

郭建平, 张玮, 周博闻, 等, 2025. 低空经济气象前沿科技问题研究进展与展望[J]. 气象, 51(11): 1455-1476. Guo J P, Zhang W, Zhou B W, et al, 2025. Progress and prospect of research on the key frontier scientific and technological issues in low-altitude economy meteorology[J]. Meteor Mon, 51(11): 1455-1476 (in Chinese).

低空经济气象前沿科技问题研究进展与展望^{*}

郭建平¹ 张 玮¹ 周博闻² 严 超³ 张雪琳⁴ 孙玉萍¹ 邓威龙¹
陈田萌¹ 杨红龙⁵ 邱宗旭⁵ 黎志波⁶ 陶 法⁷ 梁海河⁸ 张朝林¹

1 中国气象科学研究院 灾害天气科学与技术全国重点实验室/专项气象保障技术研究中心, 北京 100081

2 南京大学大气科学学院, 南京 210023

3 北京城市气象研究院, 北京 100089

4 中山大学大气科学学院, 珠海 519082

5 深圳市国家气候观象台, 深圳 518022

6 江西省气象探测中心, 南昌 330096

7 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

8 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081

提 要: 低空经济作为新质生产力代表, 其发展依赖于非管制空域内的飞行活动, 该空域主要对应大气边界层下层, 是湍流和风切变等航空危险(简称航危)天气的高发区域。气象条件与通信、导航、监视系统共同构成低空经济高质量发展的关键基础支撑。然而, 该空域的高时空分辨率航危天气监测预警能力仍严重不足, 对实现高效、安全的低空飞行构成严峻挑战。为此, 本文系统梳理了低空经济气象科技领域的国内外研究进展, 剖析了边界层湍流相干结构、低空风切变、湍流与微下击暴流监测预警以及大涡模拟等关键科技领域所面临的核心挑战。进而从近中性边界层湍流新理论、湿边界层过程、面向低空航空器安全飞行的气象智能感知装备研发、人工智能赋能的低空航危天气预警、智能计算流体力学模型研发以及低空气象条件与无人机路径规划协同优化等角度, 对低空经济气象领域若干前沿科技问题进行了展望。旨在深化低空航危天气与低空飞行器相互作用机理的认知, 为提升低空航危天气的高精度智能感知与快速预报预警能力提供理论依据与技术路径, 从而为低空经济的安全与可持续发展提供关键气象科技支撑。

关键词: 低空经济气象, 大气边界层, 风切变, 湍流, 微下击暴流, 大涡模拟

中图分类号: P404, V321, F561

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.082601

Progress and Prospect of Research on the Key Frontier Scientific and Technological Issues in Low-Altitude Economy Meteorology

GUO Jianping¹ ZHANG Wei¹ ZHOU Bowen² YAN Chao³ ZHANG Xuelin⁴
SUN Yuping¹ DENG Weilong¹ CHEN Tianmeng¹ YANG Honglong⁵
QIU Zongxu⁵ LI Zhibo⁶ TAO Fa⁷ LIANG Haihe⁸ ZHANG Chaolin¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology & Specialized Meteorological Support Technology Research Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

3 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

^{*} 国家重点研发计划(2024YFC3013001)、国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(42325501)和中国气象科学研究院基本科研业务经费(2024Z003)共同资助

2025 年 6 月 25 日收稿; 2025 年 10 月 12 日收修定稿

第一作者: 郭建平, 主要从事边界层气象和中小尺度天气研究. E-mail: jpguo@cma.gov.cn

4 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

5 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518022

6 Jiangxi Meteorological Observation Center, Nanchang 330096

7 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

8 CMA Meteorological Development and Planning Institute, Beijing 100081

Abstract: As an emerging form of new quality productive forces, the development of low-altitude economy relies heavily on flight operations within non-controlled airspace categories, such as Class G and Class W. This airspace predominantly resides in the lower atmospheric boundary layer, an area highly prone to aviation hazardous weather phenomena like turbulence and wind shear. Meteorological conditions, together with communication, navigation, and surveillance systems, constitute the critical foundational support for the high-quality development of the low-altitude economy. However, there remains a severe deficiency in the high spatiotemporal resolution monitoring and early warning capabilities for aviation hazardous weather within this airspace, posing significant challenges to achieving efficient and safe low-altitude flight operations. To address this, this paper systematically reviews domestic and international research progresses in low-altitude economy meteorology and analyzes the key core challenges currently faced in key scientific and technological domains, including coherent structures in boundary layer turbulence, low-altitude wind shear, monitoring and early warning of turbulence and microbursts, and large eddy simulation. Furthermore, this paper explores several frontier scientific and technological issues in low-altitude meteorology, which include new theoretical frameworks for near-neutral boundary layer turbulence, moist boundary layer processes, development of intelligent meteorological sensing equipment for low-altitude aircraft safety, early warning powered by artificial intelligence for low-altitude aviation hazardous weather, development of intelligent computational fluid dynamics models, and the synergistic optimization of low-altitude meteorological condition and unmanned aerial vehicle path planning. Overall, this study aims to deepen the understanding of the underlying mechanisms governing the interaction between low-altitude aviation hazardous weather and aircraft, and seeks to provide theoretical foundations and technical pathways for enhancing high-precision intelligent sensing, as well as rapid forecasting and early warning capabilities for low-altitude aviation hazardous weather. Ultimately, this work endeavors to deliver crucial meteorological science and technology support for the safety and sustainable development of the low-altitude economy.

Key words: low-altitude economy meteorology, atmospheric boundary layer, wind shear, turbulence, microburst, large eddy simulation

引言

在全球新一轮科技革命与产业变革加速演进的时代背景下,低空经济以巨大的发展潜力和广泛的赋能效应,正迅速崛起为新质生产力的重要代表,并日益成为驱动未来经济增长的新赛道与新引擎。低空经济指的是依托于垂直高度 1000 m 以下(根据实际需要可延伸至不超过 3000 m)的低空空域,以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的低空飞行活动为牵引,辐射带动相关领域融合发展而形成的综合性

经济形态。低空经济所依赖的飞行活动主要发生在 G 类(真高 120~300 m)和 W 类(真高 120 m 以下)(合称 G/W)这两个非管制空域范围(图 1)。低空飞行安全是低空经济高质量发展的生命线,要做到“飞得起,管得住,发展好”,离不开气象-通信-导航-监视一体化发展的低空基础设施支撑(图 2)。其中,高时空分辨率(米级+秒级)气象条件是影响低空飞行安全的重要因素,也是低空航空器适飞空域和时域资源开发利用的重要依据。然而,全球气候变化背景下,强降水、雷暴大风、微下击暴流、台风等极端天气事件呈频发、多发和重发态势。上述极端天

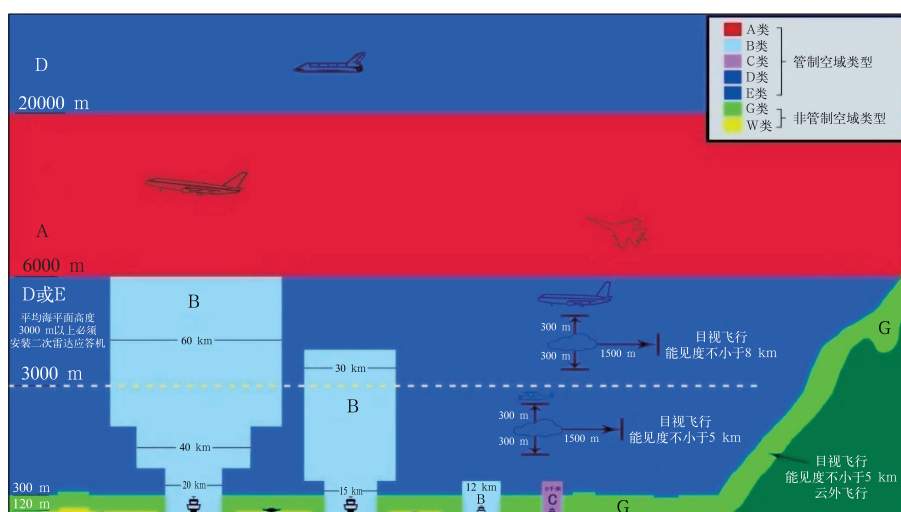


图 1 国家空域基础分类示意(中国民用航空局,2023)

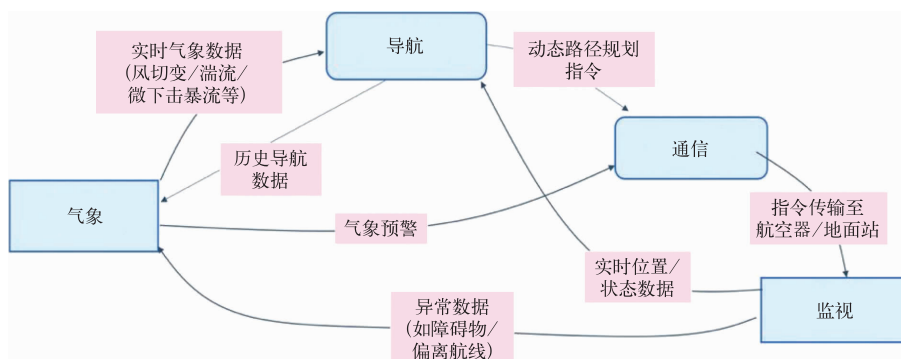
Fig. 1 Schematic diagram of basic classification of national airspace
(cited from Civil Aviation Administration of China, 2023)

图 2 影响低空飞行安全的气象-通信-导航-监视一体化发展框架示意

Fig. 2 Schematic diagram of the integrated development framework for meteorology-communication-navigation-surveillance affecting low-altitude flight safety

气背景下发生在低空空域内的湍流、风切变等影响飞行安全的航空危险(简称航危)天气监测预警能力仍严重不足,对低空经济高质量发展构成严峻挑战。

低空经济气象是针对交通物流、农林植保、工业巡检、治安防控、应急救援、文旅融合、生态环保、智慧交通等低空气象敏感行业趋利避害的需求,开展低空气象基础前沿理论、航空器与低空气象条件相互作用、低空航危天气监测预报预警等研究,以服务保障低空经济高质量发展的新兴交叉学科(中国气象局,2024)。其研究的主要空域涵盖了行星边界层(PBL)以及部分自由大气层。PBL以湍流运动为主要特征,是地气之间物质、能量和水汽等交换的重要场所,可显著影响云降水,同时也易受云雨反馈作用。尤其是当PBL过程与云雾物理过程发生相互

作用,即湍流-对流过程相互交织时,会进一步加剧低空风切变和强湍流发生概率,严重威胁飞行安全。

近年来,低空航空器坠毁、颠簸、偏航等典型案例频发,其安全飞行亟需现代化的低空气象保障。据美国国家运输安全委员会统计,欧美发达国家近30%的低空飞行事故由低空风切变和湍流等气象因素引发(Gultepe et al,2019)。G/W空域面临湍流、风切变、微下击暴流等航危天气挑战,其与边界层关键动力过程(如湍流对流相互作用、复杂下垫面强迫)耦合机制尚不明确。此外,低空航空器与风切变和湍流存在复杂的相关性。而现有气象站仅能给出10 m高度的风场信息,风廓线雷达在G空域存在观测盲区,多普勒测风激光雷达无法给出清洁大气和云雨条件下的低空风场(郭建平等,2021)。同时,现

有业务数值模式无法给出 G/W 空域内高分辨率的气象条件精准预报。

为推动低空经济的高质量发展,亟需对低空经济气象这一新兴交叉学科的发展现状进行系统评述,重点围绕大气边界层湍流相干结构理论、低空航天气(风切变/湍流/微下击暴流)监测预警技术以及高分辨率数值模拟方法,如大涡模拟和计算流体力学应用等关键领域的研究进展,剖析当前的领域痛点,并展望若干前沿科学问题,旨在为低空经济气象的理论创新与技术突破提供新思路。

1 低空经济气象研究主要进展

低空经济气象包括边界层气象理论体系的构建、低空航天气监测预警技术方法创新以及依托二者融合所形成的实际应用,目前已取得了显著进展,具体框架见图 3。在理论和机理方面,主要体现在对大气边界层湍流相干结构及其转变机制的深入揭示,以及对晴空边界层结构与演变机理的详细阐明。在技术层面,重点突破包括针对低空航天气的低空监测预警技术及其支撑性野外科学试验,以及基于图形处理单元(GPU)新架构的高精度大涡模拟及城市微尺度计算流体力学方法。在应用层

