

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 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 G/W 等两类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警预报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

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

Jianping Guo¹, Wei Zhang¹, Bowen Zhou², Chao Yan³, Xuelin Zhang⁴, Yuping Sun¹, Weilong Deng¹, Tianmeng Chen¹, Honglong Yang⁵, Zongxu Qiu⁵, Zhibo Li⁶, Fa Tao⁷, Haihe Liang⁸, Chaolin Zhang¹

¹ State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

³ Beijing Urban Meteorological Institute, Beijing 100089, China

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

⁵ Shenzhen National Climate Observatory, Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China

⁶ Jiangxi Meteorological Observation Center, Nanchang 330096, China

⁷ CMA Meteorological Observation Center, Beijing 100081, China

⁸ CMA Meteorological Development and Planning Institute, Beijing 100081, China

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, a region highly prone to aviation hazardous weather phenomena like turbulence and wind shear. Meteorological conditions, together with Communication, Navigation, and Surveillance (CNS) 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 progress 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 for turbulence and microbursts, and Large Eddy Simulation (LES). Furthermore, the paper explores several frontier scientific and technological issues in low-altitude meteorology. Key perspectives include: new theoretical frameworks for near-neutral boundary layer turbulence; moist boundary layer processes; the development of intelligent meteorological sensing equipment for low-altitude aircraft safety; artificial intelligence (AI)-powered early warning for low-altitude aviation hazardous weather; the development of intelligent Computational Fluid Dynamics (CFD) models; and the synergistic optimization of low-altitude meteorological prediction and unmanned aerial vehicle (UAV) path planning. This study aims to deepen the understanding of the underlying mechanisms governing the

interaction between low-altitude aviation hazardous weather and aircraft. It seeks to provide theoretical foundations and technical pathways for enhancing high-precision intelligent sensing, as well as rapid early warning and forecasting 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.

Keywords: 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 米以下(根据实际需要可延伸至不超过 3000 米)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。根据中央空管委员于 2023 年 12 月发布的《国家空域基础分类方法》,低空经济所依赖的飞行活动主要发生是在 G 类(真高 120-300 米)和 W 类(真高 120 米以下)等两个非管制空域范围(见图 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(NTSB)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 米高度的风场信息，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、低空航危天气（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（Large Eddy Simulation, LES）和计算流体力学（Computational fluid dynamic, CFD）等的应用进展等关键领域的研究进展，剖析当前领域的痛点，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。

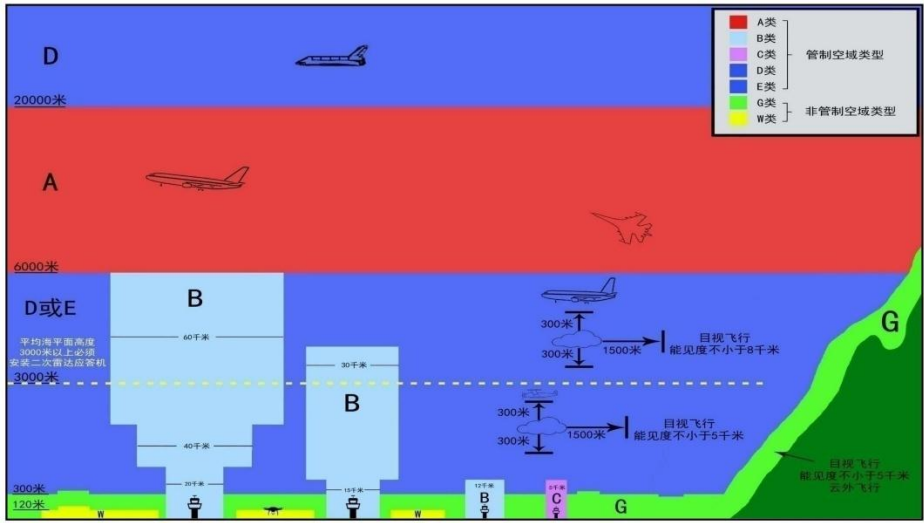


图 1 国家空域基础分类示意图（中国民用航空局，2023）

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

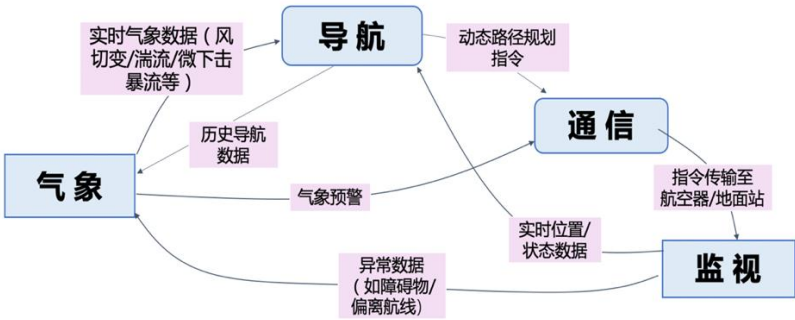


图 2 影响低空飞行安全的气象-通信-导航-监视一体化发展框架示意图

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

1 低空经济气象研究主要进展

低空经济气象科技包括边界层气象理论体系的构建、低空航危天气监测预警技术创新以及依托二者融合所形成的实际应用，当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危天气（如风切变、湍流和微下击暴流等）的低空监测预警技术及其支撑性野外科学实验，以及基于 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。

