

王婷,张锦城,胡琳,2026.多因子耦合的近地层风廓线指数修正算法[J].气象,52(8):999-1007. Wang T, Zhang J C, Hu L, 2026. Multi-factor coupled correction algorithm for the near-surface wind profile exponent[J]. Meteor Mon, 52(8):999-1007 (in Chinese).

多因子耦合的近地层风廓线指数修正算法^{*}

王 婷¹ 张锦城¹ 胡 琳²

1 广州市气象台, 广州 511430

2 广东省广州市海珠区气象局, 广州 510240

提 要: 基于激光测风雷达数据, 采用风廓线幂律(WPE)方法, 计算了不同地面风力条件下 50~500 m 高度范围内的风廓线指数, 并通过 50 个观测高度超过 40 m 的气象站数据进行验证。结果表明, 由激光测风雷达反演的风廓线指数存在系统性高估问题, 且误差大小与观测区域的建筑物密度和高度特征密切相关。针对这一问题, 引入百米级网格建筑物密度和平均高度参数, 构建了多因子驱动的风廓线指数动态修正算法, 改进了传统方法依赖单一粗糙度参数的局限性。修正后, 91.7% 的风力计算误差被控制在 1 级范围内, 其中 50.1% 达到零误差。基于此, 进一步开发了面向城市复杂建筑物环境的近地层高空风场三维重构模型, 其具备 100 m 水平分辨率和 50~500 m 垂直覆盖范围, 实现每 5 min 实时监测和最长 168 h 的预报输出, 为城市高空作业安全提供了低成本、高精度的风灾防控技术路径, 具有业务推广潜力和工程应用价值。

关键词: 激光测风雷达, 风廓线指数, 百米级网格建筑物密度, 百米级网格建筑物平均高度, 近地层高空风监测预报, 风灾防控

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.010602

Multi-Factor Coupled Correction Algorithm for the Near-Surface Wind Profile Exponent

WANG Ting¹ ZHANG Jincheng¹ HU Lin²

1 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

2 Guangzhou Haizhu District Meteorological Station of Guangdong Province, Guangzhou 510240

Abstract: Using wind-measuring lidar wind profiler data and the wind profile exponent (WPE) method, we calculate the WPE within the 50—500 m height range under different surface wind conditions in this study. Then the results are validated using data from 50 meteorological stations with observation heights exceeding 40 m. The results indicate that the WPE retrieved from wind-measuring lidar has the problem of systematic overestimation, with the error magnitude closely related to the building density and height characteristics of the observation area. To address this issue, building density and building average height parameters on a 100 m×100 m grid are introduced to develop a multi-factor-driven dynamic correction algorithm for the WPE, which overcomes the limitation of traditional methods that rely solely on a single roughness parameter. After correction, 91.7% of the wind force calculation errors are confined within the range of 1 level, with 50.1% showing zero error. On this basis, a three-dimensional high-level wind field reconstruction model tailored for urban complex building environments is further developed. This model has a horizontal resolution of 100 m and vertical coverage from 50 to 500 m, enabling real-time monitoring every 5 min and forecast outputs up to 168 h. The model can provide a low-cost, high-precision wind disaster

^{*} 广东省气象联合基金项目(2024A1515510011)和粤港澳大湾区气象科技协同攻关项目(GHMA2024Y05)共同资助

2025 年 6 月 16 日收稿; 2026 年 1 月 6 日收修定稿

第一作者: 王婷, 主要从事气候诊断、天气预报、影响预报与风险预警研究. E-mail: wangting0834@163.com

prevention and control technology pathway for urban high-level operations, having business application potential and engineering value.

Key words: wind-measuring lidar, wind profile exponent, building density on a 100 m $\times$ 100 m grid, average height of buildings on a 100 m $\times$ 100 m grid, near-surface high-level wind field monitoring and forecasting, wind disaster prevention

引 言

随着超高层建筑物建造技术的持续发展,超高空作业与大型预制件装配式吊装作业需求快速增长,而近地层高空风(高于常规地面测风高度、距地面约 50~500 m 的大气边界层下部风场)的变化,是影响高空作业安全与工程效率的关键因素。因此,构建时空连续、分辨率高、响应及时的城市近地层高空风场监测预报体系具有重要的工程应用价值。当前近地层高空风场观测主要依赖 3 类技术手段:(1)L 波段二次测风雷达通过算法优化可实现 30 km 范围内的风矢量探测(梁建平等,2014;王缅甸等,2011;陈磊等,2017;吴泓等,2011;杨国彬等,2021),但其站点稀疏(全国仅 120 个),且观测频次较低(2 次 $\cdot$ d $^{-1}$),难以满足高空作业场景对风场时空分辨率的要求;(2)星基导航类探空系统(如 GPS/北斗)在风速及高度测量方面具备较高精度,性能优于传统雷达和经纬仪测风(吴维等,2009;赵世军等,2013),但其观测频次与空间覆盖亦十分有限,难以感知城市局地风场变化;(3)以多普勒雷达、风廓线雷达及激光测风雷达为代表的新型测风设备,虽具备时间分辨率高、数据连续性强与自动化程度高等优势(姚晓娟等,2024;金效梅等,2020;郑腾飞等,2024;夏芸洁等,2024;陈斌源和姜陈威,2024;王栋成等,2019),可有效弥补常规探空系统的不足,但受限于高昂的设备成本,难以大规模部署,从而制约了其在近地层高空作业场景的应用。为突破上述技术瓶颈,基于地面测风资料推算近地层高空风场成为重要研究方向。Davenport(1961)在分析全球 90 余次强风过程资料的基础上,提出了反映脉动风特性的 Davenport 风速谱以及描述平均风沿高度变化规律的指数律模型,其广泛应用于风能评估、结构抗风设计等领域。其中,指数律模型认为风速随高度呈幂函数增长,核心参数是风廓线指数,其值取决于下垫面粗糙度。我国《建筑结构荷载规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)推荐了典型地