面,研究致力于结合精细化气象信息实现低空飞行路径的智能规划与优化。下面将围绕上述三个层面,系统梳理低空经济气象研究的主要进展。

1.1 大气边界层湍流相干结构

行星边界层中的湍流相干结构是浮力和风切变之间复杂平衡的结果,这一关系在早期研究中已被广泛探讨(LeMone, 1973; Moeng and Sullivan, 1994; Weckwerth et al, 1997)。二者的相对大小决定了边界层的整体稳定状态,进而影响边界层湍流相干结构特征与边界层高度 z_i 和奥布霍夫长度(Obukhov length, L)的比值($-z_i/L$)密切相关,其中 L 是浮力湍流首次超过剪切湍流时的地面以上距离,而 $-z_i/L$ 则定量描述边界层全局不稳定的参数。

典型的日间边界层通常处于不稳定状态,此时 $L < 0$, 导致 $-z_i/L > 0$ 。随着 $-z_i/L$ 的增加,浮力的主导作用逐渐增强;当其趋近于无穷大时(“自由对流”极限),边界层湍流完全由浮力主导;而当其趋近于 0 时(“中性”极限),平均剪切成为湍流产生的唯一来源(Panofsky, 1974; Kaimal et al, 1976; Wilczak and Tillman, 1980)。中性边界层通常由逆温层上方自由大气的中尺度水平风驱动,地表附近平均剪

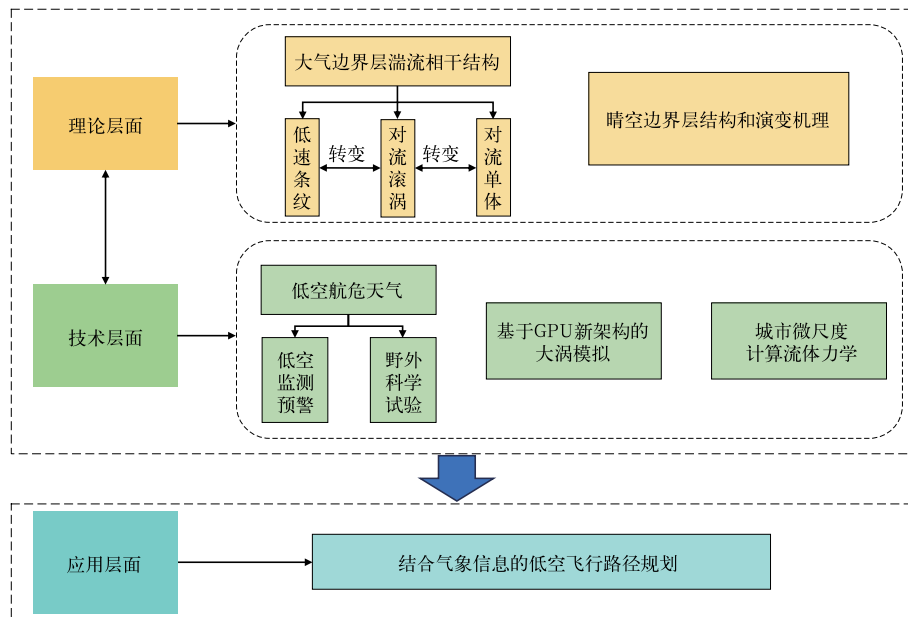


图 3 低空经济气象研究进展理论、技术与应用框架

Fig. 3 Theory, technology and application framework for research progress in low-altitude economy meteorology

切引起的雷诺应力扭曲,形成沿平均速度方向取向的低速“条纹”(Rogers and Moin, 1987; Lee et al, 1990; Robinson, 1991)。在日间对流边界层中,当地表热通量较弱而平均风切变较强时,湍流倾向于组织成水平滚涡的准二维结构(Young et al, 2002),其风向通常与北半球的地转风向相差 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ (LeMone, 1973);相反,当地表热通量强烈且平均风切变较小时,则会形成开放的对流单体(Agee et al, 1973),其形态与实验室条件下观测到的瑞利-贝纳德对流高度相似。

行星边界层中湍流相干结构的存在已被大量观测和数值模拟研究所证实。Deardorff (1972)首次使用大涡模拟研究了对流滚涡和单体结构,模拟了不同 $-z_i/L$ 值的对流边界层(convective boundary layer, CBL),并观察到对流滚涡的存在。Schmidt and Schumann (1989)进一步利用大涡模拟详细探索了无剪切 CBL 中的胞状对流结构,揭示了热羽流在 CBL 下部以胞状模式组织、合并和生长的过程。Khanna and Brasseur (1998)研究了浮力和剪切产生的湍流动能如何共同促进 CBL 的组织,并通过大涡模拟方法模拟了不同 $-z_i/L$ 值的 CBL,发现其值为 0.44、3 和 8 时水平滚涡普遍存在。Hastings (2009)利用国际 H₂O 项目的观测数据发现,在 $-z_i/L$ 为 13 和 27 时,对流滚涡和单体结构共存。Park and Baik (2014)在对城市表面粗糙度的大涡模拟的研究中发现,在 $-z_i/L$ 为 14.1 的 CBL 中存在滚涡和单体之间的过渡结构。根据观测的结果,Weckwerth et al (1999)提出从滚涡结构到单体结构的转变发生在 $-z_i/L$ 为 25 的临界值附近。然而, Grossman (1982)提出的分类中,从滚涡结构和单体结构到仅单体结构转变发生在 $-z_i/L$ 为 21 左右时。Hastings (2009)从观测数据中发现了滚涡和单体共存的时间,且观测(Brümmner, 1999)和数值模拟(Park and Baik, 2014)均报告了滚涡和单体之间的过渡结构,这表明转变可能在 $-z_i/L$ 范围内逐渐发生。

尽管已有研究对湍流相干结构的转变机制进行了探讨,但其物理过程仍需进一步研究。Salesky et al (2017)首次对滚涡向单体结构的转变进行了系统的大涡模拟,分析了从中性到强对流边界层,即 $-z_i/L$ 为 0~1041 的 14 个大涡模拟案例。类似地, Jayaraman and Brasseur (2021)在较小的稳定性范围内($-z_i/L$ 为 0~10)对低速条纹与对流滚涡及

其转变性质进行了详细的大涡模拟研究,但仍未涉及实际行星边界层的几何结构。随着技术进步,对流滚涡和涡旋的现场观测也取得了进展,如地面摄影、机载图像和卫星遥感(Kuettner, 1959; Christian and Wakimoto, 1989; Young et al, 2002)。Aksamit et al (2024)提出了一种基于拉格朗日相干结构的新方法,通过明确识别单个相干流体结构的边界并量化其在动量和热量传输中的作用,为大气通量的客观量化和涡流分类提供了新途径。然而,目前的研究主要基于平衡边界层条件,因为这一条件下的湍流结构仅取决于 $-z_i/L$,便于研究。对于实际边界层的复杂条件(如晨昏时分的非定常态、斜压效应、非均匀下垫面、锋面过境以及地形效应等),研究仍显不足。尽管 Aksamit et al (2024)利用现代仪器确定了湍流结构,但未来仍需开展更多研究,以深入理解湍流相干结构在非平衡条件下的演变及其对边界层动力学和传输过程的影响(赵昭和周博闻, 2021)。

1.2 晴空边界层结构和演变机理

晴空边界层通常指无云或少云条件下的行星边界层,其研究在气象学、环境科学、低空经济等领域具有重要意义。在早期研究中,行星边界层高度(PBLH)主要依赖于高精度的无线电探空(张强和胡隐樵, 2001; 张强, 2003; 张宏昇等, 2020)。例如 Guo et al (2016)和 Guo et al (2024)分别利用中国和全球高分辨率无线电探空数据,首次得到了中国和全球首个基于观测的 PBLH 气候学特征。然而,无线电探空气球每日仅在 08 时和 20 时(北京时)施放两次(徐丽丽等, 2020),不仅无法捕捉到 PBLH 的最大值,也难以提供全天候的边界层湍流观测。近年来,随着激光雷达、风廓线雷达等高分辨率遥感技术的发展以及无人机机载气象观测技术的兴起,已有望实现全边界层湍流观测。Liu et al (2019)借助地基风廓线雷达观测,发展了一种新的基于归一化信噪比廓线的边界层高度反演算法,并给出了大空间尺度的分钟级边界层高度演变特征(Liu et al, 2020)。Porta and Demoz (2025)已提出利用 S 波段气象雷达(WSR-88D)组网的差分反射率,构建自动检测 PBLH 估计值的新算法。通过与自动地面观测系统网络协同作业,这一方法有望迅速产出经过验证的 PBLH 估计值数据集,为深入了解边界层的物理过程提供了新方向。

湍流运动是晴空边界层的核心特征,早期研究

主要基于理论分析和简化的数值模型,其湍流表征的精度有限。近年来,大涡模拟技术的广泛应用使得对边界层湍流的研究更加深入和精准(Xu et al, 2024)。大涡模拟可再现昼夜循环期间大气流动的演变,并定量解析风切变、湍流强度及湍流动能等关键动力参数(Song et al, 2020)。此外,晴空边界层与空气污染的耦合机制也是近年来的研究热点之一(刘树华等, 2020; 王安庭等, 2021; 王嘉鑫等, 2025),对低空飞行安全及运行效率等具有显著影响。PBLH 的变化直接影响污染物的扩散和积累,较低的 PBLH 会导致污染物在近地面层积聚,从而降低能见度,增加低空航空器的碰撞风险,同时也会影响其性能及使用寿命。因此, PBLH 与地表污染物之间的关系也被大量关注,如 Su et al(2018)研究了中国 PBLH 与地表污染颗粒物浓度之间的关系。气溶胶作为空气污染的重要组成部分,与行星边界层间的相互作用也获得系统阐述(何成等, 2022; Nair et al, 2023)。

1.3 低空湍流监测预警

低空航行的安全保障还离不开对湍流的监测预警。依据成因及特性,湍流主要分为晴空湍流(clear-air turbulence, CAT)和对流性湍流(convection-induced turbulence, CIT)。早期湍流监测主要依赖飞行员口头报告,其虽能直观反映湍流对飞机的影响,但主观性强且存在时空位移误差(Schwartz, 1996)。随着技术发展,商用飞机的自动化湍流监测系统和机载雷达逐渐得到广泛应用,为湍流监测提供了更客观、连续的数据源(Cornman et al, 1995; 2004; Cornman, 2016)。地面监测方面,雷达如多普勒雷达(Chang et al, 2010)、激光雷达(Oude Nijhuis et al, 2018)、双极性雷达(Ma et al, 2021)、相干多普勒测风激光雷达(Xian et al, 2024; 2025)已成为识别湍流的标准化技术手段。

传统的 CAT 识别算法大多基于模糊逻辑(Abernethy, 2008),通过集成多源湍流诊断方法生成预报产品,如美国国家大气研究中心(NCAR)开发的图形湍流引导系统(Sharman et al, 2006)。随着人工智能算法的出现和发展,随机森林等更为先进有效的算法也被应用于识别 CAT(Abernethy, 2008; Williams, 2014)。近年来,基于贝叶斯算法的 X 波段双极性雷达 CAT 识别技术实现突破,如在北京地区实现了 CAT 的识别与雷达数据质量改善

(Ma et al, 2021)。相较于 CAT, CIT 对低空航空的威胁更为显著,其引发的航空事故占比达 60% (Cornman and Carmichael, 1993)。这类湍流的生成机制与重力波破碎、开尔文-亥姆霍兹不稳定性等复杂过程密切相关,其中雷暴外流边界引发的动力扰动可在下风向 200 km 处诱发强湍流(Kim et al, 2021)。自 20 世纪中叶起,国外首先使用地基雷达开展识别 CIT 的研究。Press and Binckley(1948)首次发现地基雷波回波之外存在“中间区”,该区域的湍流强度介于雷达回波区与周围环境之间。随着多普勒雷达的引入, Doviak and Lee(1985)发现,当飞机距雷达在 1 km 以内时,地基雷达的谱宽度和飞机现场湍流速度测量值之间存在一致性,并且在“中度”或“严重”湍流区域内,谱宽超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。然而,如果雷达反射率较弱或事件距雷达超过 60 km,则谱宽计算可能不准确(Brewster, 1984),并且地基雷达上传到飞机上还需要一定的时间。

因此,具有预测风切变能力的机载雷达成为重点研究对象。美国在 2000—2001 年开展了湍流监测预警飞机试验,发现 53 次 CIT 事件的回波强度小于 40 dBz,且湍流强度与雷达反射率因子呈弱相关性,甚至在 0 dBz 区域也存在强湍流,致使飞行员常将强湍流误报为 CAT 而非 CIT(Hamilton et al, 2012)。鉴于此,自动化湍流报告系统开发受到资助。近年来,商用飞机自动湍流报告与重合雷达数据中的湍流数据显著增加,对近风暴湍流观测的全面分析对航空具有重大潜在价值。Hitchcock et al (2025)通过比较美国九年内暴风雨导致的湍流事件报告,得出雷暴附近湍流空间分布特征。美国联邦航空管理局(FAA)发布的湍流预警指南指出:距离雷达回波 32 km 外也存在强湍流,甚至在 100 km 左右位置亦有强湍流出现。

