森林火灾对消防无人机产业发展的影响机制

杨 超[1]，吴鸿轩[1,2]，陈俊宇[1]，杨 熠[1]，刘雅琪[1]

（1. 中国矿业大学公共管理学院（应急管理学院），徐州 221116；2. 厦门大学教育研究院，厦门 361005）

摘要：基于2012—2022年中国省级森林火灾和消防无人机产业数据，运用双重固定效应模型研究森林火灾对消防无人机产业发展的影响机制。研究发现：森林火灾的发生不仅驱动了消防无人机整体产业的发展，而且能促进消防无人机高新技术企业的发展；政府公共安全支出和低空产业集聚是森林火灾正向影响消防无人机产业发展的核心机制；森林火灾的发生对消防无人机产业发展的促进作用存在明显的区域异质性，其中东、西部省份较为显著，而中部省份则不显著；东部省份的公共安全支出和低空产业集聚机制均显著，西部省份则只有公共安全支出机制显著。由此提出应在政策设计中考虑森林火灾不确定性、加强智慧消防采购规划、构建产业生态圈和低空产业链区域协同等方面的对策建议。

关键词：森林火灾；无人机；消防无人机；低空经济；公共安全支出

中图分类号：F204 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)11－0020－11

森林草原防灭火工作是事关人民群众生命财产安全和国家生态安全的大事[1]。森林资源是人类赖以生存的物质基础，也是社会经济发展的重要保障，更是维持生态环境平衡的重要力量。林草防灭火工作在全球变暖的背景下尤为紧迫，是中国维护生物多样性、保护动植物栖息地，乃至落实联合国可持续发展目标的关键。无人机技术参与高层建筑、森林草原、城市社区的消防应急工作有显著的积极效果[2-4]。尤其是在森林火灾救援方面，无人机增强了消防工作的监测预警、物资配送、灾后恢复和损失估计效率[5-7]。随着无人机生产的小型化，其制造成本和能耗不断走低，无人机行业迎来了新发展机遇，发展速度大幅提升[8]。早期森林火灾监测和救援主要依赖于消防员、直升机等，人力救援对消防员人数和能力要求高，易造成人员伤害；传统灭火设备效率低下且成本高昂。而更为关键的是，消防员和飞机很容易受到大火烟雾的影响无法飞行，消防无人机则通过成像传感器抓取图像数据，感知更大面积的火情，而且成本低且效果好[9]。在资源有限的背景下，合理调度消防资源，提升调度能力和救援效率是森林防灭火工作的现实困境[10]。

消防无人机灵活性强、响应速度快和相对成本较低，为化解这一困境展现出独特的技术优势。它不仅弥补了消防人力资源紧缺的问题，而且具有超越人类个体的知觉能力，在消防巡检预警、灭火喷洒和救援构建起空地协同防灭火的“技术防线”。2023年，《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》出台，为微型、轻型、小型、中型、大型无人机的规模化使用提供了市场化规范。消防安全巡查和应急救援场景是无人机市场化应用的核心场景。政府部门为减少人员伤亡，快速高效地控制火情，积极购入消防无人机并在火灾救援中使用。2024年，广东省政府工作报告中提出要加快在应急救援领域的无人感知产业体系建设。

尽管如此，消防无人机产业仍面临市场动力不足和场景应用效果不佳等问题。一方面，政府公共安全支出的不断增加，进一步驱动了消防无人机的政府采购，但消防无人机的市场仍然较小，市场需求不足，创新动力欠佳，缺乏统一的应用管理制度[11]；另一方面，消防无人机技术仍在载荷能力、法规标准建设、专业人员建设等方面存在应用局限和管理难题。但当前时期也正是消防无人机发展的最佳时期。消防无人机是低空经济在公共安

