



李萌,王亦菲,潘家华. 低空经济的气候困局、风险演化与协同治理[J]. 中国人口·资源与环境,2026,36(2):99-111. [LI M,WANG Y F,PAN J H. Climate dilemmas, risk evolution, and collaborative governance of the low-altitude economy[J]. China population, resources and environment,2026,36(2):99-111.]

低空经济的气候困局、风险演化与协同治理

李萌^{1,2}, 王亦菲¹, 潘家华¹

(1. 中国社会科学院大学应用经济学院,北京 102488; 2. 中国社会科学院生态文明研究所,北京 100028)

摘要 在全球气候变化与低碳经济转型的大背景下,低空经济作为融合先进制造、智慧交通与数字治理等的新兴经济形态,正面临着前所未有的气候风险挑战。该研究基于复杂系统理论,构建低空经济气候风险分析框架,通过系统解构低空经济核心子系统——装备制造、基础设施、运行保障、应用场景与政策监管,剖析其内部子系统的互动机制以及与社会、环境系统的交互关系,深入剖析气候风险的演化机制与协同治理路径。研究发现:①低空经济系统因其垂直暴露性、能源依赖性及生态交互性,对气候变化的敏感性显著高于传统经济系统。②气候变化对低空经济的影响通过直接物理影响和间接系统干预两条路径传导,其风险呈现出短期突发性、中期系统性和长期结构性的动态演化特征。短期内,极端天气导致服务链断裂—供应链中断—公共安全事件激增;中期内,适航区域缩减引发产业链联动失效、基础设施老化加速与政策工具失灵;长期内,则因经济带迁移形成技术代际断层与制度僵化。为应对这些风险,该研究提出以“适应性-协同性-韧性”为核心的三螺旋动态协同治理框架。该框架强调:通过动态调整与技术赋能加强系统气候适应性治理;借助多元主体联动与制度创新促进系统协同治理;依托应急管理与风险防范提升低空经济系统韧性。研究旨在为低空经济系统性防控气候风险及其可持续发展提供理论支撑与实践参考。

关键词 低空经济;气候风险;传导机理;动态演化;协同治理

中图分类号 F562;P467 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2026)02-0099-13 DOI:10.12062/cpre.20251035

低空经济是以低空空域为核心载体,融合低空装备制造、基础设施、运行保障、应用场景与政策监管五大子系统,通过无人机、电动垂直起降飞行器(eVTOL)等装备,实现物流运输、应急救援、城市交通等多元服务的新兴经济形态^[1],其本质是“垂直空间资源的产业化开发”。当前,这一形态正借助技术突破与政策支持快速发展^[2]:无人机、eVTOL、低空物流等技术推动应用场景从物流运输、应急救援扩展至农业植保、城市交通、生态监测^[3-7];生成式AI与北斗导航、5G的融合,如华为“盘古”大模型优化飞行路径,进一步提升了设备自主性^[8]。从规模看,中国民航局数据显示,到2030年中国低空市场规模将突破2万亿元,无人机物流、城市空中交通、低空遥感监测等场景正在成为主要经济增长极。从地域布局及实践落地看,三大集群呈现差异化发展:长三角集群(上海、杭州、南京)聚焦无人机研发与高端制造,贡献全国低空装备产值的45%;粤港澳大湾区(深圳、广州、珠海)以低空物流和城市空中交通为特色,应用场景占比超30%,其中顺丰

丰翼物流无人机实现常态化运营,日均起降800~2000架次,运输单量超1.2万票;成渝经济圈(成都、重庆)侧重山地应急救援与工业巡检^①。此外,美团无人机获配送试运行许可,截至2024年12月已在多城开通53条航线,累计完成订单超40万单,成为跨区域低空物流的典型实践。

然而,在全球气候变化加剧的背景下,低空经济的“垂直空间属性”使其面临独特且严峻的气候风险挑战。与高空航空依赖平流层(气象条件稳定)不同,低空经济核心运营空域集中于大气对流层中下部,该区域云、雨、风、雷暴等气象活动最为活跃,温度湿度波动、风速变化、极端天气(如台风、暴雨、热浪)可直接作用于飞行器性能、基础设施安全和服务连续性^[9]。例如,低温会导致无人机锂电池续航骤降30%以上,强风会破坏起降场设施,极端暴雨会中断低空物流运输^[10]。依据复杂系统理论,低空经济作为“空-地-信”联动的复杂系统,外部气候环境变化会通过物质、能量、信息交换等方式影响系统运

收稿日期:2025-07-31 修回日期:2025-11-06

作者简介:李萌,博士,研究员,主要研究方向为低空经济、气候变化经济学。E-mail:ccnuli@163.com。

基金项目:中国社会科学院生态文明研究所重点项目“碳中和的经济分析与政策研究”(批准号:STWM-ZS-2021-001)。

①数据来源:中国信息协会低空经济分会《低空经济发展报告(2024—2025)》、工业和信息化部。

行,且这种影响因系统内子系统的高度耦合性,易呈现“一子系统失效→多子系统连锁崩溃”的非线性特征,这种风险远超传统经济系统,但现有相关研究明显不足,实践中也未形成有效的应对框架。

鉴于此,本研究基于复杂系统理论,旨在突破传统单一视角的局限:一方面,通过系统性解构低空经济系统的交互机理及气候敏感性,理清气候变化对低空经济影响的传导机制,剖析从短期突发性风险、中期系统性风险到长期结构性风险的动态演化路径;另一方面,针对现有治理短板,构建“适应性-协同性-韧性”三位一体的治理模型。研究的创新点在于:将复杂系统理论贯穿研究全程,结合地理学“垂直空间治理”、社会学“垂直不平等”等跨学科理论,全面考量低空经济系统各要素及与外部系统的交互关系;在治理框架构建上,突破传统航空管理模式的局限,融入气候适应视角,整合多元主体力量,创新治理工具,同时引入系统自稳、技术替代等负反馈机制,增强推演的客观性,为低空经济气候风险治理提供全新思路与方法。

1 低空经济系统的解构与系统内外交互作用机理

复杂系统理论强调系统的整体性、开放性和动态性,这为深入研究低空经济系统提供了有力的理论工具。结合地理学“垂直空间治理”理论对低空资源属性的界定、社会学“垂直不平等”理论对系统交互差异的解读,全面解构低空经济内部系统的构成与运行逻辑,剖析其与社会、环境系统的多维交互关系,对于理解低空经济气候风险的形成机制至关重要,也能为后续气候风险分析搭建起系统性框架。

1.1 低空经济系统的解构

从复杂系统理论与地理学“垂直空间治理”理论的交叉视角来看,低空经济本质上是一个“垂直空间资源产业化”的有机整体,五大内部子系统相互交织、协同演化。通过对其内在运行机理、产业要素构成及功能实现路径的深度解构,本研究将低空经济体系凝练为五大核心子系统:低空装备制造子系统以飞行器研发制造为核心,构筑产业发展的根基;低空基础设施子系统依托空域管理网络与起降设施建设,搭建产业运行的物理载体;低空运行保障子系统通过空管服务与数据平台的有机集成,筑牢安全运行防线;低空应用子系统覆盖物流运输、应急救援等多元场景,释放产业价值潜能;政策监管子系统贯穿全产业链条,提供制度性保障支撑。这五大子系统通过技术流、数据流、政策流的深度耦合,共同构成低空经济立体化发展架构,充分彰显系统的整体性

与协同性特征。

(1)从产业基础层面来看,以飞行器研发制造为核心的低空装备制造子系统成为产业基石。飞行器作为实现低空活动的物理载体,其性能水平与技术成熟度直接决定了低空经济的可行性与发展高度。该子系统涵盖无人机、电动垂直起降飞行器(eVTOL)等航空器的设计、制造与迭代,贯穿“材料—动力—航电—测试”全产业链环节。例如,物流无人机续航与载重能力的提升,依赖于电池能量密度与机体轻量化材料的突破。因此,将装备制造作为独立子系统,旨在强调其作为技术物化载体与产业供给基础的核心地位。

(2)从运行载体角度出发,以空域管理网络和起降设施为代表的低空基础设施子系统至关重要,这也是“垂直空间治理”理论的核心应用场景。该子系统构建了“空—地—信”三位一体的设施体系:空中层包括低空航路网络与飞行服务站,解决“飞在哪里”的空域资源问题;地面层涵盖起降场、能源补给站与维修基地,提供飞行器起降与持续运行的地面保障;信息层则包括低空通信网络与高精度导航增强系统,构成飞行器可联、可导的“神经网络”。基础设施子系统不直接参与飞行管理,而是为飞行活动与运行服务提供不可或缺的物理平台。