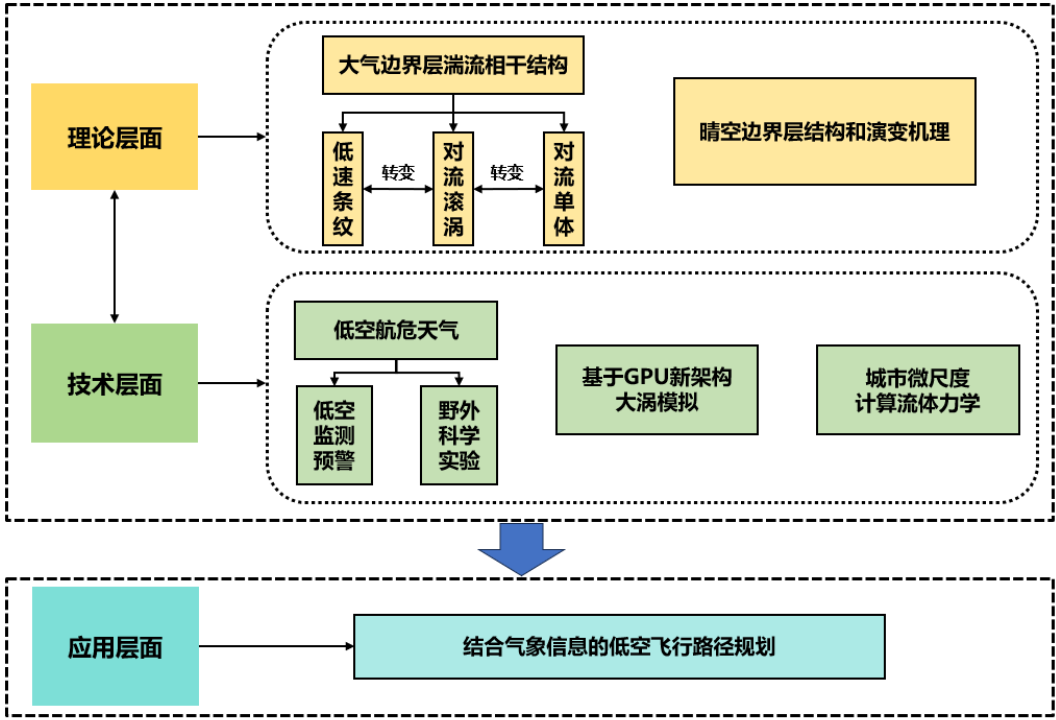


图 3 低空经济气象研究进展理论、技术与应用框架

Fig. 3 Theoretical and technological and application framework for meteorological research progress in low-altitude economy

1.1 大气边界层湍流相干结构

行星边界层(PBL)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; Weckwerth et al., 1997; Moeng and Sullivan, 1994)。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。在水平均匀的定常边界层中，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 是浮力湍流产生首次超过剪切湍流产生的地面以上距离，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 $-z_i/L$ 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 $-z_i/L$ 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中尺度水平风驱动，地表附近平均剪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 $10-20^\circ$ （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。

PBL 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 LES 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（Turbulence Kinetic Energy, TKE）如何共同促进 CBL 的组织，并通过 LES 模拟了不同 $-z_i/L$ 值的 CBL，发现水平滚涡在 $-z_i/L = 0.44$ 、3 和 8 时普遍存在。Hastings（2009）利用国际 H2O 项目（IHOP）的观测数据发现，在 $-z_i/L = 13$ 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 LES 研究中发现，在 $-z_i/L = 14.1$ 的 CBL 中存在滚涡和单体之间的过渡结构。根据观测结果，Weckwerth 等（1999）提出从滚涡结构到单体结构的转变发生在临界值 $-z_i/L \approx 25$ 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被发生在 $-z_i/L \approx 21$ 左右，Hastings（2009）从观测数据中发现了滚涡和单体共存的时间，并且观测（Brümmer, 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 等（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（ $-z_i/L = 0$ ）到强对流边界层（ $-z_i/L = 1041$ ）的 14 个 LES 案例。类似地，Jayaraman and Brasseur（2021）在较小的稳定性范围（ $-z_i/L = 0 \sim 10$ ）内对低速条纹与对流滚涡及其转变性质进行了详细的 LES 研究，但仍未涉及实际 PBL 的几何结构。随着技术的进步，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（Christian and Wakimoto, 1989; Kuettner, 1959; Young et al., 2002）。Aksamit 等（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 等(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 PBL,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(PBL Height, 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 等(2016)和 Guo 等(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北京时间 08 时和 20 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、风廓线雷达等时间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 等(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)。Della 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(Automated Surface Observation System, ASOS)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,LES 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)。LES 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),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 等(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 PBL 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 (Pilot Reports, PIREPS), 其虽能直观反映湍流对飞机的影响, 但存在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 (Yue 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 CAT 识别算法多基于模糊逻辑 (Abernethy, 2008), 通过集成多源湍流诊断方法生成预报产品如 NCAR 开发的图形湍流引导 (GTG) 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 et al, 2008; Williams, 2013)。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, 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, 当飞机距离雷达分辨率体积在 1 公里内时, 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 m/s。然而, 如果雷达反射率较弱或事件距离雷达超过 60 公里, 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 等 (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 (Federal Aviation Administration, FAA) 发布的湍流预警指南指出: 距离雷达回波 32 公里外也存在强湍流, 甚至在 100 公里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传统上耗时耗算力的数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 方法, 例如, Muñoz-Esparza 等 (2020) 使用梯度提升回归树 (GBRT) 每 1 小时生成一次全球湍流预报产品; Shao 等 (2024) 构建了可每小时更新的随机森林模型。值得注意的是, 基于扩散的深度学习在湍流产生预测方面也取得了进展, 有望成为湍流长期预测的有效方法 (Patil et al, 2024)。

271 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
272 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
273 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临预警带来质的飞跃,
274 这将是未来湍流监测预警研究的重要方向。

275 276 1.4 微下击暴流监测预警

277 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
278 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
279 会(NTSB)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。
280 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
281 可能由当时科学界尚未认知的雷暴风切变所致。通过对 1975 年东方航空事故的
282 深入分析, Fujita 首次提出"下击暴流"概念,并将其中直径小于 4 公里的现象定
283 义为"微下击暴流"(Fujita, 1976; Wilson and Wakimoto, 2001)。为验证这一开创
284 性理论,美国于 1978 年实施了"伊利诺伊州北部气象研究"(NIMROD)。Fujita
285 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
286 直尺度通常小于 1 公里<1 公里),1982 年又启动了"联合机场天气研究"(JAWS)
287 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
288 频发,更揭示了其对航空安全构成致命威胁的核心机制:空速突变导致的升力丧
289 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
290 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
291 Willson,1984)。这项实验催生了一系列关于微下击暴流的结构、演变和形成机
292 理的重要研究(例如, McCarthy and Wilson, 1984; Fujita, 1985; Srivastava, 1985;
293 Wilson, 1986; Mahoney and Rodi 1987; Kessinger et al,1988; Hjelmfelt, 1988)。