收稿日期：2026-03-05

基金项目：国家自然科学基金项目（72204249）；中国矿业大学国家级大学生创新创业训练计划项目（202410290115Z）

作者简介：杨超（1988—），男，安徽宣城人，博士，副教授，博士研究生导师，研究方向为应急科技治理；吴鸿轩（2004—），男，福建福州人，硕士研究生，研究方向为应急科技治理；陈俊宇（2005—），男，河北沧州人，研究方向为生态植被监测与修复；杨熠（2004—），女，重庆人，研究方向为应急科技治理；刘雅琪（2005—），女，浙江温州人，研究方向为应急科技治理。

全服务领域的核心产品,是低空经济发展优化社会安全治理的场景体现[12-13]。随着人工智能技术的深度嵌入,低空产业链从上游、中游、下游方面的技术突破为组装消防无人机提供了有力的技术支持。

森林火灾是消防无人机最普遍的应用场景,构成了消防无人机的核心市场需求。近年来,随着低空经济上升为国家战略,消防无人机产业正从技术探索迈向规模化应用的关键阶段,但现有研究多聚焦于技术优化,缺乏从产业视角系统审视森林火灾对产业发展的深层驱动机制[14-15]。现探讨森林火灾的爆发对消防无人机产业发展的影响机制,并探讨政府支出和产业集聚在此过程中的中介作用。研究的边际贡献主要在两个方面:①聚焦于消防无人机这一低空经济的核心应用场景,验证了具有高度不确定性的森林火灾对消防无人机产业发展的积极作用,为政府建立长期稳定的智慧消防装备政策激励机制提供了实证依据;②深度解析了政府投入和产业集聚在森林火灾影响消防无人机产业发展的中介效应,揭示了消防无人机产业发展和创新驱动关键因素,尤其是发现消防无人机产业发展在东、中、西部的驱动因素差异,阐释了政府采购和无人机产业集聚水平差异对消防无人机产业发展的深层次影响。最终,针对森林火灾的不确定性、政府采购、产业集聚和区域差异,提出了消防无人机产业发展的政策建议。

1　理论机制与研究假设

1.1　森林火灾对消防无人机产业发展的影响假设

森林火灾是中国森林资源大量减少的主要原因之一,而同时期的造林工作难以弥补[16]。根据国家统计年鉴,2012—2022 年共发生特别重大的森林火灾 7 次,重大火灾 36 次,这 10 年里森林火灾的损失金额在 2018 年达到顶峰,共计 20 444.73 万元,其次是 2019 年,共损耗 16 219.90 万元。而森林火灾的受损面积最大的一次是在 2017 年,共计 24 502.43 hm^2,其次是 2014 年共计损毁 19 110.38 hm^2(表 1)。

国家长期重视森林防火工作,明确提出“预防为主、积极消灭、生命至上、安全第一”的工作方针,推进防灭火一体化,从而保护人民群众生命财产安全和国家生态安全[16]。自 2010 年以后,无人机逐渐应用到消防领域。森林火灾的防灭火工作催生了消防无人机的市场需求。消防无人机在森林火灾应急响应和减少消防员伤亡有突出优势。传统的森林防灭火手段主要依赖人工巡查和卫星遥感监测,这些方法在效率、准确性和实时性方面存在一定的局限性。消防无人机能够更有效地应对森林火灾情势复杂多变的难题。森林火灾具有复杂性强和变化极快的特征,受植被分布和地形影响大,缺乏规则,甚至会出现爆燃、飞火等极端危险的林火现象[17]。搭载计算机视觉遥感系统的消防无人机已经成为森林调查最常用的工具[3]。此外,无人机具有机动灵活、操作简便、成本相对较低等优点。消防无人机还能够对火灾受损的林木进行灾后评估,提升区域植被恢复的规划能力[18]。

表 1　全国范围内森林火灾发生情况

年份	火灾发生次数				受害森林面积/hm^2	森林火灾折损金额/万元
	总数	较大火灾	重大火灾	特别重大火灾		
2012	3 699	1 568	1	0	13 948.00	10 801.54
2013	3 929	1 582	0	0	13 724.38	6 061.63
2014	3 703	1 620	2	1	19 110.38	42 512.79
2015	2 963	1 254	6	0	12 940.03	6 371.45
2016	2 034	693	1	0	6 223.75	4 135.68
2017	3 223	958	4	3	24 502.43	4 624.06
2018	2 478	894	3	2	16 309.07	20 444.73
2019	2 345	802	8	1	13 504.90	16 219.90
2020	1 153	424	7	0	8 526.20	10 077.67
2021	616	321	0	0	4 456.62	3 324.10
2022	709	335	4	0	6 853.88	38 845.64