表粗糙条件下风廓线指数的取值范围。在此基础上,不少研究利用气象塔梯度风观测资料,分析了风廓线指数的变化特征及其影响因素(田浦等,1984;刘学军和吴丹朱,1991;郭凤霞等,2010;龚玺等,2018;崔杨等,2021;龚强等,2015;刘敏等,2010;鞠红霞等,2018),并提出基于梯度风观测资料修正风廓线指数的技术思路。该方法以获取长期梯度风观测数据为前提,但建筑物施工工期短暂,且不同场地的风场特征差异显著,导致数据难以通用,限制了其适用性。近年来,学者们广泛采用多尺度模式耦合(Liu et al, 2024;刘震卿等,2020;李叶晴等,2023;邢佩等,2019;张弛等,2015)与机器学习方法(李聪健等,2023;陶天友等,2025)开展城市近地层精细化风场的模拟与重构。然而,多尺度模式耦合计算链路长、耗时高,难以兼顾施工现场的实时预警与大范围推广应用;机器学习方法虽具较高计算效率,却依赖高质量训练数据,在近地层观测资料匮乏的情况下,其预测精度和稳定性均难以保障。

本研究以广州市为试验区,通过融合多源气象观测数据与引进百米级网格建筑物平均高度和密度等参数,构建基于风廓线指数动态修正的近地层高空风场反演模型。通过建立多因子驱动的风廓线指数修正算法,改进传统方法依赖单一粗糙度参数的局限性;研发水平分辨率 100 m、垂直覆盖 50~500 m 的三维风场重构技术;开发逐 5 min 实时监测与 168 h 预报的近地层高空风监测预报产品,为城市高空作业安全提供低成本、高精度的风灾防控技术支持。

1 资料和方法

1.1 术语定义

为便于阐述,对本研究涉及的核心术语定义如下。

近地层高空风:高于常规地面测风高度、距地面约 50~500 m 的大气边界层下部风场。

激光风廓线指数(α_{lidar}):基于激光测风雷达和同址地面风观测数据,采用风廓线幂律(WPE)方法反演得到的风廓线指数,用于表征不同高度层风速与地面风速之间的幂律关系。

观测风廓线指数(α_{obs}):基于楼顶和地面气象站测风数据,采用 WPE 方法反演得到的风廓线指数。

测算基准站:指参与 WPE 方法计算、为风廓线指数反演或高层风速测算提供地面风观测数据的气象观测站点。

1.2 数 据

本研究所用激光测风雷达观测数据来自广州市气象局部署的 WindPrint S4000 型相干多普勒激光测风雷达,时间范围为 2020 年 1 月至 2023 年 12 月,涵盖 52~494 m 高度层(垂直间隔 26 m)的水平风速和风向,时间分辨率为 6 min,每小时有 10 个观测时次,主要用于反演激光风廓线指数。该雷达基于激光信号与气溶胶粒子相互作用所产生的多普勒频移效应测量气溶胶粒子的运动速度和方向,进而反演大气风场信息,主要观测参数和性能指标列于表 1。针对该设备的观测性能,张志坚等(2022)在 2019 年 11 月 6 日至 12 月 9 日广州超大城市综合气象观测试验期间,利用距雷达小于 50 m 的深圳气象梯度塔同期观测数据进行了质量评估,结果显示二者测风结果一致性较高,风速和风向的相关系数分别为 0.96 和 0.99,平均绝对误差分别为 $0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 9.95° ,为本研究数据的可靠性提供了依据。

地面风观测数据来自广州市 484 个气象站,数据包括 2 min 平均风速和风向,时间范围为 2020 年 1 月至 2024 年 12 月,时间分辨率为 5 min。为确保激光测风雷达和地面气象站观测数据时序的一致性与可比性,对两类数据的观测时次进行了匹配:激光测风雷达数据为每小时内第 00、06、12、18、24、30、36、42、48、54 min 的观测记录,与之匹配的气象站数据选取同小时第 00、05、10、20、25、30、35、40、50、55 min 的观测记录,配对时刻之间最大时间差不超过 2 min。地面风观测数据主要用于 3 个方面:(1)与激光测风雷达同址的地面风数据用于反演激光风廓线指数;(2)50 个观测高度超 40 m 的观测站数据作为独立数据源,对激光风廓线指数进行验证,并基于误差分析结果制定激光风廓线指数修正方案;(3)全市 484 个气象站均作为测算基准站,结合修正后的风廓线指数,实现全市范围近地层高空风的反

演。需要说明的是,50 个高层测站是 484 个气象站的子集,仅用于模型验证与修正,未参与激光风廓线指数初始拟合训练。由此,模型构建、验证、修正与应用在数据来源上彼此独立,符合统计建模的独立性原则,确保风廓线指数评估的客观性与修正方案的可靠性。