近期,机器学习在湍流预警方面取得了显著进展,基于人工智能的湍流预警性能显著优于耗时耗算力的传统数值天气预报方法,例如, Muñoz-Esparza et al(2020b)使用梯度提升回归树每小时生成一次全球湍流预报产品; Shao et al(2024)构建了可每小时更新的随机森林模型。值得注意的是, Navier-Stokes 方程的直接数值模拟成为全面认识湍流的重要手段,然而,由此带来的高雷诺数计算给模拟和预测湍流增加了巨大的计算成本和时间, Buaria and Sreenivasan(2023)借助深度神经网络模型,成功破解了该难题并实现湍流高精度模拟和预

测。

尽管相关研究丰富了湍流监测预警体系,但当前仍面临原位观测数据匮乏的问题。一方面,基于质量欠佳的旧观测数据难以获取精准结论;另一方面,原位观测技术若取得实质性突破,将为低空航行的实时监测与短时临近预警带来质的飞跃,这将是未来湍流监测预警研究的重要方向。

1.4 微下击暴流监测预警

微下击暴流是影响低空航行安全的另一个关键气象因子,其研究始于 20 世纪 60 年代商用飞机的一系列不明原因的坠机事件。当时美国国家运输安全委员会对多起事故的调查虽未能明确结论,但均指出危险天气的重要影响。这一现象引起了芝加哥大学 Fujita 教授的高度关注,他创新性地提出,这些事故可能由当时科学界尚未认知的雷暴风切变所致。通过对 1975 年东方航空事故深入分析,Fujita (1976)首次提出“下击暴流”概念,并将其中直径小于 4 km 的现象定义为“微下击暴流”(Wilson and Wakimoto,2001)。为验证这一开创性理论,美国于 1978 年实施了“伊利诺伊州北部气象研究”。Fujita 利用多普勒雷达首次直接观测到下击暴流的存在。鉴于下击暴流的低空特性(垂直尺度通常小于 1 km),1982 年又启动了“联合机场天气研究”项目(McCarthy et al,1982)。该项目不仅证实了微下击暴流在高平原气候区的频发,更揭示了其对航空安全构成致命威胁的核心机制:飞行器相对空气的速度(简称空速)突变导致的升力丧失。研究同时确立了多普勒雷达和风速计网络的监测可行性,并基于观测到的微下击暴流特征,明确指出需要开发快速更新的自动预警系统(McCarthy and Willson,1984)。这项研究催生了一系列关于微下击暴流结构、演变和形成机理的重要研究(McCarthy and Wilson,1984;Fujita,1985;Srivastava,1985;Wilson,1986;Mahoney III and Rodi,1987;Kessinger et al,1988;Hjelmfelt,1988)。

当下一代天气雷达(NEXRAD)计划于 1979 年启动时(Crum and Alberty,1993),FAA 同步启动了使用 NEXRAD 提高航空安全和效率的研究(Laird and Evans,1982)。1984 年“分类、定位、避免风切变”项目的成功实施,促使 FAA 专注于使用脉冲多普勒天气雷达在美国主要机场进行微下击暴流的全自动化检测和警告。基于此,1985 年正式启

动了终端多普勒天气雷达(TDWR)采购计划。其原型机先后在多个机场进行测试,系统收集不同气候条件下的微下击暴流事件的多普勒数据集,为初始自动化、基于人工智能的微下击暴流识别算法开发提供了关键支撑。1988 年,FAA 在丹佛国际机场进行了正式的 TDWR 操作演示,首次实现了微下击暴流的全自动检测和实时警告(Schlickenmaier,1989)。然而,在 TDWR 原型机转移至下击暴流频发的奥兰多国际机场后,FAA 发现在微下击暴流高峰期迫切需要改进空中交通管理支持。由于奥兰多检测到微下击暴流,抵达的飞机经常会进入等待模式,影响更广泛的区域运营,并给交通管理带来重大问题,因此,亟需提高预测微下击暴流的能力,以便空中交通管制塔对终端交通流进行主动调整。早期基于 TDWR 降水产品的预测算法(Chornoboy et al,1995)存在明显局限。微下击暴流的热动力学研究(Roberts and Wilson,1989;Wolfson,1990)表明,可靠的预测需要融合热力学参数与脉冲多普勒雷达数据,加上对多传感器输入其他需求,推动 TDWR 原型转换为综合终端天气系统原型(Evans and Bernella,1994),其创新性地整合了飞机报告、地面观测和数值预报模型的数据,实现了温湿廓线的实时自动生成,结合下降中的风暴核心雷达反射率可预测地面外流强度(Wolfson et al,1995)。

2000—2010 年,TDWR 信号处理研究仍在继续,旨在抑制地杂波、避免远距离雷暴的影响和解决多普勒速度模糊问题(Cho,2005;Cho and Chornoboy,2005)。激光雷达技术的突破实现了干型微下击暴流的有效监测(Hannon,2004;Keohan et al,2006)。后续开展的“风和港口”“雷暴严重对流外流”“风-港口-海洋”等多个大型观测项目(Solari et al,2012;Gunter and Schroeder,2015;Repetto et al,2017;Solari,2020),进一步扩展了微下击暴流数据库。然而,TDWR 与激光雷达的协同应用仍面临成本高昂(Kim and Matsui,2017)、数据分辨率不足等技术瓶颈,制约了精细化预警能力的提升。

1.5 低空航危天气野外科学试验研究进展

低空风切变、湍流和低空急流是航危天气野外科学试验的关注重点,这是因为低空风切变是航空安全的重要威胁之一,其形成机制复杂且与大气边界层过程密切相关。近年来,依托多源观测手段对低空风切变进行研究取得了显著进展(图 4)。早在

试验研究揭示了其显著的时空变化特征。Bonner (1968) 基于 47 个测风站数据, 指出 LLJ 主要发生在南风背景下, 且早晨出现频率较高。Whiteman et al (1997) 利用俄克拉何马州两年的探空观测, 研究大平原 LLJ 的气候学特征, 量化了暖季(47%)与冷季(45%) LLJ 发生率的差异。Song et al (2005) 则利用微型声雷达和 915-MHz 风廓线仪, 对堪萨斯州行星边界层试验设施的夜间 LLJ 进行观测, 发现夜间 LLJ 发生更为频繁。我国针对特定区域的野外试验也取得重要进展。Du et al (2012) 利用上海的风廓线雷达数据分析梅雨期与非梅雨期 LLJ 气候学特征, 揭示其峰值多出现在夜间和清晨。Wang et al (2013) 和 Wei et al (2014) 利用中国东部沿海的多个风廓线雷达, 系统研究了 LLJ 的日变化和季节结构, 明确了其主导风向随季节的转变(春夏季为西南偏南风, 秋冬季为东北风)。数值模拟和再分析资料也为不同区域的 LLJ 研究提供了独特的见解 (Zhang et al, 2018; Kong et al, 2020; Lima et al, 2018; Ferguson, 2022)。值得注意的是, 已有研究利用传统机器学习模型对中国沿海地区 LLJ 进行空间预测, 初步展现了人工智能(AI)模型在该领域的应用潜力 (Ding et al, 2025)。

无人机因其灵活性和低成本, 成为低空航天气象监测的新兴手段。早期研究聚焦城市风场对无人机飞行的影响。Cybyk et al (2009) 分析了不稳定气流对小型无人机的干扰, Galway et al (2011) 建立了城市风场模型, McGrath et al (2012) 则深入研究了环境与飞行器的相互作用机制。Bottyán et al (2015; 2016) 开发了基于 WRF 模式的无人机专用天气预报系统, 提升了机场周边气象服务的精细化水平。Kim (2015) 构建了风湍流预警系统, 优化了自动化空中交通管理。近年来, 无人机在边界层观测中发挥重要作用。Broisy et al (2017) 利用多旋翼无人机测量边界层物质交换, Witte et al (2017) 研制了专用湍流探测无人机, 实现了高精度数据采集。Cole and Wickenheiser (2018) 提出的多机编队控制技术, 进一步提升了无人机在复杂气象条件下的协同作业能力。

1.6 大涡模拟研究进展

大涡模拟作为一种高精度的湍流模拟方法, 自 20 世纪 60 年代末由 NCAR 的 Douglas Lilly 首次提出以来, 已成为行星边界层湍流研究的重要工具。

与传统的数值天气预报模式和大气环流模式相似, 其核心框架基于网格化求解相关动热力变量的预报方程, 并通过参数化方法表征亚网格尺度效应。然而, 大涡模拟通常采用更精细的网格, 实现了对三维时空含能湍流场的直接解析; 在有效捕捉主导湍流动能传输的大尺度涡旋同时, 通过湍流闭合方案处理次网格尺度涡旋, 显著提升了边界层物理过程的模拟精度。

随着计算机技术的发展, 大涡模拟的应用场景已从理想化均匀边界层拓展至复杂真实大气环境。早期模型采用水平周期性边界条件(与水平均匀性假设一致)模拟湍流的流入和流出, 随后逐步融合辐射传输、水汽相变、云物理过程、地表通量及城市冠层效应等多物理过程。Deardorff (1974) 率先实现辐射过程的耦合建模, 而 Sommeria (1976) 则开创性地引入了中尺度云物理、水平平流和下沉的影响。受限于早期计算资源, Mason and Derbyshire (1990) 历时十多年才成功完成稳定边界层的首例大涡模拟。值得关注的是, 近年来大涡模拟还被应用于研究城市冠层内的湍流结构研究, 通过引入浸入边界法实现对建筑物的显式分辨, 为城市低空气象预报提供了技术支撑 (Dupont and Patton, 2012; Patton et al, 2016)。

亚网格尺度模型的构建始终是大涡模拟的核心挑战。经典 Smagorinsky-Lilly 模型假设亚网格尺度通量与动量交换系数和热量交换系数的涡交换系数成比例, 其中动量交换系数是应变率张量、网格间距和 Smagorinsky 系数的函数 (Deardorff, 1972; Smagorinsky, 1963; Lilly, 1966)。Deardorff (1980) 提出的 TKE 方案则突破性地纳入压力波动、湍流输运以及浮力、剪切和耗散的影响。亚网格尺度模型通常要求网格位于惯性子层内以实现湍流各向同性的假设, 此类条件尤其适用于精细分辨率场景 (Sullivan et al, 1994)。其理论局限性在于确定性假设与湍流统计本质的矛盾: 传统亚网格尺度模型仅考虑能量正向级串, 而实际存在能量反向散射现象。Mason and Thomson (1992) 基于 Leith (1990) 随机理论框架, 首次在 Smagorinsky 模型引入反向散射参数化机制, 经验性地改善了能量级串过程的物理表征。动态模型发展进一步革新了亚网格尺度建模范式: 通过多重滤波技术实时反演 Smagorinsky 常数 (Meneveau et al, 1996; Porté-Agel et al, 2000; Bou-Zeid et al, 2005), 或者采用动态重构方法克服

前向散射约束 (Chow et al, 2005; Lu and Porté-Agel, 2010)。对比研究表明, 动态模型在中性边界层 (Ludwig et al, 2009) 和层积云顶边界层 (Shi et al, 2018) 等复杂场景中展现出显著优势。

硬件技术的进步为大涡模型发展注入了新动能。传统的 CPU 架构在处理高分辨率大涡模型时计算成本极高, 而基于 GPU 的并行计算技术显著提升了计算效率。例如, NCAR 开发的 Fast Eddy 模式采用 CUDA 语言的 GPU 架构, 实现了比传统 CPU 模式 (如 WRF-LES) 快百倍以上计算速度 (Xu et al, 2024), 同时能耗仅为 CPU 模式的十分之一 (Sauer and Muñoz-Esparza, 2020; Muñoz-Esparza et al, 2020a)。在美国能源部的支持下, 劳伦斯利弗莫尔国家实验室也已推出 WRF 模式的 GPU 版本, 即 ERF 模式, 旨在实现从中尺度到街区尺度的无缝隙预报。这些技术进步不仅降低了大涡模拟的计算成本, 还为城市低空气象预报提供了可能性。

1.7 城市微尺度计算流体力学模拟的进展

城市微尺度计算流体力学是一种精细化模拟技术, 主要用于模拟城市环境中空气流动、温度分布和其他气象参数的微小尺度变化。随着低空经济 (如无人机配送和城市空中交通) 的快速发展, 对城市近地层高精度气象预测的需求日益迫切, 尤其是在城市环境中, 建筑物和街区峡谷可能导致复杂的风场和温度分布, 而计算流体力学模拟能够提供高分辨率的城市局部气象信息, 为低空经济活动的安全和高效运行提供了关键支持。