数据来源:《中国统计年鉴》。

正是基于森林防灭火工作的市场需求,消防无人机产业快速发展。森林火灾的爆发很可能对消防无人机产业有一定的激发作用。消防无人机的广泛运用也减少了森林火灾的发生,为有效控制森林火情、人员安全以及环境保护提供了有力支持。

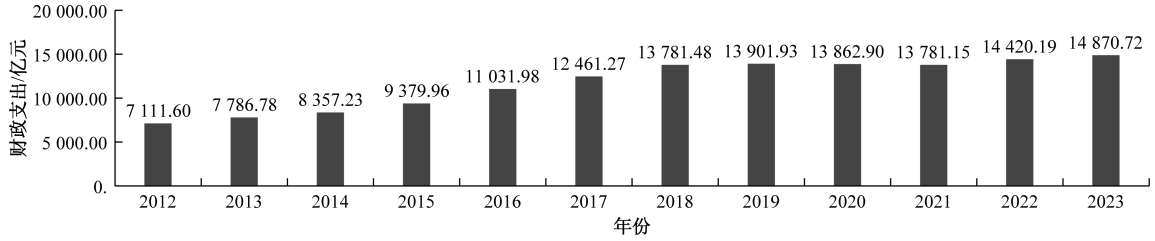
由此,提出如下假设。

H1:森林火灾的发生对消防无人机的发展有显著的正向作用。

1.2　政府公共安全支出的中介作用假设

为了进一步揭示森林火灾的发生对消防无人机产业发展的影响机制,从政府和市场两个方面加以分析。政府对消防无人机产业发展的影响主要体现在如下两个方面。

(1)森林火灾的爆发,会激发政府设立专项资金,通过转移支付方式,专项支持消防队伍的建设,保障消防队伍的正常运行工作,消防队伍通过配置先进设备减少森林火灾带来的损失。而消防无人机是森林防灭火智慧化装备中最典型的产品。通过对比中国森林火灾发生次数和政府公共安全支出数据(图 1)发现,近年来森林火灾发生数量呈递



数据来源:《中国统计年鉴》

图1 2012—2023年国家公共安全财政支出

减趋势,而国家公共安全财政支出却呈上升趋势。政府通过购买消防无人机、热成像消防监测无人机等壮大消防队伍的设备,同时积极出台相关政策加强防火专业力量建设。2023年4月出台的《关于全面加强新形势下森林草原防灭火工作的意见》[1]提出要在地方各级政府和国有林草经营单位以建设标准化、管理规范化、装备机械化为重点,加强防灭火专业力量建设。政府通过提升公共安全支出,建立智慧消防应急平台融合应急、消防、气象等多部门的数据,建立森林草原防灭火数据库。提升消防无人机在监测预警、应急响应、灾后恢复和评估等全流程的平台融合性。以监测预警为例,政府将森林火灾的预防作为首要任务,但人力监测通常耗时多、范围有限,尤其是在地形和极端天气的限制下存在明显的局限性。热成像消防监测无人机受地形影响小,扫描巡视耗时小、范围广,对迅速发现森林火灾隐患具有强力支撑。