城市建筑物形态数据包含建筑物的多边形平面几何信息及楼层高度属性。基于该数据,可计算得到百米级网格的建筑物密度和平均高度,作为关键参数用于激光风廓线指数的修正。

表 1 WindPrint S4000 型相干多普勒激光测风雷达主要观测参数

Table 1 Main observation parameters of the WindPrint S4000 coherent Doppler wind lidar	
观测参数	性能指标
激光波长/nm	1550
脉冲宽度/ns	100~400
单脉冲能量/ μJ	≥ 100
径向数据更新频率/Hz	0.25
风速测量范围/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0~75
风速测量精度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	≤ 0.1
风向测量精度/ $(^\circ)$	≤ 3 (风速 $>2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
探测距离/m	50~6000
距离分辨率(径向)/m	30
扫描精度/ $(^\circ)$	± 0.1
扫描方式	DBS

1.3 方 法

1.3.1 WPE 方法

在大气边界层中,描述风速垂直分布主要有两类方法:一是基于湍流相似理论的对数律方法,涉及卡曼常数、摩擦速度等参数;二是 WPE 方法,作为经验公式,其形式简单、便于计算,在工程风环境分析中得到广泛应用。我国《建筑结构荷载规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)和《公路桥梁抗风设计规范》(中华人民共和国交通运输部,2019)均推荐采用 WPE 方法描述近地层风速的垂直分布,其表达式为:

$$V = V_1 \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^\alpha \tag{1}$$

式中: Z 为测算高度, Z_1 为测算基准站的测风高度(当测风仪安装于地面时 Z_1 为 10 m,安装于建筑物楼顶时 Z_1 为楼高加 10 m), V 为高度 Z 处的风速, V_1 为高度 Z_1 处的风速, α 为风廓线指数。不同地面粗糙度条件对应的 α 值列于表 2(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)。

表 2 各种地面粗糙度条件下的 α 取值Table 2 The values of α under various terrain roughness conditions

地面粗糙度等级	描述	α
A	近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	0.12
B	田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	0.15
C	密集建筑物群的城市市区	0.22
D	密集建筑物群且房屋较高的城市市区	0.30

1.3.2 百米级网格建筑物密度和平均高度估算方法

基于广州市建筑物矢量数据,采用 GIS 空间分析技术估算 100 m 空间分辨率网格单元的建筑物密度和平均高度。其中,百米级网格建筑物密度定义为 100 m×100 m 网格单元内建筑物基底总面积占该网格总面积的百分比,百米级网格建筑物平均高度定义为 100 m×100 m 网格单元内所有建筑物高度的平均值,其中建筑物高度由建筑物楼层数乘以 3 m(平均层高)估算得出。

2 激光风廓线指数计算

基于 2020—2023 年激光测风雷达与同址地面气象站的分钟级测风数据,分析 52~494 m 高度层

风力与地面风力的关联特征。结果表明:(1)高层(52~494 m)风力随地面风力增大而增大,地面风力 ≤ 2 级时高层以 2~4 级风为主(概率 $>85\%$),地面风力 3 级时高层以 3~5 级风为主(概率 $>85\%$),地面风力 4 级时高层以 4~5 级风为主(概率 $>60\%$),地面风力 ≥ 5 级时高层以 5~6 级风为主(概率 $>75\%$);(2)随着地面风力增大,高层强风概率明显增加,地面风力 ≤ 3 级时高层强风概率 $<10\%$,地面风力 4 级时高层强风概率大幅跃升至 29.3%,地面风力 ≥ 5 级时高层强风概率高达 53.7%;(3)强风出现高度随地面风力增强而降低,地面风力 1 级时强风出现的起始高度在 100 m,地面风力 2 级时强风起始高度降至 70 m,地面风力 ≥ 3 级时强风出现高度降至 50 m(表 3)。

表 3 不同地面风力条件下高层(52~494 m)风力统计特征

Table 3 Statistical characteristics of wind force at high levels (52—494 m) under different surface wind force conditions

地面风力/级	高层主导风力/级	强风(≥ 6 级)概率/%	强风起始高度/m
≤ 1	2~4($>85\%$)	0.6	100
2	2~4($>87\%$)	1.3	70
3	3~5($>85\%$)	6.4	50
4	4~5($>60\%$)	29.3	50
≥ 5	5~6($>75\%$)	53.7	50

