational quality control of data assimilation over the Qingzang plateau: Parameters optimization and effective assimilation

气象学报. 2024, 82(4): 443–458 doi: [10.11676/qxxb2024.20230138](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230138)

地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用

The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect

气象学报. 2020, 78(4): 551–567 doi: [10.11676/qxxb2020.034](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.034)

复杂地形下C波段雷达定量降水估计算法

Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar situated in complex topographical regions

气象学报. 2021, 79(4): 689–702 doi: [10.11676/qxxb2021.038](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.038)

1951–2023年中国地面器测积雪深度数据集研制及应用

Development and application of a sub-daily in-situ snow depth dataset over China (1951–2023)

气象学报. 2025, 83(1): 142–155 doi: [10.11676/qxxb2025.20240027](https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240027)

5—7月大别山地区降水与边界层风场日变化特征关系研究

The relationship between diurnal variations of precipitation and boundary layer winds over the Dabie Mountains during May–July

气象学报. 2024, 82(5): 615–631 doi: [10.11676/qxxb2024.20230108](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230108)



扫码关注公众号，获取更多信息！

测风激光雷达资料质量控制和湍流探测性能研究*

程志刚 权建农 李 炬 张鑫宇

张京江 王倩倩 潘昱冰

CHENG Zhigang QUAN Jiannong LI Ju ZHANG Xinyu

ZHANG Jingjiang WANG Qianqian PAN Yubing

北京城市气象研究院, 北京, 100089

Institute of Urban Meteorology, Beijing 100089, China

2024-07-31 收稿, 2024-12-27 改回.

程志刚, 权建农, 李炬, 张鑫宇, 张京江, 王倩倩, 潘昱冰. 2025. 测风激光雷达资料质量控制和湍流探测性能研究. 气象学报, 83(5): 1313-1328

Cheng Zhigang, Quan Jiannong, Li Ju, Zhang Xinyu, Zhang Jingjiang, Wang Qianqian, Pan Yubing. 2025. Controlling data quality and assessing turbulence detection capability of a Doppler wind lidar. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1313-1328

Abstract To obtain high precision wind profile and turbulence products and fully understand the application potential of wind lidar, quality control of Doppler wind lidar with five-beam swing (DBS5) mode is investigated in this work using radial velocity and signal-to-noise ratio (SNR). Three-dimensional wind and turbulence measurements by the DBS5 mode of wind lidar are systematically evaluated based on measurements of a three-dimensional ultrasonic anemometer mounted on a tower. The results show that the wind lidar exhibits excellent observational accuracy with root mean square errors (RMSEs) as low as 0.4 m/s, 0.1 m/s, 0.1 m/s, 0.1 m/s, and $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ for horizontal wind speed (WS), vertical velocity (w), standard deviation of vertical velocity (σ_w), friction velocity (u_*), and turbulent kinetic energy (TKE), respectively at the height of 140 m. Moreover, the impacts of time scale, elevation angle, and spatial scale on observational accuracy of wind lidar are investigated. The results indicate that variations in time scale have little impact on observational accuracy, while elevation angle may affect the accuracy of TKE. Additionally, the RMSEs of WS and TKE gradually increase with increasing spatial scale, while the accuracy of w , σ_w , and u_* remain relatively stable. Further investigation of profiles of turbulence and vertical velocity under clear-sky conditions in Beijing indicates that the power spectra of vertical velocity is consistent with the classical $-5/3$ scaling law at different periods and heights, whereas white noise appears in the high-frequency region and intensifies with increasing height, especially above the boundary layer. Finally, the vertical turbulence of low-level jets (LLJs) observed by Doppler wind lidar is stronger below the jet height and weaker in and above the jet height.

Key words Wind lidar, DBS5, Quality control, Turbulence, Low-level jet

摘 要 为获取高精度的风廓线和湍流产品, 全面认识测风激光雷达应用潜力, 基于径向速度和信噪比, 开展了测风激光雷达 5 波束 (DBS5) 模式观测资料的质量控制算法研究。通过与铁塔上安装的三维超声风速仪观测资料对比, 评估了测风激光雷达 DBS5 模式获取的三维风速和湍流的探测性能。结果显示, 在 140 m 高度处, 测风激光雷达具有卓越的观测精度, 水平风速 (WS)、垂直速度 (w)、垂直速度标准差 (σ_w)、摩擦速度 (u_*) 和平均湍流强度 (TKE) 的均方根误差 (RMSE) 分别低至 0.4 m/s、0.1 m/s、0.1 m/s、0.1 m/s 和 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。此外, 还分析了时间尺度、观测仰角和空间尺度对雷达观测精度的影响。分析发现, 时间尺度的变

* 资助课题: 国家重点研发计划 (2023YFC3007805)、国家自然科学基金 (42330608)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目 (IUMKY202415)、北京市科技计划 (Z241100009124014)、中国气象局青年创新团队 (CMA2023QN10)、中国气象局重点创新团队 (CMA2022ZD09)、北京市气象局综合探测系统协同观测技术研发创新团队 (BMB2024ZD05)。

作者简介: 程志刚, 主要从事城市边界层气象观测与高影响天气研究工作。E-mail: zgcheng@ium.cn

通信作者: 权建农, 主要从事城市边界层气象与环境研究工作。E-mail: jnquan@ium.cn

化对其观测精度影响可以忽略不计,而观测仰角对TKE影响较大。空间尺度对 w 、 σ_w 和 u_* 影响较小,而对WS和TKE影响较大。研究北京晴空条件下的湍流廓线特征发现,不同时段、不同高度垂直速度功率谱均展现经典-5/3幂次律特征,但在高频区域存在白噪声,且白噪声随着探测高度的上升而增大,在边界层以上尤为显著。对低空急流的垂直湍流结构特征分析表明,低空急流期间伴有强烈的上升运动,且急流高度以下的湍流较强,急流高度及其以上的湍流大幅度减弱。研究为测风激光雷达在不同场景下的应用提供了基础支撑,揭示了北京晴空条件下的湍流廓线特征。

关键词 测风激光雷达, 5波束模式, 质量控制, 湍流, 低空急流

中图法分类号 P407

1 引言

大气风场和大气湍流影响大气动量、热量和物质的输送,在气象防灾减灾、风力发电、航空安全等领域有非常重要的作用(温斌荣等, 2022; 丁婕等, 2023; 谭方颖等, 2024)。测风激光雷达在大气风场探测方面具有测量精度高、时空分辨率高、响应速度快、便携性强、可三维扫描等特点,开展对其资料的质量控制(质控)算法和湍流探测性能研究可以加强测风激光雷达在上述领域中的应用(Bonin, et al, 2017; Oude Nijhuis, et al, 2018; Liu, et al, 2019; 范琪等, 2020; 陈晓敏等, 2023; 王倩倩等, 2023)。

测风激光雷达通过探测目标物(通常为气溶胶粒子)的多普勒频移获取径向风速,进而通过不同的扫描模式获取大气风场信息。常用的扫描模式有5波束(DBS5)、速度方位显示(VAD)等(Liu, et al, 2019; 储玉飞等, 2020; 王倩倩等, 2022)。与VAD模式相比, DBS5模式的扫描波束较少、时间分辨率更高、计算方法简单,故应用更广泛。程志刚等(2020)和李林等(2022)分别与铁塔、气球探空对比,研究发现测风激光雷达具有较高的测风精度。白寒冰等(2023)基于测风激光雷达研究了机场晴空风切变结构特征,在航空安全保障中发挥了重要作用。同时,测风激光雷达在雾霾、沙尘等天气过程分析中也发挥了重要作用(Li, et al, 2018; 孟赫等, 2024)。对测风激光雷达的观测性能和应用的研究已有很多,包括功率谱估计方法的研究(Rye, et al, 1997; Frehlich, 1999),但是对径向速度质量控制的研究较少。郝博胜等(2022)和刘秉义等(2022)对测风激光雷达径向速度做质控研究,但是此方法仅适用于VAD模式,不适用于DBS5模式。

表征大气湍流强度的参数有很多,最常用的有

平均湍流动能(TKE),也有学者以垂直速度标准差(σ_w)、湍流耗散率、摩擦速度(u_*)等表征大气湍流强度(Mann, et al, 2010; Huang, et al, 2017)。采用测风激光雷达可以开展大气湍流探测(Barlow, et al, 2011; Wang, et al, 2015)。Chan(2011)基于测风激光雷达开展对湍流耗散率的探测研究,并在机场得到广泛应用。Tucker等(2009)和Huang等(2017)将测风激光雷达获取的 σ_w 作为大气湍流强度,并以此反演了大气边界层高度(PBLH)。Manninen等(2018)基于测风激光雷达开展了大气湍流观测,识别出湍流的驱动源(浮力和风切变)。Mann等(2010)基于测风激光雷达开展大气动量通量观测,获得了较好的观测结果。也有学者利用3台测风激光雷达开展“虚拟铁塔”协同观测,获取大气湍流强度(Fuertes, et al, 2014; 程志刚等, 2020),并且其观测精度优于单台测风激光雷达获取的湍流强度(Choukulkar, et al, 2017)。虽然基于“虚拟铁塔”协同观测获取的大气湍流观测精度较高,但是对观测环境的要求比较苛刻,在建筑物密集的城市区域难以开展协同观测(程志刚等, 2020)。尽管基于测风激光雷达开展大气湍流的研究很多,但是测风激光雷达探测的风,在时间和空间尺度上与三维超声风速仪探测的风是不同的,其在探测原理上存在一定的误差(Brugger, et al, 2016; 程志刚等, 2020)。

测风激光雷达可用于大气风场和大气湍流观测,但是目前对于测风激光雷达DBS5模式的资料质量控制流程以及湍流探测误差的研究较少。拟从径向速度开始,逐级开展测风激光雷达DBS5模式的资料质量控制研究,获取高质量的平均风廓线和湍流产品;并与三维超声风速仪测风结果对比分析,开展测风激光雷达三维风速和湍流探测性能研究;通过典型个例分析,开展北京晴空大气湍流廓线变化特征研究。

2 观测和方法

2.1 观测介绍

本研究主要在北京城市气象研究院(IUM)和中国科学院大气物理研究所铁塔(IAP, 大气所铁塔)开展观测试验(图 1a), 所使用的观测设备有: (1)两台型号相同的测风激光雷达, 生产厂家为青岛华航环境科技有限责任公司, 型号为 WindPrint S4000, 两台雷达分别标识为 BDH 和 BDJ, 雷达波长、脉冲宽度等信息见表 1。观测期间, 雷达的脉冲宽度均设为 250 ns, 对应的径向分辨率为 30 m, 如无特殊说明, DBS5 模式的仰角设为 60° 。(2)大气所铁塔高度为 325 m, 在 80、140、200 和 280 m 安装有湍流通量观测设备。湍流通量的观测设备为三维超声风速仪(型号: WindMaster, 生产厂家: 英国 Gill 公司), 开展 10 Hz 频率的三维风速观测, 后期利用 Eddypro 软件处理成 30 min 平均的风速和湍流动能等(Cheng, et al, 2021)。已有研究(McCaffrey, et al, 2017)发现铁塔上的三维超声风速仪观测受铁塔自身的影响, 在本研究中同样发现铁塔对三维超声风速仪观测有影响(图略)。大气所铁塔上的三维超声风速仪的支臂位于铁塔北偏