294 当下一代天气雷达(NEXRAD)计划于 1979 年启动时(Crum and Alberty,
295 1993),FAA 同步启动了使用 NEXRAD 提高航空安全和效率的研究(Laird and
296 Evans, 1982)。1984 年"分类、定位、避免风切变"(CLAWS)项目的成功
297 实施,促使 FAA 将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
298 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
299 (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
300 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
301 暴流识别算法开发提供了关键支撑。1988 年,FAA 在丹佛斯台普顿国际机场进
302 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
303 (Schlickemaier, 1989)。然而,在 TDWR 原型机转移至下击暴流频发的奥兰多
304 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。
305 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
306 区域运营,并给交通管理带来重大问题,因此,亟需预测微下击暴流的能力,以
307 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
308 测算法(Chornoboy et al.,1994)存在明显局限。微下击暴流的热动力学研究
309 (Roberts and Wilson, 1989; Wolfson, 1990)表明,可靠的预测需要融合热力学参
310 数与脉冲多普勒雷达数据,加上对多传感器输入的其他需求,推动 TDWR 原型
311 转换为"综合终端天气系统"(ITWS)原型(Evans and Ducot, 1994)。ITWS
312 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,1994)。

2000-2010 年间,TDWR 完成全美机场部署的同时,其信号处理的研究仍在继续,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”(WP)、“雷暴严重对流外流”(SCOT)、“风-港口-海洋”(MPS)及 ERC THUNDERER 等多个大型观测项目(Solari et al,2012; Gunter and Schroeder, 2015; Reptto 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)。早在上世纪 80 年代,Wilson et al. (1984)通过多普勒雷达研究微下击暴流的风场结构,评估其在机场风切变探测中的应用效果。Boilley and Mahfouf(2013)在法国蔚蓝海岸国际机场开展了低空水平风切变观测试验,通过部署 4 个风速计、1 台风廓线仪和 1 台测风激光雷达,于 2009 年捕捉到两次风切变事件,并分析了导致风切变的气象成因。国内学者在北京地区的研究颇具代表性。Chen et al. (2017a,2017b)结合测风激光雷达和 325 米气象塔数据,揭示了夜间风切变与颗粒物分布的关联,发现南北城区风向切变存在 1.5 小时滞后,并建立了 PM_{10} 浓度与激光雷达载噪比的定量关系。Zhang et al. (2019)提出基于 1550 nm 激光雷达的分步扫描策略,开发了风切变快速识别算法,有效提升了机场低空风场的实时监测能力。黄轩等(2022)针对高原机场,利用激光雷达和风廓线数据,分析了顺风切变线和逆风切变线的垂直结构特征,厘清了风速传播与风向突变的动力学联系。刘晓英等(2020)在北京首都国际机场识别出干性雷暴和地形诱导两类风切变,阐明了风速骤增和风向突变的相互作用机制。梁志等(2024)基于测风塔和激光雷达建立了风速切变、风向切变与大气稳定度的关系模型,揭示了大气稳定度对风切变的影响。

湍流是直接威胁低空航空飞行安全的另一重要因素。美国波音公司利用机载观测数据构建了大气状态数据集,并结合深度学习优化湍流预测模型,为航线优化和气候研究提供了重要数据支撑。MIT 林肯实验室基于 O'Connor et al.(2010)提出的方法,建立了机场低空 EDR 气候学分布,同时评估了弱湍流条件下的计算可靠性。NCAR 的 SCALES 试验结合无人机观测、移动探空和激光雷达数据,验证了基于 GPU 的 FastEddy 大涡模式的精度,为城市边界层湍流研究提供了新方法。俄克拉荷马大学基于自动湍流报告的分析表明,雷暴附近 2 km 高度内的湍流风险显著增加。UCAR 团队利用非线性湍流检测算法(NTDA)解析了对流云内的湍流强度分布,为航空气象预警提供了理论依据。

除上述威胁外，低空急流（Low-Level Jet，简称 LLJ）常诱发强烈的低空风切变和晴空湍流(Abernethy, 2008)，或通过与重力波相互作用产生间歇式湍流（Hallgren et al., 2024）。特别是在城市低空环境中，LLJ 流经建筑物时产生的绕流尾涡，对低空飞行安全构成显著威胁。针对 LLJ 的野外科学实验研究揭示了其显著的时空变化特征。在美国，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）利用俄克拉荷马州两年的探空观测，建立了大平原 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 等（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(PBL)实验设施的夜间 LLJ 进行观测，发现夜间 LLJ 发生更为频繁。在中国，针对特定区域的野外实验取得重要进展。Du et al.（2012）利用上海的风廓线雷达数据，建立了梅雨期与非梅雨期 LLJ 气候学，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 et al., 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 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，成为低空航危天气监测的新兴手段。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 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。Brosy et al.（2017）利用多旋翼无人机测量边界层物质交换，Witte（2017）研制了专用湍流探测无人机，实现了高精度数据采集。Cole（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。

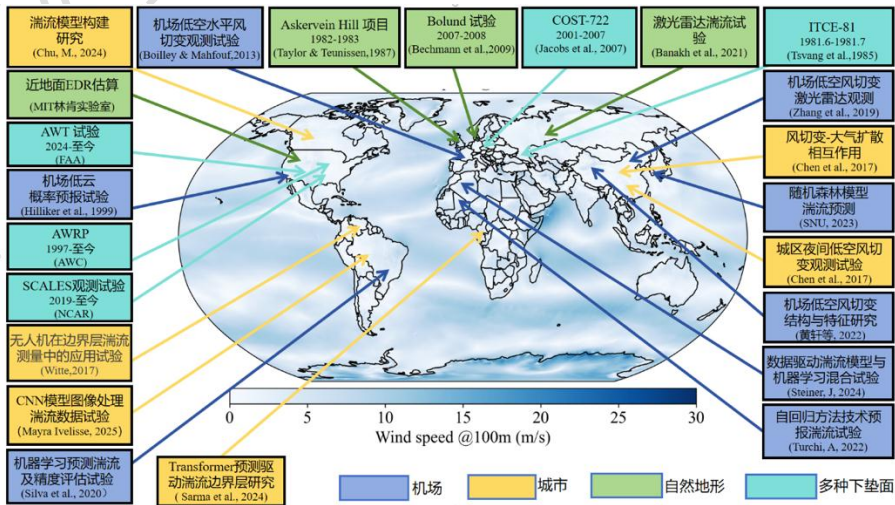


图 4 全球围绕低空航危天气监测预警预报开展的野外科学试验空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of global field scientific experiments on monitoring, forecasting, and early warning of hazardous weather for low-altitude flights