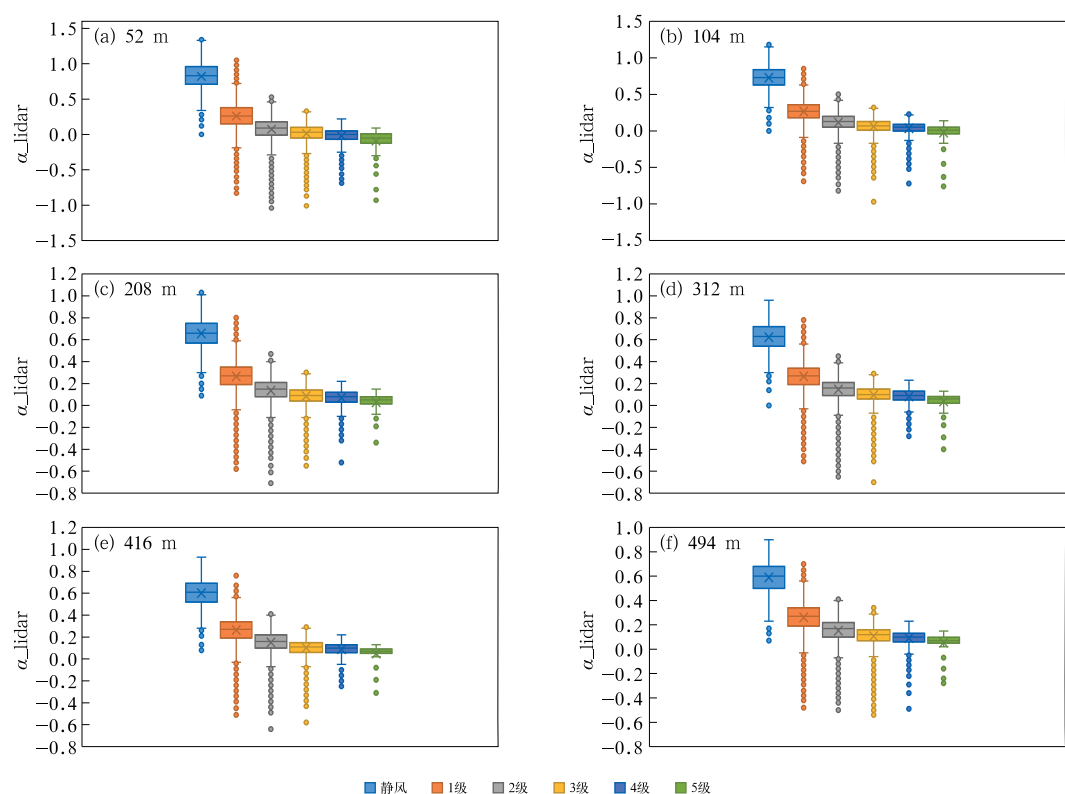
注:括号内为出现概率。

为量化近地层高空风对地面风的响应特征,采用 WPE 方法,分类计算了不同地面风力及风向条件下各高度层的 α_{lidar} 。结果表明,对于同一高度层,在地面风力相同的条件下,不同风向分组计算得到的 α_{lidar} 差异较小,而在地面风向相同的条件下,不同风力分组计算得到的 α_{lidar} 差异显著,即地面风力是影响风廓线指数的主导因素。图 1 为各高度层在不同地面风力条件下的 α_{lidar} 箱线图,可看出,随着地面风力的增大,各高度层的 α_{lidar} 呈现逐渐减小的趋势。后续基于楼顶站测风数据计算的风廓线指数也呈现了相同特征,说明地面风力越大,近地层高空风力的增幅越小,反之亦然。基于上述分析结果,计算了不同地面风力条件下不同高度

层的 α_{lidar} (表 4),其取值为箱线图中位数。由表 4 可见,随着高度增加, α_{lidar} 并未呈现线性增大的趋势,甚至地面静风时 α_{lidar} 还随着高度的增加而减小。因此,未用线性回归方法来拟合不同测算高度的 α_{lidar} ,而是采用高度邻近原则进行指数映射,即选取与测算高度最接近的代表层 α_{lidar} 值。

3 激光风廓线指数验证

为评估基于 α_{lidar} 测算近地层高空风的可行性,选取广州市 50 个观测高度大于 40 m 的楼顶气象站,将其 2020—2024 年观测风速与测算风速进行对比验证。楼顶测算风速依据 WPE 方法,输入测算



注:箱线图中触须的上端和下端分别代表统计最大值和最小值,箱体内部 3 条线自下而上分别代表第 25%、50%和 75%分位数。

图 1 不同高度层 α_{lidar} 箱线图
Fig. 1 Box plots of α_{lidar} across different height layers

表 4 不同地面风力对应的不同高度层 α_{lidar}

Table 4 α_{lidar} corresponding to surface wind force conditions across different height layers						
高度/m	静风	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级及以上
52	0.83	0.26	0.09	0.03	0	-0.05
78	0.77	0.27	0.11	0.06	0.03	-0.01
104	0.73	0.27	0.13	0.07	0.05	0.01
130	0.71	0.27	0.13	0.08	0.06	0.02
156	0.69	0.27	0.14	0.09	0.07	0.04
182	0.67	0.27	0.14	0.09	0.08	0.05
208	0.66	0.27	0.15	0.09	0.08	0.05
234	0.65	0.27	0.15	0.1	0.08	0.05
260	0.64	0.27	0.15	0.1	0.09	0.05
286	0.64	0.27	0.15	0.1	0.09	0.06
312	0.63	0.27	0.16	0.1	0.09	0.06
338	0.62	0.27	0.16	0.11	0.09	0.06
364	0.62	0.27	0.16	0.11	0.09	0.07
390	0.61	0.27	0.16	0.11	0.1	0.07
416	0.61	0.27	0.16	0.11	0.1	0.07
442	0.6	0.27	0.17	0.11	0.1	0.07
468	0.6	0.27	0.17	0.12	0.1	0.07
494	0.6	0.27	0.17	0.12	0.1	0.07

基准站观测风速及高度、楼顶站观测高度及 α_{lidar} 计算得到,其中测算基准站选取距离楼顶站最近的

地面气象站。验证结果显示:整体样本中,测算风力误差 ≤ 1 级的样本占比达 87%(其中 0 级误差占比

36.3%, 1 级误差占比 50.7%)。但不同观测站间存在显著差异(图 2a), 300 m 以上观测站误差 ≤ 1 级样本占比仅为 60%(0 级误差占比约 20%、1 级误差占比约 40%); 而 300 m 以下观测站误差 ≤ 1 级样本占比为 80%(0 级误差占比约 30%、1 级误差占比约 50%)。说明基于地面风测算近地层高空风的方法更适用于 300 m 以下的区域。但尽管如此, 300 m 以下仍有少部分观测站的准确率较低。