(3)从安全保障与运行效率提升方面考虑,集成空管服务与数据平台的低空运行保障子系统不可或缺。该子系统是低空经济的运行中枢,负责飞行活动的全过程监控与动态调度。其核心功能包括:飞行器适航审定、空域动态划分与释放、飞行冲突预警与消解,以及突发事件应急响应。它不直接提供通信导航信号(由基础设施承担),而是基于这些设施和数据,执行空中交通管理、空域资源分配与安全策略实施,确保系统有序高效运行。

(4)从价值创造与市场应用维度分析,涵盖物流运输、应急救援等多元场景的低空应用子系统是低空经济价值的直接体现。该子系统通过“低空+”模式,将飞行能力转化为具体的经济与社会服务,如物流配送、农林植保、应急救援与空中游览等。它是低空经济与社会需求的接口,直接创造市场价值并反哺产业生态。应用子系统不涉及飞行器的制造(装备子系统)或运行指挥(运行保障子系统),而是基于前几个子系统提供的装备与服务,在具体的垂直领域实现功能输出与价值兑现。

(5)从制度保障与规范引导层面来看,贯穿全链条的政策监管子系统是低空经济健康、有序发展的制度基石。在复杂的低空经济系统中,需要明确的法律法规、标准体系及治理机制来平衡安全与发展的关系。政策监管子系统的核心功能在于建立并维护行业通用的法律法规、技

术标准与行为规范^①。例如,为装备制造设定准入门槛,为基础设施建设提供规划标准,为运行保障明确职责权限,为应用场景划定合规边界等。同时,根据各子系统的实践反馈,及时调整政策,平衡安全与发展的关系,促进各子系统之间的兼容性和协同发展。

需要指出的是,鉴于当前低空经济正处于系统建构的初期,本研究所界定的低空经济系统属于五大核心子系统的狭义范畴,共同构成“装备制造—设施支撑—运行保障—场景赋能—制度监管”的完整内部闭环,不包含外部环境、社会环境、通用政策等要素。随着产业生态与社会经济环境的持续互动演进,未来低空经济系统的边界将不断拓展,内部子系统的协同深度也将进一步提升,呈现出更为丰富的内涵与外延。

1.2 低空经济系统内部的交互耦合机理

复杂系统理论中的协同进化观点认为,系统内各子系统之间通过相互作用、相互影响,实现共同发展和进化。低空经济内部五大子系统正是通过技术渗透、资源流动与政策反馈形成多维交互网络,它们之间的相互作用本质上是“技术创新—场景落地—制度适配”的协同进化过程。在这个不断进化的过程中,各子系统之间通过物质、能量与信息的交换,形成了更为复杂的相互作用网络。例如,装备制造与基础设施的技术进步突破低空经济的供给边界,应用子系统的市场实践暴露能力短板并催生新需求(如高气候风险区对耐候型装备的需求),运行保障子系统通过流程优化填补运行漏洞,政策监管子系统以制度创新破除体制机制障碍(如调整空域划分规则适应气候风险)。这种多向互动既需要技术标准的统

一,也依赖政策工具的跨领域协同,最终形成系统合力,推动低空经济从理论架构向现实生产力转化。五大核心子系统的交互耦合作用如图1所示。

政策监管子系统通过法规制定、资源配置和风险控制等方式,引导和规范低空经济产业链的发展路径,协调各子系统的运行。政策制度为装备制造设定技术门槛、为基础设施明确建设标准、为运行保障提供执法依据、为应用场景划定合规边界。同时,各子系统的实践反馈,如新兴应用的监管空白、装备研发的共性技术瓶颈等,也推动了政策动态调整更新,体现了子系统之间的交互影响和反馈机制。

装备制造子系统、基础设施子系统和运行保障子系统作为低空经济系统产业链的供给侧,通过多层次交互形成了动态平衡机制。低空装备制造子系统作为基础载体,通过技术创新与产品迭代为基础设施子系统和运行保障子系统提供硬件支撑,其技术溢出效应亦推动基础设施子系统和运行保障子系统的智能化升级,如低空互联网对飞行器数据交互的支撑。低空基础设施子系统具有强外部性,其空域规划,如起降场布局、通信网络覆盖等为装备制造提供了研发方向,推动航空器向小型化、适地化迭代。同时,基础设施建设需统筹起降场用地规划等“硬基建”与低空航路数据共享等“软基建”,既依赖运行保障子系统的运营维护能力,又与运行保障子系统协同优化资源配置,避免重复建设与资源浪费。低空运行保障子系统则通过空域管理、运行监控等功能与装备制造、基础设施子系统形成技术对接,保障了它们的安全运行。

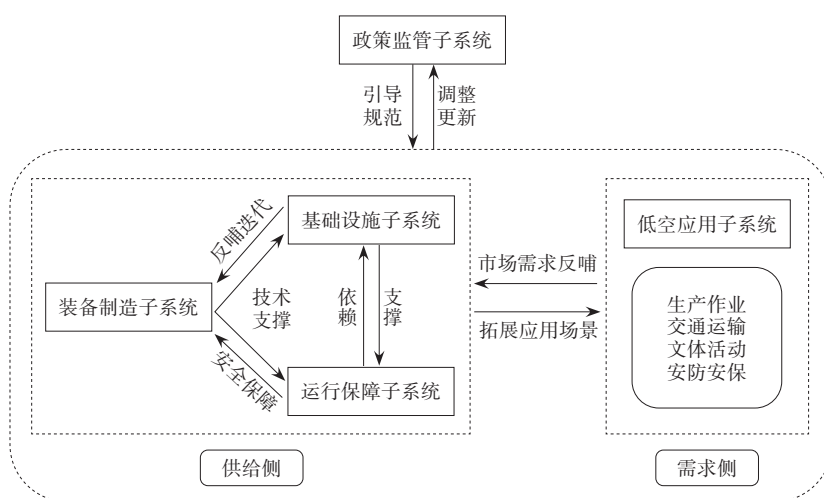


图1 低空经济系统内部五大核心子系统的交互耦合作用

^①这里的政策主要是指低空经济专属规则、标准等,与外部通用政策系统相区分,如碳交易、通用环保法等属于外部政策,不纳入低空经济内部系统。

低空应用子系统作为市场价值的最终承载端,具有高度动态性与网络效应,其多元化场景产生对装备性能、基础设施布局和服务保障体系的具体需求,驱动装备制造子系统定向研发、基础设施子系统和运行保障子系统针对性建设。同时,装备、基础设施与运行保障的进步拓展应用场景边界,形成“需求牵引—供给创新—场景拓展”的螺旋上升模式,充分展示了内部各子系统之间耦合与协同进化的动态过程。

1.3 低空经济系统与外部的社会、环境系统的交互作用

本研究以是否直接参与“垂直空间资源产业化”内部闭环为划分依据,进一步明晰低空经济系统的边界。低空经济的内部系统为闭环内的五大子系统(装备制造、基础设施、运行保障、应用场景、政策监管);外部系统则为除闭环外,不参与内部闭环,仅通过“物质、能量、信息输入”对内部系统施加约束或输入的外部体系,具体分为两大类——外部环境系统(温度、极端天气等自然要素)与外部社会系统(市场需求、社会争议等社会要素)。在与外部环境、社会系统的持续互动中,低空经济系统逐步形成了其独特的生态位,而这种高度开放的联动特征,为气候风险的产生与传导创造了条件(图2)。

作为技术革命与城市发展的新兴交汇点,低空经济系统正以无人机、城市空中交通、低空物流等业态为载体,深度嵌入社会与自然环境,呈现出高度开放的联动特征。该系统在快速扩张过程中,不仅重构了传统产业形态与城市空间逻辑,也引发了关乎资源优化配置与生态可持续发展的多重挑战。

1.3.1 从外部环境系统维度分析

依据复杂系统理论中“环境对系统的制约作用”原理,环境系统以生态阈值、资源禀赋和气候条件构成刚性约束,倒逼低空经济技术创新与模式转型。同时,低空经济凭借技术优势对环境系统形成反向服务能力,推动“发展—保护”协同演进,呈现“约束倒逼”与“反向赋能”双向作用机制。