东约 30° , 为了剔除铁塔塔身的影响, 本研究剔除了 190° — 230° 风向范围的数据。除了上述观测设备以外, 还用到了南郊观象台(NJ)的气球探空和欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料, 气球施放频次为 1 天 4 次(02、08、14、20 时, 北京时, 下同)。

为了开展多普勒测风激光雷达资料质量控制和湍流探测性能研究, 本研究开展了多个观测试验(表 2 和图 1a)。E1 期间, BDH 与大气所铁塔开展对比观测, 观测地点位于 IAP, 将雷达置于铁塔西北侧 50 m 处, 观测模式设为 DBS5(图 1b), 主要用于开展雷达资料质量控制和湍流探测性能研究。E2 与 E1 类似, BDH 与大气所铁塔开展对比观测, 但是将雷达的观测模式设为垂直 LOS10Hz 模式(图 1c, 垂直指向天顶, 径向观测频率设为 10 Hz), 主要用于验证垂直 LOS10Hz 模式下湍流的探测性能。E3 期间, BDH 和 BDJ 开展对比观测, 观测地点位于 IUM, BDH 的观测模式设为 DBS5, BDJ 的观测模式设为垂直 LOS10Hz, 两台雷达相距 2 m 左右, 主要用于验证 DBS5 和垂直 LOS10Hz 模式下湍流探测性能的一致性。E2 和 E3 是为了研究不同时间尺度对大气湍流探测性能的影响。E4—E13

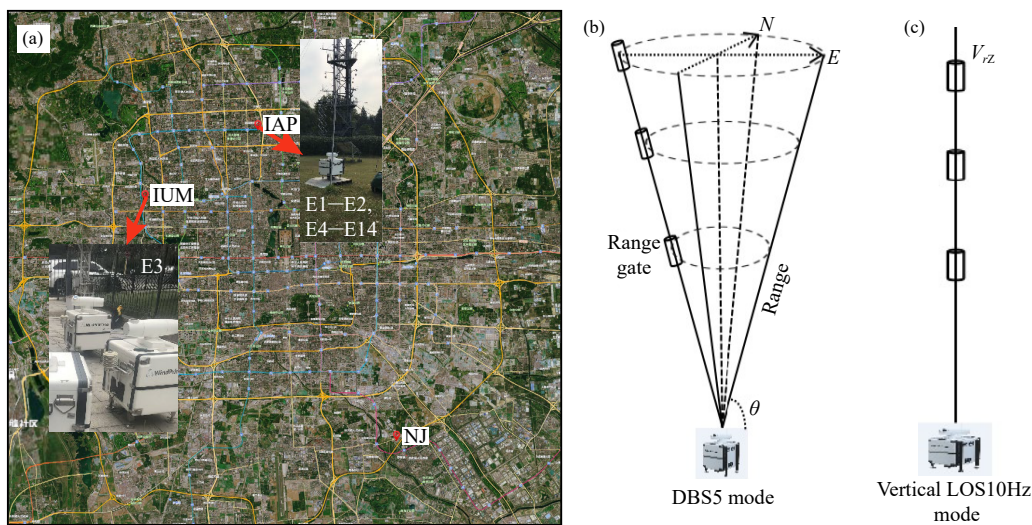


图 1 (a) 开展观测试验的站点分布及观测现场照片(地图为天地地图影像; 其中 IUM、IAP 和 NJ 分别为北京城市气象研究院、大气所铁塔、南郊观象台; E1—E14 为本研究所开展的观测试验, 详见表 2); (b) 和 (c) 分别是测风激光雷达 DBS5 模式和垂直 LOS10Hz 模式的示意

Fig. 1 (a) Distribution of observation sites and photos used in this article (the map is Ovi World map image; IUM, IAP, and NJ are respectively the Institute of Urban Meteorology, Institute of Atmospheric Physics tower, and Beijing basic meteorological observation station; E1—E14 are the observation experiments conducted in this study; see Table 2 for details); (b) and (c) are schematic diagrams of DBS5 mode and vertical LOS10Hz mode of Doppler wind lidar, respectively

表1 WindPrint S4000 型多普勒测风激光雷达的性能参数

Table 1 Parameters of WindPrint S4000

指标项	指标性能
激光波长	1550 nm
脉冲宽度	100—400 ns(可调)
单脉冲能量	>100 μ J
径向数据更新速率	1—10 Hz(可调)
风速测量范围	0—75 m/s
径向风速测量精度	< \pm 0.1 m/s
径向探测距离	60—4000 m
径向距离分辨率	15 m/30 m/60 m(可调)
扫描伺服精度	\pm 0.1 $^\circ$
功耗	<500 W
输出产品	径向速度、信噪比(SNR)、水平风向、水平风速、垂直速度
质量	95 kg

表2 观测试验

Table 2 Observation experiments

试验名称	观测时段(年.月.日)	观测地点	测风激光雷达: 观测模式
E1	2019.08.17—2019.12.12	IAP	BDH; DBS5
E2	2022.10.12—2022.10.24	IAP	BDH; LOS10Hz
E3	2019.06.28—2019.07.28	IUM	BDH; DBS5; BDJ; LOS10Hz
E4	2023.11.20—2023.11.29	IAP	BDH; DBS5(仰角: 40 $^\circ$)
E5	2023.11.11—2023.11.20		BDH; DBS5(仰角: 45 $^\circ$)
E6	2023.11.05—2023.11.11		BDH; DBS5(仰角: 50 $^\circ$)
E7	2023.10.30—2023.11.05		BDH; DBS5(仰角: 55 $^\circ$)
E8	2020.08.25—2020.09.02		BDH; DBS5(仰角: 60 $^\circ$)
E9	2023.10.15—2023.10.30		BDH; DBS5(仰角: 65 $^\circ$)
E10	2023.10.07—2023.10.15		BDH; DBS5(仰角: 70 $^\circ$)
E11	2023.09.05—2023.09.15		BDH; DBS5(仰角: 75 $^\circ$)
E12	2023.09.24—2023.10.07		BDH; DBS5(仰角: 80 $^\circ$)
E13	2023.09.15—2023.09.24		BDH; DBS5(仰角: 85 $^\circ$)
E14	2020.04.08—2020.07.03	IAP	BDH; DBS5

与 E1 类似,但是雷达 DBS5 模式设置的仰角不同 (40 $^\circ$ —85 $^\circ$, 间隔 5 $^\circ$), 主要是为了研究不同仰角和空间尺度对大气湍流探测性能的影响。在 E1、E2、E4—E13 中, 仅使用了大气所铁塔 140 m 高度处的观测资料。在 E14 中, 使用了 80、140、200 和 280 m 这 4 层的观测资料, 用于研究相同仰角下不同空间尺度对大气湍流探测性能的影响。

2.2 三维风速的计算及误差分析

DBS5 探测模式的前提是假设风场水平均匀, 根据图 1b, 不同波束的径向速度与三维风速 (u 、 v 、 w) 的关系为

$$V_{rE} = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (1)$$

$$V_{rW} = -u \cos \theta + w \sin \theta \quad (2)$$

$$V_{rN} = v \cos \theta + w \sin \theta \quad (3)$$

$$V_{rS} = -v \cos \theta + w \sin \theta \quad (4)$$

$$V_{rZ} = w \quad (5)$$

式中, V_r 为径向速度, 远离雷达为正, 指向雷达为负, 下标 E、W、N、S、Z 分别为东、西、北、南、垂直波束, θ 为雷达仰角。式(1)(式(3))减去式(2)(式(4)), 则三维风速的计算公式为

$$u = (V_{rE} - V_{rW}) / (2\cos\theta) \quad (6)$$

$$v = (V_{rN} - V_{rS}) / (2\cos\theta) \quad (7)$$

$$w = V_{rZ} \quad (8)$$

由式(6)–(8)可知,水平风速的误差(ε_u 和 ε_v)主要与径向风速误差(ε_{V_r})和仰角误差(ε_θ)有关,垂直速度的误差(ε_w)主要与 ε_{V_r} 有关。由于误差有可能会变量增大或减小,因此以 $\pm\varepsilon_u$ 表示纬向风的误差。将相关误差代入式(1)–(5),有

$$V_{rE} \pm \varepsilon_{V_r} = (u \pm \varepsilon_u)\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) + (w \pm \varepsilon_w)\sin(\theta \pm \varepsilon_\theta) \quad (9)$$

$$V_{rW} \pm \varepsilon_{V_r} = -(u \pm \varepsilon_u)\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) + (w \pm \varepsilon_w)\sin(\theta \pm \varepsilon_\theta) \quad (10)$$

$$V_{rN} \pm \varepsilon_{V_r} = (v \pm \varepsilon_v)\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) + (w \pm \varepsilon_w)\sin(\theta \pm \varepsilon_\theta) \quad (11)$$

$$V_{rS} \pm \varepsilon_{V_r} = -(v \pm \varepsilon_v)\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) + (w \pm \varepsilon_w)\sin(\theta \pm \varepsilon_\theta) \quad (12)$$

$$V_{rZ} \pm \varepsilon_{V_r} = w \pm \varepsilon_w \quad (13)$$

式(9)减式(10),有

$$V_{rE} - V_{rW} \pm 2\varepsilon_{V_r} = 2u\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) \pm 2\varepsilon_u\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta) \pm 2\varepsilon_w\sin(\theta \pm \varepsilon_\theta) \quad (14)$$

式中, $\varepsilon_w = \varepsilon_{V_r}$,则 u 风的误差为

$$\pm\varepsilon_u = \left(\frac{\cos\theta}{\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta)} - 1 \right) u \pm \frac{1 + \sin(\theta \pm \varepsilon_\theta)}{\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta)} \varepsilon_{V_r} \quad (15)$$

同理, v 风的误差为

$$\pm\varepsilon_v = \left(\frac{\cos\theta}{\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta)} - 1 \right) v \pm \frac{1 + \sin(\theta \pm \varepsilon_\theta)}{\cos(\theta \pm \varepsilon_\theta)} \varepsilon_{V_r} \quad (16)$$

由表1可知, ε_{V_r} 为0.1 m/s, ε_θ 为0.1°。式(15)和(16)等号后边第一项(S1)与风速和仰角有关,右边第二项(S2)只与仰角有关。S1和S2随着雷达仰角的增大而增大(图2),在较大(20 m/s)风速的情况下,S1是S2的1/6左右。因此,当风速不大时,S1比S2通常小1个数量级,可以忽略不计。