传统气象预报模式通常以小时为更新间隔, 在千米级分辨率下运行, 难以满足低空运行的精细化需求, 这与无人机在短距离、低空域下作业需分钟级响应的飞行需求不符。相比之下, 城市微尺度计算流体力学模拟的优势在于能够捕捉城市结构 (如建筑物、街区峡谷和植被) 对局部气象要素的复杂影响, 其空间尺度通常在几米至几千米范围内。在低空经济领域, 这种精细的微尺度气象信息对于确保无人机与城市空中交通工具的安全导航和高效作业至关重要, 而传统气象预报的空间和时间分辨率往往难以满足此类需求。

计算流体力学模拟的准确性在很大程度上依赖于所采用的数值方法和湍流模型, 目前城市气象研究中常用的计算流体力学方法包括雷诺平均和大涡模拟方法。雷诺平均方法通过求解气象要素的时间

平均方程, 显著降低了时空分辨率要求, 因此在实际应用中得到了广泛采用 (Blocken, 2018)。Toparlar et al (2017) 指出, 高达 96% 的城市计算流体力学研究采用了雷诺平均方法, 但其主要依赖经验公式对所有尺度的湍流脉动逐个建模, 难以准确揭示湍流在动量、热量和物质交换中的物理机制, 限制了其在微气象精细预报中的应用潜力 (Tominaga and Stathopoulos, 2011)。相较之下, 大涡模拟方法能够分辨大尺度湍流结构, 精确捕捉瞬态流场特征, 但高昂的计算成本在一定程度上制约了其大规模实时应用。

此外, 传统的城市微尺度计算流体力学模拟多采用理想化的周期性边界条件, 忽略了天气尺度气象系统的动态变化。而城市地表覆盖高度异质且呈不规则分布, 导致大气边界层内湍流活动呈现出强烈的空间非均匀性。因此采用理想化的初始和边界条件难以准确反映真实城市边界层内的流动特征。在此背景下, 将微尺度计算流体力学模式与中尺度大气模式进行耦合成为重要发展方向, 通过引入中尺度模式提供的动态大气变量边界条件, 计算流体力学方法可以精细化这些信息以反映城市环境的局地效应。这种耦合方法克服了传统固定边界条件的局限性, 提高了模拟的真实性和应用价值 (Piroozmand et al, 2020; Yan et al, 2020)。

尽管微尺度计算流体力学模拟在理论上为低空经济和城市气象服务提供了强有力的技术支撑, 但在实际应用中仍面临诸多挑战, 城市环境的复杂性显著增加了模拟的计算成本。未来的研究方向应着重探索更高效的多尺度耦合框架和实时模拟技术, 并构建更广泛的验证数据集, 以推动计算流体力学模拟更有效地融入日常气象预报和低空经济运营体系中。

1.8 结合气象信息的低空飞行路径规划进展

随着低空经济的快速发展, 低空路径规划成为无人机物流配送和城市空中交通系统的核心环节, 其目标是在复杂城市环境中为飞行器规划出安全、高效且能耗最优的飞行轨迹。这要求路径规划技术需综合考虑复杂的地形结构、动态障碍物避障、气象条件、能量约束等多重因素, 以确保飞行器在多变环境下的飞行安全以及运行效率。

无人机路径规划可被视为移动机器人路径规划在三维低空空域的特定应用, 旨在确定飞行器从起

点到终点避开障碍物的可行路径,通常被建模为多目标优化问题,即兼顾飞行时间、能源消耗及安全性的最优解。在低空飞行系统中,路径规划通常分为飞行器的引导、导航和控制三个核心模块:引导模块作为全局路径规划层,基于空域与障碍物分布生成初始可行路径,核心功能是确保静态避障能力与空域合规性;导航模块则基于引导模块生成的路径,进一步求解飞行器的姿态、速度等状态,生成具体的飞行轨迹;控制模块则作为执行层,生成指令驱动飞行器精确跟随规划的轨迹,并在飞行过程中进行实时的偏差修正,也被称为轨迹跟踪。现有研究主要围绕静态或已知动态环境中的障碍规避问题展开,形成了多类方法体系:基于搜索的算法(如 Dijkstra)通过构建栅格化配置空间实现全局最优路径求解;基于随机采样的方法(如快速扩展随机树、概率路线图)则通过状态空间随机采样迭代求解最优路径;启发式优化算法(如人工势场法、蚁群算法、遗传算法)通过模拟自然现象建立路径搜索规则迭代求解(Debnath et al, 2019; Liu et al, 2023a; 2023b)。此外,生成的全局路径往往仅满足避障的可行性,需进一步通过轨迹优化技术(如非线性模型预测控制)综合考虑动力学约束与多目标优化(如时间最短、能耗最低),进而实现从引导阶段到轨迹生成的优化(Chan et al, 2025; Lu et al, 2025; Zhou et al, 2019)。

随着无人机在山地巡检、城市物流等应用场景的规模化应用,建筑群与地形诱导的强风、湍流等对飞行安全的影响愈发显著,气象条件对无人机路径规划的影响逐渐成为研究热点。传统路径规划常忽略风速、风向等动态气象要素,导致复杂地形飞行存在功耗过多与轨迹偏移等风险。近年来,研究重点已逐渐侧重结合气象要素的路径规划方法:例如,在风场建模方面,通过 WRF-CFD 降尺度模拟技术提高城市风场预报的准确性,结合风场数据定义低空飞行中无人机可能遇到的飞行风险,评估航线的飞行安全性,并根据风险概率划分禁飞区(Chrit and Majdi, 2022; Giersch et al, 2022; Jiang et al, 2024)。在路径规划方面,通过结合城市风场的计算流体力学模拟,规划出规避高湍流区的全局路径(Pensado et al, 2024),以及引入风速、风向对无人机功耗的影响,并结合风向的动态变化实时调整地面速度与航向角(Du et al, 2024)。

然而,基于风场建模的路径规划仍面临诸多局限性。其一,高精度计算流体力学模拟在复杂城市

或山地场景中的计算时效性严重制约实时决策能力;其二,现有路径规划模型多依赖均匀风场或理想化大气风廓线假设(Hong et al, 2023),虽然降低了算法复杂度却牺牲了真实风场结构(如建筑尾涡、地形波)的物理真实性;其三,多目标优化中安全性、路径长度与能耗的权重系数缺乏基于飞行力学原理的普适性量化准则,仍以经验设定为主。

总体而言,低空路径规划与气象建模的协同研究已取得阶段性进展,未来需进一步提高风场预测精度,为实时路径优化提供高精度气象输入,以及进一步量化气象要素对低空飞行的确切影响,为路径规划提供可靠的物理约束。

2 低空经济气象前沿科学问题展望

尽管近年来国内外学者在低空经济气象领域取得了显著进展,但在支撑低空安全、高效运行的气象科技体系构建中,仍面临一系列亟待突破的核心科学挑战:中性边界层湍流能量串级机制、湿边界层相变与热力耦合过程、低空气象多源智能感知装备精度瓶颈以及 AI 赋能的航危天气实时监测预警可靠性等关键问题。本文聚焦上述前沿挑战展开系统性探讨,旨在通过厘清基础理论盲区、技术发展路径及学科交叉融合方向,为低空经济气象的可持续发展提供理论锚点和技术路标。

2.1 近中性边界层湍流新理论

至今为止,对流边界层湍流相关研究已取得显著进展,对流单体和对流滚涡的动力学特性及生成机制获得充分阐释。前人利用整体稳定判据($-z_i/L$),深入认识了低速条纹、对流滚涡与对流单体,及其间的转变机制。尤其是对流滚涡与对流单体,目前已有新方法能够区分二者(Aksamit et al, 2024),打破了传统湍流研究仅建立在平衡边界层条件下的束缚。与此同时,中性边界层目前也突破了理论瓶颈,如 Liu and Stevens(2022)首次获得了正压条件下适用于整个常规中性边界层内风速、风向、湍流剪切力预测的解析表达式。

然而,湍流结构通常由浮力和风切变共同驱动,难以单独区分单一强迫对湍流的影响。近中性边界层介于中性边界层与对流边界层之间,其动力学机制仍存在显著认知空白。例如晨昏时往往存在显著的稳定边界层与对流边界层之间的转换,存在显著

的近中性边界层特征;台风边界层是另一种典型的近中性边界层,存在复杂条件下大气结构函数和湍流演变特征,这种临界状态下组织化对流的演变及其对热量、动量和水汽传输的影响机制也仍然模糊不清;斜压条件下的近中性边界层风廓线理论和相应的边界层参数化也依旧不明。以上这些理论空白直接制约了低空航空器在复杂气象条件下的安全运行。鉴于此,亟需构建对流近中性边界层湍流理论体系,并以此为基础向非定常、斜压和非均匀等实际复杂大气边界层理论拓展。

2.2 湿边界层物理过程

依据水汽的重要性,可将大气边界层划分为干、湿两类。以往的边界层湍流研究主要聚焦于“干”过程,即相对湿度较低的晴空边界层过程,而对于包含云、降水及雾等水凝物的湿边界层知之甚少(LeMone et al, 2019)。湿边界层的复杂性源于多重机制:水汽密度小于干空气产生的浮力扰动($10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水汽的浮力扰动相当于 1.8 K 位温扰动)、降水粒子的拖曳作用及其蒸发冷却导致的负浮力。此外,边界层水汽抬升凝结后所形成的浅积云和层积云是常见的低空气象现象,其热动力、水汽作用以及辐射作用又使得湿边界层过程更为复杂。同时,湿边界层内相干湍流结构还直接参与深对流的触发和维持,例如组织化热对流可触发午后深对流,低空急流输送水汽可维持中尺度对流系统。

然而,湿边界层研究长期面临观测与模拟的双重挑战。由于湿边界层湍流往往与云过程密切相关,云下层和云层的协同观测是解码云覆盖边界层湍流过程的关键(张强等, 2017)。早期地基和塔基设备受限于观测高度,仅能获取近地层数据(徐祥德等, 2014),而混合层和云层的湍流特征因缺乏有效观测手段而难以量化,导致云量、云底质量通量等基本变量仍无完善的物理模型。模拟方面,湿边界层的模拟需更高的模式顶以容纳完整的云过程、更宽的水平模式域以解析中尺度对流结构(Atkinson and Zhang, 1996),同时云中湍流(尤其是云和环境交界处的湍流)尺度因受稳定层结的制约而较一般湍流更小,需要更高的空间分辨率,这对计算资源提出严峻挑战。此外,由于湿边界层理论认识的缺失,传统的边界层参数化方案全都建立在干边界层的理论模型之上,边界层中的水汽和水凝物往往都被视为被动标量,方案中的水汽湍流混合(包括一些方案

中的水凝物混合)则沿用了干边界层的热力混合模型。基于干边界层所设计的边界层方案对于湿边界层的适用性缺乏有效评估,这也与湿边界层中湍流观测稀缺有关。

近年来,高分辨率遥感技术(激光雷达/云雷达协同观测)、边界层高塔梯度测量及无人机机载湍流探空系统的突破性发展,为湿边界层研究开辟了新路径。这些技术已初步实现对非降水相态下全边界层湍流结构的协同捕捉,显著深化了对云下湍流-云层互馈机制的理解(如夹卷过程的热力调控作用)。但对于降水边界层,目前仍然缺乏有效的湍流观测手段,如超声风速仪在声波路径受降水粒子干扰时可能产生较大的误差(尤其是超声温度的观测)、雷达回波则因水凝物信号主导而难以分离弱湍流信号;数值模拟,尤其是湍流可分辨的大涡模拟技术,已成为研究边界层湍流的重要工具。一些先进的湍流方案已开始考虑湿边界层过程,并以构建综合考虑边界层湍流、积云对流、云微物理甚至辐射过程的一体化方案为目标,如 Eddy-Diffusivity Mass-Flux (Siebesma et al, 2007)、Cloud Layers Unified By Binormals(Golaz et al, 2002)及 Unified Convection Scheme(Park, 2014)等,目前这些一体化方案对云覆盖边界层和深对流边界层过程的模拟已展现出较大的潜力(Lu et al, 2024; Park et al, 2024; Vraciu, 2024)。

2.3 面向低空航空器安全飞行的气象智能感知装备及组网观测

由于无人驾驶航空器具有质量轻、惯性小的特点,G/W 等非管制空域对低空风切变、湍流等气象因子的敏感性远高于传统航空器,湍流的内外尺度与航空器的尺寸和响应频率高度相关。另外,城市和山区等复杂地表环境中,绕流产生的机械湍流与热力湍流形成多尺度涡旋耦合,其动能谱在惯性子区呈现多峰值分布的复杂特征,可严重威胁低空飞行稳定性。然而,目前我国的气象综合观测网仍难以实现 G/W 非管制空域内的风切变、湍流等影响低空飞行安全的气象因子精密监测,存在诸多痛点、难点问题,使得航路规划中难以量化湍流动能等关键参数的时空分布梯度,导致对于低空风切变、湍流等影响无人机飞行的关键气象因子发展和演变物理机制仍不清晰。