(1)在约束层面,自然生态的脆弱性限定空间布局,如候鸟迁徙通道、自然保护区核心区等需划设永久性禁飞区,避免飞行器干扰生物栖息地;资源环境成本倒逼能源转型,低空飞行器需符合碳排放标准与噪声污染阈值,传统燃油航空器因高碳排放正加速向电动化转型;气候条件限制推动装备技术迭代,如无人机采用防水密封技术确保中雨环境下安全起降,宽温域电池解决高低温续航衰减问题,而这种技术迭代本质上是对气候条件潜在影响的适应性回应。

(2)在赋能层面,低空经济对环境系统形成独特反哺:一方面,整合卫星遥感、无人机空巡与地面传感数据,构建“空-天-地”三位一体的环境监测网络——相较于卫星米级空间分辨率、数天时间分辨率,低空设备可实现厘米级空间精度,实时动态监测、精准捕捉微尺度生态变化;另一方面,将灾害响应从“事后处置”升级为“事前预防—事中控制”,如台风前通过无人机排查地质隐患,灾后利用无人机搭建临时通信链路、投送应急物资。

需注意的是,环境系统的扰动也会对低空经济产生直接冲击,如极端暴雨导致飞行器电池短路,强风破坏起降场设施,地震、山体滑坡等灾害可能中断应急救援物资

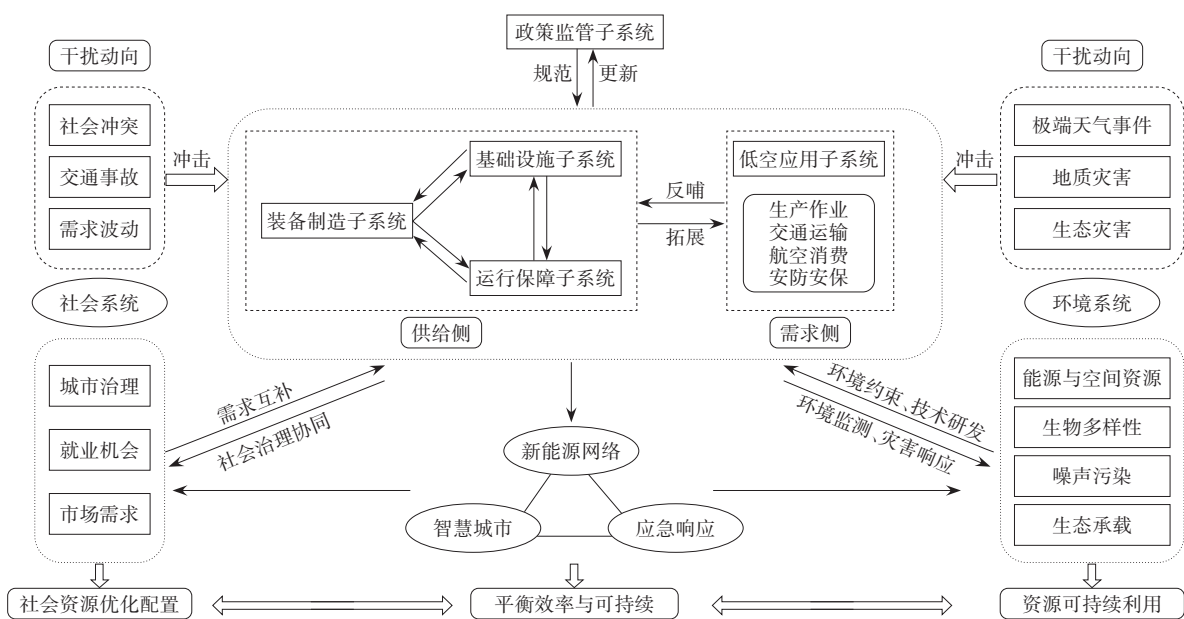


图2 低空经济系统与外部的社会、环境等系统的交互作用分析框架

投送,这种“约束-赋能-冲击”的双向耦合,构成两者交互的核心逻辑,而气候要素作为环境系统中最具动态性和不确定性的变量,是触发此类冲击的核心诱因,这也为后续对气候风险传导机制的分析提供了逻辑前提。

1.3.2 从外部社会系统维度分析

基于复杂系统理论中“系统间相互作用”的原理,低空经济系统通过技术创新与产业融合,成为驱动社会经济增长的重要引擎,这体现了系统之间的正向促进作用。低空经济通过提供高效、灵活的运输服务,可以填补传统交通系统的空白,满足社会对速度、安全性和可达性的新需求,如疫情期间利用无人机配送药品和物资,地震灾区依托无人机建立“空中生命线”,将救灾物资投送时间大幅压缩。同时,无人机植保、低空物流等业态催生了新型职业集群,引领了区域产业链升级,提升了公共服务效率,推动了社会资源分配的精准化,也丰富了城市文化体验。无人机灯光秀、低空观光等新业态的出现还催生了跨界文化形态。

然而,社会系统中也存在一些扰动对低空经济发展产生冲击,如频繁的飞行噪声可能引发社区抗议、非法航拍等技术滥用带来隐私侵犯等问题加剧了社会争议,这反映了系统之间的负向影响。这种正、负向的影响相互交织,体现了低空经济系统与社会系统交互的复杂性,而气候风险引发的服务波动、成本上升等问题,可能进一步放大此类交互中的矛盾与冲突,间接影响低空经济的稳定运行。

另外,低空经济系统作为节点系统,连接智慧城市、新能源网络、应急管理,成为跨领域协同的纽带,驱动相关系统在可持续发展的同时不断实现社会资源优化配置,这一跨系统联动特征也为气候风险的跨领域传导提供了潜在通道,进一步凸显了后续风险治理的复杂性与必要性。

2 低空经济的气候风险及其演化机制

基于前文对低空经济内外部系统交互逻辑的剖析,本节进一步结合复杂系统理论,深入解构气候变化背景下,低空经济的气候敏感性、气候变化影响传导机制及风险从短期突发到长期固化的演化路径,为后续治理框架

构建提供依据。

2.1 低空经济系统的气候敏感性

低空经济系统的运行高度和物理属性使其与自然生态系统的交互更为直接,其气候敏感性显著区别于农业、能源、制造业等传统经济系统。依据复杂系统理论中系统与环境相互作用的原理,低空经济系统对外部环境系统中气候要素的变化有着独特的响应方式,见表1。

从空间暴露性来看,低空经济系统垂直空间直接暴露于气象条件下,局部易受扰动。其运行设备如无人机等飞行器直接处于复杂的气象环境中,对风速、降水、温度等参数的敏感性极高,强风或极端降水都可能导致作业中断,直接影响经济产出效率。相比之下,传统经济系统以水平空间分布为主,依赖广域缓冲,局部气象灾害可通过库存调配或替代供应缓解。此外,低空设备的运行可能改变局部微气候环境,加剧城市热岛效应;而公路、港口等传统基础设施虽受海平面上升等长期威胁,但其气候影响的时空滞后性更强,修复缓冲周期也更长。这种空间暴露性的差异,决定了低空经济对短期气象波动的响应更为直接且剧烈。

值得注意的是,低空经济系统与地表生态系统的垂直整合性正在进一步放大其气候敏感性。例如,农业无人机喷洒农药的药效受温度、湿度实时影响,环境监测设备的光学传感器易受雾霾或沙尘干扰,这些活动与生态参数的耦合程度远超常规农业或工业监测。再如,低空设备的物理侵入性(如噪声、电磁辐射等)可能直接干扰鸟类迁徙等生态行为,气候变暖导致的物种分布变化会加剧此类冲突。反观传统经济系统,其生态反馈更具间接性与累积性,如制造业碳排放通过温室效应逐步影响全球气候,其作用链条长且空间分散;低空经济则可能因局部扰动触发非线性生态响应,这种即时性反馈使其气候风险管理需更精细的时空尺度调控。

从经济系统能源基石的脆弱性来看,低空经济的气候敏感性更为突出。一方面,其依赖的电池技术在极端温度下性能骤降,充电设施易受气候破坏,且“实时运行”特性使其难以匹配传统电网的强韧调峰能力,凸显了能源供应弹性上的固有挑战。另一方面,大规模无人机集群通过智能化调度,使其在电网谷期充电、峰期运行,不

表1 低空经济系统与传统经济系统气候敏感性对比

| 维度 | 低空经济系统 | 传统经济系统 |
|--------|-------------------------------------|------------------------|
| 空间暴露性 | 垂直空间直接暴露于外部环境系统的气象条件(如强风、暴雨),局部易受扰动 | 以水平空间分布为主,依赖广域缓冲 |
| 生态交互模式 | 与外部环境系统的地表生态系统垂直交互(如无人机干扰候鸟迁徙等) | 与生态系统水平交互 |
| 能源脆弱性 | 依赖电池技术,气温敏感;充电设施易受极端天气破坏 | 能源组合多元化(火电、风电等),调峰能力较强 |
| 时间敏感性 | 实时响应(外部环境系统的小时/分钟级气象波动决定运营) | 长期适应(年际气候变化主导风险) |