(2)政府与行业通力合作,在顶层规划和基础设施建设上,为消防无人机产业发展创造了良好的产业集群和生态环境[19]。政府通过修改法规和调整政策,优化对消防无人机的政策支撑,加大对消防无人机市场的支持[13]。2012年以来,消防信息化水平不断提高,消防直升机、消防机器人等先进技术开始成为消防领域科技创新的热点问题[20]。2021年,中共中央、国务院出台的《国家综合立体交通网规划纲要》首次提出“发展低空经济”“推进基础设施数字化、网联化”。2023年,中央经济工作会议将低空经济列为重点发展的战略性新兴产业。2024年,《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》的正式实施,无人机产业规范化发展得到有力保障。2024年和2025年《政府工作报告》进一步强调要将低空经济培育为新的经济增长点。消防机器人是“低空经济”领域集聚发展的典型代表,也是政府在森林火灾方面智慧消防产品支出的重要装备,在城市公共安全风险评估中,以社会保障和就业支出为代表的抗灾能力是核心要素[21],而生态安全等非传统风险日益凸显,政府应急管理中的公共安全支出不仅是对突发灾害的响应,更需通过标准建设和平台搭建,为消防无人机等新兴应急装备产业创造稳定的市场预期,从而提升城市综合抗灾能力。

由此,提出如下假设。

H2:政府公共安全支出在森林火灾影响消防无人机产业发展过程中起中介作用。

1.3 低空产业链集聚的中介作用假设

低空经济指的是各类低空航空器在飞行活动中所关联的新兴产业,产业链上游以原材料和部件为主,中游以生产低空装备为主,而下游则是低空配套、服务及场景应用[22]。森林火灾的发生涉及范围广、领域深。近些年来新兴经济形态蓬勃发展,低空产业链的原材料和部件也在不断更新,以无人机为主的低空装备也在寻求技术突破。森林火灾为训练无人机技术、提升无人机精度提供了大量数据,在无人机的具体使用过程中有大量数据可以不断更新产品,精进相关技术。当作为低空产业链中游的无人机产品有了具体的更新方向,作为产业链上游的原材料和部件也会有更明确的技术革新方向,同样位于产业链下游的低空配套、服务等也有了具体的应用。例如,在火灾发生前森林的地形限制导致人工巡查耗时耗力,而无人机能够突破地形束缚,通过遥感技术、地理信息技术等精准测算森林具体起火位置;在发生火灾之后无人机也可以与救援活动相搭配,减少人员伤亡,有效控制火情。世界各国都非常重视无人机带来的新兴经济形态[23]。在现有产业中,生产作业类项目的发展更加成熟,而低空相关的公共服务类项目则处于快速扩张阶段[12]。2010年,国务院、中央军委联合发布《关于深化我国低空空域管理改革的意见》提出要深化低空空域管理改革,大力发展通用航空,拉开了低空经济发展的序幕。2016年5月13日,国务院办公厅发布《关于促进通用航空业发展的指导意见》,要求扩大低空空域开放范围,指出通用航空业是以通用航空飞行活动为核心,涵盖通用航空器研

发制造、市场运营、综合保障以及延伸服务等全产业链的战略性新兴产业体系,具有产业链条长、服务领域广、带动作用强等特点。低空产业链的上游是电子部件的开发,中游则是其核心部分,包括摄像机、传感器、无人机、航空器等,下游为低空经济的应用场景,以“低空经济+”的模式与物流、农业、旅游、应急等场景融合[19]。森林火灾、高层建筑防火救援等为消防无人机产业提供了市场机遇。根据赛迪顾问的报告,2026 年中国低空经济规模有望突破 1 万亿元,2030 年预计达到 2.5 万亿元[24]。在全球变暖背景下,森林火灾的爆发为无人机参与预警和救援提供了丰富的数据,增强了企业研发消防无人机的基础数据。这些都会激发无人机产业链集聚,而低空产业链的集聚为消防无人机产业发展提供了强有力的创新生态保障。森林火灾应急产业体系构建不仅为灾害应对提供物质与技术支撑,更通过推动产业结构优化与自主创新,驱动相关产业技术迭代[25-26]。当前无人机应急技术呈现人工智能增强的新趋势,森林火灾的复杂场景恰好为产业链上下游提供了问题导向的攻关契机,这与应急产业核心技术培优机制的形成路径高度契合。

