

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 海珠区气象局，广州 510240

摘要：本文基于激光测风雷达数据，采用风廓线幂律（Wind Profile Exponent, WPE）方法，计算了不同地面风力条件下，50–500米高度范围内的风廓线指数，并通过50个观测高度超过40米的气象站数据进行验证。结果表明，激光风廓线指数存在系统性高估问题，且误差与观测区域的建筑密度和高度特征密切相关。针对这一问题，本文引入网格化建筑密度和建筑高度参数，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环境的近地层高空风场三维重构模型，具备100米水平分辨率和50–500米垂直覆盖范围，实现每5分钟实时监测和最长168小时的预报输出，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，具有良好的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，建筑密度，建筑高度，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

A 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 Haizhu District Meteorological Bureau, Guangzhou 510240

Abstract: This study is based on LiDAR wind profiler data and uses the Wind Profile Exponent (WPE) method to calculate the wind profile exponent within the 50–500 meter height range under different surface wind conditions. The results were validated using data from 50 meteorological stations, each with observation heights exceeding 40 meters. The findings indicate that the LiDAR wind profile exponent suffers from a systematic overestimation, with errors closely related to the building density and height characteristics of the observation area. To address this issue, the study introduces parameters of gridded building density and building height to construct a multi-factor-driven dynamic correction algorithm for the wind profile exponent, thereby overcoming the limitation of traditional methods that rely solely on a single

*广东省气象联合基金（2024A1515510011）、粤港澳大湾区气象科技协同攻关项目（GHMA2024Y05）共同资助
2025年4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

通讯作者：张锦城，主要从事天气预报与风险预警研究. E-mail:1210270836@qq.com

roughness parameter. After correction, 91.7% of the wind force calculation errors were confined within the range of ± 1 Beaufort scale level, with 50.1% showing zero error. Building upon this, a three-dimensional high-altitude wind field reconstruction model tailored for urban complex building environments was further developed. This model has a horizontal resolution of 100 meters and vertical coverage from 50 to 500 meters, enabling real-time monitoring every 5 minutes and forecast outputs up to 168 hours. The model provides a low-cost, high-precision wind disaster prevention and control technology pathway for urban high-altitude operations, offering significant business application potential and engineering value.

Keywords: Wind-measuring lidar, Wind Profile Exponent, Building density, Building height, Near-surface elevated Wind Field Monitoring and Forecasting, Wind Disaster Prevention

引言

随着超高层建筑技术的持续发展，超高空作业与大型预制件装配式吊装需求快速增长，而近地层高空风（指高于常规地面测风高度、约 50–500 米大气边界层中的近地层高段风场）变化直接关系到高空作业安全与工程效率。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三类技术手段：（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；王缅等，2011；陈磊等，2017；吴泓等，2011；杨国彬等，2021），但其站点密度（全国范围仅 120 个）及观测频次（12 小时/次）难以满足高空作业场景对风场信息高时空分辨率的需求；（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），但其同样覆盖密度有限，难以感知城市局地风场信息；（3）多普勒雷达、风廓线雷达及激光测风雷达因其具有高时间分辨率、数据连续性强与自动化程度高等特点（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，但因设备成本高、运行维护复杂，尚难实现大规模部署，限制了其在近地层高空作业场景的广泛应用。为突破上述技术瓶颈，基于地面观测资料开展近地层高空风场推算成为重要研究方向，加拿大学者 Davenport（1961）在分析全球 90 余次强风过程资料的基础上，提出了 Davenport 风速谱和梯度风沿高度变化规律即指数律模型，广泛应用于风能评估、结构抗风设计等领域。指数律模型认为风速随高度呈幂函数增长，风廓线指数是该模型的核心参数，主要与地表下垫面粗糙度相关。我国《建筑结构荷载规范》（GB 50009–2012）（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, 但由于需依赖长期梯度风观测数据, 而建筑施工场景的工期限制与空间异质性导致其适用性受限。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。

本研究以广州市为实验区, 通过融合多源气象观测数据与城市网格化建筑高度、建筑密度参数, 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。主要贡献包括: ①建立多因子驱动的风廓线指数修正算法, 改进了传统方法依赖单一粗糙度参数的局限性; ②研发水平分辨率 100m、垂直覆盖 50–500m 的三维风场重构技术; ③研发逐 5 分钟实时监测与 168 小时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 数据说明

本研究采用以下多源观测数据集:

(1) 激光测风雷达观测数据。数据来源于广州市气象局部署的 WindPrint S4000 型相干多普勒激光测风雷达(站址: 23.14° N, 113.31° E)。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, 其主要观测参数和技术指标见表 1。广州超大城市综合气象观测试验期间(2019 年 11 月 6 日至 12 月 9 日), 张志坚等(2022)利用与雷达距离小于 50m 的深圳气象梯度塔同期观测数据对该设备进行了数据质量评估, 结果表明二者的测风结果具有较高一致性, 风速和风向相关系数分别为 0.96 和 0.99, 平均绝对误差分别为 0.54m/s 和 9.95°。本研究使用的激光测风雷达数据涵盖 52–494 米高度层(垂直间隔 26m)的水平风速和风向, 时间范围为 2020 年 1 月至 2023 年 12 月, 时间分辨率为 6 分钟, 每小时有 10 个观测时次, 即 00、06、12、18、24、30、36、42、48、54 分。本文中激光测风雷达数据主要用于激光风廓线指数的拟合。

(2) 气象站观测数据。来自广州市 484 个气象站, 数据包括 2 分钟平均风速和风向, 时间范围为 2020 年 1 月至 2024 年 12 月, 时间分辨率为 5 分钟, 每小时有 12 个观测时次, 即 00、05、10、

15、20、25、30、35、40、45、50、55 分。在利用气象站观测数据和激光测风雷达观测数据进行风廓线指数计算和验证时,为确保数据时序的一致性与可比性,本文将二者数据时次进行了匹配,雷达的 00、06、12、18、24、30、36、42、48、54 分数据对应气象站的 00、05、10、20、25、30、35、40、50、55 分数据,最大时间差不超过 2 分钟。本文中气象站观测数据有 3 个用途:①与激光测风雷达同址的地面观测站数据用于拟合激光风廓线指数;②50 个观测高度超 40m 的测站观测数据,作为独立数据源,用于对激光风廓线指数测算结果进行验证,并基于误差分析结果制定激光风廓线指数动态修正方案;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,仅在模型验证与修正阶段使用,未参与风廓线指数初始拟合训练。因此,在数据来源和功能定位上,模型构建、验证、修正与应用彼此独立,符合统计建模中的独立性原则,确保风廓线指数评估的客观性与修正方案的可靠性。

(3) 城市建筑形态数据。数据包含建筑物的多边形平面几何信息及楼层高度属性,用于计算网格建筑密度、网格平均建筑高度参数,参与激光风廓线指数的动态修正。

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 Observational Parameters of the WindPrint S4000 Coherent Doppler Wind LiDAR

观测参数	性能指标
激光波长	1550nm
脉冲宽度	100~400ns
单脉冲能量	$\geq 100 \mu J$
径向数据更新频率	0.25Hz
风速测量范围	0~75m/s
风速测量精度	$\leq 0.1 m/s$
风向测量精度	$\leq 3^\circ$ (风速 $> 2 m/s$)
探测距离	50~6000m
距离分辨率(径向)	30m
扫描精度	$\pm 0.1^\circ$
扫描方式	DBS

1.2 风廓线指数计算方法

在 500~1500 m 以下的大气边界层(摩擦层)中,风速随高度变化的常用模拟方法为指数律。该方法在工程风环境分析中应用广泛,亦为国内外多项设计规范所采纳。《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 和《公路桥梁抗风设计指南》(JTG/T D60—01—2004) 均推荐采用指数形式描述近地层风速的垂直分布,其表达式如下:

式中, Z 为测算高度, Z_1 为测算基准站的测风高度(若测算基准站安装在地面, 则 Z_1 为10m; 若测算基准站安装在楼顶, 则 Z_1 为楼层高度×3m后再加10m), 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。《建筑结构荷载规范》中推荐了不同地面粗糙度对应的 α 值(表2)。

表 2 各种地面粗糙度条件下的风廓线指数

Table 2 Wind Profile Exponents Under Various Terrain Roughness Conditions

地面粗糙度	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	密集建筑群的城市市区	0.22
D	密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30

1.3 网格建筑密度和平均建筑高度估算方法

基于广州市建筑物矢量数据，采用 GIS 空间分析技术估算 100m 空间分辨率网格单元的建筑密度和平均建筑高度。其中，建筑密度定义为该网格单元内建筑物总面积占该单元总面积的百分比，平均建筑高度为该网格单元内所有建筑物高度的平均值，建筑物高度由建筑物层数乘以 3m 得出。