仅能降低运营成本,也具备为电网“削峰填谷”的潜力。然而,实现此潜力受制于基础设施、调度协议与经济性等现实约束,其最终表现取决于技术迭代与系统协同的水平,凸显了其在技术弹性上的独特挑战。

进一步从具象化的时间维度分析,低空经济的气候敏感性集中于小时至日际尺度的气象波动。无人物流需根据实时天气调整航线,强对流天气可能导致分钟级运营中断;而传统经济系统更关注季度至年际尺度的气候变化,如干旱对作物产量的影响或碳价政策对能源结构的长期影响。这种时间敏感性差异要求政策工具分化,低空经济需强化气象预警与动态调度系统的协同。

2.2 气候变化对低空经济影响的传导机制

基于前文对系统边界的界定(即以五大子系统构成的“垂直空间资源产业化”内部闭环为界),气候变化对低空经济产生的影响,本质是外部气候扰动通过系统边界,与内部系统结构产生交叉作用的过程^①。其传导机制可据此清晰地划分为直接物理影响与间接系统影响两条路径:前者是外部环境系统(气候要素)直接作用于内部子系统;后者则是通过改变外部变量间接干预内部系统运行(图3)。

2.2.1 直接物理影响(外部环境对内部系统的直接作用路径)

该路径是外部环境系统与内部系统“垂直无缓冲”交互的直接体现,指外部环境系统的气象要素(温度、风速、极端天气等)直接作用于内部核心系统和内部子系统,引发技术、设施、服务的非线性连锁反应。这正是复杂系统“要素耦合性”的典型体现。

气候变化对低空装备的物理性能构成了基础性冲击。动力电池作为电动飞行器的关键部件,在高温(40℃以上)环境下电池容量衰减速率加快3倍,低温(-10℃以下)环境下电池续航能力骤降40%,湿热与冻融循环环境下复合材料机身寿命缩短至设计值的60%。同时,复合材料在湿热环境下会因吸湿膨胀,在冻融循环的机械应力作用下,设备使用寿命大幅缩短。这些变化直接削弱了装备的可靠性,进而抬高了适航认证标准,使企业面临“技术-监管”的双重压力。这一系列因果关系表明,气候变化的微小波动,经过低空产业链内部的物理和化学过程,被放大为影响整个产业发展的关键因素。

低空运行网络同样面临着气候变化的渐进侵蚀与突发破坏双重威胁。在沿海地区,海平面上升使垂直起降场的设计防洪标准加速淘汰,维护成本呈指数级增长。在极端天气下,跑道会因强降雨而积水,降低摩擦系数,长期的结构性损伤累积将使突发失效概率提升至20%以上。电离层扰动对低轨卫星导航信号的干扰也不容小觑,定位误差从米级扩大至百米级,严重挑战超视距飞行的安全边界,均是气候通过物理过程直接影响低空经济系统的具象表现。

气象变化还直接限定了低空经济服务的时空边界。例如,能见度下降会降低目视飞行规则的适用性,使物流无人机的日均有效作业时长系统性压缩;风速变异率增大则迫使城市空中交通扩大安全冗余,降低调度密度。极端天气事件频发更是加剧了场景的不稳定性,飓风、雷暴等天气会直接中断低空作业;野火等衍生灾害虽然催生了应急巡检需求,但由于其突发性与不可预测性,相关

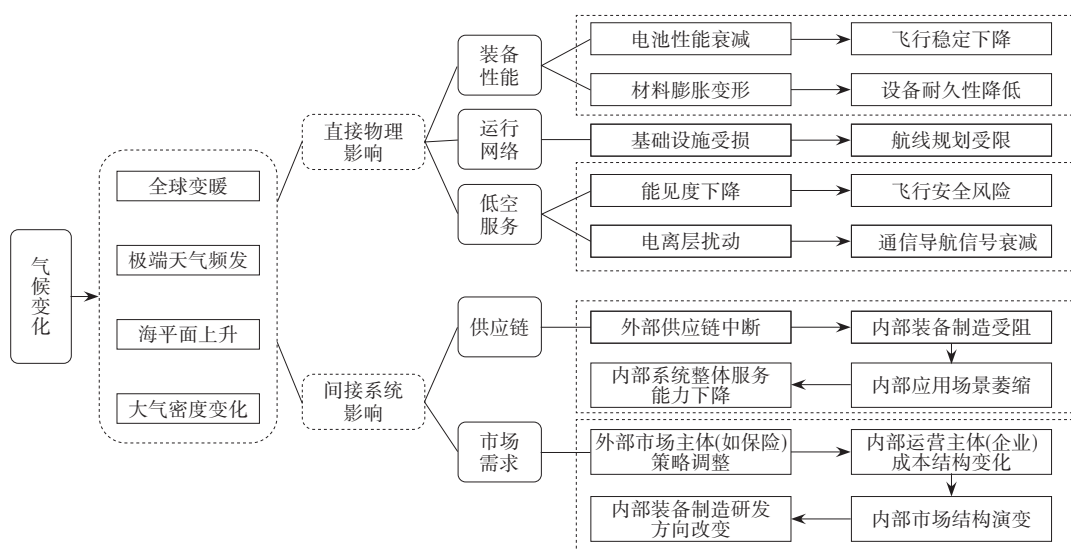


图3 气候变化对低空经济影响的传导机制

^①内部系统是风险传导的承载主体,外部系统尤其是外部环境系统是气候风险的源头。

商业模式难以持续,直接影响低空经济系统的正常运行与系统整体效益。

2.2.2 间接系统干预(外部系统对内部系统的间接作用路径)

该路径的核心逻辑是气候变化先作用于外部环境或社会系统,再通过中介变量间接传导至低空经济内部,外部系统不直接参与内部子系统职能,仅通过“变量输入”引导内部调整。

(1)供应链扰动。气候变化通过冲击外部社会系统的供应链网络,间接传导至低空经济内部^①。例如,当极端气候事件(如洪涝、飓风等)发生时,首先冲击外部社会系统,造成特定区域的零部件工厂因灾害停产,或运输线路因天气中断,进而导致零部件供应中断。随后,这一外部扰动通过“采购-生产”链路传导至内部,造成装备制造子系统因核心部件断供而陷入产能停滞,应用场景子系统因运营机队无法补充或维修导致服务能力萎缩,最终引发全系统波动。从地理维度看,高气候风险区域的低空服务供给会因供应链中断而系统性萎缩,产业资源向气候稳定区聚集,又将进一步加剧区域发展不平衡^[11]。

(2)市场需求异变。气候变化通过重塑外部社会系统的市场主体预期,间接驱动内部系统调整。例如,气候变化引起的极端天气频发,使外部社会系统中的市场主体(保险公司、投资者、消费者)风险预期改变,造成保险公司上调低空运营保费以覆盖赔付成本,投资者收紧对低空经济领域的投资,消费者更倾向于选择气候适应性更强的低空服务。这些市场信号作为外部输入进入内部,造成中小运营商因保费激增、融资困难被迫退出市场,推动市场结构向头部企业集中;而市场结构变化又反向推动装备制造子系统聚焦高端耐候机型研发,形成“气候风险→市场预期→市场结构→技术路径”的连锁反馈效应。

需强调的是,气候风险的传导并非简单的线性叠加,而是通过内部子系统之间的交互形成放大或衰减效应,外部系统仅提供初始扰动,不直接参与风险传导过程。例如,基础设施维护成本上升会推高运营费率,间接抑制应用场景的拓展,而应用需求的萎缩又影响装备制造的规模经济,形成负反馈循环。同时,内部系统存在的负反馈机制(如技术替代、制度学习、市场调节等)可抑制风险扩散。一是技术替代效应。当高温导致锂电池续航衰减时,氢燃料电池技术的快速迭代可替代锂电池,降低能源脆弱性,如2024年深圳某物流企业用氢燃料电池无人机,在35℃以上环境下续航提升40%。二是制度学习效应。

政策部门通过建立“气候风险动态数据库”,将历史上因极端天气导致的政策失灵案例转化为标准,可减少政策滞后带来的系统冲击。三是市场调节效应。高气候风险区域的低空服务供给萎缩后,保险企业推出“气候指数保险”,通过保费差异化分散风险,避免中小运营商集中退出,缓解供应链断裂压力。这些负反馈机制与风险放大机制的博弈,决定了低空经济气候风险演化的最终路径。