由于垂直速度(w)直接由垂直波束的径向速度获取,其误差 $\pm\varepsilon_w$ 与径向速度误差一致(式(13)),为 ± 0.1 m/s。

3 测风激光雷达资料质量控制研究

测风激光雷达观测资料的质量控制流程主要包括3步:径向速度质量控制、径向速度计算风廓线、计算平均风廓线和湍流产品3个方面(图3)。

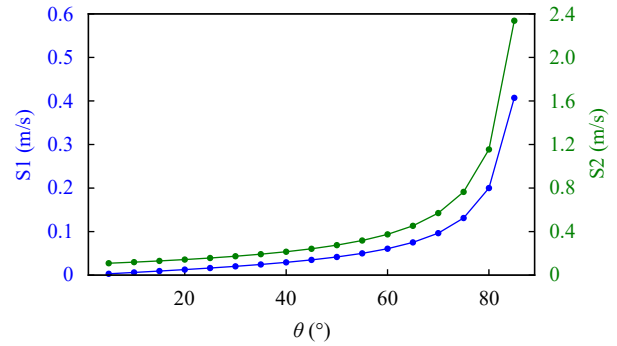


图2 水平风速误差随仰角的变化(S1和S2分别是式(15)和(16)中等号右边的第1项和第2项;其中S1是在20 m/s风速情况下的结果,S1和S2的 $\pm\varepsilon_\theta$ 取 $+0.1^\circ$)

Fig. 2 Variation of horizontal wind speed error with elevation (S1 and S2 are the first and second terms on the right side of the formulas (15)–(16); S1 is the result when the wind speed is 20 m/s, and the value of $\pm\varepsilon_\theta$ in S1 and S2 is $+0.1^\circ$)

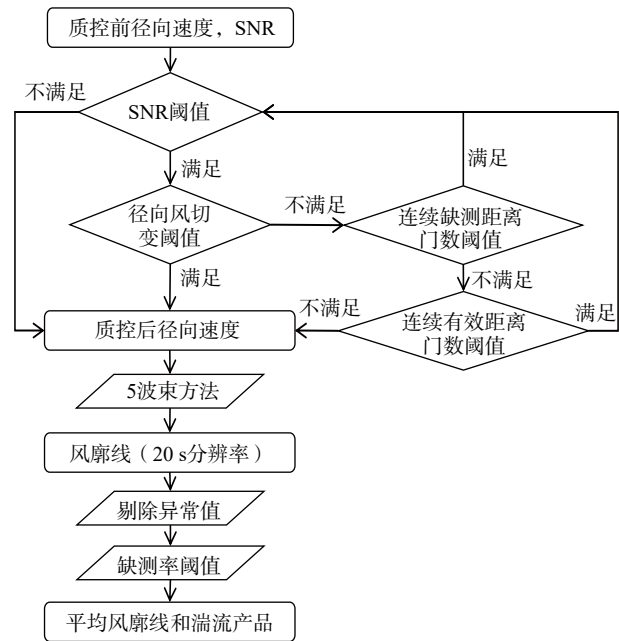


图3 测风激光雷达资料质量控制流程

Fig. 3 Flow chart of data quality control for wind lidar

3.1 径向速度质量控制

信噪比(SNR)是评估测风激光雷达观测质量的重要指标。图4为径向速度与SNR的关系。当SNR较大时,雷达获取的径向速度观测质量较好;当SNR较小时,径向速度的随机扰动变大,观测质量变差。为了确定SNR阈值,计算了不同SNR下的径向速度标准差($\sigma_{V_r,SNR}$)。文中选取 $\sigma_{V_r,SNR}$ 变化最快处的SNR作为SNR阈值,既不会丢失太多有

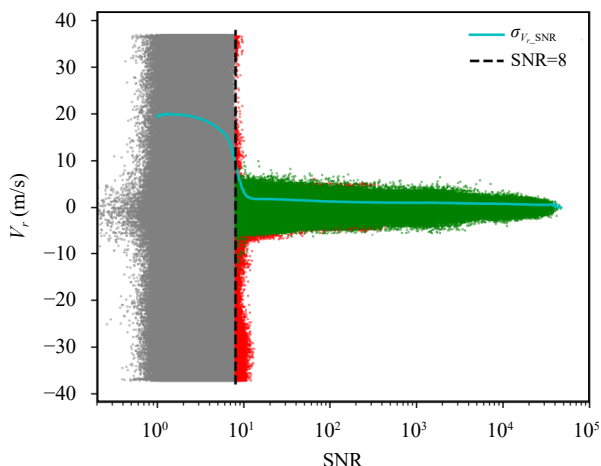


图4 径向速度与SNR关系的散点图(灰点为SNR阈值质控剔除的数据,红点为径向风切变阈值和连续缺测距离门数阈值质控剔除的数据,绿点为质控后的有效数据;青色实线为不同SNR下的径向速度标准差($\sigma_{V_r, SNR}$),黑色虚线为SNR=8的线)

Fig. 4 Relationship between radial velocity and SNR (gray dots are excluded data by SNR threshold quality control; red dots are excluded data by quality control of radial wind shear threshold and maximum missing gate threshold; green dots are effective data after quality control; the cyan solid line is the standard deviation of radial velocity under different SNR; the black dashed line is the line with SNR equals to 8)

效数据而降低雷达有效探测距离,也会剔除大部分无效数据以便于后续的数据处理。

但是仅以SNR阈值质控的话,一些无效数据未被剔除(图4中的红点)。大气风场是连续变量,径向风速廓线同样是连续变量,因此可以利用径向风切变阈值做进一步质控。DBS5模式中,斜波束和垂直波束探测的径向速度在量级上有一定差异,因此应分别确定斜波束和垂直波束的径向风切变阈值。

当径向风切变大于径向风切变阈值时,不满足质控条件,则需检测连续缺测的距离门数。当连续缺测的距离门数较大时,大气中实际的径向风切变可能较大,不能以径向风切变阈值进行质控。因此,需确定合适的连续缺测距离门数阈值。当连续缺测距离门数低于阈值时,满足质控条件,继续进行SNR阈值和径向风切变阈值质控;当连续缺测距离门数高于阈值时,不满足质控条件,只进行SNR阈值质控,当连续满足SNR阈值质控的距离门数达到连续有效距离门数阈值时,再进行SNR阈值和径向风切变阈值质控;当连续满足SNR阈值质

控的距离门数小于连续有效距离门数阈值时,数据定义为缺测。

综上,径向速度质量控制需确定多个阈值。通过不同阈值参数的敏感性分析(图略),文中SNR阈值取8,斜(垂直)波束径向风切变阈值取5 m/s每30 m(2 m/s每30 m),连续缺测距离门数阈值和连续有效距离门数均设为5。文中径向分辨率为30 m,则5个距离门的距离为150 m。

3.2 质控后径向速度计算风廓线

DBS5模式中,径向速度计算风廓线一般采用5波束方法(式(1)–(5))。其中,垂直速度除了从垂直波束获取外,还可以基于4个斜波束获取(式(1)–(4)相加)

$$w = (V_{rE} + V_{rW} + V_{rN} + V_{rS}) / (4\sin\theta) \quad (17)$$

本研究将两种方法计算的平均 w 和 σ_w 与三维超声风速仪进行对比(图略)。垂直波束和斜波束获取的平均 w 与三维超声风速仪的对比结果为:相关系数(R)分别为0.77和0.76,平均偏差(ME)分别为-0.03和-0.01 m/s,绝对偏差(MAE)均为0.11 m/s,均方根误差(RMSE)分别为0.18和0.17 m/s;垂直波束和斜波束获取的 σ_w 与三维超声风速仪的对比结果为: R 分别为0.98和0.97,ME分别为0.04和-0.12 m/s,MAE分别为0.08和0.12 m/s, RMSE均为0.11 m/s。结果表明,两种方法计算的 w 的精度基本相当,但是基于斜波束计算的 σ_w 比三维超声风速仪的偏低,这主要是由于基于斜波束获取的垂直速度表征的是空间平均的垂直速度,降低了其扰动。因此,文中直接利用垂直波束的径向速度作为垂直速度,并且基于垂直波束获取垂直速度的探测高度比基于斜波束获取垂直速度的探测高度高约28%(图略)。

DBS5模式中,每个波束的时间间隔为3–5 s,扫描5个波束耗时约20 s。利用径向速度计算风廓线时,除了利用每5个波束,获取20 s时间分辨率的风廓线外,也可以利用当前波束和前面4个波束进行滑动计算,获取3–5 s时间分辨率的风廓线。两种分辨率的风廓线计算的30 min平均的风廓线和湍流基本一致,但是滑动计算的风廓线在高频段的功率谱有间隙(图略)。Kumer等(2016)研究表明,这种谱间隙可能与滑动计算有关。因此,文中利用每5个波束获取20 s时间分辨率的风廓线。

3.3 平均风廓线和湍流产品

由径向速度计算风廓线(时间分辨率: 20 s)后, 一般需要对风廓线进行时间平均获取平均风廓线产品, 同时可以计算湍流参数。基于三维风速可以计算多种湍流参数产品, 根据 Stull(1988), 计算 3 种常用的湍流参数产品: σ_w 、 u_* 、TKE, 其计算公式为

$$A' = A - \bar{A} \quad (18)$$

$$\sigma_w = (\overline{w'^2})^{1/2} \quad (19)$$

$$u_* = \left[(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2 \right]^{1/4} \quad (20)$$

$$\text{TKE} = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (21)$$

式中, A 代表变量 u 、 v 、 w 等, “ $-$ ” 表征平均量, 带 “ $'$ ” 的变量为其脉动量。在计算平均风廓线和湍流产品时, 需要剔除异常值, 并剔除缺测率较大的时段。根据以往的经验, 将异常值的标准定义为超过 3.5 倍标准差的值, 并将缺测率大于 10% 的时段予以剔除。文中平均风廓线和湍流产品为 30 min 平均的结果。

4 测风激光雷达探测性能分析

经过上述质控后, 雷达探测高度 150 m 最接近大气所铁塔湍流观测高度 140 m, 将 E1 期间雷达观测结果与三维超声风速仪观测结果进行对比分析(图 5)。图 5 给出了测风激光雷达与三维超声风速仪对比的不同变量的 R 、ME、MAE 和 RMSE。从三维风速的对比结果来看, 水平风速(Ws)的相关较强, R 达到 0.989, RMSE 为 0.4 m/s; w 的相关较弱, R 为 0.713, RMSE 为 0.1 m/s。从湍流强度的对比结果来看, 除了 u_* 的 R 为 0.869 外, 其余湍流强度的 R 均超过 0.9; 误差对比结果表明, 除了 TKE 的 RMSE 为 0.5 m^2/s^2 外, 其余湍流强度的 RMSE 均不超过 0.2 m/s。从归一化的散点密度可以看出, 测风激光雷达观测与三维超声风速仪观测主要集中在 1:1 线附近。

通过与铁塔上三维超声风速仪对比, 测风激光雷达 DBS5 模式探测的三维风和湍流具有较高的探测精度。但是在铁塔高度以上, 没有三维超声风速仪的观测, 无法开展湍流的直接对比观测。测风激