1.6 大涡模拟研究进展

大涡模拟 (Large-eddy simulation, LES) 作为一种高精度的湍流模拟方法, 自 20 世纪 60 年代末由美国国家大气研究中心 (NCAR) 的 Douglas Lilly 首次提出以来, 已成为 PBL 湍流研究的重要工具。与传统的数值天气预报 (NWP) 模式和大气环流模式 (General Circulation Models, GCMs) 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, LES 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, LES 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) 历时十多年才完成稳定边界层的首例 LES 成功模拟。值得关注的是, 近年来 LES 还被应用于研究城市冠层内的湍流结构的研究, 通过引入浸入边界法 (Immersed Boundary Method, IBM) 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 (Subgrid-Scale, SGS) 模型的构建始终是 LES 的核心挑战。经典 Smagorinsky-Lilly 模型假设 SGS 通量与动量 KM 和热量 KH 的涡交换系数成比例, 其中 KM 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。SGS 模型通常要求网格位于惯性子层内以实现湍流各向同性假设, 此类条件尤其适用于精细分辨率场景 (如 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 SGS 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 模型中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。动态模型的发展进一步革新了 SGS 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) 等复杂场景中展现显著优势。

硬件技术的进步为 LES 发展注入了新动能。传统的 CPU 架构在处理高分辨率 LES 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, 美国国家大气研究中心 (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 (Xu et al., 2024)) 快百倍

以上的计算速度,同时能耗仅为 CPU 模式的十分之一(Sauer and Munoz-Esparza, 2020; Munoz-Esparza et al.,2020)。在美国能源部的支持下,劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)也已推出 WRF 模式的 GPU 版本,即 Energy Research and Forecasting (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 LES 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 CFD 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,在公里级分辨率下运行,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 CFD 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公里范围内。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和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。

CFD 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 CFD 方法包括雷诺平均(RANS)方法和 LES 方法。RANS 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 CFD 研究采用了 RANS 方法。但 RANS 方法的主要缺点是依赖经验公式对所有尺度的湍流脉动个建模,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,LES 方法能够分辨大尺度湍流结构,精确捕捉瞬态流场特征,但其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 CFD 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 CFD 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,CFD 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 CFD 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,但其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 CFD 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 RRT、概率路线图 PRM）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 APF、蚁群算法 ACO、遗传算法 GA）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.,2023）。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 NMPC）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 CFD 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。首先，复杂的城市或山地环境中的风场模拟主要依赖高精度 CFD，但是模拟的时间成本制约实时决策能力。其次，现有的路径规划模型多采用均匀风场或大气风廓线等理想化假设

(Hong et al., 2023), 这些风场模型易于集成进路径规划求解算法, 但是却难以反应真实城市或山地中的风场特征。此外, 多目标优化中权重系数(如安全性、路径长度以及功耗)的设定仍依赖经验, 缺乏普适性理论指导。

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 CFD 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), 虽降低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

尽管近年来国内外科学家围绕低空经济气象相关领域取得了显著进展, 但在面向低空安全、高效飞行的气象科技支撑, 包括中性边界层基础理论、和湿边界层过程、低空气象智能感知装备、AI 赋能的低空航危天气监测预警等诸多前沿科学问题方面, 仍存诸多痛点, 下面将展望这些问题进行讨论, 旨在为低空经济气象的可持续发展提供指引。

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, CBL 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, 以及它们之间的转变机制。尤其是对流滚涡与对流单体, 目前已有新方法能够区分对流滚涡与对流单体(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(Stable Boundary Layer, SBL)与 CBL 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

542 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。
543 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,
544 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
545 匀等实际复杂大气边界层理论拓展。

546 547 2.2 湿边界层物理过程

548 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
549 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、
550 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
551 杂性源于多重机制:水汽密度小于干空气产生的浮力扰动(10g/kg 水汽的浮力扰
552 动相当于 1.8K 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。
553 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,
554 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
555 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
556 后深对流,低空急流输送水汽可维持中尺度对流系统。

557 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
558 往与云过程密切相联,云下层和云层的协同观测是解码云覆盖边界层湍流过程
559 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
560 数据,而混合层和云层的湍流特征缺乏有效观测手段难以量化,导致云量、云底
561 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
562 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
563 (Atkinson and Zhang, 1996),同时云中湍流(尤其是云和环境交界处的湍流)
564 尺度受稳定层结的制约而相比湍流更小,需更高的空间分辨率,这对计算资源提
565 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
566 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
567 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
568 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
569 乏有效评估,这也与湿边界层中湍流观测的稀缺有关。

570 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
571 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。
572 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
573 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
574 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
575 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
576 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,
577 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
578 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
579 方案为目标,如 Eddy-Diffusivity Mass-Flux (EDMF; Siebesma, et al., 2007) 方案、
580 Cloud Layers Unified By Binormals (CLUBB; Golaz et al., 2002) 方案、及 Unified
581 Convection Scheme (UNICON; Park, 2014) 等,目前这些一体化方案对云覆盖边

582 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.,
583 2024; Vraciu et al., 2024)。

585 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

586 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
587 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
588 器的尺寸和响应频率高度相关。另一方面，城市和山区等复杂地表环境中，绕流
589 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
590 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
591 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
592 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
593 键参数的时空分布梯度，导致人们对于低空风切变、湍流等影响无人机飞行的关
594 键气象因子发展和演变物理机制仍不清晰。

595 中华人民共和国工业和信息化部于 2023 年 12 月发布的《民用无人驾驶航空
596 器生产管理若干规定》并未提及气象感知装备相关技术要求和规定，导致参与低
597 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
598 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
599 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
600 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
601 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
602 破遥感测风的关键元器件技术；再次研发基于城市楼宇屋顶平台的云状、云量、
603 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、
604 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/
605 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
606 观测技术，建立低空三维风场、风切变、湍流耗散率、湍涡尺度等参数的多源融
607 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。

608 2.4 人工智能赋能的低空航危天气短临预警

609 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 分钟以内，
610 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
611 航路分钟级风切变、湍流、低空急流及强降水的精准预报。另一方面，人工智能
612 短临模型以天气雷达基本反射率因子作为主要输入的也无法快速而准确地预警
613 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
614 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、
615 纳维-斯托克斯方程(N-S)等物理约束嵌入随机森林、神经网络等机器学习框架，
616 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,
617 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
618 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，
619 利用数值天气预报 (NWP) 输出的垂直风廓线与历史灾害数据，结合随机森林
620 模型，已在欧洲部分机场实现低空风切变 (LLWS) 1 小时预警，且 PR-AUC 值
621 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，依托我国全球最密集的地基垂直观测网络（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（GNN）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（AGI）模型的端到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（见图 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。