2.3 低空经济气候风险的动态演化路径

结合低空经济内外部系统交互逻辑与传导机制,气候风险的演化并非线性叠加,而是在“放大效应与负反馈机制的博弈”中,呈现“短期突发性-中期系统性-长期结构性”的阶梯式跃迁特征。短期风险通常发生于小时至1年之间,具有突发性、剧烈性与局部性的特征,主要来自极端气候事件对运行设备与服务链的直接冲击;中期风险发生于季度至3年之间,表现为系统性失效与结构耦合失衡,往往由治理滞后与产业链断裂叠加引发;长期风险则指向3年以上的结构性隐患,如路径依赖、制度僵化与韧性分化。需要指出的是,短期突发性、中期系统性与长期结构性这3类风险在时间维度上并非截然割裂,而是常常并存并相互交织。但在不同阶段,其表现形态、影响范围和主导地位不同,并存在演化关系。各阶段风险既来自前序交互与传导的累积,又存在独特的演化逻辑。

2.3.1 短期内风险的传导与影响(小时至1年)

短期风险以直接物理影响为主、间接系统干预为辅,是极端气候事件对低空经济系统的即时冲击。在强对流天气、雷暴、突发风暴等短期气候事件冲击下,低空经济系统暴露出三大薄弱环节:技术脆弱性(如飞行器在极端温湿环境中失效)、供应链刚性(零部件高度依赖单一区域),以及应急能力缺口(如飞行调度响应延迟、缺乏备用航线规划)。这些弱点共同构成风险传导的核心中介机制(图4),成为气候冲击由外部扰动转化为系统性暴露的关键通道。

在企业运营层面,强风、雷电、暴雨等突发性气象灾害直接威胁低空飞行器的运营。例如,低空物流企业的无人机群在雷暴天气中集体停飞,可能导致生鲜配送订单大规模违约,企业将不仅遭受直接收入损失,还需承担高额违约金,被迫增加备件库存与维修频次。再如,低空旅游公司的飞行器因高温致使电池过热,航班被迫取消,可能带来客户退款与口碑下滑的双重打击。这种情况下,即时服务链断裂,设备损耗加速,赔付成本激增,给企业带来巨大的短期压力。

^①这里需要明确的是,低空经济的装备制造子系统聚焦飞行器及核心部件的设计、制造,但其生产所需的专用芯片、高能量密度电池等精密零部件,并非全部由装备制造子系统自主生产,而是依赖外部社会系统的产业分工网络(即供应链)提供——这部分零部件的生产工厂、跨区域运输线路,均属于外部社会系统范畴,而非低空经济内部闭环。

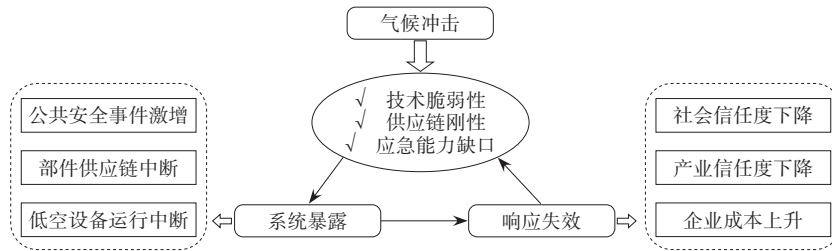


图4 低空经济气候风险短期反馈机制

在产业生态层面,部件供应链因极端天气短暂中断,加之气象部门、设备制造商与运营企业之间缺乏实时数据共享机制和应急协同机制,产业链上下游各自为战,进一步延长了供应链中断的时间,导致社会信任度下降。以低空物流为例,部件供应问题使无人机等运输设备无法正常组装和维护,物流配送服务瘫痪,不仅可能诱发上下游企业之间相互指责、推诿责任,而且严重干扰产业生态的正常运转。

在社会治理层面,短期内极端天气事件频繁导致公共安全事件激增,政府应急管理机制迅速超载,应急资源被大量消耗。现有应急管理体系多基于历史气候数据设计,难以应对气候变化带来的新型风险场景,导致社会信任度下降,民众对政府的应急响应能力产生质疑,进而对社会稳定构成潜在威胁。这一阶段的风险管理往往是被动防御,缺乏系统性,也为中期风险的累积埋下了隐患。

需特别注意的是,短期突发性风险并非孤立存在,其向中期系统性风险转化的关键触发点在于“局部冲击是否突破系统缓冲能力”。当极端天气导致企业集中退出(如某细分领域超半数中小运营商因设备损耗、赔付成本等退出),或基础设施因气候损伤的维护成本剧增(如年度维护开支占企业营收比例显著超出行业平均盈利水

平)时,单个企业的设备停摆、局部供应链中断将演变为产业链联动失效,将推动风险从“短期突发”转向“中期系统”。巴西国家气象研究所(Instituto Nacional de Meteorologia, INMET)统计,2024年巴西因干旱导致农业无人机企业大量退出,直接引发农药喷洒供应链断裂,倒逼适航区域缩减,正是短期风险向中期风险转化的标志性案例。

2.3.2 中期阶段系统性风险的累积(季度至3年)

中期风险是直接物理影响长期化与间接系统干预深度化的耦合结果,以系统性失效与结构耦合失衡为核心特征。随着气候环境持续恶化,极端天气频率和强度上升,适航区域呈现出缩减的趋势,低空经济系统开始显现出以基础设施老化、技术路径锁定与政策适应失调为核心特征的系统性风险积累(图5)。此阶段,风险不再仅表现为设备停摆或任务中断的偶发事件,而是逐步演化为跨子系统耦合失灵、产业协同断裂与制度工具钝化的深层困境。

在企业运营层面,核心挑战从设备停摆转向基础设施老化加速。极端天气常态化显著缩短低空设备使用寿命,物流企业无人机电机故障率在极端天气下比普通设备高30%左右,维护成本成倍增加。适航区域调整导致一些边缘位置的基础设施使用频率增加,加速损耗,企业被迫将更多资金向维修倾斜,减少技术升级,行业竞争格

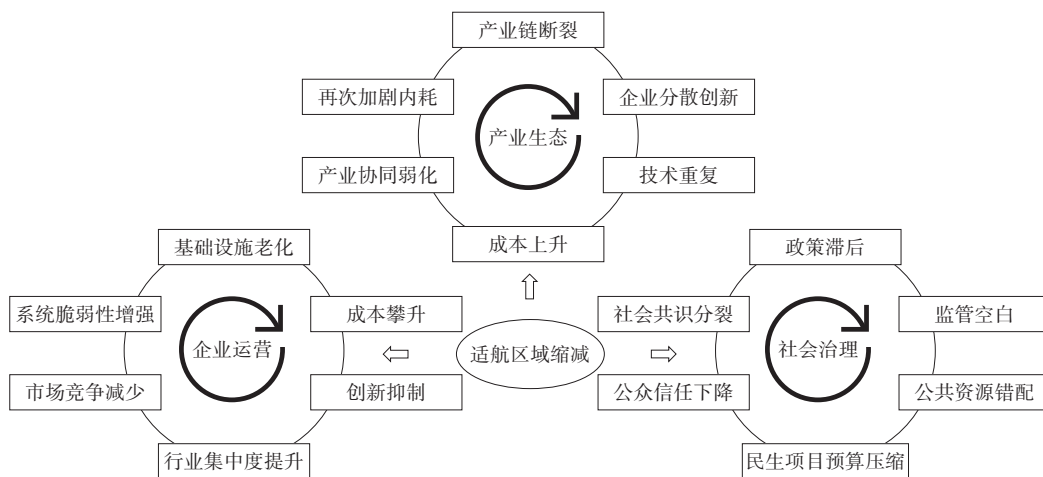


图5 低空经济气候风险中期反馈回路

局重构,大型企业通过垂直整合巩固市场地位,中小企业因资金与技术短板,被迫退出高成本细分领域,转向低附加值业务,创新活力受抑。

在产业生态层面,风险焦点从供应链断裂转向产业链联动失效与技术路线竞争内耗。适航区域缩减改变了低空经济产业的地理布局,依赖特定区域的企业需重新选址,导致产业链上下游合作断裂;企业探索新技术路径时缺乏行业协调,重复研发造成资源浪费,产业规模效应衰减,整体竞争力严重削弱。《中国低空经济城市发展指数(LCDI)2025》显示,截至2025年,全国低空经济核心企事业单位数量不断增多,但跨链企业占比极低,深圳、北京的跨链企业比例仅在3.1%以上,而广州、郑州、长沙等不足1%,一旦适航区域缩减会导致需求迁移,“链式协同”极易断裂。