光雷达 DBS5 模式在时间尺度和空间尺度上与三维超声风速仪存在较大差异, 并且随着探测高度的升高, 雷达观测的空间尺度随之增大(图 1b)。本研究从时间尺度和空间尺度两方面研究测风激光雷达的观测精度, 以评估测风激光雷达在铁塔高度以上的探测性能。

4.1 时间尺度对雷达探测性能的影响

测风激光雷达 DBS5 模式、垂直 LOS10Hz 模式和三维超声风速仪获取的风的时间分辨率分别为 20、0.1、0.1 s。由于测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式只能获取 w (图 1c), 因此仅对比了 w 和 σ_w 的探测性能。E3 开展了测风激光雷达 DBS5 模式和垂直 LOS10Hz 模式的对比观测, 结果表明两种观测模式获取的 w 和 σ_w 具有很好的一致性(图 6a、b)。E2 开展了测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式与三维超声风速仪的对比观测, 结果表明垂直 LOS10Hz 模式获取的 w 和 σ_w 与三维超声风速仪的观测有很高的一致性(图 6c、d)。E1—E3 的对比结果表明, 测风激光雷达 DBS5 模式和垂直 LOS10Hz 模式、三维超声风速仪相比, 虽然时间分辨率不同, 但是其探测的 w 和 σ_w 是一致的。

从 E1 和 E2 中选取稳定层结和不稳定层结开展垂直速度功率谱分析, 研究测风激光雷达 DBS5 模式和垂直 LOS10Hz 模式获取的湍流结构特征。从功率谱分析结果(图 7)来看, DBS5 模式仅能捕获 0.025 Hz 以及更低频的湍流, 而且其捕获的低频尺度结构与三维超声风速仪是一致的。其中 DBS5 模式的功率谱密度比三维超声风速仪的偏高是合理的, 这主要是由于 w 的功率谱密度之和为垂直速度方差(σ_w^2), DBS5 模式与三维超声风速仪的 σ_w 基本一致, 而 DBS5 模式无法捕获高频的湍流, 基于能量守恒的原理, DBS5 模式在低频尺度的功率谱密度偏高。图 7c、d 表明, 测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式与三维超声风速仪一样, 均可以捕获 5 Hz 以及更低频的湍流。其捕获的低频尺度湍流的功率谱密度与三维超声风速仪基本一致, 在惯性子区也满足 $-5/3$ 幂次律。但是在高频区域, 垂直 LOS10Hz 模式的功率谱密度不随频率变化, 为白噪声, 说明其难以捕获高频尺度的湍流, 这是因为测风激光雷达获取的是径向距离门平均的径向风, 存在一定的空间尺度。

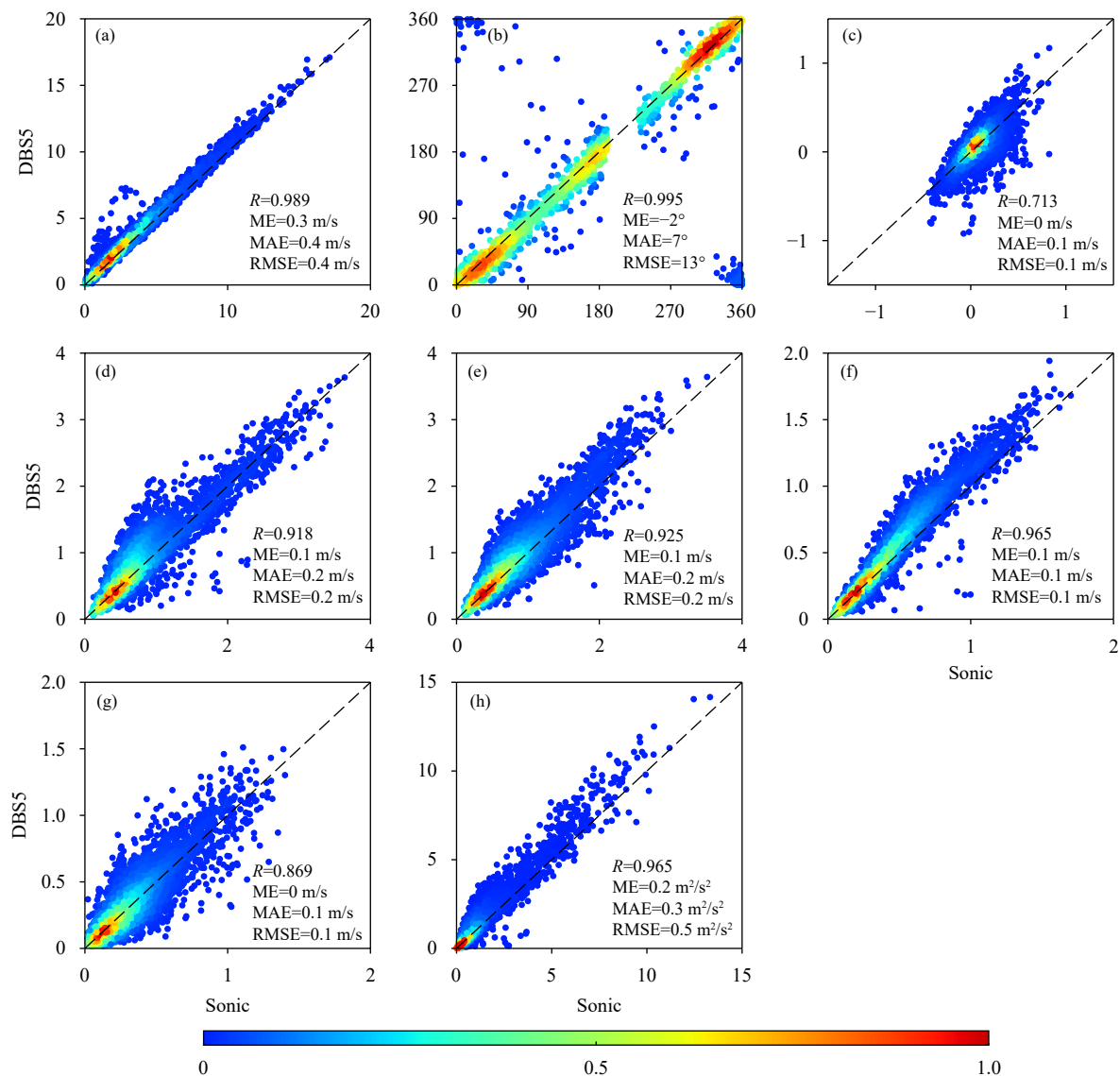


图 5 E1 期间, 测风激光雷达 DBS5 模式与三维超声风速仪 (Sonic) 的对比结果 (a-h 分别是水平风速 (WS, 单位: m/s), 水平风向 (WD, 单位: °), 垂直速度 (w , 单位: m/s), 纬向风标准差 (σ_u , 单位: m/s), 经向风标准差 (σ_v , 单位: m/s), 垂直速度标准差 (σ_w , 单位: m/s), 摩擦速度 (u_* , 单位: m/s) 和平均湍流动能 (TKE, 单位: m^2/s^2); 黑色虚线为 1:1 线, 色阶为归一化的散点密度)

Fig. 5 Comparison of wind lidar DBS5 mode and three-dimensional ultrasonic anemometer (Sonic) during E1 (Figs. a-h are horizontal wind speed (WS, unit: m/s), horizontal wind direction (WD, unit: °), vertical velocity (w , unit: m/s), standard deviation of u -wind (σ_u , unit: m/s), standard deviation of v -wind (σ_v , unit: m/s), standard deviation of vertical velocity (σ_w , unit: m/s), frictional velocity (u_* , unit: m/s) and average turbulent kinetic energy (TKE, unit: m^2/s^2), respectively; the black dotted line is a 1:1 line; color shadings show the normalized scatter density)

为了探讨时间分辨率对湍流强度的影响, 基于 E1 期间大气所铁塔 140 m 高度处三维超声风速仪的观测, 利用跳点降频方法对 w 进行降频, 获取降频后的 σ_w 并计算其误差 ε_{σ_w} 。 ε_{σ_w} 的计算公式为

$$\varepsilon_{\sigma_w} = \frac{\sigma_{w,\text{res}} - \sigma_{w,0.1\text{s}}}{\sigma_{w,0.1\text{s}}} \quad (22)$$

式中, res 指不同的时间分辨率, 如 0.1、1、10、

20 s 等。值得注意的是, 此处计算的误差 ε_{σ_w} 是不同时间分辨率造成垂直速度标准差的理想误差。研究结果 (图 8) 表明, 当观测频率降低时, ε_{σ_w} 越来越离散。若以误差的 10% 和 90% 分位数确定其误差上、下限的话, 当时间分辨率降为 20 s 时, ε_{σ_w} 在 $\pm 5\%$ 左右, 与图 5f 的结果相当。类似地, ε_{σ_u} 、 ε_{σ_v} 的理想误差均为 $\pm 2.5\%$ (图略), 小于其实际观测误差

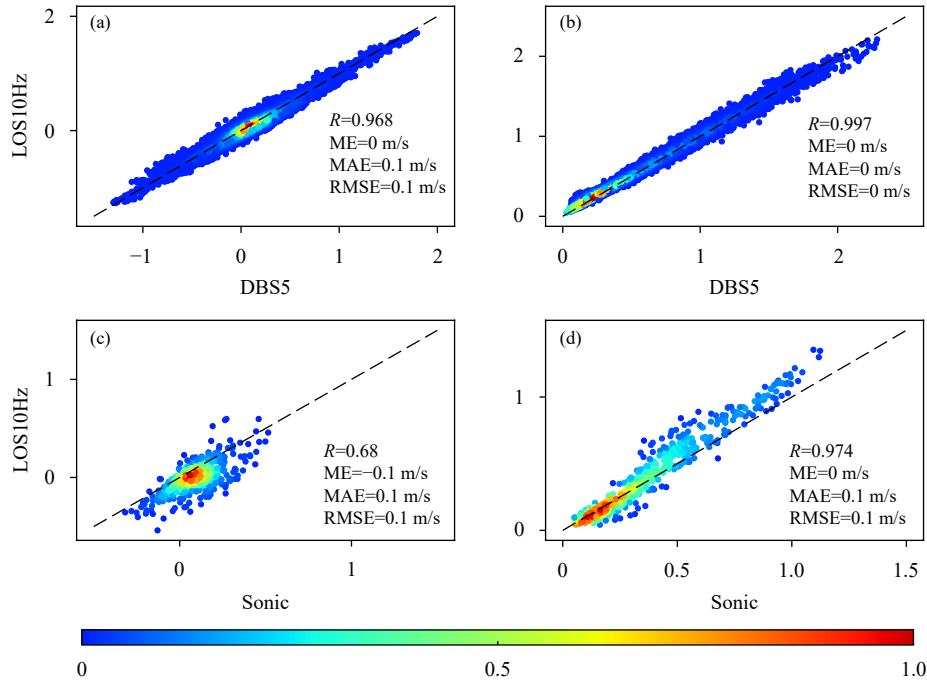


图6 (a、b) E3期间,测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式和 DBS5 模式的平均 w (a) 和 σ_w (b) 的对比结果; (c、d) E2 期间,测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式和三维超声风速仪(Sonic)的平均 w (c) 和 σ_w (d) 的对比结果(单位: m/s)