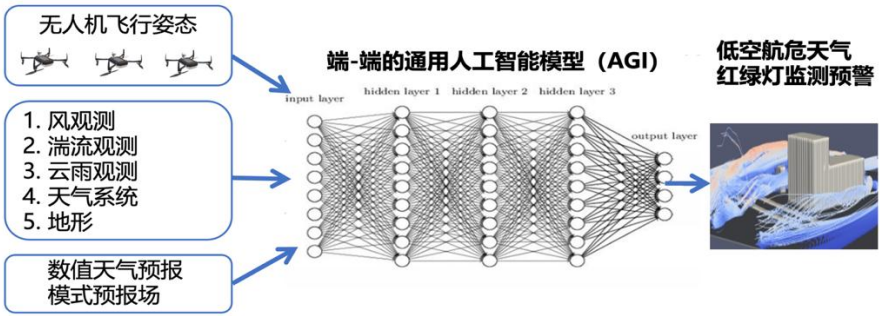


图 5 基于端-端的通用人工智能模型（AGI）的低空航危天气监测预警流程

Fig. 5 Workflow of AGI-based monitoring and early warning for low-altitude flight hazardous weather using 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 到 5 倍建筑物高度区域内（称为粗糙子层）的气流具有高度的局地特征，空间尺度在十米到百米量级。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 x 10 km x 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 10 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。例如，2020 年美国大气研究中心研发的 FastEddy 模式，采用了基于 CUDA 语言的 GPU 构架，实现了相对传统 CPU 大涡模式（如 WRF-LES）百倍以上计算速度提升（Munoz-Esparza et al.,2020；Sauer and Munoz-Esparza, 2020），能耗则是 CPU 模式的十分之一。在美国能源部的支持下，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）也已推出 WRF 模式的 GPU 版本，即 Energy Research and Forecasting（ERF）模式，向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 LES 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（IBM）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（CFD）模拟技术研发

城市微尺度 CFD 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 CFD 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 CFD 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 CFD 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 CFD 求解过程，显著加快计算速度；另一类是辅助型方法，在传统 CFD 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 CFD 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 CFD 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 CFD 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、温和湿）作为 CFD 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 CFD 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 CFD 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 CFD 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 CFD 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控系统频繁调整舵面，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实验研究，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 结束语

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。但人们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（LES）与观测实验，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（CAT）与对流性湍流（CIT）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，LES 与城市微尺度 CFD 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”的端到端预警模型，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 米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 CFD 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。

致谢

感谢国家自然科学基金委杰出青年科学基金项目(42325501)，科技部重点研发项目（42325501）和中国气象科学研究院基本科研业务费（2024Z003）共同资助。

参考文献

- 郭建平, 刘博铭, 郭晓冉, 张颖, 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. Guo J, Liu B, Guo X, Zhang Y, 2021. Research progress on new applications based on radar wind profiler networking observations[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 11(2):5-12(in Chinese).
- 何成, 卢骁, 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. 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. 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. Laser Technol, 46(2):206-212(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(03):365-374. Liang Z, Shi Y, Zhang Z, et al., 2024. Impact of atmospheric stability on vertical wind shear in the boundary layer[J]. J Univ Chin Acad Sci, 41(03):365-374(in Chinese).