在社会治理层面,政策工具失灵成为核心问题。传统空域管理、产业扶持等政策难以基于历史气候数据制定静态规则,而政策修订周期远慢于气候风险演化速度,难以适应适航区域动态缩减等复杂场景,导致监管空白。政府增加公共资源投入弥补漏洞时,又会引发资源分配失衡、代际公平正义等问题,导致社会共识分裂,治理成本显著增加。

中期风险向长期结构性风险转化的核心逻辑,在于“系统是否形成不可逆的锁定效应”。若政策响应显著滞后或技术代际更新成本高,企业将被迫陷入“维持旧技术→竞争力下降→无力研发新技术”的路径依赖,推动风险从“中期系统”固化为“长期结构”。

2.3.3 长期视角下结构性风险的增加与固化(3年以上)

长期风险是内外部系统交互不可逆锁定的结果,以技术代际断层、制度僵化与社会韧性分化为核心特征。在长期视角下,低空经济带被迫向气候稳定区域迁移,市场需求分化与资源依赖固化构成结构性矛盾,行业面临可持续转型困境。

在企业运营方面,结构性风险体现为技术路径依赖的刚性化。长期形成的特定技术路线(如传统燃油动力系统)使企业在面对清洁能源需求(如电动、氢能飞行器)时难以实现转型。这种路径依赖不仅是技术层面的惯性,更演变为组织结构、供应链与人才体系的结构性固化。例如,一些专注于传统燃油动力低空飞行器制造的企业,面对电动飞行器及氢能等清洁能源飞行器的旺盛需求,因技术转型困难而失去市场份额。市场需求的分化促使企业重新审视自身的产品和服务定位,根据不同区域的经济水平、产业特色和消费需求进行精准化生产和服务。同时,监管规则重塑迫在眉睫,监管部门需要重新制定产品质量标准、安全规范等监管规则。企业

为适应分化后的区域市场需求与监管规则,被迫进行精准化服务定位,但技术转型的高成本与高风险使其在结构性风险环境中面临生存压力,推动行业从资源依赖型向技术创新型演进。

在产业生态层面,技术代际断层成为关键阻碍。低空经济带迁移导致原有技术体系与新兴应用场景失配,而企业在技术研发和更新上往往存在滞后性,难以迅速填补技术代际间的差距。这一断层倒逼政策框架进行系统性重置,政府需通过产业政策与标准体系重构引导企业进行技术创新和产业升级。与此同时,产业生态位发生结构性重组:新的技术和市场需求催生了一批新兴企业和业态,掌握新技术的企业抢占主导生态位,而固守传统技术的企业被边缘化,产业格局从“事后补偿”的被动应对转向“事前规制”的主动引导,形成新的结构性平衡。

在社会治理层面,制度滞后是首要难题。随着低空经济带的迁移,原有的制度体系难以适应新的经济地理格局和发展需求。空域管理、安全监管等相关制度可能仍基于过去的适航区域和产业布局制定,无法有效规范新区域内低空经济活动。这种制度滞后会进一步引发社会韧性分化。经济发达、制度创新能力强的地区,能够较快调整制度以适应低空经济带迁移,增强社会韧性;而一些落后地区则可能因制度更新缓慢,在面对风险时愈发脆弱^[12]。这种制度响应能力的差异导致社会韧性出现结构性分化,促使社会意识发生转化,民众和企业逐渐认识到气候风险对低空经济的长期影响,风险意识增强,开始从单纯依赖政府应急响应,向主动寻求气候适应策略转变,实现从被动依赖到主动适应的社会转变。这一转变虽然带来了积极的风险应对意识提升,但在短期内也加剧了社会不同群体间的认知冲突和协调难度。

前述分析表明,“适航区域大幅缩减”“核心技术专利高度集中”是贯穿风险演化的两大核心锁定节点:前者直接改变产业地理布局,适航区域的持续缩减将导致企业被迫向气候稳定区迁移,原有产业链、基础设施网络不可逆重构;后者则强化技术路径依赖,核心技术专利向少数企业集中,将限制中小主体的技术选择空间,进而固化“技术锁定”格局。这两大节点与各阶段触发条件相互作用,共同推动风险从量变到质变(图6)。

3 低空经济气候风险的协同应对

针对气候风险的跨界性、非线性叠加、复杂性及动态不确定性等特点,单一的治理手段难以应对低空经济气候风险的挑战。现有研究多聚焦于平衡不同主体的多层级治理框架^[13-17]、复杂适应性系统理论在生态系统中的应用及气候韧性城市的探索^[18-21]等。然而,低空经济作

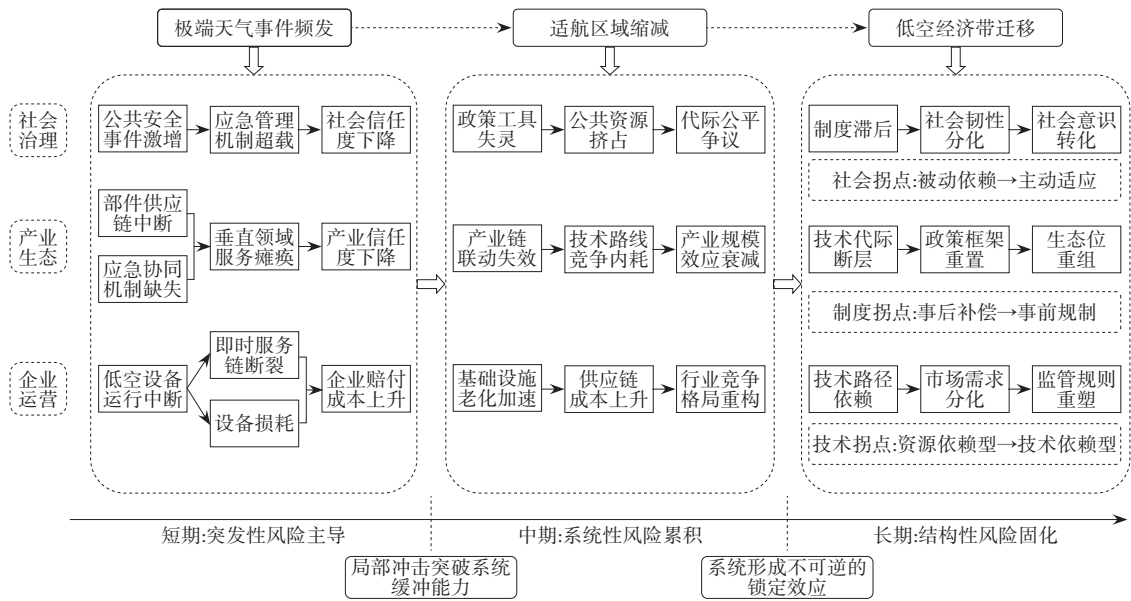


图6 低空经济气候风险的动态演化路径

为三维空间经济形态,其特殊的生态位、高度气候敏感性
及跨行业跨区域的复杂交互特性,亟须突破传统理论边
界,构建更具整合性与动态性的治理框架。

为此,本研究基于前文对风险演化路径的剖析,打破
传统治理模式的局限,通过提升系统主动适应能力、构建
协同网络以及强化韧性防线,构建“适应性-协同性-韧
性”三位一体的动态治理框架,促进风险防控与可持续发
展的有机统一,以为低空经济气候治理提供系统性解
决方案。具体而言,针对低空经济垂直暴露与气候敏感
性的独特挑战提出适应性治理,突破传统被动防御模式,

通过技术动态迭代、制度弹性设计与社会行为调适的协
同响应,实现从“气候威胁应对”向“气候机遇转化”的范
式跃迁;针对低空经济跨行业、跨区域与跨产业的复杂网
络特征提出协同性治理,通过多元主体联动、数据共享机
制与制度创新工具,破解传统治理中“条块分割”与“政
策孤岛”难题,构建风险共担、行动共振的治理生态;针
对系统内部高紧密型传导性风险提出韧性治理,超越基础
设施冗余的物理韧性思维,融合应急管理优化、经济工具
创新与社会资本动员,形成“抗压-缓冲-修复-进化”的全
周期韧性增强机制(图7)。