Fig. 6 (a, b) the comparison results of averaged w (a) and σ_w (b) of wind lidar vertical LOS10Hz mode and DBS5 mode during E3; (c, d) the comparison results of averaged w (c) and σ_w (d) of wind lidar vertical LOS10Hz mode and three-dimensional ultrasonic anemometer (Sonic) during E2 (unit: m/s)

(图 5d、e)。

上述对比结果表明,低频的 DBS5 模式(时间分辨率 20 s)只能捕获低频尺度的湍流(含能涡区湍流),无法捕获高频尺度的湍流(惯性子区和耗散区湍流)。因此, DBS5 模式的观测资料无法用于研究能量串级等微尺度特征,但是当研究湍流强度或能量特征时,时间尺度对测风激光雷达 DBS5 模式探测结果的影响较小。

4.2 空间尺度对雷达探测性能的影响

测风激光雷达 DBS5 模式探测的空间尺度与仰角和探测高度有关(图 1b)。E4—E13 获取了不同仰角 DBS5 模式与三维超声风速仪的对比观测。对比结果表明(图 9),仰角对水平风、 w 、 σ_w 、 u_w 等的观测精度影响不大,但是对水平风速标准差和 TKE 的影响较大。当仰角较大时, σ_u 、 σ_v 和 TKE 的 ME、MAE、RMSE 随仰角的增大而迅速增大。这与图 2 中水平风速理论误差的结果是一致的。而仰角对平均水平风速的影响较小,主要是由于仰角对水平风速的影响有正贡献和负贡献,时间平均后,正、负贡献相互抵消,但是其扰动会变大(对水

平风速标准差和 TKE 的影响),这也是水平风速标准差的实际观测误差(图 5d、e)高于其理想误差($\pm 2.5\%$)的原因。文中垂直速度直接由垂直波束获取,因此仰角对 w 和 σ_w 的影响不大。

E14 开展了 60° 仰角下测风激光雷达 DBS5 模式与大气所铁塔不同高度(80、140、200、280 m)三维超声风速仪的对比观测(图 10)。对比结果表明,随着探测高度的升高, WS 的 R 先增大后减小, ME 有所降低, MAE 先降低后升高, RMSE 增大,这可能是风场水平均匀性和雷达探测水平尺度共同作用的结果。在近地面层,随着探测高度的升高,风场受地面摩擦的影响减小,风场水平均匀性增强,但是测风激光雷达 DBS5 模式探测的水平尺度也增大。 w 和 σ_w 的观测精度受观测高度的影响较小,这主要是由于文中的 w 由垂直波束直接获取,在不同高度上探测的空间尺度是一致的。随着探测高度的升高, σ_u 、 σ_v 和 TKE 的相关降低, MAE 和 RMSE 均增大,说明随着探测的空间尺度增大,测风激光雷达的水平风扰动的探测精度有所降低,这也与近地面层风场水平均匀性较差有关。探测高

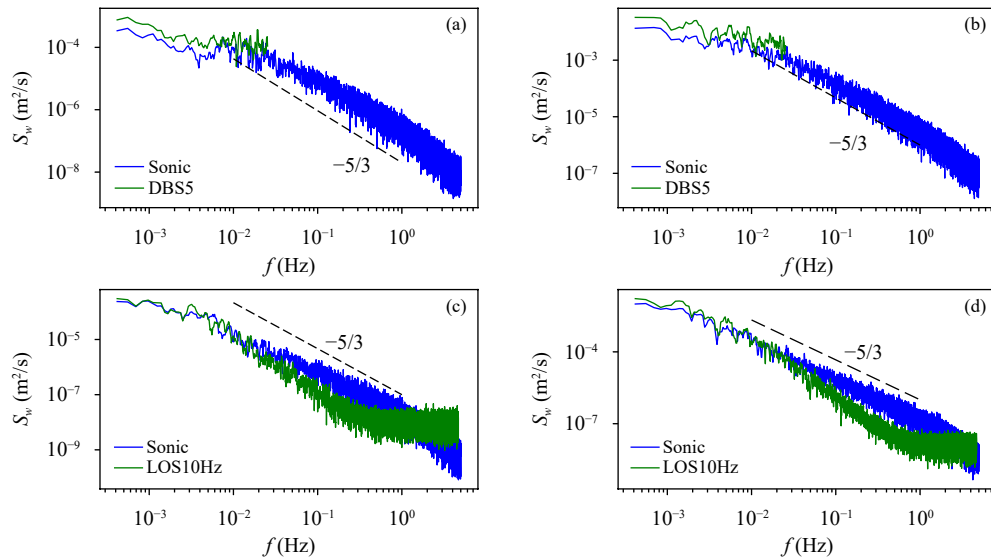


图7 稳定层结 (a, c) 和不稳定层结 (b, d) 下, 垂直速度功率谱 (S_w) 的对比 (a, b 为测风激光雷达 DBS5 模式和三维超声风速仪的对比结果, 对比时段分别为 2019 年 10 月 3 日 02—04 时、2019 年 10 月 25 日 12—14 时; c, d 为测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式与三维超声风速仪 (Sonic) 的对比, 对比时段分别为 2022 年 10 月 20 日 03—05 时、2022 年 10 月 13 日 11—13 时; 虚线为 $-5/3$ 斜率线)

Fig. 7 Comparative analysis of vertical velocity power spectra (S_w) under stable (a, c) and unstable (b, d) stratification (Figs. a and b are the comparison of wind lidar DBS5 mode and three-dimensional ultrasonic anemometer, and the comparison periods are 02:00—04:00 BT 3 October and 12:00—14:00 BT 25 October 2019, respectively; Figs. c and d are the comparison of wind lidar vertical LOS10Hz mode and three-dimensional ultrasonic anemometer (Sonic), and the comparison periods are 03:00—05:00 BT 20 October and 11:00—13:00 BT 13 October 2022, respectively; the dashed line is the $-5/3$ slope line)

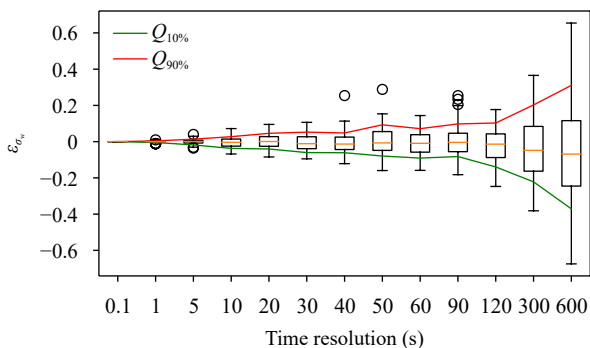


图8 不同时间分辨率下的垂直速度标准差的理想误差箱线图 (其中, 黄色横线为中位数, 箱体上下限为 75% 和 25% 分位数 (Q3 和 Q1), 上下须分别为 $Q3+1.5(Q3-Q1)$ 和 $Q1-1.5(Q3-Q1)$, 圆圈为超过上下须的值, 黄色和红色实线分别为 10% 和 90% 分位数, 所用资料为 E1 期间大气所铁塔 140 m 高度处的三维超声风速仪)

Fig. 8 Box plot of ideal errors of vertical velocity standard deviations at different temporal resolutions (the yellow horizontal line is the median, the upper and lower limits of the box are the 75% and 25% quantiles (Q3 and Q1), the upper and lower whiskers are $Q3+1.5(Q3-Q1)$ and $Q1-1.5(Q3-Q1)$, and the circles are the values exceeding the upper and lower whiskers; the yellow and red solid lines are the 10% and 90% quantiles, respectively; the data used are the three-dimensional ultrasonic anemometer at the altitude of 140 m during E1)

度对 u_* 的影响不大。

根据图 1b, DBS5 模式探测的水平尺度 (s) 与探测高度 (h) 和仰角 (θ) 的关系为

$$s = 2h/\tan\theta \quad (23)$$

当仰角为 60° 时, $s=1.15h$ 。图 11 为不同仰角下 140 m 高度处的水平尺度和 60° 仰角下不同高度处的水平尺度。由图可知, 60° 仰角下 80、140、200、280 m 高度处的水平尺度分别与 70° 、 60° 、 50° 、 40° 仰角下 140 m 高度处的水平尺度相当, 分别为 95、161.7、230、330 m 左右。其中, 仅 70° 仰角 TKE 受仰角误差的影响而偏差较大, 其余相同水平尺度的三维风速和湍流观测误差基本一致。

上述对比结果表明, 测风激光雷达 DBS5 模式下, 仰角对 WS 的观测误差影响较小, 但是对水平风速标准差的影响较大, 进而影响 TKE 的观测误差。测风激光雷达 DBS5 模式探测的水平尺度与探测高度和仰角有关, 分别固定探测高度 (E4—E13)、固定仰角 (E14), 从两方面研究水平尺度对测风激光雷达 DBS5 模式探测结果的影响。研究表明, 随着水平尺度的增大, WS 和 TKE 的观测

