

极端天气气候事件对无人机配送的影响

刁月¹ 周静芝^{2*} 朱雪瑜¹ 王雯语¹

1 重庆机电职业技术大学 2 肇庆学院

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17863

[摘要] 全球气候变化加剧导致极端天气事件频发,凸显无人机配送在应急场景的地理优势与其气象脆弱性间的矛盾。本研究通过综述气候变化风险、极端事件演变、无人机应急价值及现有研究进展,系统解析极端事件对无人机物流的多维影响。提出亟需构建气象-工程-物流跨学科框架,结合复合极端场景开发抗扰算法,将气候韧性深度融入无人物流体系。未来需聚焦动态风险预警与灾时协同调度机制,强化无人机在气候危机中的战略价值。

[关键词] 无人机配送; 低空物流; 极端天气; 协同算法

中图分类号: V19 **文献标识码:** A

Impact of Extreme Weather and Climate Events on Drone Delivery

Yue Diao¹ Ching-chih Chou^{2*} Xueyu Zhu¹ Wenyu Wang¹

1 Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics

2 Zhaoqing University

[Abstract] The increasing frequency of extreme weather events, exacerbated by global climate change, highlights the contradiction between the geographical advantages of drone delivery in emergency scenarios and its vulnerability to meteorological conditions. This study systematically analyzes the multidimensional impacts of extreme events on drone logistics by reviewing climate change risks, the evolution of extreme events, the value of drones in emergency response, and existing research progress. It proposes an urgent need to establish an interdisciplinary framework integrating meteorology, engineering, and logistics. This framework should involve developing robust algorithms for compound extreme weather scenarios and deeply embedding climate resilience into unmanned logistics systems. Future efforts should focus on dynamic risk early warning and disaster-time collaborative scheduling mechanisms to enhance the strategic value of drones in climate crises.

[Key words] drone delivery; low-altitude logistics; extreme weather; collaborative algorithm

引言

全球气候变化加剧导致极端天气气候事件(极端事件)频发,而无人机配送在灾害应急、医疗急救等场景中展现的地理穿透优势,与其在复杂气象条件下的技术脆弱性形成尖锐矛盾。本研究旨在分析极端事件对无人机配送的多维影响,将从气候变化风险、极端事件发展情况、无人机应急价值以及现有研究进展四个维度展开现状综述,为未来提升低空物流的气象适应性与运营可靠性提供思路,并丰富低空物流领域研究文献。

1 极端天气气候事件

1.1 气候变化风险

2018年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)把“气候变化”解释为:在时间推移下,无论是自然变化还是人类活动导致的任何气候状态的变化^[1]。这种变化一般会持续几十年甚至更久,可以使用统计检验来确定。

目前主要的气候变化风险包括全球气温上升、海平面上升、极端事件增加、冰川和永久冻土融化等^[2]。现有人类活动中,主要是排放温室气体造成了全球气候变暖。在过去100到150年之间,地球表面温度升高了1.1摄氏度。预计到2040年左右,全球平均表面升温将达或超过1.5摄氏度。一个世纪内平均海平面将出现持续上升幅度,平均降水也将增加。同时区域间、季节间变率增大,导致极端天气出现频率升高^[3]。

1.2 极端事件日渐频发

极端事件变化是IPCC的评估重点之一。2023年,IPCC发布的第六次评估报告(AR6),第一次单独设置章节(第11章),明确定义“复合事件”为两个及以上天气气候事件在时间上(同时或连续发生)或空间上(不同地点同时发生)的组合,其综合影响显著大于各单一事件影响的总和,并对极端事件(台风、暴雨、极热、极寒等),尤其是复合事件的发展进行较全面评估^[4]。报告系统

阐述了因全球变暖加剧,即使只是小幅升温,如0.5℃,以下三类复合事件的过去变化、归因及未来趋势。其关键结论如表1所示。

表1 AR6三类复合事件

复合事件	过去变化	未来趋势	归因	信度层级
热浪与干旱	1950年代以来持续增多	欧亚北部、欧洲、澳大利亚东南部、美国、印度、中国西北部等地强度和频率均增加	全球小幅度变暖	高
野火相关	欧洲南部、欧亚北部、美国和澳大利亚等地趋于频繁	发生概率显著增加	干旱和高温热浪加剧	中高
沿海与河口洪涝	部分沿海和河口地区复合洪涝事件增加	海岸带复合洪水事件频次和强度增加	海平面上升和强降水增多	高