为进一步分析误差原因, 本研究基于楼顶站观测数据计算了观测风廓线指数(α_{obs}), 并绘制了 α_{lidar} 与 α_{obs} 的差值箱线图(图 3), 发现 α_{lidar} 相较 α_{obs} 呈现系统性高估特征, 且二者之间的差值在 100 m 以上相对较小、100 m 以下较大。推断该现象一方面源于两类观测系统观测原理的差异, 另一方面与观测环境有关: 激光测风雷达布设于开阔区域, 受地物干扰小, 而楼顶气象站(尤其 < 100 m 站点)易受周边建筑物或地形遮挡, 观测风速偏小。为验证环境干扰的影响, 选取 4 个 300 m 以下测算

准确率偏低的观测站, 系统考察其设备运行状态和观测环境。结果表明, 4 个观测站设备运行正常, 数据连续稳定, 测算误差主要归因于观测环境因素, 尤其是周边建筑物分布和地形特征的差异。具体而言, 观测站 1~3 所在的 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网格内, 平均建筑物密度分别为 28.8%、19.6% 和 5.5%, 平均建筑物高度分别为 90、72 和 108 m(均高于观测站观测高度), 建筑物排列方向为东北—西南或东西向, 与观测站主导风向(东南风)夹角均大于 45° , 形成明显遮挡效应。观测站 4 周边虽无建筑物干扰, 但其东侧邻近山体, 呈东北—西南向分布, 与观测站主导风向(东南风)夹角接近 90° , 亦形成了明显的遮挡效应。同时, 4 个观测站对应的测算基准站位于空旷地带, 地势平坦无显著干扰源。观测站与基准站观测环境差异加剧了测算误差, 4 个观测站均有 80% 以上样本存在测算风力大于实际观测风力的偏差, α_{obs} 明显小于 α_{lidar} (表 5)。

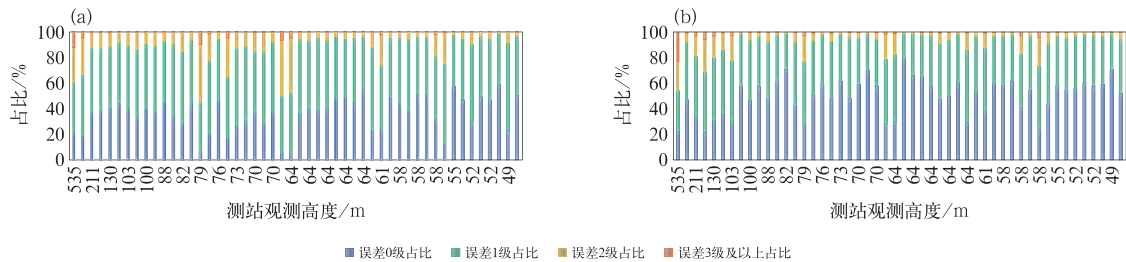
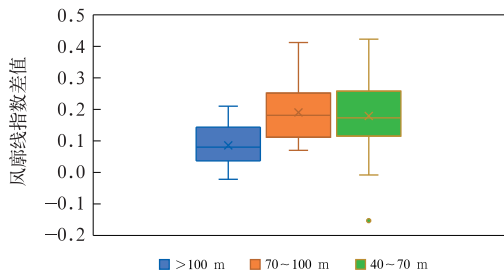


图 2 (a) α_{lidar} 和 (b) α_{revised} 风力测算误差分布

Fig. 2 Distribution of wind force errors of (a) α_{lidar} and (b) α_{revised}



注: 箱线图中触须的上端和下端分别代表统计最大值和最小值, 箱体内部三条线自下而上分别代表第 25%、50% 和 75% 分位数。

图 3 α_{lidar} 与 α_{obs} 差值箱线图

Fig. 3 Box plot of difference values between α_{lidar} and α_{obs}

4 激光风廓线指数修正

针对 α_{lidar} 系统性高估及其环境敏感性特征, 构建了多参数耦合的风廓线指数修正模型。模型实施路径为: (1) 基于广州市建筑物矢量数据库, 采用 GIS 空间分析技术生成 100 m 分辨率网格化建筑物参数场(包含网格建筑物密度和平均高度), 空间分布如图 4 所示; (2) 建立三维修正系数 β (表 6), 其维度包含测算高度(z_{lev})与网格建筑物平均高度(pjz_{grid})的差值、测算网格与基准站网格建筑物密度差异(mdc)以及地面风力($\text{fl}_{\text{ground}}$); (3) 将激光风廓线指数与修正系数动态耦合后得到该网格的修正风廓线指数(α_{revised}), 其数据表达为:

表 5 代表观测站测算误差指标及观测环境参数

代表观测站	观测高度/m	误差 0 级占比/%	误差 1 级占比/%	测算偏大占比/%	测算偏小占比/%	m_1 / %	h / m	m_2 / %	e
观测站 1	79	6.9	38.8	92.9	0.20	28.8	90	0	-0.412
观测站 2	64	5.4	48.0	94.5	0.09	19.6	72	0	-0.388
观测站 3	68	17.5	47.6	80.6	1.90	5.5	108	0	-0.289
观测站 4	64	5.8	44.5	94.1	0.06	0.0	0	0	-0.423

注: m_1 和 m_2 分别为楼顶站和测算基准站网格建筑物密度, h 为楼顶站网格建筑物平均高度, $e=\alpha_{\text{obs}}-\alpha_{\text{lidar}}$ 。

$$\alpha_{\text{revised}} = \alpha_{\text{lidar}} + \beta(z_{\text{lev}}, \text{pjz}_{\text{grid}}, \text{mdc}, \text{fl}_{\text{ground}})$$

(2)