《民用无人驾驶航空器生产管理若干规定》

(https://www.miit.gov.cn/zcfg/jdcjxl/art/2024/art_736ee4c79f2f488-3a2d43f0673705bd5.html)并未提及气象感知装备相关技术要求,导致参与低空经济运行的大部分无人驾驶航空器未搭载气象载荷。而低空安全飞行需要高时空分辨率、强时效的气象实况信息,仅靠地面原位和遥感方式获得的气象观测难以满足需求。因此,首先亟需推动适用于无人航空器搭载的多气象要素原位探测传感器的研制工作,尤其是研究基于无人航空器悬停、垂直起降及水平航行的先进气象感知技术;其次需加强小型化、轻量化的测风激光雷达研制,尤其是要突破遥感测风的关键元器件技术;三是研发基于城市楼宇屋顶平台的云状、云量、风速计、测风激光雷达等气象要素智能感知装备,获取低云、能见度、风切变、湍流等航危天气信息;最后需针对城市低空经济主要应用场景,发展城市地基/楼宇屋顶气象站、三维超声风及测风激光雷达/风廓线雷达等垂直遥感协同组网观测技术,建立低空三维风场、风切变、湍流耗散率、湍流尺度等参数的多源融合监测技术,研发影响低空飞行安全的危险天气精准识别与诊断方法。

2.4 人工智能赋能的低空航危天气短时临近预警

鉴于目前投入低空经济运营的无人驾驶航空器飞行时间往往在 30 min 以内,而传统的数值天气预报模式,受参数化方案局限及计算资源约束,难以实现低空航路分钟级风切变、湍流、低空急流及强降水的精准预报。另外,人工智能短时临近预报模型以天气雷达基本反射率因子作为主要输入,也无法快速而准确地预警低空航路上风切变、湍流、低空急流、强降水等秒级的演变特征。近年来,人工智能与

物理机制融合的技术路径具备显著潜力。已有研究通过将大气动力学方程、Navier-Stokes 方程等物理约束嵌入随机森林、神经网络等机器学习框架,成功实现了对微下击暴流等强对流天气的物理一致性建模(Hadavi and Romanic, 2024; Yao et al, 2024)。此类方法不仅从有限数据中提取了关键气象参数的非线性关联,还通过物理规律的正则化作用降低了模型对海量数据的依赖。与此同时,利用数值天气预报输出的垂直风廓线与历史灾害数据,结合随机森林模型,已在欧洲部分机场实现低空风切变 1 h 预警,且 PR-AUC 值达 87%,验证了轻量化数据驱动的可行性(Ripesi and Criscuolo, 2024)。

围绕低空安全飞行对气象条件预警的高要求,破局的关键在于发挥现有气象基础设施、无人机载气象遥感装备、无人机飞行姿态和人工智能的协同效能,构建端-端的低空航危天气通用人工智能模型。一方面,依托我国拥有的全球最密集地基垂直观测网络(覆盖风廓线雷达、GNSS/MET 水汽站等),构建多源数据同化与物理嵌入 AI 融合架构,例如利用图神经网络耦合大气运动方程,实现微尺度天气系统的“机理-数据”联合推演(Chen et al, 2024),获得低空空域风、云、雨等气象要素观测;另一方面,结合无人机飞行姿态数据,发展无人机集群与微型化传感器协同的低空风切变和湍流智能观测系统,构建基于通用人工智能模型的端-端低空航危险天气预警模型,实现低空非管制空域航路的风切变和湍流秒级预警(图 5)。此类技术路径既可规避高成本雷达布设瓶颈,又能提高预警时效,为低空航路筑造“监测-预测-响应”一体化的低空航危天气红绿灯监测预警防线。

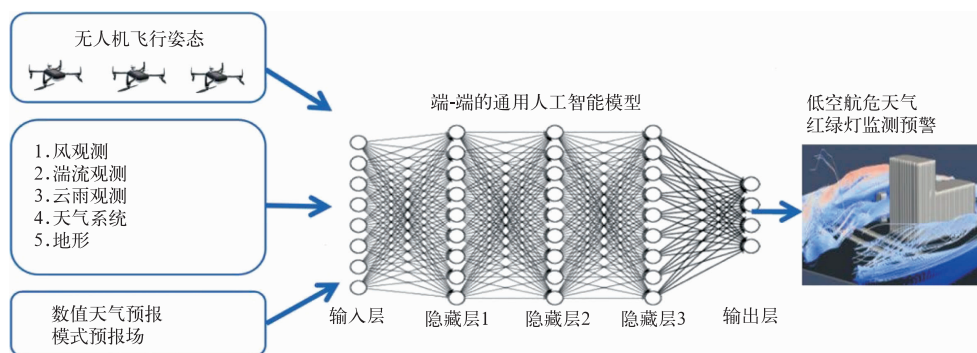


图 5 基于端-端的通用人工智能模型的低空航危天气监测预警流程

Fig. 5 Workflow of AGI-based monitoring and early warning for low-altitude flight hazardous weather based on end-to-end general artificial intelligence models

2.5 高精度可业务应用的大涡模式研发

城市作为低空经济的主战场,其上空 G/W 空域内气象条件精准预报预警对低空飞行安全保障至关重要。受城市下垫面的高度复杂性影响,城市街区及 2~5 倍建筑物高度区域内(称为粗糙子层)的气流具有极强的局地特征,空间尺度在 10~100 米量级。因此,若要精准预报低空飞行器航路上的气象条件,需要开展 10 m 量级空间分辨率的大涡模拟,并基于浸入式边界层法等技术手段实现对建筑物的显式分辨。此类大涡模拟计算成本巨大:以 10 km×10 km×1 km 的低空城市区域为例,开展 10 m 分辨率的大涡模拟需要 1 亿个网格点,目前此类模拟仍限于研究层面,尚无法实现有效预报。

近十年来,基于 GPU 的大涡模式逐渐兴起,显著提升了计算效率,为城市低空气象预报提供了新的机遇。如 1.6 节所述,美国已研发的 Fast Eddy 模式,采用了 GPU 构架,计算速度相对传统 CPU 大涡模式提升百倍以上;已推出的 WRF 模式的 GPU 版本,使中尺度到街区尺度的无缝隙预报大步迈进。这些进展表明,基于 GPU 架构重构大涡模式是突破算力制约的关键方向。

我国需加快自主可控且基于 GPU 加速的大涡模拟和中尺度天气耦合模型研发,重点突破城市微尺度湍流的精细化建模。一方面需融合浸入边界法与动态亚网格模型,实现对建筑群形态的显式解析,准确捕捉街谷涡旋、屋顶分离流等特征结构;另一方面需优化异构计算框架,利用国产超级计算平台实现十亿网格量级模拟的工程化应用。值得注意的是,单纯依赖进口 GPU 硬件存在技术风险,需同步开发适配国产加速卡(如 DCU)的核心算法库,构建从下垫面建模、动态网格优化到实时数据同化的全链条技术体系。该技术路线将推动城市低空气象预报从“理想化研究”向“业务化预警”的历史性跨越。

2.6 智能计算流体力学模拟技术研发

城市微尺度计算流体力学模拟通过高分辨率建模,能够精确描述建筑物周围的空气流动和气象条件。然而,传统计算流体力学模拟依赖对物理方程(如 Navier-Stokes 方程)的数值求解,面临计算成本高、实时性不足的问题,难以满足低空经济对实时性和灵活性的需求,且在动态边界条件处理和多尺度信息耦合方面仍存在局限。

为突破此瓶颈,亟需发展融合物理建模与机器学习的新型智能计算流体力学模拟技术。具体而言,通过构建物理-数据混合驱动的预测框架,可在保持物理一致性的基础上,利用数据驱动方法加速计算过程,实现分钟级、米级分辨率的快速气象预报;同时,基于 GPU 并行计算技术开发高效数值求解器,有望进一步大幅缩短模拟时间,提升整体系统的实时响应能力。

根据机器学习介入的深度和对物理方程依赖程度,目前智能计算流体力学模拟技术主要分为两类:一类是替代型方法,通过机器学习模型直接近似计算流体力学的求解过程,显著加快计算速度;另一类是辅助型方法,在传统计算流体力学框架基础上引入机器学习,以优化湍流参数化、初边界条件设定等环节,提升模拟效率和精度(Calzolari and Liu, 2021;Caron et al, 2025)。尽管这种智能计算流体力学展现出显著潜力,但在模型泛化能力方面还有待加强,特别是在不同城市环境和天气条件下,确保其稳定性和可靠性仍是一项关键挑战。

此外,城市微尺度气象演变受区域尺度天气系统调制,单一尺度的计算流体力学模拟难以准确反映这种多尺度相互作用。因此,有必要建立多尺度协同预测框架,实现区域数值预报模式与微尺度计算流体力学模拟的动态耦合。具体而言,通过嵌套耦合方式,将中尺度模式输出的三维气象场(风、温度和湿度)作为计算流体力学边界条件,驱动微尺度模拟,并根据实时气象观测及无人机飞行反馈数据,动态更新计算流体力学模式的初始场和边界条件,从而提高预测准确性和适应性。面向未来,智能计算流体力学模拟技术有望成为低空经济气象服务的核心支撑。通过提供快速、精准的城市微气象预报,不仅能够有效提升低空飞行器的作业安全性与运行效率,还将助力城市智能化管理。

2.7 低空气象条件与无人机路径规划协同优化

随着城市低空交通网络的密集化与无人机配送规模的扩大,路径规划技术需向更高实时性和适应性方向推进。未来研究应重点聚焦动态气象条件下的路径优化框架构建,并深入探索环境风场影响飞行稳定性的物理机制。

虽然基于计算流体力学的气象模拟可以精细化模拟城市风场,但其极高的计算成本难以满足无人机路径规划对分钟级气象数据更新的需求。为此,

亟需探索结合数值模拟与数据驱动风场预测的技术路线,利用历史气象数据训练机器学习模型生成高分辨率风场,在保证精度的前提下显著降低计算耗时,为动态路径规划提供可靠的数据输入。

无人机在复杂风场环境中的飞行稳定性与能量效率,本质上取决于气动特性与外部流动的耦合作用机制。现有研究多基于静态假设简化风场影响,将侧风、湍流等效为恒定干扰力引入动力学方程,难以准确反映瞬态风场扰动对飞行轨迹的非线性影响。因此,未来的研究需从多尺度流体力学机理出发,建立精细化风场-飞行器耦合模型。在气动特性建模方面,需通过风洞实验与计算流体力学仿真相结合的方式(Paz et al, 2020; 2021),系统研究不同雷诺数下无人机的气动参数随风速、攻角的变化规律,建立城市风场耦合无人机气动仿真的模型,以精细化评估城市场景下的无人机的飞行特性。在飞行器能量消耗建模方面,现有研究多采用恒定功率假设或经验公式估算飞行能耗(Dorling et al, 2017),忽略了风场引起的附加阻力与推进系统效率变化,需通过飞行动力学仿真与实验数据联合标定,建立环境风速与飞行器功耗的确切关系。例如,逆风条件下无人机需增加推力以维持空速,导致额外的功耗;而侧风则通过诱导偏航力矩迫使飞行控制系统频繁调整舵面,增加姿态控制能耗。在安全风险评估层面,需建立动态风场下的飞行可量化的安全指标,明确低空飞行风险的确切阈值,定义基于风险等级的禁飞区域与时变的安全走廊,为路径规划提供可信的约束条件。

综上所述,低空路径规划的进一步发展需打破学科壁垒,融合气象学、数据科学以及控制工程方法。一方面,通过数据同化与机器学习提高风场的预测速度与精度;另一方面,基于多尺度耦合模拟揭示环境风场影响无人机气动特性的确切机制,为路径规划算法提供可量化的物理约束,推动无人机在复杂城市空域中实现真正意义上的自主智能运行。

2.8 低空经济气象标准和工程实现规范

在实际飞行中,无人航空器需要确定何时穿云、绕云,以及与云保持多远的距离飞行。然而无人机与云的侧边界和云底之间的安全距离阈值尚未明确界定,导致我国低空航空器适航论证标准(云外飞行)缺乏充分的科学依据。当前针对低空空域的政策中阈值设定过于保守,极大程度上限制了无人机