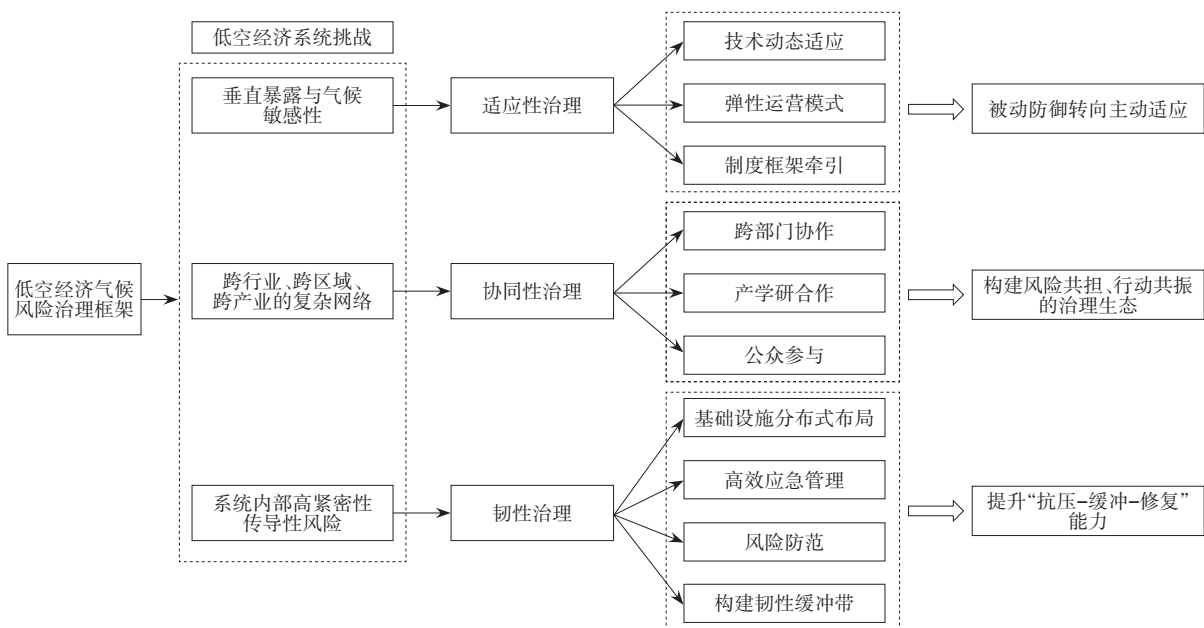


图7 低空经济气候风险治理框架

3.1 以动态调整与技术赋能为支撑,加强系统气候适应性治理

适应性是指系统通过动态调整技术、制度及社会行为,应对环境不确定性并维持功能稳定的能力。基于复杂系统理论,低空经济系统的适应性需实现从“被动防御”向“主动响应”的范式转变,通过技术迭代、运营弹性与制度牵引的三维协同,构建动态风险缓冲机制。这一转变契合复杂系统在面对外部环境变化时自我调整和适应的原理,有助于低空经济系统在复杂多变的气候环境中保持稳定运行。

技术适应性是低空经济抵御气候风险的第一道防线。全球气候变化加剧导致极端天气事件频发,低空经济依赖的空域环境稳定性持续下降。传统技术体系难以应对气候波动与生态保护的复合挑战,亟须通过技术适应性升级,在抵御气候风险的同时减少对生态系统的二次破坏。一方面,需针对极端天气研发耐候性硬件设备,通过轻量化复合材料提升无人机抗风能力,或开发宽温域电池以应对高温与严寒对续航的冲击,如宁德时代在“天行系列”电池中具备应对冷链场景的低温性能优化能力,可实现“全生命周期低温稳定输出”;另一方面,需强化智能算法对气候变化的动态响应能力,如将高精度气象预报数据嵌入无人机导航系统,利用机器学习预测雷暴路径并实时生成绕飞方案。技术升级不仅需要单点突破,更需要系统集成。例如,企业通过“气象感知决策执行”闭环系统,在台风登陆前2小时自动触发无人机返航指令,避免设备损失。此外,气候模拟测试应成为设备研发的标配流程,从源头提升技术的气候韧性,使技术体系能够更好地适应复杂多变的气候环境,增强系统的稳定性和抗干扰能力。适应性治理还需针对不同业态的核心风险精准发力:对于物流配送,重点在于开发抗风算法和宽温域电池,以保障时效;对于eVTOL,则需建立堪比民航的恶劣天气起降标准与乘客补偿机制;对于农业植保,应推广内置气象传感器的智能喷洒系统,实现药剂与微气候的精准匹配;对于生态监测,需发展多光谱、激光雷达等抗干扰传感技术,确保数据的连续性与准确性。

技术适应性需通过弹性运营模式转化为实际抗风险能力。低空经济主体需突破固定作业范式,建立气象阈值管理机制:根据历史气候数据和风险概率划定安全运营阈值,设置动态任务优先级;推行时间-空间双维度弹性调度,如暴雨频发地区采用碎片化空域预约模式,将长距离航线拆解为多段短途任务,利用天气窗口间歇性执

行。企业需重构管理体系,引入气候风险绩效指标,推动运营模式从“被动应对”转向“主动适应”。

制度框架的牵引是适应性治理的关键保障。从制度经济学和系统自适应理论角度出发,政策层面应着力解决两个关键问题:一是建立差异化的气候适应性标准体系,为企业提供明确的技术和运营规范;二是将气候预测纳入基础设施规划,通过“风险地图”识别洪涝、山体滑坡等气候脆弱地区,合理布局关键设施。此外,创新政策工具激发市场动力,如对通过气候适应性认证的企业给予空域使用费减免,将气候韧性指标纳入低空经济项目招标评分体系等,激发市场主体的适应动力。

3.2 以多元主体联动与机制协调为手段,促进系统协同治理

协同性强调打破主体间壁垒,整合分散的资源与能力,形成“风险共担、信息共享、行动共振”的治理网络。面对气候风险的跨界性与复杂性,单一主体难以独立应对,唯有通过跨部门协作、产学研联动与公众参与的深度耦合,才能构建系统性防御体系。这符合复杂系统理论中强调的系统整体性和协同性原则,通过整合不同主体的资源和能力,实现系统整体功能大于部分功能之和的效果。

跨部门协作是破解治理碎片化的核心。低空经济的气候风险具有跨域性。例如,无人机物流网络中断可能涉及气象、交通、生态等多个领域。传统“条块分割”的管理模式致使生态保护目标分散,各部门关注重点不同,系统性生态风险被低估。从复杂系统角度看,这种管理模式破坏了系统的整体性和协调性。基于协同治理理论中信息共享和协作的要求,解决这一困境需以数据共享为核心抓手。一方面,搭建政府主导的“低空气象风险信息平台”,打通气象局的实时天气数据、空管部门的空域动态信息、应急管理部的灾害预警信号,形成多源数据融合的决策支持系统^①;另一方面,建立跨部门联合响应机制,明确极端天气下的协同规则,如台风红色预警时,交通部门立即启动空域管制,而应急部门同步授权无人机执行灾区物资投送任务。

产学研合作是推动气候适应性技术创新的重要途径。气候适应性技术的研发具有高投入、长周期特征,企业单打独斗难以突破技术瓶颈。需构建“需求牵引-科研支撑-产业转化”的协同链条。企业联合高校与科研院所开展定向攻关,形成“高校基础研究→企业应用转化→政府标准认证”的闭环,政府通过专项基金分担研发风险。同时,建立行业级气候风险案例库与经验共享网络,促进

^①例如杭州市气象局联合空管、应急管理等部门,搭建覆盖全域的低空气象监测网络,整合130个起降场实时数据、550条航线飞行日志及气象雷达数据,实现风场、降水、颠簸等要素的分钟级更新。

知识传播和技术改进,将极端天气事故数据转化为可复制的技术改进方案。

公众参与是协同治理的重要组成部分。传统政府主导企业执行的治理模式,忽视了社区本土知识在生态风险管理中的价值。基于协同治理理论中公众参与的原则,在数据层,可通过众包模式鼓励用户利用手机App上传低空气象微环境数据,补充官方监测的盲区,为无人机路径规划提供支持;在行动层面,设计公众参与接口,如召开低空经济气候适应性听证会等,让居民参与评估无人机噪声、光污染与生态保护的平衡方案。德国汉堡市曾发起“我的天空”公民科学项目,市民通过便携式气象仪采集城市热岛效应数据,辅助政府优化无人机物流热区避让算法,实现了公共利益与技术效率的共赢。