表格数据由作者根据IPCC报告^[4]整理。

因此,积极推动碳中和与可持续发展,将全球温升控制在1.5℃之内,可以减少极端事件发生概率与强度。然而,即使如此,全球仍面临较现状而言前所未有的极端事件。除了积极采取减缓气候变暖的行动之外,为减轻极端事件变化带来的危害、增强社会韧性而提前制定并实施适应策略,也至关重要。

2 无人机配送与极端事件的关系

2.1 无人机配送在极端事件中的价值

极端事件导致传统物流受阻甚至完全瘫痪的情况下,无人机配送独具价值和潜力,成为重要的应急或补充解决方案。首先,无人机配送可以突破地面交通障碍。强降水或复合洪水事件(如风暴潮+极端降水)常常淹没道路、损毁桥梁,使地面车辆运输完全中断。无人机可以直飞受淹区域,将紧急医疗物资(药品、血液、疫苗)、小型应急食品包、通讯设备等送达被困人员或救援点。例如,在突发性山洪或城市内涝后,无人机可以快速响应,为孤立社区提供生命线。地震或强降水引发的山体滑坡会严重破坏甚至掩埋道路。无人机可以迅速勘察灾情,并绕过障碍物,将急救包、饮用水、临时庇护物资等精准投送到受灾点或救援人员手中,为生命救援赢得宝贵时间。暴雪或冻雨导致道路结冰、交通堵塞甚至瘫痪。无人机可以在相对较短的距离内(如城市内部、园区内),避开拥堵和危险路面,运送急需物品。

其次,无人机可应对局部高风险区域的物品配送,比如野火风险区、疫区或污染区。IPCC报告指出利于野火的复合天气事件(炎热、干燥、大风)将更频繁^[4]。在火势蔓延或高风险区域,地面人员进入极其危险。无人机可用于向消防前线投送小型补给(如对讲机电池、紧急药品、能量棒),进行火情侦察,甚至在安全区域运送撤离人员所需的小型应急物资。此外,在因极端天气(如洪水引发次生疫情)或其它原因导致的隔离区,无人机可以实现无接触配送,保障物资供应,同时降低人员暴露风险。

与传统物流相比,无人机配送对基础设施依赖较低,有快速响应与灵活部署的优势。相比需复杂基础设施和长时间准备的传统运输方式,无人机系统部署相对快速灵活。在灾害发生初期,大型救援通道尚未打通,无人机作为“先遣队”,提供小批量、高优先级的紧急物资投送服务。对于偏远地区(山区、海岛等),在恶劣天气导致常规补给路线中断时,无人机(尤其具备较强抗风能力的固定翼或垂直起降固定翼)或成为维持基本联系和物

资供应的关键手段。无人机配送对公路、铁路、桥梁等传统交通基础设施的依赖度较低,在基础设施因极端事件(如洪水冲毁桥梁、风暴破坏道路)而受损时,其运行能力受影响较小,只要起降点安全、通信链路可用,即可执行任务。

2.2 无人机配送在极端事件中的研究现状

虽然无人机在极端天气下的应用前景被关注,但一个研究盲点是,大量关于无人机物流的研究,往往默认或简化天气条件的影响,缺乏对复杂、剧烈且日益频繁的极端事件(特别是IPCC强调的复合事件)对无人机飞行安全、可靠性和效率带来的系统性、量化风险评估和应对方案研究。

首先是缺乏无人机物流受单一极端天气情境影响的研究,如强风、湍流,强降水、冰雹,极端高、低温等情境。现有研究多关注“平均风速”限制^[5-7],对突发的阵风、低空风切变、复杂地形(如城市峡谷、山区)产生的湍流对小型无人机的稳定性、控制精度和结构强度的破坏性影响研究不足。IPCC指出极端风暴可能增加^[4],这对无人机的抗风能力提出更高要求。现有研究多集中于“能否在雨中飞行”^[5],对高强度降水导致能见度急剧下降、传感器(光学相机、激光雷达)失效、机体结冰增重、电子设备受潮短路,以及冰雹对机体和旋翼的直接物理损伤等具体风险及其临界阈值缺乏细致评估。此外,高温不仅影响锂电池性能(续航缩短、起火风险增加),还会导致电机过热、电子元件可靠性下降、空气密度降低(影响升力)。IPCC强调热浪加剧^[4],但针对高温环境下无人机热管理系统的研究相对薄弱。而低温同样严重影响电池性能,并可能导致机体结冰、传感器(如空速管)结冰失效、起降场地湿滑等问题。相关应对措施(如除冰系统)会增加重量和能耗。