的飞行灵活性(当云处于消散状态时,无人机实则具备在云中安全飞行的可能性),因此还需要加强科学试验研究,以确定更为合理、科学的距离阈值。

此外,无论是适航论证标准的建立,还是针对湍流的低空监测预警,都需要先进的湍流监测预警装备提供支持。但目前湍流监测预警装备缺乏,因为雷达反射率因子与湍流强度相关性较弱(Hamilton et al, 2012),限制了适航论证标准的科学性。未来需加大研发投入,开发精准、高效监测技术,获取丰富湍流数据,为标准制定提供科学依据,进而提升空域利用效率,促进低空经济产业健康发展,助力我国低空经济在全球竞争中占据优势地位。

3 结论与讨论

尽管诞生于 19 世纪末的传统边界层气象已取得显著进展,且现有天气预报模式中也考虑了边界层湍流参数化方案,但对低空航危天气发生发展过程的观测和预报预警手段仍存诸多不足,尤其是对低空经济气象这一新兴交叉学科的科学理解尚不深刻。具体体现在:低空经济气象研究已在边界层湍流机制、航危天气监测及数值模拟等领域取得实质性突破。在大气边界层方面,通过大涡模拟与观测试验,揭示了湍流相干结构(如对流滚涡、低速条纹)的演变规律,发现其转变机制与浮力和风切变的相对作用密切相关;激光雷达与多普勒雷达技术实现了晴空边界层湍流的高时空分辨率监测,但降水条件下的湍流观测仍受设备精度制约。在航危天气预警领域,人工智能算法(如随机森林、贝叶斯模型)显著提升了晴空湍流与对流性湍流的识别效率,美国已构建微下击暴流自动化监测系统,而我国因云下杂波抑制技术短板,尚未形成自主业务化产品。此外,大涡模拟与城市微尺度计算流体力学模拟结合 GPU 并行计算,推动了城市风场精细化模拟,为低空路径规划提供了数据支撑,但实时性与多目标优化仍存在技术瓶颈。

面向低空经济安全发展的需求,亟需从理论、技术与应用层面突破关键问题。理论层面,需构建近中性边界层湍流新理论,解析晨昏时段稳定边界层与对流边界层的过渡机制,完善湿边界层中水汽相变与湍流耦合的物理模型。技术层面,需研发“AI+物理约束”的端-端预警模型,融合无人机姿态数据与多源观测,实现微下击暴流等突发天气的秒级预

警;同时推进国产 GPU 加速的大涡模式(CMA-LES)工程化,突破城市街区 10 m 级分辨率模拟的算力限制。应用层面,需建立基于低空风切变和湍流强度的气象适航论证标准,优化云外飞行安全阈值,并构建星空地协同观测网络,填补 G/W 空域垂直观测空白。此外,需发展智能计算流体力学与路径规划的动态耦合技术,量化风场对无人机能耗与稳定性的影响,并建立“红绿灯”式的低空航危天气风险定级技术,形成“气象预测-路径优化-安全评估”一体化体系,为低空经济可持续发展提供科技支撑。

参考文献

- 何成,卢晓,范绍佳,2022. 中国近地面夜间臭氧增加事件的特征及其潜在成因[C]//第二十六届大气污染防治技术研讨会论文集. 杭州:中国环境科学学会:383. He C, Lu X, Fan S J, 2022. Characteristics and potential causes of nocturnal surface ozone enhancement events in China[C]//Proceedings of the 26th Symposium on Air Pollution Control Technology. Hangzhou: Chinese Society for Environmental Sciences:383(in Chinese).
- 黄轩,郑佳峰,张杰,等,2022. 西宁机场一次低空风切变的结构和特征研究[J]. 激光技术, 46(2):206-212. Huang X, Zheng J F, Zhang J, et al, 2022. A study on the structure and characteristics of a low-level wind shear incident at Xining Airport[J]. Laser Technol, 46(2):206-212(in Chinese).
- 郭建平,刘博铭,郭晓冉,等,2021. 风廓线雷达组网观测新型应用研究进展[J]. 气象科技进展, 11(2):5-12, 51. Guo J P, Liu B M, Guo X R, et al, 2021. Research progress on new applications of networked observation of wind profile radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(2):5-12, 51(in Chinese).
- 梁志,师宇,张哲,等,2024. 大气稳定度对边界层垂直风切变的影响[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 41(3):365-374. Liang Z, Shi Y, Zhang Z, et al, 2024. Impact of atmospheric stability on vertical wind shear and wind veer in atmospheric boundary layer[J]. J Univ Chin Acad Sci, 41(3):365-374(in Chinese).
- 刘树华,缪育聪,李婧,2020. 我国区域大气污染成因机制研究[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会议论文集(第一卷). 南京:中国环境科学学会:1210-1214. Liu S H, Miao Y C, Li J, 2020. Research on the formation mechanism of regional air pollution in China[C]//Proceedings of the 2020 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences (Volume 1). Nanjing: Chinese Society for Environmental Sciences:1210-1214(in Chinese).
- 刘晓英,吴松华,张洪玮,等,2020. 基于相干多普勒测风激光雷达的不同成因类型的低空风切变观测[J]. 红外与毫米波学报, 39(4):491-504. Liu X Y, Wu S H, Zhang H W, et al, 2020. Low-level wind shear observation based on different physical mechanisms by coherent Doppler lidar[J]. J Infrared Millimeter Waves, 39(4):491-504(in Chinese).
- 王安庭,李煜斌,赵纯,等,2021. 边界层方案对南京地区 PM_{2.5} 浓度模拟的影响[J]. 中国环境科学, 41(7):2977-2992. Wang A T, Li Y B, Zhao C, et al, 2021. Influence of different boundary layer schemes on PM_{2.5} concentration simulation in Nanjing[J]. China Environ Sci, 41(7):2977-2992(in Chinese).
- 王嘉鑫,王成刚,严家德,等,2025. 北京地区一种弱风速带包裹型边界层急流现象的研究[J]. 气象, 51(5):607-617. Wang J X, Wang C G, Yan J D, et al, 2025. Study on the weak wind speed zone boundary layer low-level jet phenomenon in Beijing[J]. Meteor Mon, 51(5):607-617(in Chinese).
- 徐丽丽,张镭,杜韬,等,2020. 利用地基遥感资料确定大气边界层高度[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 56(5):635-641, 649. Xu L L, Zhang L, Du T, et al, 2020. Determining the height of atmospheric boundary layer using the data from ground-based remote sensing[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 56(5):635-641, 649(in Chinese).
- 徐祥德,王寅钧,赵天良,等,2014. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征[J]. 气象, 40(10):1165-1173. Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al, 2014. Relationship between turbulent energy in the near-surface layer and atmospheric boundary layer thermodynamic structure over the southeastern side of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 40(10):1165-1173(in Chinese).
- 张宏昇,张小曳,李倩惠,等,2020. 大气边界层高度确定及应用研究进展[J]. 气象学报, 78(3):522-536. Zhang H S, Zhang X Y, Li Q H, et al, 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):522-536(in Chinese).
- 张强,2003. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 21(3):74-78. Zhang Q, 2003. Review of atmospheric boundary layer meteorology[J]. J Arid Meteor, 21(3):74-78(in Chinese).
- 张强,胡隐樵,2001. 大气边界层物理学研究进展和面临的科学问题[J]. 地球科学进展, 16(4):526-532. Zhang Q, Hu Y Q, 2001. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics[J]. Adv Earth Sci, 16(4):526-532(in Chinese).
- 张强,王蓉,岳平,等,2017. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J]. 气象学报, 75(1):39-56. Zhang Q, Wang R, Yue P, et al, 2017. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):39-56(in Chinese).
- 赵昭,周博闻,2021. 日间对流边界层中的非局地动量混合[J]. 气象科学, 41(5):631-643. Zhao Z, Zhou B W, 2021. Non-local mixing of momentum in the daytime convective boundary layer[J]. J Meteor Sci, 41(5):631-643(in Chinese).
- 中国民用航空局,(2023-12-21). 国家空域基础分类方法[EB/OL]. <https://www.laernoc.com/newsinfo/1834846943197663233>. Civil Aviation Administration of China. (2023-12-21). National airspace basic classification methodology[EB/OL]. <https://www.laernoc.com/newsinfo/1834846943197663233>(in Chinese).
- 中国气象局,2024. 低空经济气象科技创新工作方案(2024—2030 年)[EB/OL]. <https://www.163.com/dy/article/JJA4N7120553-XYOL.html>. China Meteorological Administration, 2024. Work

- Plan for Meteorological Science and Technology Innovation in the Low-Altitude Economy (2024—2030) [EB/OL]. <https://www.163.com/dy/article/JJA4N7120553XYOL.html> (in Chinese).
- Abernethy J A, 2008. A domain analysis approach to clear-air turbulence forecasting using high-density in-situ measurements[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder.
- Agee E M, Chen T S, Dowell K E, 1973. A review of mesoscale cellular convection[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 54(10):1004-1012.
- Aksamit N, Katurji M, Zhang J W, 2024. Understanding coherent turbulence and the roll-cell transition with Lagrangian coherent structures and frame-indifferent fluxes[J]. *J Geophys Res Atmos*, 129(18):e2024JD041490.
- Atkinson B W, Zhang J W, 1996. Mesoscale shallow convection in the atmosphere[J]. *Rev Geophys*, 34(4):403-431.
- Banakh V A, Smalikho I N, Falits A V, et al, 2021. Estimating the parameters of wind turbulence from spectra of radial velocity measured by a pulsed Doppler lidar[J]. *Remote Sens*, 13(11):2071.
- Bechmann A, Berg J, Christiansen L C, et al, 2009. The Bolund experiment: overview and background[C]//Proceedings of EWEC 2009, Marseille: European Wind Energy Association.
- Blocken B, 2018. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications; a foregone conclusion? [J]. *Building Simulation*, 11(5):821-870.
- Boilley A, Mahfouf J F, 2013. Wind shear over the Nice Côte d'Azur airport: case studies[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13(9):2223-2238.
- Bonner W D, 1968. Climatology of the low level jet[J]. *Mon Wea Rev*, 96(12):833-850.
- Bottyán Z, Gyöngyösi A Z, Wantuch F, et al, 2015. Measuring and modeling of hazardous weather phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS)[J]. *IDŐJÁRÁS*, 119(3):307-335.
- Bottyán Z, Tuba Z, Gyöngyösi A Z, 2016. Weather forecasting system for the Unmanned Aircraft Systems (UAS) missions with the special regard to visibility prediction, in Hungary [M] // Nádai L, Padányi J. *Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary*. Cham: Springer: 23-34.
- Bou-Zeid E, Meneveau C, Parlange M, 2005. A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows[J]. *Phys Fluids*, 17(2):025105.
- Brewster K A, 1984. *Kinetic Energy Evolution in a Developing Severe Thunderstorm*[M]. University of Oklahoma.
- Broisy C, Krampf K, Zeeman M, et al, 2017. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables [J]. *Atmos Meas Tech*, 10(8):2773-2784.
- Brümmer B, 1999. Roll and cell convection in wintertime arctic cold-air outbreaks[J]. *J Atmos Sci*, 56(15):2613-2636.
- Buaría D, Sreenivasan K, 2023. Forecasting small-scale dynamics of fluid turbulence using deep neural networks[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 120(30):e2305765120.
- Calzolari G, Liu W, 2021. Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications; a review[J]. *Build Environ*, 206:108315.
- Caron C, Lauret P, Bastide A, 2025. Machine learning to speed up computational fluid dynamics engineering simulations for built environments; a review[J]. *Build Environ*, 267:112229.
- Chan Y Y, Ng K K H, Wang T Q, et al, 2025. Near time-optimal trajectory optimisation for drones in last-mile delivery using spatial reformulation approach[J]. *Transp Res Part C Emerg Technol*, 171:104986.
- Chang Y, Chen D S, Guo Z H, 2010. Research on the relationship of Doppler radar and the lightning warning [J]. *Meteor Environ Sci*, 33(1):36-39.
- Chen Y, An J L, Lin J, et al, 2017a. Observation of nocturnal low-level wind shear and particulate matter in urban Beijing using a Doppler wind lidar[J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 10(6):411-417.
- Chen Y, An J L, Wang X Q, et al, 2017b. Observation of wind shear during evening transition and an estimation of submicron aerosol concentrations in Beijing using a Doppler wind lidar[J]. *J Meteor Res*, 31(2):350-362.
- Chen Y T, Wang Y, Huang G, et al, 2024. Coupling physical factors for precipitation forecast in China with graph neural network [J]. *Geophys Res Lett*, 51(2):e2023GL106676.
- Cho J Y N, 2005. Multi-PRI signal processing for the terminal doppler weather radar. Part II: range-velocity ambiguity mitigation[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 22(10):1507-1519.
- Cho J Y N, Chornoboy E S, 2005. Multi-PRI signal processing for the terminal doppler weather radar. Part I: clutter filtering[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 22(5):575-582.
- Chornoboy E S, Matlin A M, Morgan J P, 1995. Automated storm tracking for terminal air traffic control[J]. *Lincoln Lab J*, 7(2):427-448.
- Chow F K, Street R L, Xue M, et al, 2005. Explicit filtering and reconstruction turbulence modeling for large-eddy simulation of neutral boundary layer flow[J]. *J Atmos Sci*, 62(7):2058-2077.
- Christian T W, Wakimoto R M, 1989. The relationship between radar reflectivities and clouds associated with horizontal roll convection on 8 August 1982[J]. *Mon Wea Rev*, 117(7):1530-1544.
- Chrit M, Majdi M, (2022-10-12). Improving wind speed forecasting for urban air mobility using coupled simulations[J/OL]. *Adv Meteor*, 2629432. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/2629432>.
- Chu M H, 2024. Physics based & machine learning methods for uncertainty estimation in turbulence modeling[J]. *arXiv preprint arXiv:2407.10615*.
- Cole K, Wickenheiser A M, 2018. Reactive trajectory generation for multiple vehicles in unknown environments with wind disturbances[J]. *IEEE Trans Robot*, 34(5):1333-1348.
- Cornman L B, 2016. Airborne in situ measurements of turbulence