式中 α_{lidar} 由表 4 查算获得。该模型通过空间异质性参数化,有效解耦了环境干扰因素。

利用 α_{revised} 进行近地层高空风测算检验,结果表明,修正后的风廓线指数显著提高了测算精度(图 2b):整体样本中测算风力误差 ≤ 1 级的比例提升至 91.7%(较修正前提升 4.7%),其中测算误差 0 级的比例提升至 50.1%(较修正前大幅提升 13.8%);且修正后,76%的观测站 0 级误差占比突破了 40% 阈值。

5 近地层高空风监测预报模型及应用

本研究构建了广州市域高分辨率(100 m)的近地层高空风(50~500 m)监测预报模型,其技术框架包含 3 个核心模块:(1)数据预处理模块,基于 GIS 平台将研究区域离散化为 730 963 个 100 m $\times$ 100 m 网格单元,每个网格单元与最近的气象自动站或精细化预报网格点匹配,作为测算基准站。其中气象自动站总数为 484 个,精细化预报网格空间分辨率为 5 km;(2)参数化建模模块,基于建筑物矢

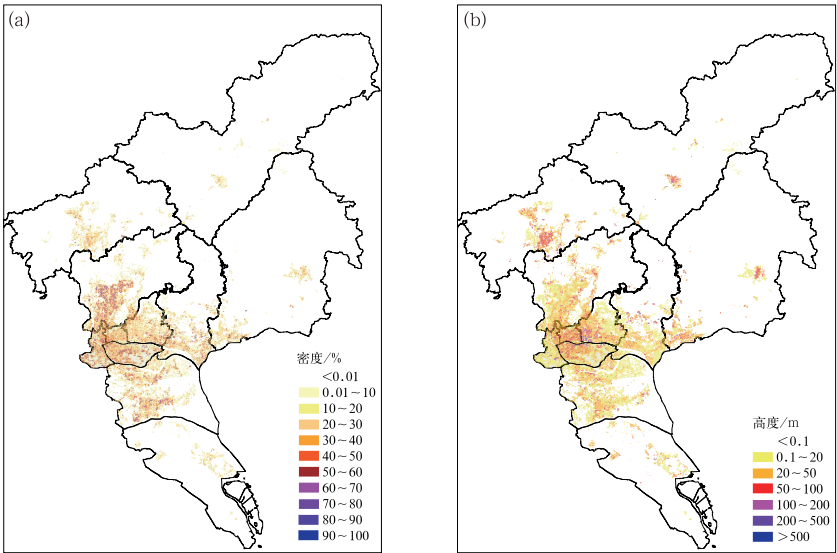


图 4 广州百米级网格建筑物(a)密度和(b)平均高度分布
Fig. 4 Distributions of (a) building density and (b) building average height at a 100 m $\times$ 100 m grid resolution in Guangzhou

表 6 基于建筑物环境参数与地面风力的激光风廓线指数修正系数(β)

修正条件	静风	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级及以上
$z_{\text{lev}} > \text{pjz}_{\text{grid}}$	-0.25	-0.22	-0.15	-0.05	-0.03	-0.01
$z_{\text{lev}} \leq \text{pjz}_{\text{grid}}, \text{mdc} < 10\%$	-0.30	-0.25	-0.20	-0.15	-0.05	-0.03
$z_{\text{lev}} \leq \text{pjz}_{\text{grid}}, 10\% \leq \text{mdc} < 20\%$	-0.35	-0.30	-0.25	-0.20	-0.08	-0.05
$z_{\text{lev}} \leq \text{pjz}_{\text{grid}}, \text{mdc} \geq 20\%$	-0.40	-0.35	-0.30	-0.25	-0.10	-0.08

量数据,通过空间分析获取各网格单元的建筑物密度、平均高度,依据测算高度、地面风力及网格建筑参数,结合表 4 和表 6,构建网格单元风廓线指数动态算法;(3)监测预报模块,集成气象站实时观测与 7 d 预报风场数据,结合网格动态修正的风廓线指数,实现 50~500 m 高度层风场的动态反演。该模型已集成至“番禺区建设工程气象服务平台”,为该区 175 个建筑工地提供近地层高空风逐 5 min 实时监测和未来 168 h 预报产品,为城市高空作业安全提供了经济有效的风灾防控解决方案。

6 结论和讨论

本研究融合多源气象观测数据与城市建筑物数据,构建了基于风廓线指数动态修正的近地层高空风场反演模型,得出以下主要结论。

(1)基于激光测风雷达分钟级观测数据,结合风廓线幂律方法,计算了不同地面风力条件下近地层高空分层激光风廓线指数。结果表明:近地层高空风力随高度和地面风力的增加呈增大趋势,但当地面风力增强时,近地层高空风力的增幅趋缓,揭示了近地层高空风随高度和地面风力条件变化的非线性特征。

(2)针对激光风廓线指数存在系统性高估及其对观测环境敏感的特点,建立了由百米级网格建筑物平均高度、密度,测算高度和地面风力共同作用的风廓线指数多因子修正算法,改进了传统方法依赖单一粗糙度参数的局限性。该修正模型显著提升了风力测算精度,91.7%的样本测算误差控制在 1 级内,其中 50.1%实现零误差。

(3)基于风廓线指数动态修正算法,构建了广州市域范围内水平分辨率 100 m、垂直高度覆盖 50~500 m 的三维近地层高空风场监测预报模型。该模型支持逐 5 min 实时监测和最长 168 h 预报,具备业务化产品输出能力,为城市高空作业的风灾防控提供了低成本、高精度的支撑手段。