其次是严重忽视复合事件的叠加效应与放大风险对无人机物流的影响。这是当前研究的最大盲点。IPCC AR6首次系统评估并强调了复合事件的巨大危害^[4]。然而,无人机研究领域目前对此研究较少。第一是“高温+大风”复合,这正是利于野火的天气组合。高温降低空气密度(需更高转速产生升力),同时大风增加飞行阻力和能耗,两者叠加对电池续航和电机负载构成远超单一因素的严峻考验,并可能导致失控风险倍增。其次是“强降水+大风”复合。雨水本身降低能见度和传感器性能,大风则使雨滴或雪花以更高速度冲击机体和传感器,加剧设备损坏风险,并严重影响飞行稳定性。还有“高温+强太阳辐射”复合。在炎热晴朗天气下,强烈的太阳辐射可能导致地表附近产生热对流和湍流(“热泡”),对低空飞行的无人机造成颠簸甚至失控风险,同时也加剧了设备过热问题。沿海地区“风暴潮+强降水+大风”复合洪水事件,不仅造成地面物流瘫痪,其伴随的猛烈阵风、暴雨、低云、盐雾环境对无人机的导航(GPS信号可能受干扰)、通信、机体防腐、飞行安全构成全方位、高强度的威胁。

另外,现有研究缺乏在真实极端情境的数据下的系统性测试与验证。大部分无人机性能测试和算法验证在实验室或温和天气条件下进行^[6-7]。在真实、剧烈的极端天气(尤其是复合事件)下进行的飞行测试数据极其匮乏。这使得模型预测的可靠性

和安全边界设定缺乏坚实的实证基础。并且气象信息融入度低。虽然天气预报很重要,但现有无人机路径规划和风险管理系统在实时、高精度融合小尺度、突发性极端天气预警信息(如微下击暴流、局地强对流预警)方面能力不足。对于复合事件的精细化预报和快速影响评估更是挑战。

3 结论

极端事件的频率与强度持续攀升已对无人机配送构成系统性威胁,而当前对无人机配送系统的研究,缺少针对气候变量的考量。本文认为,亟需构建气象-工程-物流跨学科融合框架,结合复合极端场景开发抗扰算法,同时将气候韧性纳入无人物流体系。未来研究可聚焦动态风险预警系统开发与灾时低空物流协同调度机制,为无人机在气候危机下的战略价值释放提供理论支撑与实践范式。

[基金项目]

2024年重庆市职业教育教学改革研究项目编号Z2241384。

[参考文献]

[1] IPCC. Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R.(ed.)]. In: Global Warming of 1.5° C. [Masson-DeMotte, V., et al. (eds.)] [M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2018: 541-562.

[2] McClymont, H., & Hu, W. Weather variability and COVID-19 transmission: a review of recent research [J]. International journal of environmental research and public health, 2021, 18(2):

396.

[3] 周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. IPCC AR6报告解读: 未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.

[4] IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] [M]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023: 1-34.

[5] Touloumidis, D., Madas, M., Zeimpekis, V., & Ayfantopoulou, G. Weather-Related Disruptions in Transportation and Logistics: A Systematic Literature Review and a Policy Implementation Roadmap [J]. Logistics, 2025, 9(1): 32.

[6] 陈希琼, 王兴隆, 胡大伟. 考虑等待成本的卡车与多无人机联合配送农村物流路径优化 [J]. 运筹与管理, 2024, 33(8): 23.

[7] 镇璐, 高佳静, 谭哲一. 多卡车与多无人机协同配送路径优化问题研究 [J]. 管理科学学报, 2024, 27(7): 01.

作者简介:

刁月(1988--), 女, 汉族, 重庆永川人, 物流博士在读, 重庆机电职业技术学院副教授, 研究方向: 低空物流工程、应用行为分析。

*通讯作者:

周静芝(1976--), 女, 汉族, 台湾高雄人, 管理学博士, 肇庆学院副教授, 研究方向: 国际物流与供应链管理、可持续发展。