2 激光风廓线指数计算

基于 2020 年至 2023 年间激光测风雷达与同址地面气象站的分钟级测风数据，本文系统分析了 52 至 494 米垂直高度范围内风速与地面风速的关联特征。结果表明，风速在不同高度层呈现出随地面风速增加和高度升高而增大的趋势。具体而言，当地面风速为静风或 1 级风时，近地层高空（52–494 米）出现 2–4 级风的概率超过 85%，且 100 米以上可能出现强风（ ≥ 6 级），但概率仅为 0.6%；当地面风速提升至 2 级时，近地层高空出现 2–4 级风的概率为 87%，且 70 米以上可能出现强风，强风概率增至 1.3%；当地面风速为 3 级时，近地层高空出现 3–5 级风的概率为 85.3%，50 米以上可能出现强风，强风概率增至 6.4%；在地面 4 级风条件下，近地层高空维持 4–5 级风的概率为 60%，强风概率上升至 29.3%；当地面风速达到 5 级及以上时，近地层高空维持 5 级风的概率为 25%，强风出现概率高达 53.7%。

为量化揭示近地层高空风对地面风的响应特征,采用风廓线幂律(Wind Profile Exponent, WPE)

方法，分类计算了不同地面风力等级及风向条件下各高度层的风廓线指数。结果表明，对于同一高度层，在地面风力等级相同的条件下，不同风向所对应的风廓线指数差异较小，标准差多数小于 0.1；在地面风向相同的条件下，不同地面风力等级对应的风廓线指数差异显著，标准差普遍大于 0.2。这一结果说明，相比地面风向，地面风力对风廓线指数的影响更明显。图 1 为各高度层在不同地面风力条件下的风廓线指数箱线图，表明：随着地面风力的增大，各个高度层的风廓线指数呈现出逐渐减小的趋势；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，本文采用地面风力等级为主要分类指标，构建了差异化的垂直高度风廓线指数（表 3，简称为激光风廓线指数 α_{lidar} ），其取值为箱线图中位数。由表 3 可见，随着高度的增加， α_{lidar} 并没有呈现线性增长的趋势，甚至地面静风时 α_{lidar} 还随着高度的增加而减小。因此，本文没有用线性回归的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。