模型重构风场时沿用了地面观测风向,但统计分析表明,仅约 10%的样本地面风向与近地层高空风向完全一致,约 50%的样本风向差异在两个方位角以内,说明地面风向难以准确代表近地层高空风向分布。因此,尽管本模型在风力反演方面表现良好,但在风向精度要求较高的应用场景中(如无人机航线规划等低空经济领域)尚需进一步优化。未来研究可从引入多层风向廓线数据、融合边界层风场

数值模拟结果等方面入手,提升风向反演精度,拓展模型在复杂城市环境中的多场景适应能力。

参考文献

- 陈斌源,姜陈威,2024.多普勒激光测风雷达及风廓线雷达探测能力分析[J].仪器仪表用户,31(5):62-64. Chen B Y, Jiang C W, 2024. Analysis of detection capability of Doppler laser wind radar and wind profile radar[J]. Instrum Users, 31(5): 62-64 (in Chinese).
- 陈磊,卞建春,刘毅,等,2017.可业务化应用的 L 波段探空系统高空风改进算法[J].沙漠与绿洲气象,11(1):22-27. Chen L, Bian J C, Liu Y, et al, 2017. An improved upper-air wind measurement algorithm for L-band radiosonde sounding system[J]. Desert Oasis Meteor, 11(1): 22-27 (in Chinese).
- 崔杨,陈正洪,何英杰,等,2021.湖北省近地层风切变特征[J].气象科技,49(5):785-793. Cui Y, Chen Z H, He Y J, et al, 2021. Characteristics of surface layer wind shear in Hubei Province [J]. Meteor Sci Technol, 49(5): 785-793 (in Chinese).
- 龚强,汪宏宇,朱玲,等,2015.辽宁省近地层风切变特征研究[J].自然资源学报,30(9):1560-1569. Gong Q, Wang H Y, Zhu L, et al, 2015. Study on the near surface wind shear characteristics in Liaoning Province[J]. J Nat Resour, 30(9): 1560-1569 (in Chinese).
- 龚玺,朱蓉,李泽椿,2018.我国不同下垫面的近地层风切变指数研究[J].气象,44(9):1160-1168. Gong X, Zhu R, Li Z C, 2018. Study of near-surface wind shear exponents of different regions in China[J]. Meteor Mon, 44(9): 1160-1168 (in Chinese).
- 郭凤霞,朱文越,饶瑞中,2010.非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究[J].气象,36(6):90-94. Guo F X, Zhu W Y, Rao R Z, 2010. Study on the feature of surface layer wind velocity profile and the roughness over non-homogeneous landform [J]. Meteor Mon, 36(6): 90-94 (in Chinese).
- 金效梅,朱文越,刘庆,2020.激光相干测风技术应用研究[J].大气与环境光学学报,15(3):161-173. Jin X M, Zhu W Y, Liu Q, 2020. Application research of laser coherent wind technology[J]. J Atmos Environ Opt, 15(3): 161-173 (in Chinese).
- 鞠红霞,刘素萍,何芴,2018.梯度风观测资料在高层建筑物气象灾害风险评估中的应用研究[J].天津科技,45(3):66-69. Ju H X, Liu S P, He S, 2018. Application of gradient wind observation data in meteorological disaster risk evaluation for high-rise buildings[J]. Tianjin Sci Technol, 45(3): 66-69 (in Chinese).
- 李聪健,高航,刘奕,2023.基于数值模拟和机器学习的风场快速重构方法[J].清华大学学报(自然科学版),63(6):882-887. Li C J, Gao H, Liu Y, 2023. Fast reconstruction of a wind field based on numerical simulation and machine learning[J]. J Tsinghua Univ (Sci Technol), 63(6): 882-887 (in Chinese).
- 李叶晴,师春香,沈润平,等,2023.基于 WRF-LES 的门头沟地区近地面风场模拟与边界层方案敏感性研究[J].高原气象,42(3):758-770. Li Y Q, Shi C X, Shen R P, et al, 2023. Simulation of near-surface wind over Mentougou with WRF-LES and sensitivity study of planetary boundary layer schemes[J]. Plateau Meteor, 42(3): 758-770 (in Chinese).
- 梁建平,李宇中,黎洁波,等,2014. L 波段高空气象探测系统测风算法改进探讨[J].气象科技,42(5):753-758. Liang J P, Li Y Z, Li