779 刘树华, 缪育聪, 李婧, 2020. 我国区域大气污染成因机制研究[C]//
 780 2020中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷). 1210-1214. Liu S H, Miao Y C, Li J,
 781 2020. Research on the formation mechanism of regional air pollution in China[C]// Proceedings of
 782 the 2020 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences (Volume 1).
 783 1210-1214(in Chinese).
 784 刘晓英, 吴松华,
 785 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
 786 毫米波学报,39(4):491-504.Liu X Y, Wu S H, Zhang H W, et al., 2020. Observation of
 787 Low-altitude Wind Shear of Different Causes Based on Coherent Doppler Wind Lidar[J]. J Infrared
 788 Millimeter Waves,39(4):491-504(in Chinese).
 789 王安庭, 李煜斌, 赵纯, 等, 2021. 边界层方案对南京地区PM2.5浓度模拟的影响[J]. 中国环境科学,
 790 41(07):2977-2992. Wang A T, Li Y B, Zhao C, et al., 2021. Impact of boundary layer schemes on
 791 PM2.5 concentration simulation in Nanjing area[J]. China Environ Sci, 41(07):2977-2992(in
 792 Chinese).
 793 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].
 794 兰州大学学报(自然科学版), 56(05):635-641. Xu L L, Zhang L, Du T, et al., 2020. Determination
 795 of atmospheric boundary layer height using ground-based remote sensing data[J]. J Lanzhou Univ
 796 (Nat Sci), 56(05):635-641(in Chinese).
 797 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,
 798 78(03):522-536. Zhang H S, Zhang X Y, Li Q H, et al., 2020. Research progress on the
 799 determination and application of atmospheric boundary layer height[J]. Acta Meteor Sin,
 800 78(03):522-536(in Chinese).
 801 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. Research
 802 review of atmospheric boundary layer meteorology[J]. J Arid Meteor, 21(3): 74-78 (in Chinese).
 803 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):
 804 526-532. Zhang Q, Hu Y Q, 2001. Advances and scientific issues in atmospheric boundary layer
 805 physics[J]. Adv Earth Sci, 16(4): 526-532 (in Chinese).
 806 张强, 王蓉, 岳平, 等, 2017. 复杂条件下陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J]. 气象学
 807 报, 75(1): 39-56. Zhang Q, Wang R, Yue P, et al., 2017. Discussion on scientific issues in
 808 land-atmosphere interaction under complex conditions[J]. Acta Meteor Sin, 75(1): 39-56 (in
 809 Chinese).
 810 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(05):631-643. Zhao Z,
 811 Zhou B W, 2021. Non-local momentum mixing in the daytime convective boundary layer[J]. Sci
 812 Meteor Sin, 41(05):631-643(in Chinese).
 813 中国民用航空局, 2023. 国家空域基础分类方法, 1-10. Civil Aviation Administration of China, 2023.
 814 National airspace basic classification methodology, 1-10(in Chinese).
 815 中国气象局, 2024. 低空经济气象科技创新工作方案(2024—2030年),1-13. China Meteorological
 816 Administration, 2024. Work Plan for Meteorological Science and Technology Innovation in the
 817 Low-Altitude Economy (2024-2030), pp. 1-13(in Chinese).
 818 Abernethy J A, 2008. A domain analysis approach to clear-air turbulence forecasting using high-density
 819 in-situ measurements[D]. University of Colorado at Boulder.
 820 Agee E, Chen T, Dowell K, 1973. A review of mesoscale cellular convection[J]. Bull Amer Meteor Soc,
 821 54: 1004-1012.
 822 Aksamit N, Katurji M, Zhang J, 2024. Understanding coherent turbulence and the roll - cell transition
 823 with Lagrangian coherent structures and frame - indifferent fluxes[J]. J Geophys Res,
 824 129(18):e2024JD041490.
 825 Atkinson B W, Zhang J W, 1996. Mesoscale shallow convection in the atmosphere[J]. Rev Geophys,
 826 34(4): 403-431.
 827 Blocken B. 2018, LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A
 828 foregone conclusion? Building Simulation, 11: 821-870.
 829 Boilley A, and Mahfouf J F, 2013. Wind shear over the Nice Côte d'Azur airport: case studies[J]. Nat
 830 Hazards Earth Syst Sci, 13(9):2223-2238.
 831 Bonner W D, 1968. Climatology of the low level jet[J]. Mon Wea Rev, 96: 833-850.
 832 Bottyán Z, Gyöngyösi A Z, Wantuch F, et al., 2015. Measuring and modeling of hazardous weather
 833 phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS)
 834 [J]. Idojaras, 119(3):307-335.
 835 Bottyán Z, Tuba Z, and Gyöngyösi A Z, 2016. Weather forecasting system for the Unmanned Aircraft
 836 Systems (UAS) missions with the special regard to visibility prediction, in Hungary[M]. In: Critical
 837 Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research
 838 Project in Hungary. 23-34.
 839 Bou-Zeid E, Meneveau C, Parlange M, 2005. A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large
 840 eddy simulation of complex turbulent flows[J]. Phys Fluids, 17: 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 Discuss*, 2017:1–21.
- Brümmer B, 1999. Roll and cell convection in wintertime Arctic cold-air outbreaks[J]. *J Atmos Sci*, 56(15): 2613–2636.
- Calzolari G, Liu W, 2021. Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*, 206, 108315.
- Caron C, Lauret P, Bastide A, 2025. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review. *Building and Environment*, 267: 112229.
- Chan Y Y, Ng K K H, Wang T, 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.
- 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, Wang X, 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, Wang Y, Huang G, et al., 2024. Coupling physical factors for precipitation forecast in China with graph neural network[J]. *Geophys Res Lett*, 51: e2023GL106676. <https://doi.org/10.1029/2023GL106676>.
- 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 Tech*, 22: 1507–1519. <https://doi.org/10.1175/JTECH1805.1>.
- 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 Tech*, 22: 575–582. <https://doi.org/10.1175/JTECH1730.1>.
- Chornoboy E S, Matlin A M, Morgan J P, 1994. Automated storm tracking for terminal air traffic control[J]. *Lincoln Lab J*, 7: 427–448.
- Chow F, 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: 2058–2077. <https://doi.org/10.1175/JAS3456.1>.
- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1530:TRBRRRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1530:TRBRRRA>2.0.CO;2).
- Chrit M, and Majdi M, 2022. Improving wind speed forecasting for urban air mobility using coupled simulations[J]. *Adv Meteorol*, 2022:2629432.
- Cole K, and 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 C S, Meymaris G, Limber M, 2004. An update on the FAA aviation weather research program's in situ turbulence measurement and reporting system[C]. 11th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Boulder, CO, National Center for Atmospheric Research, P4.3. <https://www.researchgate.net/publication/228379921>.
- Cornman C S, Morse C, Cuning G, 1995. Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in-situ aircraft measurements[J]. *J Aircr*, 32: 171–177. <https://doi.org/10.2514/3.46697>.
- Cornman L B, 2016. Airborne in situ measurements of turbulence[M]//Sharman R, Lane T, Eds. *Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction*. Springer: 97–120. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23630-8_5.
- Cornman L B, Carmichael B, 1993. Varied research efforts are under way to find means of avoiding air turbulence[J]. *ICAO J*, 48: 10–15.
- Crum T D, Alberty R L, 1993. The WSR-88D and the WSR-88D Operational Support Facility[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 74: 1669–1688. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<1669:TWATWO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<1669:TWATWO>2.0.CO;2).
- Cybyk B, Frey T, McGrath B, et al., 2009. Unsteady urban airflows and their impact on small unmanned air system operations[C]. In: *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*. 6049.
- Deardorff J W, 1972. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers[J]. *J Atmos Sci*, 29: 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: 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00224974>.
- Deardorff J W, 1980. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model[J]. *Bound-Layer Meteor*, 18: 495–527. <https://doi.org/10.1007/BF00119502>.

- Debnath S K, Omar R, Latip N B A, 2019. A review on energy efficient path planning algorithms for unmanned air vehicles[C]. In: Alfred R, Lim Y, Ibrahim A A A, Anthony P, eds. Computational Science and Technology. Singapore: Springer, 523–532.
- Della P D T, 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.*
- Ding J, Ren Y, Zhang H, 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*, 47:70–85.
- Doviak R J, Lee J T, 1985. Radar for Storm Forecasting and Weather Hazard Warning[J]. *J Aircr*, 22: 1059–1063.
- Du P, Shi Y, Cao H, et al., 2024. AI-enabled trajectory optimization of logistics UAVs with wind impacts in smart cities[J]. *IEEE Trans Consum Electron*, 70:3885–3897.
- 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: 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 Meteorol*, 157: 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.011>.
- Evans J, Bernella D, 1994. Supporting the deployment of the Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)[J]. *Lincoln Lab J*, 7: 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: e2021JD035859.
- Fujita T T, 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of John F. Kennedy airport runway, New York City[R]. University of Chicago SMRP Research Paper 137: 56 pp.
- Fujita T T, 1985. The downburst, microburst and macroburst[R]. University of Chicago SMRP Research Paper 210: 122 pp. <http://pi.lib.uchicago.edu/1001/cat/bib/684175>.
- Galway D, Etele J, and 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<3540:APBMFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<3540:APBMFB>2.0.CO;2).
- Grossman R L, 1982. An analysis of vertical velocity spectra obtained in the BOMEX fair-weather, trade-wind boundary layer[J]. *Bound-Layer Meteorol*, 23(3): 323–357.
- Gultepe I et al., 2019. A review of high impact weather for aviation meteorology[J]. *Pure and Applied Geophysics*[J], 176: 1869-1921.
- Gunter W S, Schroeder J L, 2015. High-resolution full-scale measurements of thunderstorm outflow winds[J]. *J Wind Eng Ind Aerod*, 138: 13–26.
- Guo J, Miao Y, 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: 13309–13319. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13309-2016>.
- Guo, J., Zhang, J., Shao, J., Chen, T., Bai, K., Sun, Y., Li, N., Wu, J., Li, R., Li, J., Guo, Q., Cohen, J. B., Zhai, P., Xu, X., and Hu, F. 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, 1–14, <https://doi.org/10.5194/essd-16-1-2024>.
- 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., 2023. Machine learning methods to improve spatial predictions of coastal wind speed profiles and low-level jets using single-level ERA5 data[J]. *Wind Energy Science Discussions*, 2023: 1-30.
- Hamilton D W, Proctor F H, Ahmad N N, 2012. Flight Tests of the Turbulence Prediction and Warning System (TPAWS)[R]. NASA/TM-2012-217337.
- Hannon S M, 2004. Pulsed Doppler lidar for terminal area monitoring of wind and wake hazards[C]. 11th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer Meteor Soc, P4.21. https://ams.confex.com/ams/11aram22sls/techprogram/paper_87757.htm.
- Hastings R, 2009. Multi-platform analysis of morning transition and evolution of shallow mesoscale convection on 21 June 2002[M]. The Pennsylvania State University.