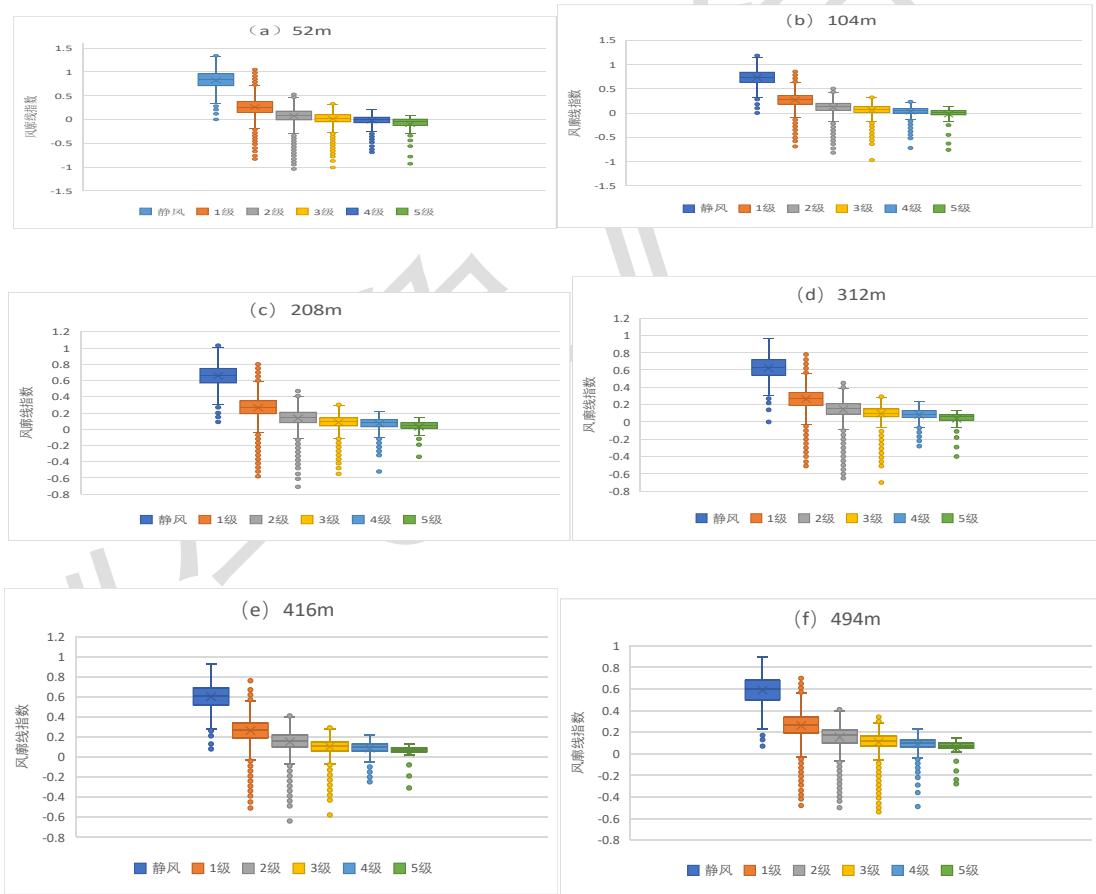


图 1 不同高度层激光风廓线指数(α_{lidar})箱线图:(a) 52m (b) 104m (c) 208m (d) 312m (e) 416m (f) 494m

Fig. 1 Box-and-whisker plots of lidar-derived wind profile exponent (α_{lidar}) across stratified height layers: (a) 52m (b) 104m (c) 208m (d) 312m (e) 416m (f) 494m

表 3 不同地面风力对应的不同高度层激光风廓线指数(α_{lidar})表

Table 3 Lidar-derived wind profile exponents (α_{lidar}) corresponding to surface wind conditions across

stratified altitude layers						
高度/m	静风	一级	二级	三级	四级	五级及以上
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

3 激光风廓线指数验证

为验证 α_{lidar} 准确性，本文选取广州市 50 个观测高度大于 40m 的楼顶气象站，将其 2020–2024 年观测风速与基于 α_{lidar} 的测算风速进行对比验证。测算过程中，基准站选取距离楼顶站最近的地面观测站。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%）。但不同测站间存在显著差异（图2a）：300m以上测站误差≤1级样本比例仅为60%（0级误差占比约20%、1级误差占比约40%）；而300m以下测站误差≤1级样本比例为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300m以下的区域。但尽管如此，300m以下仍有少部分测站的准确率较低。

为进一步分析误差原因，本文基于楼顶站观测数据计算了楼顶站的风廓线指数（ 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米以上相对较小、100米以下相对较大。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<100m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，本文选取4个300m以下测算准确率偏低的测站，系统考察其设备运行状态和观测环境。结果表明，4个测站设备运行正常，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，测站1-3所在的100m*100m网格内，平均建筑密度分别为28.8%、19.6%和5.5%，平均建筑高度分别为90m、72m和108m（均高于测站观测高度），建筑排列方向为东北-西南或东西走向，与测站主导风向（东南风）夹角均大于45°，形成明显遮挡效应。测站4周边虽无建筑物干扰，但其东侧邻近山体，呈东北-西南方向分布，与测站主导风向（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。测站与基准站观测环境差异加剧了测算误差，4个测站均有80%以上样本存在测算风力大于实际观测风力的偏差，基于测站观测数据反演的风廓线指数明显小于激光风廓线指数（表4）。

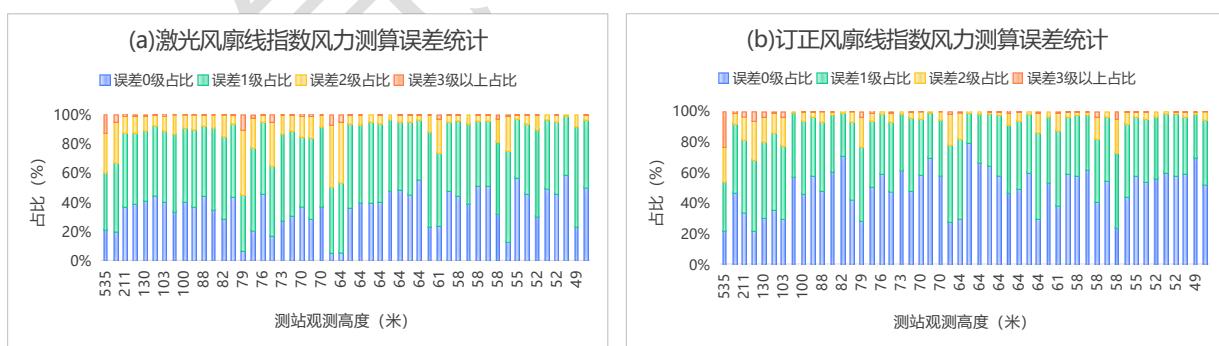


图2 风力测算误差分布：(a) α_{lidar} 测算误差 (b) $\alpha_{revised}$ 测算误差

Fig. 2 Error distributions in wind estimation: (a) Original lidar-derived exponent (α_{lidar}) vs. (b) Revised exponent ($\alpha_{revised}$) with environmental correction