3.3 以应急管理 with 风险防范为抓手,提升低空经济系统韧性

韧性是低空经济应对气候风险的终极防线,强调系统在遭受冲击时维持核心功能、快速恢复并从中学习进化的能力。与适应性聚焦主动调整不同,韧性更关注被动防御与灾后重生的平衡,需从基础设施冗余、应急机制完善到风险防范多维度提升“抗压-缓冲-修复”能力。这与复杂系统在面对外部冲击时的自我修复和进化能力相契合,有助于低空经济系统在遭受气候风险冲击后迅速恢复并提升应对能力。

基础设施的物理韧性是系统抵御气候冲击的基石。传统低空基础设施高度依赖集中式布局,气候冲击易引发系统性崩溃。因此在空间布局上,需摒弃传统中心化架构,转向分布式、冗余化的节点网络。例如在山区无人机物流网络中,同时部署地面充电站与空中悬浮充电平台,确保某一节点因山体滑坡损毁时,其他节点仍能维持网络连通性。在单体设计上,关键设施需采用抗灾强化技术,如通信基站采用防风抗震结构,数据中心配备防水密封层与双路供电系统。这种分布式、冗余化的基础设施布局和抗灾强化设计,能够增强系统的抗干扰能力和恢复能力,减少气候冲击对基础设施的破坏,保障低空经济系统的基本运行功能。

高效的应急管理是将基础设施的物理韧性转化为实际抗灾效能的关键。为此,在制度层面,需制定分级响应预案,明确不同气候预警级别下的行动规则:例如沙尘暴黄色预警时启动备用导航系统,红色预警时强制无人机降落并激活应急物资运输绿色通道;在技术层面,开发自动化灾后恢复工具链,如通过卫星通信指挥受损充电站启动自动修复程序,或利用无人机集群快速重建临时通信网络。此外,定期开展极端气候情景压力测试至关重要:企业应适时模拟气候场景,测试无人机在通信中断、

定位失效下的盲飞能力与人工干预响应速度,并将结果反馈至系统升级,形成韧性,增强闭环。

风险防范是韧性强化的重要手段。风险防范的本质是通过前瞻性干预降低气候冲击的发生概率与损失强度,而韧性构建需将防范思维嵌入系统全生命周期。在风险评估端,需量化不同气象参数对低空经济关键节点的失效概率,绘制动态风险热力图,指导基础设施布局与冗余备份策略;在监测预警端,构建“空-天-地”一体化的感知网络,通过气象卫星、低空雷达与物联网传感器融合,实现极端天气的分钟级预警与风险传导路径模拟,为主动避险争取黄金时间窗口;在防御响应端,推行“预防性关停”机制,当风险指数超过预设阈值时,自动暂停非必要低空活动并启动备用系统压力测试,防止系统因带病运行导致崩溃。

需要指出的是,气候风险的长期影响往往超出技术应对范畴,可通过经济工具与社会网络构建韧性缓冲带。在经济层面,创新金融工具分散风险负担:例如推出低空经济气候指数保险,将降雨量、风速等参数与赔付触发机制绑定,企业按区域气候风险等级差异化投保;在社会层面,培育本地化应急能力,培训社区志愿者掌握无人机维修技能,组建民间气候观察员网络辅助灾情评估,进一步增强社会应对风险的韧性。

参考文献

- [1] 王树森,倪红福. 低空经济的概念辨析与经济含义[J]. 西安财经大学学报,2025,38(5):42-53.
- [2] 于立深. 低空经济有序发展的政府管制逻辑及法律保障[J]. 江西社会科学,2025,45(3):33-47.
- [3] 郜春海,朱力,苗佳,等. 低空经济与城市轨道交通融合的技术路径与应用前景[J]. 都市快轨交通,2025,38(2):14-21.
- [4] 贾永楠. 低空空域无人系统交通管理方案初探[J]. 航空学报,2025,46(11):121-147.
- [5] 娄伟,钟佳珉. 低空经济绿色发展问题研究:基于产业链与空间视角[J]. 阅江学刊,2025,17(6):138-146.
- [6] 戴翔. 低空经济赋能新质生产力发展:逻辑及路径[J]. 阅江学刊,2024,16(6):110-119.
- [7] 韩昱. 中国低空经济发展动力机制的优化路径研究[J]. 阅江学刊,2025,17(5):109-118.
- [8] 杨骏,李长健. 生成式人工智能助推低空经济的实践研判、风险识别及制度应对[J]. 当代经济管理,2025,47(3):77-86.
- [9] 郑文革,刘婕. 低空经济发展中的潜在风险及其应对[J]. 阅江学刊,2025,17(2):97-106.
- [10] GAO M Z, HUGENHOLTZ C H, FOX T A, et al. Weather constraints on global drone flyability[J]. Scientific reports, 2021, 11: 12092.
- [11] 余怒涛,成杭,阮萍,等. 从脆弱性到适应性:气候风险对供应链韧性的影响研究[J]. 证券市场导报,2025(10):30-42.
- [12] 易承志,龙翠红. 风险社会、韧性治理与国家治理能力现代化



- [J]. 人文杂志,2022(12):78-86.
- [13] 俞好爱,付颖群. 低空经济对区域商业模式创新的影响:基于创业环境的调节效应[J]. 商业经济研究,2025(7):177-180.
- [14] 沈映春,赵雨涵,周昕怡. 低空经济现代化产业体系建设的逻辑框架与战略路径[J]. 江苏社会科学,2025(2):104-112.
- [15] 赵力佳,王颖斌. 低空经济助推绿色低碳发展:价值逻辑、现实梗阻与疏解策略[J]. 技术经济与管理研究,2025(7):64-69.
- [16] 李晓华. 政府引导、产业生态构建与低空经济发展[J]. 改革,2025(2):21-35.
- [17] 战绍磊. 低空经济高质量发展的理论逻辑与实践路径[J]. 阅江学刊,2024,16(5):101-109.
- [18] 李军辉. 复杂系统理论视阈下我国区域经济协同发展机理研究[J]. 经济问题探索,2018(7):154-163.
- [19] 孟延春,郭红星,王喆. 中国气候韧性城市的空间格局与治理路径探索[J]. 城市发展研究,2025,32(3):9-17.
- [20] 孙小涛,徐建刚,张翔,等. 基于复杂适应系统理论的城市规划[J]. 生态学报,2016,36(2):463-471.
- [21] 张卓群,姚鸣奇,郑艳. 气候适应型城市建设试点政策对城市韧性的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(4):1-12.

Climate dilemmas, risk evolution, and collaborative governance of the low-altitude economy

LI Meng^{1,2}, WANG Yifei¹, PAN Jiahua¹

- (1. Faculty of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;
2. Research Institute for Eco-civilization, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100028, China)

Abstract Against the backdrop of global climate change and the transition toward a low-carbon economy, the low-altitude economy—an emerging economic sector integrating advanced manufacturing, intelligent transportation, and digital governance—is confronting unprecedented climate risks. Grounded in complex systems theory, this study constructs a climate risk analytical framework for the low-altitude economy. By systematically deconstructing its core subsystems—equipment manufacturing, infrastructure, operational support, application scenarios, and policy regulation—the study examines both the interactive mechanisms within internal subsystems and their interactions with social and environmental systems, thereby elucidating the evolutionary mechanism of climate risks and pathways for collaborative governance. The findings reveal that: ① Owing to its vertical exposure, energy dependence, and ecological interactivity, the low-altitude economy exhibits significantly greater sensitivity to climate change than traditional economic systems; ② Climate change impacts are transmitted through two channels—direct physical impacts and indirect systemic interventions—giving rise to a dynamic risk evolution characterized by short-term abrupt shocks, medium-term systemic disruptions, and long-term structural transformations. In the short term, extreme weather events lead to service chain breakdowns, supply chain disruptions, and surges in public safety incidents. In the medium term, the contraction of airworthy operating spaces triggers cascading failures across industrial chains, accelerated infrastructure aging, and the ineffectiveness of policy instruments. In the long term, shifts in economic corridors result in technological generational gaps and institutional rigidity. To mitigate these risks, this study proposes a triple-helix dynamic collaborative governance framework centered on “adaptation-synergy-resilience.” This framework emphasizes enhancing systemic climate-adaptive governance through dynamic adjustment and technological empowerment, promoting collaborative governance through multi-stakeholder synergy and institutional innovation, and strengthening the resilience of the low-altitude economic system through emergency management and risk prevention. This study aims to provide theoretical support and practical references for the systematic prevention and control of climate risks and the sustainable development of the low-altitude economy.

Key words low-altitude economy; climate risk; transmission mechanism; dynamic evolution; collaborative governance

(责任编辑:王爱萍)