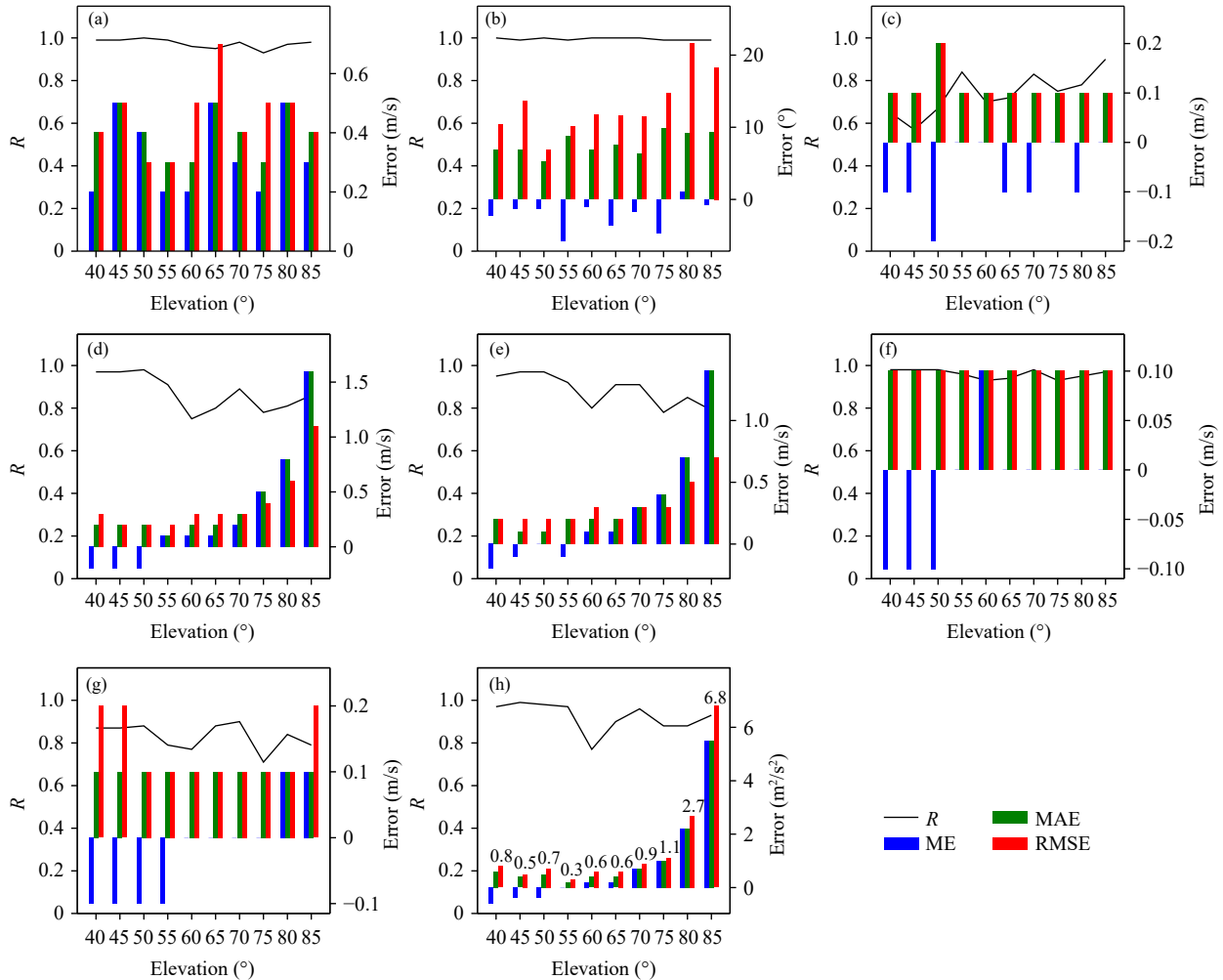


图9 E4—E13期间,不同仰角下测风激光雷达DBS5模式与大气所铁塔140 m高度处三维超声风速仪的不同变量对比的相关系数和偏差(a—h分别是WS、WD、 w 、 σ_w 、 σ_v 、 σ_w 、 u_* 、TKE;h中的数值为TKE的RMSE)

Fig. 9 Correlation coefficients and errors between wind lidar DBS5 mode at different elevations and three-dimensional ultrasonic anemometer mounted at 140 m during E4—E13 (Figs. a—h are WS, WD, w , σ_w , σ_v , σ_w , u_* and TKE, respectively; values in Fig. h are RMSEs of TKE)

误差有所增大, w 、 σ_w 、 u_* 的观测误差基本不变。因此,当研究铁塔高度以上的湍流问题时,尽量采用 σ_w 或 u_* 作为大气湍流强度。其中,WS的观测误差随水平尺度的增大而增大,这与雷达和气球探空的对比结果是一致的(李林等,2022)。

5 北京晴空大气湍流廓线变化特征

受太阳辐射加热的影响,大气湍流存在显著的日变化。本研究利用E3中的典型个例,研究了北京晴空大气湍流廓线日变化特征(图12)。从风场特征来看,12日凌晨和上午,低层为偏北风,中午以后为偏南风,为典型的山谷风特征。白天的垂直气

流为上升和下沉交替出现,为典型的热泡结构。从湍流强度来看,大气湍流存在显著的日变化:白天强、夜间弱。根据Huang等(2017)的方法,基于 σ_w 识别了PBLH,具体识别方法为:在白天,选取 $\sigma_w=0.316$ m/s ($\sigma_w^2=0.1$ m²/s²)为阈值,将 σ_w 降低到阈值的高度定为PBLH;在夜间,选取 $f(\sigma_{w_{\max}} - \sigma_{w_B}) + \sigma_{w_B}$ 为阈值,其中 $\sigma_{w_{\max}}$ 为近地面层 σ_w 的最大值, σ_{w_B} 为 σ_w 的背景值,文中以 σ_w 的最小值为背景值, f 为系数,取0.316。研究表明,基于 σ_w 识别的PBLH与南郊观象台的探空位温曲线有较好的一致性。

选取不同时段、不同高度的 w 开展功率谱分析

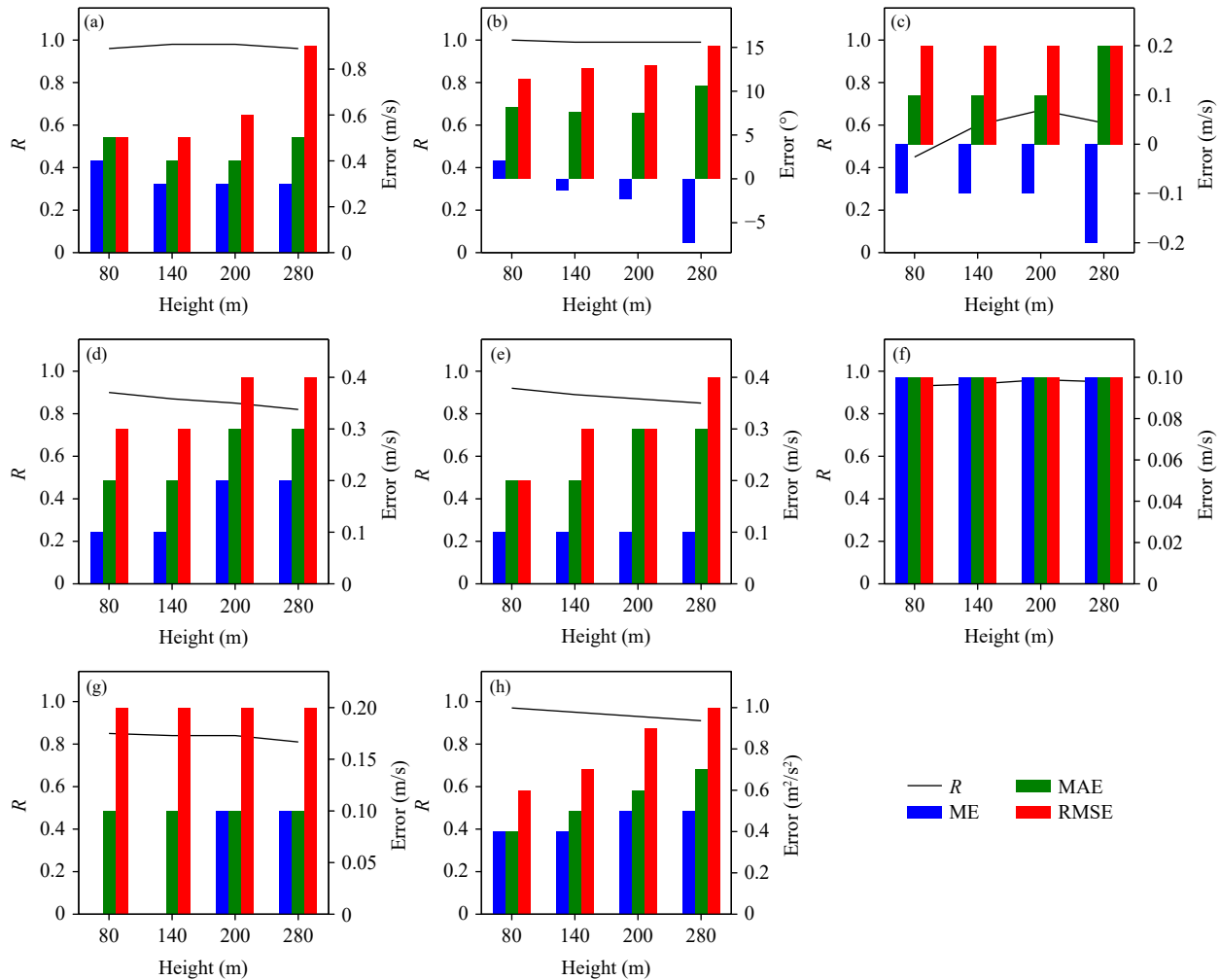


图 10 同图 9, 但为 60° 仰角下测风激光雷达 DBS5 模式与大气所铁塔不同高度处三维超声风速仪对比
 Fig. 10 Same as Fig. 9 but for the comparison between wind lidar DBS5 mode at 60 degree elevation and three-dimensional ultrasonic anemometer at different heights in IAP tower

(图 13)。分析结果表明, 不同时段、不同高度的垂直速度的功率谱均满足 $-5/3$ 幂次律。与图 7c、d 类似, 功率谱在高频区存在白噪声, 并且随着探测高度的升高, 白噪声增大。但是在边界层内, 白噪声随着探测高度的变化较小; 在边界层以上, 白噪声明显大于边界层内, 并且随探测高度的变化也大于边界层内的变化。这种白噪声可能与边界层高度以上的气溶胶粒子浓度较低有关, 而且白噪声的量级比低频段功率谱强度低 1—2 个数量级, 并且其对垂直速度标准差的计算结果影响不大 (图 6d), 因此未对这种白噪声做处理。

11 日夜间至 12 日凌晨, 存在西南低空急流。基于 Wei 等 (2013) 定义低空急流的方法, 将风廓线最大风速 $V_{\max} \geq 6$ m/s 和最大风速高度以上的风速

落差 $\geq V_{\max}/2$ 的风廓线定义为低空急流, 并且根据 V_{\max} 所属区间范围 ($[6, 10)$ 、 $[10, 14)$ 、 $[14, 20)$ 、 $[20, \infty)$ m/s), 将低空急流划分为弱、中等、强、超强低空急流。此处低空急流的最大风速约为 6.2 m/s, 为弱低空急流, 持续时间为 3 h (11 日 22 时 30 分—12 日 01 时 30 分)。图 14a 为低空急流的风速廓线和湍流强度廓线。从水平风速廓线可以看出, 低空急流存在明显的急流鼻, 急流鼻以下的湍流 (σ_w 和 TKE) 较强, 急流鼻及其以上的湍流较弱。急流鼻高度处存在较强的上升运动, 但是在急流鼻及其以上的高度, 较强的上升运动并没有产生较强的湍流。基于 ERA5 再分析资料, 上升运动产生的原因是观测点位于低空急流入口区的左侧, 存在较强的正涡度 (图略)。低空急流期间, 不同高度垂直速度

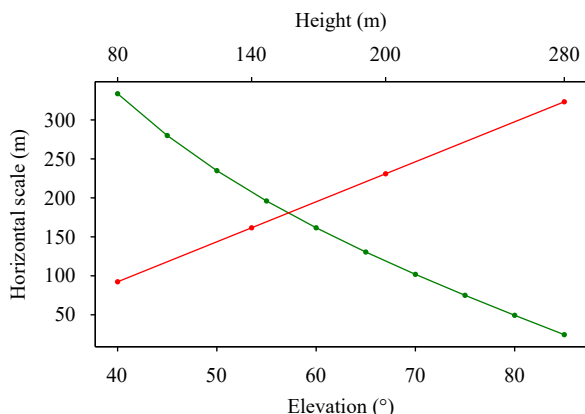


图 11 测风激光雷达 DBS5 模式探测的水平尺度 (绿色点线为不同仰角下 140 m 高度处的水平尺度; 红色点线为 60° 仰角下不同高度处的水平尺度)