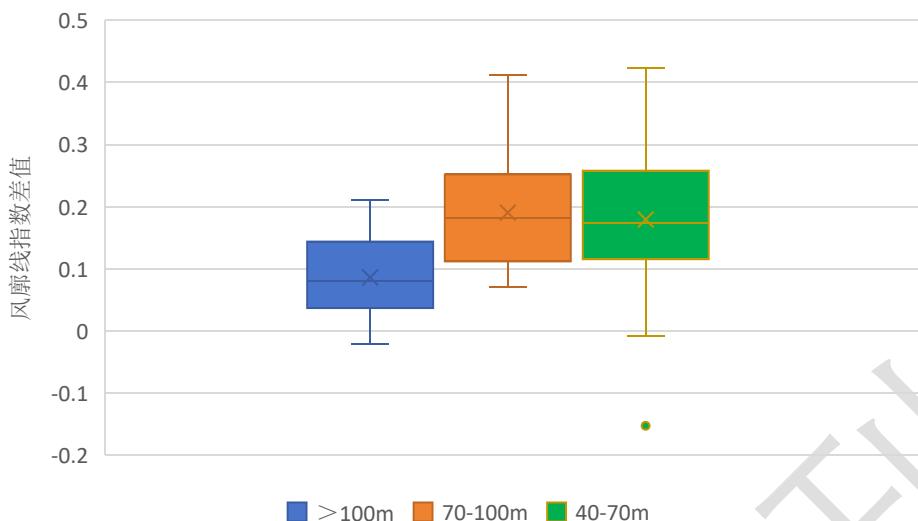


图 3 α_{lidar} 与 α_{obs} 差值箱线图

Fig. 3 Box-and-whisker analysis of $\Delta\alpha(\alpha_{lidar} - \alpha_{obs})$

表 4 代表测站测算误差指标及观测环境参数

Table 4. Estimation error metrics and environmental parameters of selected representative stations

代表测站	观测高度(米)	误差0级占比(%)	误差1级占比(%)	测算偏大占比(%)	测算偏小占比(%)	楼顶站网格建筑密度(%)	楼顶站网格平均建筑高度(m)	测算基准站网格建筑密度(%)	楼顶站与基准站网格密度差(%)	楼顶风廓线指数
测站 1	79	6.9	38.8	92.9	0.2	28.8	90	0	28.8	-0.412
测站 2	64	5.4	48	94.5	0.09	19.6	72	0	19.6	-0.388
测站 3	68	17.5	47.6	80.6	1.9	5.5	108	0	5.5	-0.289
测站 4	64	5.8	44.5	94.1	0.06	0	0	0	0	-0.423

4 激光风廓线指数修订

针对第 3 节揭示的 α_{lidar} 系统性高估及其环境敏感性特征, 本文构建了多参数耦合的风廓线指数修订模型。模型实施路径包括: (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 100m 分辨率网格化建筑参数场 (包含网格建筑密度和网格平均建筑高度, 空间分布见图 4, 计算方法详见 1.3 节); (2) 建立三维订正系数(β)矩阵 (表 5), 其维度包含测算高度与网格平均建筑高度的差值($zlev - pjz_{grid}$)、测算网格与基准站网格建筑密度差异(mdc)以及地面风力等级(fl_ground); (3) 将激光风廓线指数与订正系数动态耦合后得到该网格的实际风廓线指数($\alpha_{revised}$), 其数据表达为:

$\alpha_{revised} = \alpha_{lidar} + \beta(zlev, pjz_{grid}, mdc, fl_ground)$, 其中 α_{lidar} 由表 3 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 $\alpha_{revised}$ 进行近地层高空风测算检验, 结果表明(图 2b), 修订后的风廓线指数显著提高了测算精度: 整体样本中测算风力误差 ≤ 1 级的比例提升至 91.7% (较订正前提升 4.7%), 其中测算误差 0 级的比例提升至 50.1% (较订正前大幅提升 13.8%); 且修订后, 76%的测站 0 级误差占比突破了 40% 阈值。