- J B, et al, 2014. Improvement of wind measurement algorithm for L-band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol, 42(5): 753-758(in Chinese).
- 刘敏, 孙杰, 杨宏青, 等, 2010. 湖北省不同地形条件下风随高度变化研究[J]. 气象, 36(4): 63-67. Liu M, Sun J, Yang H Q, et al, 2010. The study on wind speed change with height under different terrain conditions in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 36(4): 63-67(in Chinese).
- 刘学军, 吴丹朱, 1991. 城市建筑物群对低层大气风速廓线影响的统计分析[J]. 气象, 17(7): 14-18. Liu X J, Wu D Z, 1991. The statistical analysis on the mean wind profiles in lower atmospheric layer effected by the urban buildings[J]. Meteor Mon, 17(7): 14-18(in Chinese).
- 刘震卿, 张冲, 吴晓波, 等, 2020. 考虑粗糙地表的近地层风场仿真模拟研究及误差分析[J]. 空气动力学学报, 38(4): 715-722. Liu Z Q, Zhang C, Wu X B, et al, 2020. Simulation and error analysis of wind field considering surface roughness[J]. Acta Aerodyn Sin, 38(4): 715-722(in Chinese).
- 陶天友, 邓鹏, 王浩, 等, 2025. 基于机器学习的极端风场短时预测研究进展与思考[J]. 空气动力学学报, 43(5): 78-91. Tao T Y, Deng P, Wang H, et al, 2025. Research progress and considerations on short-term prediction of extreme wind fields based on machine learning[J]. Acta Aerodyn Sin, 43(5): 78-91(in Chinese).
- 田浦, 顾国卿, 石照春, 1984. 城市近地层风特性的研究[J]. 气象, 10(8): 17-20. Tian P, Gu G Q, Shi X C, 1984. Study on wind characteristics in the urban near-surface layer[J]. Meteor Mon, 10(8): 17-20(in Chinese).
- 王栋成, 邱桀, 董旭光, 等, 2019. 济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达大风探空测风对比[J]. 气象, 45(8): 1169-1180. Wang D C, Qiu C, Dong X G, et al, 2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-band radar in Jinan[J]. Meteor Mon, 45(8): 1169-1180(in Chinese).
- 王珣, 李伟, 陈永清, 等, 2011. L 波段探空系统高空风平滑计算方法探讨[J]. 气象, 37(1): 85-91. Wang M, Li W, Chen Y Q, et al, 2011. Discussion of smoothing methods of upper-air wind measured by L-band radar and radiosonde sounding system[J]. Meteor Mon, 37(1): 85-91(in Chinese).
- 吴泓, 李永, 郑清华, 等, 2011. 改进高空测风算法的试验[J]. 气象科学, 31(1): 113-118. Wu H, Li Y, Zheng Q H, et al, 2011. Improve on the observation test of high-altitude wind[J]. Sci Meteor Sin, 31(1): 113-118(in Chinese).
- 吴维, 高太长, 舒海龙, 等, 2009. 卫星导航定位系统在高空探空测风上的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 26(1): 8-11, 34. Wu W, Gao T C, Shu H L, et al, 2009. Applying of upper air sounding with navigation satellite system[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 26(1): 8-11, 34(in Chinese).
- 夏芸洁, 韦涛, 李林, 等, 2024. 测风激光雷达与风廓线雷达的探测性能评估及数据融合[J]. 气象科技, 52(2): 151-162. Xia Y J, Wei T, Li L, et al, 2024. Detection performance evaluation and data fusion of Doppler wind lidar and wind profiling radar[J]. Meteor Sci Technol, 52(2): 151-162(in Chinese).
- 邢佩, 房小怡, 张宁, 等, 2019. 城市近地面高分辨率快速风场模型构建与应用[J]. 气象, 45(7): 978-988. Xing P, Fang X Y, Zhang N, et al, 2019. Construction and application of the urban surface high-resolution and fast wind field model[J]. Meteor Mon, 45(7): 978-988(in Chinese).
- 杨国彬, 郭启云, 舒康宁, 等, 2021. 基于名单控制方法的探空测风数据质量分析[J]. 气象, 47(6): 727-736. Yang G B, Guo Q Y, Shu K N, et al, 2021. Quality analysis of the radiosonde wind observation data based on the list control method[J]. Meteor Mon, 47(6): 727-736(in Chinese).
- 姚晓娟, 孙鑫, 计燕霞, 等, 2024. IVAP 法反演组网雷达风场试验与验证[J]. 气象, 50(11): 1386-1396. Yao X J, Sun X, Ji Y X, et al, 2024. Experiments and verification on Doppler radar network wind fields retrieved by the IVAP method[J]. Meteor Mon, 50(11): 1386-1396(in Chinese).
- 张弛, 王东海, 巩远发, 2015. 基于 WRF/CALMET 的近地面精细化风场的动力模拟试验研究[J]. 气象, 41(1): 34-44. Zhang C, Wang D H, Gong Y F, 2015. Dynamic modeling study of highly resolved near-surface wind based on WRF/CALMET[J]. Meteor Mon, 41(1): 34-44(in Chinese).
- 张志坚, 张静, 伍光胜, 等, 2022. 超大城市综合气象观测试验之测风激光雷达数据评估[J]. 热带气象学报, 38(2): 253-264. Zhang Z J, Zhang J, Wu G S, et al, 2022. Evaluation of wind lidar data in megacities experiment on integrated meteorological observation[J]. J Trop Meteor, 38(2): 253-264(in Chinese).
- 赵世军, 高太长, 马英, 等, 2013. 利用北斗导航系统探测高空风的研究[J]. 测绘科学, 38(5): 13-15, 45. Zhao S J, Gao T C, Ma Y, et al, 2013. Research on upper wind measurement with BD navigation system[J]. Sci Surv Mapp, 38(5): 13-15, 45(in Chinese).
- 郑腾飞, 李肖雅, 万齐林, 等, 2024. 综合观测试验中的激光测风雷达探测性能分析[J]. 大气与环境光学学报, 19(5): 529-542. Zheng T F, Li X Y, Wan Q L, et al, 2024. Analysis of detection performance of wind lidar in comprehensive observation experiment[J]. J Atmos Environ Opt, 19(5): 529-542(in Chinese).
- 中华人民共和国交通运输部, 2019. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01-2018[S]. 北京: 人民交通出版社. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2019. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01-2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd(in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑物工业出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press(in Chinese).
- Davenport A G, 1961. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 87(372): 194-211.
- Liu B M, Ma X, Guo J P, et al, 2024. Extending the wind profile beyond the surface layer by combining physical and machine learning approaches[J]. Atmos Chem Phys, 24(7): 4047-4063.

(本文责编:侯翠梅)