Fig. 11 Horizontal scale of wind lidar DBS5 mode (green dotted line is horizontal scale at 140 m height under different elevation angles; red dotted line is horizontal scale at different altitudes under 60 degree elevation)

的功率谱见图 14b。不同高度的湍流谱结构均符合 $-5/3$ 幂次律。高频区的白噪声也随着探测高度的升高而增大, 并且在边界层高度以上的白噪声明显大于边界层内。

6 总结与讨论

本研究基于径向速度和 SNR, 对测风激光雷达 DBS5 模式观测资料进行质量控制并计算平均风廓线和湍流产品。通过与铁塔搭载的三维超声风速仪对比, 分析了测风激光雷达三维风速和湍流观测误差, 评估了时间尺度、仰角和空间尺度对观测误差的影响。最后, 基于典型个例, 研究了北京地区晴空湍流廓线特征。主要结论如下:

(1) 研发了测风激光雷达资料质量控制算法。主要对径向速度进行 SNR 阈值、径向风切变阈值、连续缺测距离门数阈值等质控, 获取高质量的径向风速; 进而利用 5 波束方法计算风廓线; 通过异常

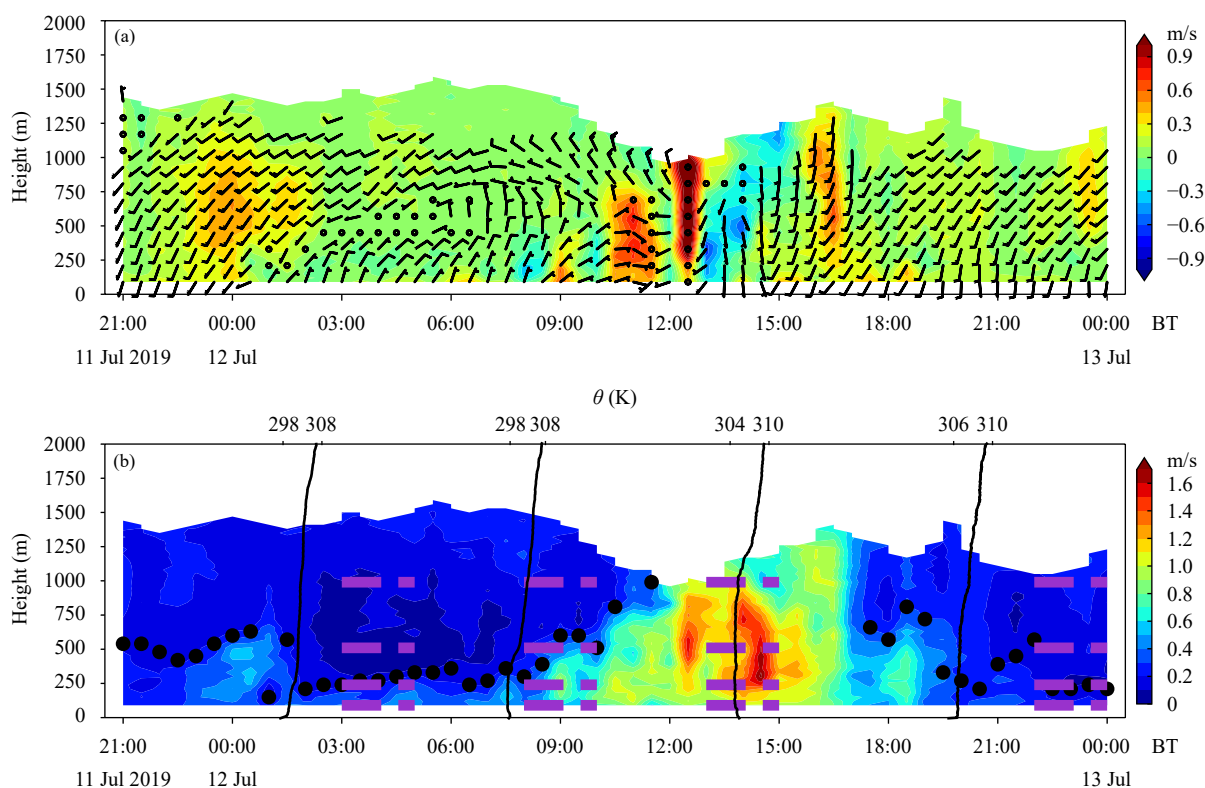


图 12 2019 年 7 月 11 日 21 时—13 日 00 时的风廓线和大气湍流强度 (a. 风羽, 色阶为垂直速度, 其中, 大于 0 的垂直速度为上升运动; b. 垂直速度标准差, 黑点为 PBLH, 黑色廓线为南郊观象台的探空位温廓线, 紫色虚线为功率谱分析的时段和高度)

Fig. 12 Wind profiles and atmospheric turbulence intensities from 21:00 BT 11 July to 00:00 BT 13 July 2019 (a. wind profiles; shadings show vertical velocity, and the vertical velocity greater than 0 denotes ascending motion; b. standard deviation of vertical velocity; black points show PBLH; the black profiles are potential temperature from radiosonde at NJ; the purple dashed lines are the periods and heights of power spectrum analysis)

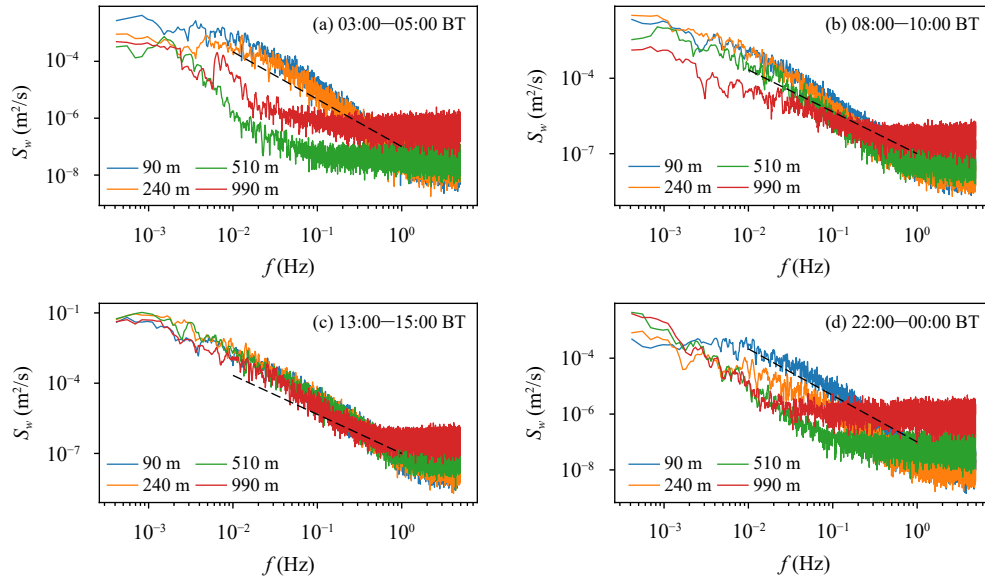


图 13 2019 年 7 月 12 日基于测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式获取的不同时段、不同高度处 (图 12b 中的紫色虚线) 的垂直速度功率谱的分析结果
 Fig. 13 Power spectra of vertical velocity at different periods and heights (denoted by purple dashed lines in Fig. 12b) based on wind lidar vertical LOS10Hz mode on 12 July 2019

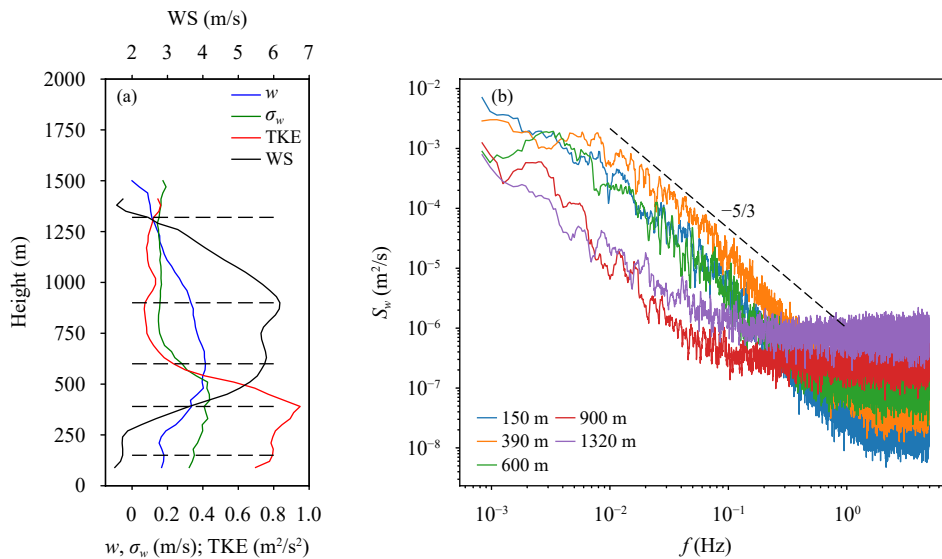


图 14 低空急流廓线及其功率谱分析结果 (a. 2019 年 7 月 11 日 23 时—12 日 01 时平均的 WS、 w 、 σ_w 和 TKE 廓线, 虚线为开展功率谱分析的高度; b. 测风激光雷达垂直 LOS10Hz 模式不同高度的垂直速度功率谱分析结果, 时段同图 a)
 Fig. 14 Profiles of low-level jet and its power spectrum (a. profiles of WS, w , σ_w , and TKE averaged during 23:00 11 July and 01:00 12 July 2019; dashed lines indicate heights at which power spectrum analysis is performed; b. power spectra of vertical velocity at different heights based on wind lidar vertical LOS10Hz mode, and the time period is from 23:00 11 July to 01:00 12 July 2019)

值剔除和缺测率阈值质控, 计算平均风廓线和湍流产品。上述质控算法可以有效剔除低信噪比信号的无效数据, 提高测风激光雷达观测数据质量。

(2) 验证了测风激光雷达 DBS5 模式探测的三维风和湍流具有较高的观测精度。通过与大气所

铁塔 140 m 高度处搭载的三维超声风速仪对比, 测风激光雷达 DBS5 模式探测的 WS 的 R 、ME、MAE、RMSE 分别为 0.989、0.3 m/s、0.4 m/s、0.4 m/s; σ_w 的 R 、ME、MAE、RMSE 分别为 0.965、0.1 m/s、0.1 m/s、0.1 m/s; TKE 的 R 、ME、MAE、RMSE 分