因此,提出如下假设。

H3:低空产业链集聚在森林火灾影响消防无人机产业发展过程中起到中介作用。

1.4　森林火灾影响消防无人机产业发展的理论逻辑

森林火灾的发生对消防无人机产业发展的影响主要通过两条路径实现(图 2)。①火灾事件促使政府增加公共安全领域的财政投入,通过专项资金支持消防队伍装备的智能化升级,并借助顶层设计与政策引导,为消防无人机产业营造稳定的制度环境和市场预期。这一传导路径体现了政府对公共风险响应的财政保障机制及其对新兴产业的培育作用。②森林火灾的频发扩大了公共服务类项目的市场需求,为低空产业链提供了真实场景下的基础研究数据与技术验证机会,推动无人机企业在火情监测、态势感知、灾后评估等环节实现技术迭代,进而促进产业集聚水平的提升。东部地区依托成熟的产业链基础形成技术与市场双重优势,西部地区则凭借高频次火灾场景驱动装备应用先行,区域异质性特征进一步印证了森林火灾对消防无人机产业发展的差异化影响路径。

2　研究设计

2.1　数据来源及描述性统计

为了满足研究需求并考虑指标的客观性及数据的可获得性,选择 2012—2022 年全国 30 个省份(因数据缺失,未包含西藏地区和港澳台地区)的森林火灾和消防无人机产业作为研究对象。所使用的数据主要来源于国家统计局、《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国金融年鉴》和《中国第三产业统计年鉴》等。在此基础上,采用插值法、均值法与回归估计法对部分缺失年份的数据进行了补充,最终整理得到了 2012—2022 年的省级面板数据。同时,为避免产生多重共线性问题,对面板数据进行共线性诊断,各变量均通过了共线性检验。表 2 报告了各变量的描述性统计结果。

2.2　指标选取及变量说明

(1)被解释变量:消防无人机产业(fuav)。统计了省级行政区内以经营范围为消防无人机的企业数量表征消防无人机产业的发展水平。依托中国国家知识产权局(CNIPA)的权威数据,采用 B64C/G05D 等国际专利分类(IPC)号,并结合《战略性新兴产业分类(2018)》中的关键词构建检索式。同时,通过国家企业信用信息公示系统核实企业实体资质,确保 2012—2022 年有效专利数据与产业的关联性。通过量化创新成果向生产端的转化规模,克服传统统计中因企业跨区域经营而导致的重复计

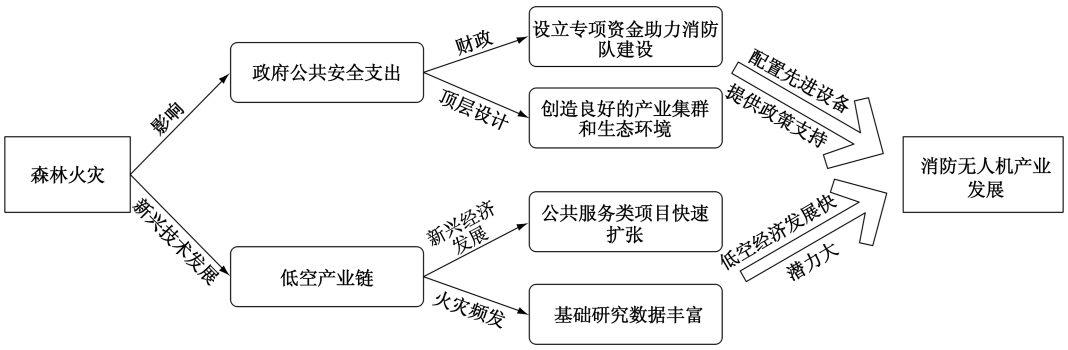


图 2　森林火灾影响消防无人机产业发展的理论逻辑

表2　变量描述性统计

变量名称	变量符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
森林火灾	ff	330	3.413	1.584	0.000	6.856
消防无人机产业	fuav	330	3.504	1.597	0.000	7.189
公共安全支出	pse	330	5.575	0.650	3.721	7.265
低空经济产业链	lei	330	0.969	0.810	0.000	3.434
经济发展水平	pgdp	330	10.908	0.445	9.849	12.155
教育水平	el	330	4.335	0.614	2.303	5.130
经济开放度	fdi	330	2.883×10^5	5.675×10^5	2.829×10^3	5.670×10^6
社会消费水平	trs	330	8.959	0.954	6.176	10.712