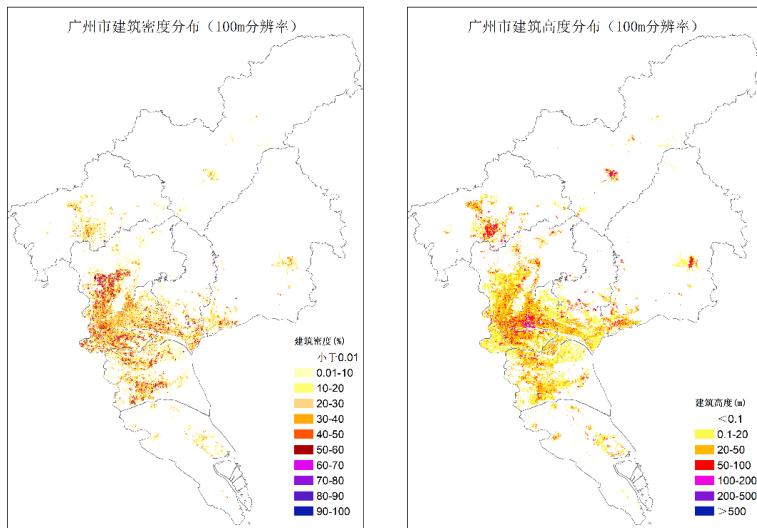


图 4 广州 100 米分辨率网格建筑密度(a) 和平均建筑高度(b) 分布

Fig. 4 Gridded spatial distributions of building density(a) and mean building height(b) at 100-meter resolution in Guangzhou

表 5 基于建筑环境参数的激光风廓线指数订正系数(β) 表

Table 5 Correction coefficients (β) for lidar-derived wind profile exponents incorporating building environmental parameters

订正条件/地面风力	静风	一级	二级	三级	四级	五级及以上
Zlev > pjz_grid	-0.25	-0.22	-0.15	-0.05	-0.03	-0.01
mdc < 10%	-0.3	-0.25	-0.2	-0.15	-0.05	-0.03
Zlev ≤ pjz_grid	10% ≤ mdc < 20%	-0.35	-0.3	-0.25	-0.2	-0.08
	mdc > 20%	-0.4	-0.35	-0.3	-0.25	-0.1

备注: Zlev 为测算高度, Pjz_grid 为测算网格平均建筑高度, mdc 代表测算网格建筑密度与基准站网格建筑密度的差值。

5 近地层高空风监测预报模型及应用

本文构建了广州市域高分辨率（100m）的近地层高空风（50–500m）监测预报模型，其技术框架包含三个核心模块：①数据预处理模块，基于 GIS 平台将研究区域离散化为 730963 个 100m*100m 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 5 公里；②参数化建模模块，基于建筑矢量数据空间分析获取各网格单元的建筑参数（网格建筑密度、网格平均建筑高度），根据测算高度、地面风力、网格建筑密度、网格平均建筑高度等参数，结合表 3 和表 5，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 天预报风场数据，结合网格动态修正的风廓线指数，实现 50–500m 垂直层风场的动态反演。该模型融入“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 分钟实时监测和未来 168 小时预报产品，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。作为该区智慧工地气象服务的核心技术载体，在 2024 年“数据要素×”大赛广东分赛气象服务赛道荣获三等奖。

6 结论和讨论

本研究融合多源气象观测数据与城市建筑数据，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，取得了较为显著的成果，主要结论如下：

- (1) 基于激光测风雷达的分钟级观测数据，构建了以地面风力等级分类为基础的垂直分层风廓线指数计算方案。结果表明：风速随高度和地面风力等级的增加呈增大趋势，但当地面风力增强时，近地层高空风速的增幅趋缓，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，建立了由建筑高度、建筑密度、测算高度和地面风力等级共同驱动的多因子修正算法，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 级以内，其中 50.1% 实现零误差，具备良好的工程适用性。
- (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 分钟实时监测和最长 168 小时预报，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。
- (4) 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, 何芍, 2018. 梯度风观测资料在高层建筑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, 石熙春, 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, 邱粲, 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).
- 王缅, 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).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. GB 50009–2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012. GB 50009–2012 Load code for the design of building structures[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.