别为 0.965 、 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

(3) 评估了时间尺度和空间尺度对测风激光雷达 DBS5 模式观测误差的影响, 揭示了其在铁塔高度以上的观测性能。测风激光雷达 DBS5 模式捕获的是 0.025 Hz 及更低频尺度的含能涡区湍流, 因此其无法研究能量串级等微尺度特征, 但是当研究湍流强度或能量特征时, 时间尺度对测风激光雷达 DBS5 模式观测误差的影响较小。高仰角会导致水平风速扰动增大, 进而导致 TKE 的观测误差增大, 但是其对平均水平风速观测误差的影响较小。DBS5 模式探测的水平尺度对其观测精度有一定影响, 随着水平尺度的增大, 水平风和 TKE 的观测精度有所降低, w 、 σ_w 、 u_* 的观测精度基本不变。因此, 当研究铁塔高度以上的湍流问题时, 尽量基于 σ_w 或 u_* 开展。

(4) 研究了北京晴空湍流的日变化特征。受太阳辐射加热的影响, 大气边界层湍流存在显著的日变化特征: 白天强、夜间弱。测风激光雷达功率谱的白噪声在边界层以上明显高于边界层内。低空急流期间, 低层大气存在上升运动, 尤其是在急流鼻附近。急流鼻以下的湍流强度较大, 急流鼻及其以上的湍流较弱。

上述研究成果是在城市近地面层完成的, 而在近地面层以上的高度处, 大气风场水平更加均匀, 更加符合测风激光雷达 DBS5 模式的假设条件, 理论上来说, 空间尺度对观测误差的影响应该有所降低, 但是这需要测风激光雷达与系留气艇或气球探空开展同址对比观测, 以验证上述猜测。同时, 文中观测误差随空间尺度的增大而增大的规律从两方面(仰角和探测高度)得到验证, 具有一定的普适性, 但是其在山区等风场水平特别不均匀的情况下是否适用, 还需要进一步验证。基于本研究成果, 测风激光雷达可以获取精度较高的三维风速和湍流廓线, 其中三维风速廓线可以直接应用于数值模式同化, 湍流廓线可以用于验证数值模式的模拟性能, 具有非常广泛的应用前景。

参考文献

白寒冰, 陈诚, 林彤. 2023. 基于 $1.55 \mu\text{m}$ 激光雷达的晴空风切变结构研究. *激光与红外*, 53(10): 1497-1504. Bai H B, Chen C, Lin T. 2023. Study on clear sky wind shear structure based on $1.55 \mu\text{m}$ lidar. *Laser Infrared*, 53(10): 1497-1504 (in Chinese)

- 陈晓敏, 张洪玮, 孙康闻等. 2023. 基于相干多普勒激光雷达的斜程湍流参数反演方法研究. *大气与环境光学学报*, 18(1): 1-13. Chen X M, Zhang H W, Sun K W, et al. 2023. Inversion methods of slant turbulence parameters based on coherent Doppler lidar. *J Atmos Environ Opt*, 18(1): 1-13 (in Chinese)
- 程志刚, 李炬, 张鑫宇等. 2020. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究. *气象学报*, 78(6): 1021-1036. Cheng Z G, Li J, Zhang X Y, et al. 2020. A study on turbulence and three-dimensional wind field based on observations of three wind lidars. *Acta Meteor Sinica*, 78(6): 1021-1036 (in Chinese)
- 储玉飞, 刘东, 王珍珠等. 2020. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展. *量子电子学报*, 37(5): 580-600. Chu Y F, Liu D, Wang Z Z, et al. 2020. Basic principle and technical progress of Doppler wind lidar. *Chinese J Quantum Electron*, 37(5): 580-600 (in Chinese)
- 丁婕, 张镭, 胡泽勇等. 2023. 基于激光雷达和航空器报告识别低空风切变及其演变过程研究. *高原气象*, 42(5): 1338-1350. Ding J, Zhang L, Hu Z Y, et al. 2023. Study of low-level wind shear and its evolution based on lidar and aircraft reports identification. *Plateau Meteor*, 42(5): 1338-1350 (in Chinese)
- 范琪, 郑佳锋, 周鼎富等. 2020. 基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法. *红外与毫米波学报*, 39(4): 462-472. Fan Q, Zheng J F, Zhou D F, et al. 2020. Research on airport low-level wind shear identification algorithm based on laser wind radar. *J Infrared Millim Waves*, 39(4): 462-472 (in Chinese)
- 郝博胜, 高霞, 周晔等. 2022. 激光测风雷达径向风速的质量控制方法. *成都信息工程大学学报*, 37(3): 259-265. Hao B S, Gao X, Zhou Y, et al. 2022. The quality control for radial wind velocity of lidar. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 37(3): 259-265 (in Chinese)
- 李林, 张治国, 杜传耀等. 2022. 多普勒测风激光雷达与 L 波段探空对比分析. *大气与环境光学学报*, 17(5): 494-505. Li L, Zhang Z G, Du C Y, et al. 2022. Inter-comparison of wind measurements between Doppler wind lidar and L-band radiosonde. *J Atmos Environ Opt*, 17(5): 494-505 (in Chinese)
- 刘秉义, 文强, 王琪超等. 2022. 漂浮式多普勒激光雷达低空风廓线反演方法. *光学学报*, 42(24): 2401002. Liu B Y, Wen Q, Wang Q C, et al. 2022. Inversion method for low-altitude wind profile based on floating Doppler lidar. *Acta Opt Sinica*, 42(24): 2401002 (in Chinese)
- 孟赫, 任晓洁, 王桂霞等. 2024. 青岛沿海地区 2021 年典型沙尘回流-霾污染过程气溶胶垂直分布特征. *环境科学学报*, 44(1): 37-46. Meng H, Ren X J, Wang G X, et al. 2024. Vertical distribution characteristics of aerosol during the typical backflow dust-haze pollution process in January 2021 in coastal area of Qingdao, China. *Acta Sci Circumstantiae*, 44(1): 37-46 (in Chinese)
- 谭方颖, 王建林, 张蕾等. 2024. 山东省设施农业风灾风险评估研究. *中国生态农业学报(中英文)*, 32(1): 174-182. Tan F Y, Wang J L, Zhang L, et al. 2024. Wind disaster risk assessment for facility agriculture in Shandong province. *Chinese J Eco-Agric*, 32(1): 174-182 (in Chinese)

- 王倩倩, 权建农, 程志刚等. 2022. 2019年冬季北京海陀山局地环流特征及机理分析. *气象学报*, 80(1): 93-107. Wang Q Q, Quan J N, Cheng Z G, et al. 2022. Local circulation characteristics and mechanism analysis of Haituo mountain in Beijing during winter 2019. *Acta Meteor Sinica*, 80(1): 93-107 (in Chinese)
- 王倩倩, 陈羿辰, 程志刚等. 2023. 海陀山冬奥气象综合观测平台及研究进展. *气象学报*, 81(1): 175-192. Wang Q Q, Chen Y C, Cheng Z G, et al. 2023. A comprehensive meteorological observation platform for the 2022 Beijing Winter Olympic Games over the Haituo mountain: Configuration, application, and development. *Acta Meteor Sinica*, 81(1): 175-192 (in Chinese)
- 温斌荣, 田新亮, 李占伟等. 2022. 大型漂浮式风电装备耦合动力学研究: 历史、进展与挑战. *力学进展*, 52(4): 731-808. Wen B R, Tian X L, Li Z W, et al. 2022. Coupling dynamics of floating wind turbines: History, progress and challenges. *Adv Mech*, 52(4): 731-808 (in Chinese)
- Barlow J F, Dunbar T M, Nemitz E G, et al. 2011. Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE-II. *Atmos Chem Phys*, 11(5): 2111-2125
- Bonin T A, Choukulkar A, Brewer W A, et al. 2017. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar. *Atmos Meas Tech*, 10(8): 3021-3039
- Brugger P, Träumner K, Jung C. 2016. Evaluation of a procedure to correct spatial averaging in turbulence statistics from a Doppler lidar by comparing time series with an ultrasonic anemometer. *J Atmos Ocean Technol*, 33(10): 2135-2144
- Chan P W. 2011. Generation of an eddy dissipation rate map at the Hong Kong international airport based on Doppler lidar data. *J Atmos Ocean Technol*, 28(1): 37-49
- Cheng Z G, Pan Y B, Li J, et al. 2021. Assessing the influence of aerosol on radiation and its roles in planetary boundary layer development. *J Meteor Res*, 35(2): 384-392
- Choukulkar A, Brewer W A, Sandberg S P, et al. 2017. Evaluation of single and multiple Doppler lidar techniques to measure complex flow during the XPIA field campaign. *Atmos Meas Tech*, 10(1): 247-264
- Frehlich R. 1999. Performance of maximum likelihood estimators of mean power and Doppler velocity with a priori knowledge of spectral width. *J Atmos Ocean Technol*, 16(11): 1702-1709
- Fuertes F C, Iungo G V, Porté-Agel F. 2014. 3D turbulence measurements using three synchronous wind lidars: Validation against sonic anemometry. *J Atmos Ocean Technol*, 31(7): 1549-1556
- Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2017. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015. *Bound-Layer Meteorol*, 162(3): 503-522
- Kumer V M, Reuder J, Dorninger M, et al. 2016. Turbulent kinetic energy estimates from profiling wind lidar measurements and their potential for wind energy applications. *Renewable Energy*, 99: 898-910
- Li J, Sun J L, Zhou M Y, et al. 2018. Observational analyses of dramatic developments of a severe air pollution event in the Beijing area. *Atmos Chem Phys*, 18(6): 3919-3935
- Liu Z L, Barlow J F, Chan P W, et al. 2019. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind lidars. *Remote Sens*, 11(21): 2522
- Mann J, Peña A, Bingöl F, et al. 2010. Lidar scanning of momentum flux in and above the atmospheric surface layer. *J Atmos Ocean Technol*, 27(6): 959-976
- Manninen A J, Marke T, Tuononen M, et al. 2018. Atmospheric boundary layer classification with Doppler lidar. *J Geophys Res: Atmos*, 123(15): 8172-8189
- McCaffrey K, Quelet P T, Choukulkar A, et al. 2017. Identification of tower-wake distortions using sonic anemometer and lidar measurements. *Atmos Meas Tech*, 10(2): 393-407
- Oude Nijhuis A C P, Thobois L P, Barbaresco F, et al. 2018. Wind hazard and turbulence monitoring at airports with lidar, radar, and mode-s downlinks: The UFO project. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(11): 2275-2293
- Rye B J, Hardesty R M. 1997. Detection techniques for validating Doppler estimates in heterodyne lidar. *Appl Opt*, 36(9): 1940-1951
- Stull R B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 29-74
- Tucker S C, Senff C J, Weickmann A M, et al. 2009. Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles. *J Atmos Ocean Technol*, 26(4): 673-688
- Wang H, Barthelmie R J, Clifton A, et al. 2015. Wind measurements from arc scans with Doppler wind lidar. *J Atmos Ocean Technol*, 32(11): 2024-2040
- Wei W, Wu B G, Ye X X, et al. 2013. Characteristics and mechanisms of low-level jets in the Yangtze river delta of China. *Bound-Layer Meteorol*, 149(3): 403-424