算问题，从而更精准地刻画出产业核心主体的创新动能。

(2)解释变量：森林火灾(ff)。采用省级行政区年度森林火灾发生总数表征森林火灾，数据源自生态环境部与国家统计局联合编纂的《中国环境统计年鉴》(2001—2022)。作为国务院批准的国家级权威年鉴，其火灾统计数据严格遵循《森林火险气象等级》(GB/T 36743—2018)和《林业统计报表制度》(林规发〔2020〕54号)，覆盖全国31个省级行政区划单位(不含港澳台)的全口径森林火灾事件记录。

(3)中介变量：①公共安全支出(pse)。基于理论分析与现实逻辑，森林火灾通过促进公共安全支出结构的调整，进而影响消防无人机产业的发展。公共安全支出的定向扩容将推动防灾资源的精准配置。以《中国统计年鉴》中的省级公共安全支出作为核心表征，其增量投入与防灾体系现代化进程密切相关，从而形成“森林火灾—政府支出—消防无人机产业”这一作用链条。②低空经济产业链(lei)。低空经济是中国首倡的一种新兴经济模式，也是近年来中国在无人机、卫星定位、5G通信和精密导航等多个领域掌握核心技术，实现高水平科技自立自强的进路呈现[8]。低空经济的发展有效激发了企业的创新精神[27-28]。考虑了涵盖上游研发制造、中游运营服务以及下游场景应用等全链条主体，以省域内无人机研发制造、数据链服务和空域运营3类企业的总数来衡量该产业链的基础规模。低空经济产业链企业界定参照《低空经济及其核心产业统计分类(试行)》，以工商登记经营范围、核心业务与专利布局为依据，纳入主营业务涉及无人机研发制造、数据链通信服务、低空空域运行管理的独立法人企业。对于业务交叉或专利相近的企业，遵循主营业务优先与核心专利归属原则，仅将低空经济相关业务占比超30%或拥有核心低空技术专利的企业计入，避免重复统计。

(4)控制变量。消防无人机产业除了受森林火灾的影响外，还受其他因素的影响。为更加全面考察消防无人机的影响因素，选取以下对消防无人机产业有重要影响的变量作为控制变量：经济发展水平(pgdp)，以人均地区生产总值来表征；教育水平(el)，以普通高等学校数来表征；经济开放度(fdi)，以外商投资企业投资总额来表征；社会消费水平(trs)，以社会消费品零售总额占GDP比重表征。

2.3　模型构建

根据前文的理论分析与研究假设，进行Hausman检验，最终确定采用双重固定效应模型来研究森林火灾对消防无人机产业的影响。

(1)基准检验模型。为了探究森林火灾对消防无人机产业的影响，并验证假设H1，构建如下基准检验模型：

$$fuav_{it}=c_1+c_2ff_{it}+c_3Control_{it}+\mu_i+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中：i为省份；t为年份；c_1为常数项；c_2、c_3为各变量的回归系数；$Control_{it}$为控制变量；μ_i为省份固定效应；ε_{it}为随机扰动项。

(2)中介效应模型。为探讨森林火灾通过公共安全支出及低空经济产业链影响消防无人机产业发展，验证假设H2和假设H3，因此分析“森林火灾—政府支出—消防无人机”与“森林火灾—产业链—消防无人机”这两个传导路径的有效性。参考温忠麟和叶宝娟[29]的中介效应检验研究，构建如下中介效应模型：

$$fuav_{it}=c_1+c_2ff_{it}+c_3Control_{it}+\mu_i+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$Mediator_{it}=\beta_0+\beta_1ff_{it}+\beta_nControl_{it}+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$fuav_{it}=\gamma_0+\gamma_1ff_{it}+\gamma_2Mediator_{it}+\gamma_nControl_{it}+\mu_{it} \quad (4)$$