- [M]//Sharman R, Lane T. Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction. Cham: Springer; 97-120.
- Cornman L B, Carmichael B, 1993. Varied research efforts are under way to find means of avoiding air turbulence[J]. ICAO J, 48(8): 10-15.
- Cornman L B, Meymaris G, Limber M, 2004. An update on the FAA aviation weather research program's in situ turbulence measurement and reporting system[C]//11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research.
- Cornman L B, Morse C S, Cuning G, 1995. Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in-situ aircraft measurements[J]. J Aircr, 32(1): 171-177.
- Crum T D, Alberty R L, 1993. The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility[J]. Bull Amer Meteor Soc, 74(9): 1669-1688.
- Cybyk B, Frey T, McGrath B, et al, 2009. Unsteady urban airflows and their impact on small unmanned air system operations[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Chicago: AIAA; 1-19.
- Deardorff J W, 1972. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers[J]. J Atmos Sci, 29(1): 91-115.
- Deardorff J W, 1974. Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer[J]. Bound-Layer Meteor, 7(1): 81-106.
- Deardorff J W, 1980. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model[J]. Bound-Layer Meteor, 18(4): 495-527.
- Debnath S K, Omar R, Latip N B A, 2019. A review on energy efficient path planning algorithms for unmanned air vehicles[C]//5th ICCST 2018, Computational Science and Technology. Kota Kinabalu, Malaysia: Springer; 523-532.
- Ding J, Ren Y, Zhang H S, et al, 2025. Mechanism of turbulence structure evolution in the nocturnal boundary layer during the interaction of low-level jet and internal gravity waves; based on full boundary layer turbulence observations[J]. J Geophys Res: Atmos, 130(6): e2024JD042106.
- Dorling K, Heinrichs J, Messier G G, et al, 2017. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 47(1): 70-85.
- Doviak R J, Lee J T, 1985. Radar for storm forecasting and weather hazard warning[J]. J Aircr, 22(12): 1059-1064.
- Du P F, Shi Y Q, Cao H T, et al, 2024. AI-enabled trajectory optimization of logistics UAVs with wind impacts in smart cities[J]. IEEE Trans Consum Electron, 70(1): 3885-3897.
- Du Y, Zhang Q H, Ying Y, et al, 2012. Characteristics of low-level jets in Shanghai during the 2008-2009 warm seasons as inferred from wind profiler radar data[J]. J Meteor Soc Japan, 90(6): 891-903.
- Dupont S, Patton E G, 2012. Influence of stability and seasonal canopy changes on micrometeorology within and above an orchard canopy: the CHATS experiment[J]. Agr Forest Meteor, 157: 11-29.
- Evans J E, Bernella D M, 1994. Supporting the deployment of the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)[J]. Lincoln Lab J, 7(2): 379-398.
- Ferguson C R, 2022. Changes in great plains low-level jet structure and associated precipitation over the 20th century[J]. J Geophys Res: Atmos, 127(3): e2021JD035859.
- Fujita T T, 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of a John F. Kennedy Airport runway, New York City[R]. Chicago: University of Chicago.
- Fujita T T, 1985. The downburst, microburst and macroburst[R]. Chicago: University of Chicago.
- Galway D, Etele J, Fusina G, 2011. Modeling of urban wind field effects on unmanned rotorcraft flight[J]. J Aircr, 48(5): 1613-1620.
- Giersch S, El Guernaoui O, Raasch S, et al, 2022. Atmospheric flow simulation strategies to assess turbulent wind conditions for safe drone operations in urban environments[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 229: 105136.
- Golaz J C, Larson V E, Cotton W R, 2002. A PDF-based model for boundary layer clouds. Part I: method and model description[J]. J Atmos Sci, 59(24): 3540-3551.
- Grossman R L, 1982. An analysis of vertical velocity spectra obtained in the BOMEX fair-weather, trade-wind boundary layer[J]. Bound-Layer Meteor, 23(3): 323-357.
- Gultepe I, Sharman R, Williams P D, et al, 2019. A review of high impact weather for aviation meteorology[J]. Pure Appl Geophys, 176(5): 1869-1921.
- Gunter W S, Schroeder J L, 2015. High-resolution full-scale measurements of thunderstorm outflow winds[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 138: 13-26.
- Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al, 2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmos Chem Phys, 16(20): 13309-13319.
- Guo J P, Zhang J, Shao J, et al, 2024. A merged continental planetary boundary layer height dataset based on high-resolution radiosonde measurements, ERA5 reanalysis, and GLDAS[J]. Earth Syst Sci Data, 16(1): 1-14.
- Hadavi M, Romanic D, 2024. Machine learning investigation of downburst-prone environments in Canada[J]. J Appl Meteor Climatol, 63(6): 677-697.
- Hallgren C, Aird J A, Ivanell S, et al, 2024. Machine learning methods to improve spatial predictions of coastal wind speed profiles and low-level jets using single-level ERA5 data[J]. Wind Energy Sci, 9(4): 821-840.
- Hamilton D W, Proctor F H, Ahmad N N, 2012. Flight tests of the turbulence prediction and warning system (TPAWS) [R]. NASA.
- Hannon S M, 2004. Pulsed Doppler lidar for terminal area monitoring of wind and wake hazards[C]//11th Conference on Aviation,

- Range, and Aerospace Meteorology. Hyannis, MA: AMC.
- Hastings R M, 2009. Multi-platform analysis of morning transition and evolution of shallow mesoscale convection on 21 June 2002 [D]. State College: The Pennsylvania State University.
- Hilliker J L, Fritsch J M, 1999. An observations — based statistical system for warm-season hourly probabilistic forecasts of low ceiling at the San Francisco International Airport [J]. *J Appl Meteor*, 38(12): 1692-1705.
- Hitchcock S M, Lane T P, Deierling W, et al, 2025. Spatial patterns of turbulence near thunderstorms [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 106(1): E1-E22.
- Hjelmfelt M R, 1988. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 27(8): 900-927.
- Hong H C, Liu L Q, Holzapfel F, et al, 2023. Dynamic soaring under different atmospheric stability conditions [J]. *J Guid Control Dyn*, 46(5): 970-977.
- Jacobs W, Nietosvaara V, Bott A, et al, 2007. Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds [R]. Brussels: COST Office.
- Jayaraman B, Brasseur J G, 2021. Transition in atmospheric boundary layer turbulence structure from neutral to convective, and large-scale rolls [J]. *J Fluid Mech*, 913: A42.
- Jiang S, Wang J H, Li C, et al, 2024. Identification of no-fly zones for delivery drone path planning in various urban wind environments [J]. *Phys Fluids*, 36(8): 085166.
- Kaimal J C, Wyngaard J C, Haugen D A, et al, 1976. Turbulence structure in the convective boundary layer [J]. *J Atmos Sci*, 33(11): 2152-2169.
- Keohan C F, Barr K, Hannon S M, 2006. Evaluation of pulsed lidar wind hazard detection at Las Vegas International Airport [C]// 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. Atlanta, GA: AMC.
- Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W, 1988. Observations of a storm containing mesocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations [J]. *Mon Wea Rev*, 116(10): 1959-1982.
- Khanna S, Brasseur J G, 1998. Three-dimensional buoyancy- and shear-induced local structure of the atmospheric boundary layer [J]. *J Atmos Sci*, 55(5): 710-743.
- Kim J H, Chan W N, Sridhar B, et al, 2015. Combined winds and turbulence prediction system for automated air-traffic management applications [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(4): 766-784.
- Kim S H, Chun H Y, Lee D B, et al, 2021. Improving numerical weather prediction-based near-cloud aviation turbulence forecasts by diagnosing convective gravity wave breaking [J]. *Wea Forecasting*, 36(5): 1735-1757.
- Kim Y C, Matsui M, 2017. Analytical and empirical models of tornado vortices: a comparative study [J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 171: 230-247.
- Kong H, Zhang Q H, Du Y, et al, 2020. Characteristics of coastal low-level jets over Beibu Gulf, China, during the early warm season [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(14): e2019JD031918.
- Kuettner J, 1959. The band structure of the atmosphere [J]. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 11(3): 267-294.
- Laird B G, Evans J E, 1982. FAA weather surveillance requirements in the context of NEXRAD [R]. MIT Lincoln Laboratory.
- Lee M J, Kim J, Moin P, 1990. Structure of turbulence at high shear rate [J]. *J Fluid Mech*, 216: 561-583.
- Leith C E, 1990. Stochastic backscatter in a subgrid-scale model: plane shear mixing layer [J]. *Phys Fluids*, 2(3): 297-299.
- LeMone M A, 1973. The structure and dynamics of horizontal roll vortices in the planetary boundary layer [J]. *J Atmos Sci*, 30(6): 1077-1091.
- LeMone M, Angevine W, Bretherton C, et al, 2019. 100 years of progress in boundary layer meteorology [J]. *Meteor Monogr*, 59: 9. 1-9. 85.
- Lilly D K, 1966. On the application of the eddy viscosity concept in the inertial sub-range of turbulence [R]. NCAR.
- Lima D C A, Soares P M M, Semedo A, et al, 2018. A global view of coastal low-level wind jets using an ensemble of reanalyses [J]. *J Climate*, 31(4): 1525-1546.
- Liu B M, Guo J P, Gong W, et al, 2020. Boundary layer height as estimated from radar wind profilers in four cities in China: relative contributions from aerosols and surface features [J]. *Remote Sens*, 12(10): 1657.
- Liu B M, Ma Y Y, Guo J P, et al, 2019. Boundary layer heights as derived from ground-based radar wind profiler in Beijing [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57(10): 8095-8104.
- Liu L Q, Stevens R J A M, 2022. Vertical structure of conventionally neutral atmospheric boundary layers [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119(22): e2119369119.
- Liu L X, Wang X, Yang X, et al, 2023a. Path planning techniques for mobile robots: review and prospect [J]. *Expert Syst Appl*, 227: 120254.
- Liu M J, Zhang X, Zhu X S, et al, 2023b. Large-eddy simulation of the rapidly intensifying Tropical Cyclone Soudelor (2015) [J]. *Atmos Res*, 294: 106976.
- Lu H, Porté-Agel F, 2010. A modulated gradient model for large-eddy simulation: application to a neutral atmospheric boundary layer [J]. *Phys Fluids*, 22(1): 015109.
- Lu J C, Nazarian N, Hart M A, et al, 2024. A one-dimensional urban flow model with an eddy-diffusivity mass-flux (EDMF) scheme and refined turbulent transport (MLUCM v3. 0) [J]. *Geosci Model Dev*, 17(7): 2525-2545.
- Lu M H, Fan X Y, Chen H, et al, 2025. FAPP: fast and adaptive perception and planning for UAVs in dynamic cluttered environments [J]. *IEEE Trans Robot*, 41: 871-886.
- Ludwig F L, Chow F K, Street R L, 2009. Effect of turbulence models and spatial resolution on resolved velocity structure and momentum fluxes in large-eddy simulations of neutral boundary layer flows [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(6): 1161-1180.
- Ma J L, Luo L, Chen M X, et al, 2021. Clear-air turbulence (CAT)