- Hitchcock S M, Lane T P, Deierling W, et al., 2025. Spatial Patterns of Turbulence near Thunderstorms[J]. Bull Amer Meteor Soc, 106: E1–E22. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0142.1>.
- Hjelmfelt M R, 1988. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado[J]. J Climate Appl Meteor, 27: 900–927. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1988\)027<0900:SALCOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1988)027<0900:SALCOM>2.0.CO;2).
- Hong H, Liu L, Holzapfel F, et al., 2023. Dynamic soaring under different atmospheric stability conditions[J]. J Guid Control Dyn, 46:970–977.
- 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: 1–31. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.3>.
- Jiang S, Wang J, Li C, et al., 2024. Identification of no-fly zones for delivery drone path planning in various urban wind environments[J]. Phys Fluids, 36:085166.
- Kaimal J, Wyngaard J, Haugen D, et al., 1976. Turbulence structure in the convective boundary layer[J]. J Atmos Sci, 33(11): 2152–2169.
- Keohan C F., B. Keith, and S. M. Hannon, 2006: Evaluation of pulsed lidar wind hazard detection at Las Vegas International Airport. Proc. 12th Conf. on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., P5.4, https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_105481.htm.
- Keohan C F, Keith B, Hannon S M, 2006. Evaluation of pulsed lidar wind hazard detection at Las Vegas International Airport[C]. Proc 12th Conf on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA, Amer Meteor Soc, P5.4. https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_105481.htm.
- Kessinger C J, Parson D B, Wilson J W, 1988. Observation of a storm containing misocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations[J]. Mon Wea Rev, 116: 1959–1982. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<1959:OOASCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<1959:OOASCM>2.0.CO;2).
- 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: 1735–1757. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0213.1>.
- Kim Y C, Matsui M, 2017. Analytical and empirical models of tornado vortices: a comparative study[J]. J Wind Eng Ind Aerod, 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: e2019JD031918.
- Kuettner J, 1959. The band structure of the atmosphere[J]. Tellus Ser A, Dyn Meteor Oceanogr, 11(3): 267–294. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1959.tb00033.x>.
- Laird, B., and J. Evans, 1982: FAA weather surveillance requirements in the context of NEXRAD. MIT Lincoln Laboratory Project Rep. ATC-112, 184 pp.
- Laird B, Evans J, 1982. FAA weather surveillance requirements in the context of NEXRAD[R]. MIT Lincoln Laboratory Project Rep. ATC-112: 184 pp.
- Lee M J, Kim J, Moin P, 1990. Structure of turbulence at high shear rate[J]. J Fluid Mech, 216: 561–583.
- Leith C, 1990. Stochastic backscatter in a subgrid-scale model: Plane shear mixing layer[J]. Phys Fluids, 2: 297–299. <https://doi.org/10.1063/1.857779>.
- LeMone M, 1973. The structure and dynamics of horizontal roll vortices in the planetary boundary layer[J]. J Atmos Sci, 30(6): 1077–1091.
- Lilly D, 1966. On the application of the eddy viscosity concept in the inertial sub-range of turbulence[R]. NCAR Manuscript 123: 19 pp.
- 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: 1525–1546.
- Liu, B., Guo, J., Gong, W., Shi, Y., Jin, S., 2020. Boundary layer height as estimated from Radar wind profilers in four Cities in China: relative contributions from aerosols and surface features[J]. Remote Sensing, 12, 1657. <https://doi.org/10.3390/rs12101657>.
- Liu, B., Y. Ma, J. Guo, W. Gong, Y. Zhang, F. Mao, J. Li, X. Guo, and Y. Shi, 2019. Boundary layer heights as derived from ground-based radar wind profiler in Beijing[J], IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 57(10): 8095–8104. doi: 10.1109/TGRS.2019.2918301.
- Liu L, Stevens R J, 2022. Vertical structure of conventionally neutral atmospheric boundary layers[J]. Proc Natl Acad Sci, 119(22): e2119369119.
- Liu L, Wang X, Yang X, et al., 2023. Path planning techniques for mobile robots: review and prospect[J]. Expert Syst Appl, 227:120254.
- Liu M, Zhang X, Zhu X S, et al., 2023. 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: 015109. <https://doi.org/10.1063/1.3291073>.
- Lu J, 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, Fan X, 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 and structure and momentum fluxes in large-eddy simulations of neutral boundary-layer flows[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48: 1161–1180. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC2021.1>.
- Ma J, Luo L, Chen M, et al., 2021. Clear-air turbulence (CAT) identification with X-band dual polarimetric radar based on Bayesian approach[J]. *Atmosphere*, 12(12): 1691.
- Mahoney W P III, Rodi A, 1987. Aircraft measurements on microburst development from hydrometeor evaporation[J]. *J Atmos Sci*, 44: 3037–3051. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<3037:AMOMDF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<3037:AMOMDF>2.0.CO;2).
- Mason P J, Derbyshire S H, 1990. Large eddy simulation of the stably-stratified atmospheric boundary layer[J]. *Bound-Layer Meteor*, 53: 117–162. <https://doi.org/10.1007/BF00122467>.
- Mason P J, Thomson D J, 1992. Stochastic backscatter in large-eddy simulations of boundary layers[J]. *J Fluid Mech*, 242: 51–78. <https://doi.org/10.1017/S0022112092002271>.
- McCarthy J, Wilson J W, 1984. The microburst as a hazard to aviation: Structure, mechanism, climatology, and nowcasting[C]. Preprints, Nowcasting II Symp., 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: 15–22. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<0015:TJAWSP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<0015:TJAWSP>2.0.CO;2).
- McGrath B E, Cybyk B Z, and 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. <https://doi.org/10.1017/S0022112096007379>.
- Moeng C, Sullivan P, 1994. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows[J]. *J Atmos Sci*, 51(7): 999–1022.
- Munoz-Esparza D, Sauer J A, Shin H H, et al., 2020. 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. <https://doi.org/10.1029/2020MS002141>.
- Muñoz-Esparza D, Sharman R D, Deierling W, 2020. 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 demasking 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 Tech*, 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.
- Panofsky H A, 1974. The atmospheric boundary layer below 150 meters[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 6(1): 147–177.
- Park S B, Baik J J, 2014. Large-eddy simulations of convective boundary layers over flat and urban-like surfaces[J]. *J Atmos Sci*, 71: 1880–1892.
- Park S, 2014. A Unified Convection Scheme (UNICON). Part I: Formulation[J]. *J Atmos Sci*, 71(11): 3902–3930. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0233.1>.
- 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.
- Patton E G, Sullivan P P, Shaw R H, et al., 2016. Atmospheric stability influences on coupled boundary layer canopy turbulence[J]. *J Atmos Sci*, 73: 1621–1647. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0068.1>.
- 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]. In: Proceedings of the 2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Chania - Crete, Greece: IEEE, 280–285.
- Piroozmand P, Mussetti G, Allegrini J, Mohammadi M H, Akrami E, Carmeliet J, 2020. Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing. *J Wind Eng Ind Aerod*, 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. <https://doi.org/10.1017/S0022112000008776>.
- Press H, Binkley E T, 1948. A preliminary evaluation of the use of ground radar for the avoidance of turbulent clouds[R]. NACA Tech Note NACA-TN-1684: 14 pp. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930082322/downloads/19930082322.pdf>.
- 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]. SID.2024.1.08.
- Roberts R D, Wilson J W, 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar[J]. *J Appl Meteor*, 28: 285–303. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1989\)028<0285:APMNP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1989)028<0285:APMNP>2.0.CO;2).
- 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 Meteorol*, 163(1): 41–68. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0220-3>.
- Sauer J A, Munoz-Esparza D, 2020. The FastEddy® Resident-GPU accelerated large-eddy simulation framework: Model formulation, dynamical-core validation and performance benchmarks[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 12(11): e2020MS002100. <https://doi.org/10.1029/2020MS002100>.
- Schlickemaier H W, 1989. Windshear case study: Denver, Colorado, July 11, 1988[R]. FAA Rep DOT/FAA/DS-89/19: 511 pp.
- 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: 372–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0372:TQUOPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0372:TQUOPI>2.0.CO;2).
- Shao J, Zhuang Z, Yu Z, et al., 2024. The prospective application of machine learning in turbulence forecasting over China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 63(10): 1273–1285.
- Sharman C, Tebaldi G, Wiener G, et al., 2006. An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 21: 268–287. <https://doi.org/10.1175/WAF924.1>.
- Shi X, 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: 1499–1507. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0392.1>.
- 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. <https://doi.org/10.1175/JAS3888.1>.
- Smagorinsky J, 1963. General circulation experiments with the primitive equation[J]. *Mon Wea Rev*, 91: 99–165. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).
- 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 Aerod*, 104: 266–277.
- Sommeria G, 1976. Three-dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade-wind boundary layer[J]. *J Atmos Sci*, 33: 216–241. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<0216:TDSOTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0216:TDSOTP>2.0.CO;2).
- 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 Meteorol*, 44: 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 downdrafts: Application to microburst downdraft[J]. *J Atmos Sci*, 42: 1004–1023. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<1004:ASMOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1004:ASMOED>2.0.CO;2).