- identification with X-band dual polarimetric radar based on Bayesian approach[J]. *Atmosphere*, 12(12):1691.
- Mahoney III W P, Rodi A R, 1987. Aircraft measurements on microburst development from hydrometeor evaporation[J]. *J Atmos Sci*, 44(20):3037-3051.
- Mason P J, Derbyshire S H, 1990. Large-eddy simulation of the stably-stratified atmospheric boundary layer[J]. *Bound-Layer Meteor*, 53(1):117-162.
- Mason P J, Thomson D J, 1992. Stochastic backscatter in large-eddy simulations of boundary layers[J]. *J Fluid Mech*, 242:51-78.
- McCarthy J, Wilson J W, 1984. The microburst as a hazard to aviation: structure, mechanisms, climatology, and nowcasting[C]// *Nowcasting II Mesoscale Observations and Very-Short-Range Weather Forecasting*. Norrköping, Sweden: European Space Agency:21-30.
- McCarthy J, Wilson J W, Fujita T T, 1982. The joint airport weather studies project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 63(1):15-22.
- McGrath B E, Cybyk B Z, Frey T M, 2012. Environment-vehicle interaction modeling for unmanned aerial system operations in complex airflow environments[J]. *Johns Hopkins APL Tech Dig*, 31(2):115-131.
- Meneveau C, Lund T S, Cabot W H, 1996. A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence[J]. *J Fluid Mech*, 319:353-385.
- Mizuno S, Ohba H, Ito K, 2022. Machine learning-based turbulence-risk prediction method for the safe operation of aircrafts[J]. *J Big Data*, 9(1):29.
- Moeng C H, Sullivan P P, 1994. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows[J]. *J Atmos Sci*, 51(7):999-1022.
- Muñoz-Esparza D, Sauer J A, Shin H H, et al, 2020a. Inclusion of building-resolving capabilities into the FastEddy GPU-LES model using an immersed body force method[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(11):e2020MS002141.
- Muñoz-Esparza D, Sharman R D, Deierling W, 2020b. Aviation turbulence forecasting at upper levels with machine learning techniques based on regression trees[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 59(11):1883-1899.
- Nair H R C R, Budhavant K, Manoj M R, et al, 2023. Aerosol de-masking enhances climate warming over South Asia[J]. *NPJ Clim Atmos Sci*, 6(1):39.
- O'Connor E J, Illingworth A J, Brooks I M, et al, 2010. A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne in situ measurements[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 27(10):1652-1664.
- 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[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(11):2275-2293.
- Oyola-Merced M I, Rodríguez-Nazario I E, 2025. The captain has turned the seatbelt sign on: 43 years of reanalysis and AI to predict clear air turbulence[C]// *Proceedings of the 105th Annual AMS Meeting*. New Orleans: AMS, 456994.
- Panofsky H A, 1974. The atmospheric boundary layer below 150 meters[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 6(1):147-177.
- Park S, 2014. A unified convection scheme (UNICON). Part I: formulation[J]. *J Atmos Sci*, 71(11):3902-3930.
- Park S, Song C, Kim S, et al, 2024. Parameterization of the elevated convection with a unified convection scheme (UNICON) and its impacts on the diurnal cycle of precipitation[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 16(3):e2023MS003651.
- Park S B, Baik J J, 2014. Large-eddy simulations of convective boundary layers over flat and urbanlike surfaces[J]. *J Atmos Sci*, 71(5):1880-1892.
- Patton E G, Sullivan P P, Shaw R H, et al, 2016. Atmospheric stability influences on coupled boundary layer and canopy turbulence[J]. *J Atmos Sci*, 73(4):1621-1647.
- Paz C, Suárez E, Gil C, et al, 2020. CFD analysis of the aerodynamic effects on the stability of the flight of a quadcopter UAV in the proximity of walls and ground[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 206:104378.
- Paz C, Suárez E, Gil C, et al, 2021. Assessment of the methodology for the CFD simulation of the flight of a quadcopter UAV[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 218:104776.
- Pensado E A, Carrera G F, López F V, et al, 2024. Turbulence-aware UAV path planning in urban environments[C]// *Proceedings of the 2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Chania-Crete, Greece: IEEE:280-285.
- Piroozmand P, Mussetti G, Allegrini J, et al, 2020. Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: application to microscale urban flows with weak synoptic forcing[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 197:104059.
- Porté-Agel F, Meneveau C, Parlange M B, 2000. A scale-dependent dynamic model for large-eddy simulation: application to a neutral atmospheric boundary layer[J]. *J Fluid Mech*, 415:261-284.
- Porta D T D, Demoz B, 2025. Signal processing of images for convective boundary layer height estimation from radar (SPICER) and multi-instrument verification[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 63:4101815.
- Press H, Binkley E T, 1948. A preliminary evaluation of the use of ground radar for the avoidance of turbulent clouds[R]. Washington: NACA.
- Repetto M P, Burlando M, Solari G, et al, 2017. Integrated tools for improving the resilience of seaports under extreme wind events[J]. *Sustain Cities Soc*, 32:277-294.
- Ripesi P, Criscuolo P, 2024. Low-level wind shear prediction based on machine learning techniques: a case study of Palermo-Punta Raisi International Airport[C]// *SESAR Innovation Days 2024*. Rome: SID.
- Roberts R D, Wilson J W, 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar[J]. *J Appl Meteor Climatol*,

- 28(4):285-303.
- Robinson S K, 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 23(1):601-639.
- Rogers M M, Moin P, 1987. The structure of the vorticity field in homogeneous turbulent flows[J]. *J Fluid Mech*, 176:33-66.
- Salesky S T, Chamecki M, Bou-Zeid E, 2017. On the nature of the transition between roll and cellular organization in the convective boundary layer[J]. *Bound-Layer Meteor*, 163(1):41-68.
- Sarma R, Hübenthal F, Inanc E, et al, 2024. Prediction of turbulent boundary layer flow dynamics with transformers[J]. *Mathematics*, 12(19):2998.
- Sauer J A, Muñoz-Esparza D, 2020. The Fast Eddy* Resident-GPU accelerated large-eddy simulation framework: model formulation, dynamical-core validation and performance benchmarks [J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(11):e2020MS002100.
- Schlickenmaier H W, 1989. Windshear case study: denver, Colorado, July 11, 1988[R]. UC Berkeley Transportation Library.
- Schmidt H, Schumann U, 1989. Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations[J]. *J Fluid Mech*, 200:511-562.
- Schwartz B, 1996. The quantitative use of PIREPs in developing aviation weather guidance products[J]. *Wea Forecasting*, 11(3):372-384.
- Shao J Y, Zhuang Z B, Yu Z Y, et al, 2024. The prospective application of machine learning in turbulence forecasting over China [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 63(10):1273-1285.
- Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al, 2006. An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 21(3):268-287.
- Shi X M, Chow F K, Street R L, et al, 2018. An evaluation of LES turbulence models for scalar mixing in the stratocumulus-capped boundary layer[J]. *J Atmos Sci*, 75(5):1499-1507.
- Siebesma A P, Soares P M M, Teixeira J, 2007. A combined eddy-diffusivity mass-flux approach for the convective boundary layer [J]. *J Atmos Sci*, 64(4):1230-1248.
- Smagorinsky J, 1963. General circulation experiments with the primitive equations. I. the basic experiment[J]. *Mon Wea Rev*, 91(3):99-164.
- Solari G, 2020. Thunderstorm downbursts and wind loading of structures: progress and prospect[J]. *Front Built Environ*, 6:63.
- Solari G, Repetto M P, Burlando M, et al, 2012. The wind forecast for safety management of port areas[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 104-106:266-277.
- Sommeria G, 1976. Three-dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade wind boundary layer[J]. *J Atmos Sci*, 33(2):216-241.
- Song J, Liao K, Coulter R L, et al, 2005. Climatology of the low-level jet at the southern great plains atmospheric boundary layer experiments site[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 44(10):1593-1606.
- Song Y L, Tian L L, Zhao N, 2020. The atmospheric turbulence characteristics in a diurnal cycle[J]. *Int J Mod Phys B*, 34(14n16):2040109.
- Srivastava R C, 1985. A simple model of evaporatively driven downdraft: application to microburst downdraft[J]. *J Atmos Sci*, 42(10):1004-1023.
- Steiner J, Dwight R, Viré A, 2020. Data-driven turbulence modeling for wind turbine wakes under neutral conditions[J]. *J Phys: Conf Ser*, 1618(6):062051.
- Su T N, Li Z Q, Kahn R, 2018. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: regional pattern and influencing factors [J]. *Atmos Chem Phys*, 18(21):15921-15935.
- Sullivan P P, McWilliams J C, Moeng C H, 1994. A subgrid-scale model for large-eddy simulation of planetary boundary-layer flows[J]. *Bound-Layer Meteor*, 71(3):247-276.
- Taylor P A, Teunissen H W, 1987. The Askervein Hill Project: overview and background data[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 39(1):15-39.
- Tominaga Y, Stathopoulos T, 2011. CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: comparison between LES and RANS [J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 99(4):340-348.
- Toparlak Y, Blocken B, Maiheu B, et al, 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 80:1613-1640.
- Tsvang L R, Zubkovskii S L, Kader B A, et al, 1985. International turbulence comparison experiment (ITCE-81) [J]. *Boundary-Layer Meteor*, 31(4):325-348.
- Turchi A, Masciadri E, Fini L, 2022. Optical turbulence forecast over short timescales using machine learning techniques[C] // *Proceedings of SPIE 12185, Adaptive Optics Systems VIII*. Montréal: SPIE, 121855W.
- Vraciu C V, 2024. Generalized eddy-diffusivity mass-flux formulation for the parametrization of atmospheric convection and turbulence[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 150(761):2316-2337.
- Wang D Q, Zhang Y C, Huang A N, 2013. Climatic features of the south-westerly low-level jet over Southeast China and its association with precipitation over East China[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 49(3):259-270.
- Weckwerth T M, Horst T W, Wilson J W, 1999. An observational study of the evolution of horizontal convective rolls[J]. *Mon Wea Rev*, 127(9):2160-2179.
- Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M, et al, 1997. Horizontal convective rolls: determining the environmental conditions supporting their existence and characteristics[J]. *Mon Wea Rev*, 125(4):505-526.
- Wei W, Zhang H S, Ye X X, 2014. Comparison of low-level jets along the north coast of China in summer[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 119(16):9692-9706.
- Whiteman C D, Bian X D, Zhong S Y, 1997. Low-level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the southern great plains[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 36(10):1363-1376.
- Wilczak J M, Tillman J E, 1980. The three-dimensional structure of

- convection in the atmospheric surface layer[J]. *J Atmos Sci*, 37(11):2424-2443.
- Williams J K, 2014. Using random forests to diagnose aviation turbulence[J]. *Mach Learn*, 95(1):51-70.
- Wilson J W, 1986. An ill wind[J]. *Nat Hist*, 95(3):48-51.
- Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al, 1984. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 23(6):898-915.
- Wilson J W, Wakimoto R M, 2001. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1):49-62.
- Witte B M, Singler R F, Bailey S C C, 2017. Development of an unmanned aerial vehicle for the measurement of turbulence in the atmospheric boundary layer[J]. *Atmosphere*, 8(10):195.
- Wolfson M M, 1990. Understanding and predicting microbursts[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 303.
- Wolfson M M, Delanoy R L, Forman B E, et al, 1995. Automated microburst wind-shear prediction[J]. *Lincoln Lab J*, 7(2):399-426.
- Xian J H, Lu C, Lin X L, et al, 2024. Directly measuring the power-law exponent and kinetic energy of atmospheric turbulence using coherent Doppler wind lidar[J]. *Atmos Meas Tech*, 17(6):1837-1850.
- Xian J H, Qiu Z X, Luo H Y, et al, 2025. Turbulent energy budget analysis based on coherent wind lidar observations[J]. *Atmos Chem Phys*, 25(1):441-457.
- Xu X Y, Li X, Zhang Y J, et al, 2024. Application of WRF-LES on the simulation of seasonal characteristics of atmospheric boundary layer structure in Taklamakan Desert[J]. *Remote Sens*, 16(3):558.
- Yan C, Miao S G, Liu Y J, et al, 2020. Multiscale modeling of the atmospheric environment over a forest canopy[J]. *Sci China Earth Sci*, 63(6):875-890.
- Yao B, Wang Z S, Fang Z Y, et al, 2024. Reconstruction of downburst wind fields using physics-informed neural network[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 254:105935.
- Young G S, Kristovich D A R, Hjelmfelt M R, et al, 2002. Rolls, streets, waves, and more: a review of quasi-two-dimensional structures in the atmospheric boundary layer[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(7):997-1001.
- Yousif M Z, Yu L Q, Hoyas S, et al, 2023. A deep-learning approach for reconstructing 3D turbulent flows from 2D observation data[J]. *Sci Rep*, 13(1):2529.
- Zhang F, Zhang Q H, Du Y, et al, 2018. Characteristics of coastal low-level jets in the Bohai Sea, China, during the early warm season[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 123(24):13763-13774.
- Zhang H W, Wu S H, Wang Q C, et al, 2019. Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport[J]. *Infrared Phys Technol*, 96:113-122.
- Zhou B Y, Gao F, Wang L Q, et al, 2019. Robust and efficient quadrotor trajectory generation for fast autonomous flight[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 4(4):3529-3536.

(本文责编:张芳)