- Su T, Li Z, 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 Meteorol*, 71: 247–276. <https://doi.org/10.1007/BF00713741>.
- Tominaga Y, Stathopoulos T, 2011. CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: comparison between LES and RANS. *J Wind Eng Ind Aerod*, 99, 340–348.
- Toparlar Y, Blocken B, Maiheu B, van Heijst G J F, 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renew Sustain Energy Rev*, 80: 1613-1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- 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-Pac J Atmos Sci*, 49: 259-270.
- Weckwerth T, Horst T, Wilson J, 1999. An observational study of the evolution of horizontal convective rolls[J]. *Mon Wea Rev*, 127(9): 2160–2179.
- Weckwerth T, Wilson J, Wakimoto R, 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: 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 Meteorol*, 36: 1363-1376.
- Wilczak J M, Tillman J, 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: 51–70.
- Wilson J W, 1986. An ill wind[J]. *Nat Hist*, 95: 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: 49–62. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0049:TDOTDT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0049:TDOTDT>2.3.CO;2).
- Witte B M, Singler R F, and Bailey S 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, 1990. Understanding and predicting microbursts[D]. Massachusetts Institute of Technology: 303 pp.
- Wolfson R, Delanoy R, Forman B, et al., 1994. Automated microburst wind shear prediction[C]. *Lincoln Lab J*, 7: 399–426.
- Xian J, Lu C, Lin X, 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, Qiu, Z, Luo H, et al., 2025. Turbulent energy budget analysis based on coherent wind lidar observations[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 25,441–457, <https://doi.org/10.5194/acp-25-441-2025>.
- Xu X, Li X, Zhang Y, 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, Liu Y, Cui G. 2020. Multiscale modeling of the atmospheric environment over a forest canopy. *Science China Earth Sciences*, 63, 875-890. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9525-6>
- Yao B, Wang Z, Fang Z, et al., 2024. Reconstruction of downburst wind fields using physics-informed neural network[J]. *J Wind Eng Ind Aerod*, 254: 105935.
- Young G, Kristovich D, Hjelmfelt M, 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.
- Yue C, Desheng C, Zaihua G, 2010. Research on the relationship of Doppler radar and the lightning warning[J]. *Meteor Environ Sci*, 1: 006.
- 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: 13763-13774.
- Zhang H, Wu S, Wang Q, et al., 2019. Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport[J]. *Infrared Phys Tech*, 96:113–122.
- Zhou B, Gao F, Wang L, et al., 2019. Robust and efficient quadrotor trajectory generation for fast autonomous flight[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 4:3529–3536.