式中：Mediator为中介变量，分别为公共安全支出(pse)和低空经济产业链集聚(laeif)；β_0、γ_0为常数项；β_1、β_n、γ_1、γ_2、γ_n为系数，γ_1为加入中介变量后森林火灾对消防无人机产业的直接影响效应；μ_{it}为随机扰动项。若β_1显著且γ_2显著，同时β_1的绝对值

大于 γ_1 的绝对值,存在部分中介效应;若 γ_1 不显著而 γ_2 显著,则为完全中介效应。

3　实证分析

3.1　基准回归

通过系统的计量检验确保模型设定的可靠性。在进行固定效应回归分析之前,首先进行多重共线性诊断。结果显示,所有解释变量的方差膨胀因子(VIF)均值低于 2.85,并显著低于临界值 10,从而排除了多重共线性问题。表 3 展示了基于双向固定效应模型的逐步回归结果,通过同时控制个体和时间固定效应,有效解决了不可观测异质性及时间趋势的问题。所有回归分析均采用聚类稳健标准误,以确保统计推断的有效性。表 3 中的回归结果显示,森林火灾(ff)在所有模型设定中均显著为正,其系数表明森林火灾对消防无人机(fuav)具有稳健的促进作用。从列(1)～列(5),随着控制变量的逐步引入,森林火灾(ff)的系数绝对值先增加后减少,这表明控制了经济发展水平(pgdp)与教育水平(el)后,更凸显出核心变量对被解释变量的直接影响;但在加入对外经济开放度(fdi)与社会消费水平(trs)这部分推动消防无人机发展的因素可能被吸收。然而,其统计显著性仍保持在 0.01 水准,这证明了其独立解释力较强。以列(5)为例,森林火灾(ff)的系数为 0.515。这一结果意味着在控制其他变量的情况下,若森林面积规模提升 1%,消防无人机数量将相应增加约 0.515 个单位。这一发现与需求拉动理论相吻合,有力地证实了频繁发生的森林火灾显著提高了社会对于森林火情监测与预警的需求,从而进一步推动了消防无人机产业的发展。因此,假设 H1 得到了验证。

在控制变量体系中,教育水平(el)与社会消费水平(trs)的系数均显著为正。这表明,教育水平为地方发展消防无人机提供了人才保障,而社会消费水平则促进了消防无人机产业的建设与发展。然而,经济开放度(fdi)的表现则与理论预期相悖,展现出负向驱动效应。这一现象暗示,高水平的经济开放度可能促进外资企业在消防设备领域引入成熟技术,从而形成市场壁垒,并对本土消防无人机企业的生存空间造成挤压。

3.2　中介效应检验

为进一步探究公共安全支出在森林火灾作用与消防无人机产业的关系中是否发挥中介效应,运用固定效应模型,基于式(2)～式(4)中介效应模型进行逐步回归。

3.2.1　公共安全支出的中介效应分析与 Bootstrap 检验

表 4 汇报了公共安全支出的中介效应回归结果。从直接效应维度看,列(1)显示森林火灾(ff)对消防无人机产业呈现显著正向影响($\beta=0.515$,$P<0.01$)。这表明在实现固定效应后,森林火灾规模每提升 1 个单位,可引致一省的消防无人机企业增加 0.515 个单位,反映了森林火灾规模影响消防无人机的总效应。在中介效应机制方面,列(2)的回归结果表明,森林火灾(ff)对公共安全支出(pse)存在显著正向驱动作用($\beta=0.040$,$P<0.01$),满足中介效应第 1 阶段条件。这一发现揭示,森林火灾可

表 3　基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	fuav	fuav	fuav	fuav	fuav
ff	0.405***	0.527***	0.566***	0.550***	0.515***
	(4.630)	(4.950)	(5.330)	(5.250)	(5.000)
pgdp		0.762**	−0.110	0.223	−1.514**
		(1.990)	(−0.230)	(0.450)	(−2.230)
el			5.111***	5.351***	3.906**
			(2.830)	(3.000)	(−2.180)
fdi				-5.98×10^{-7}***	-5.92×10^{-7}***
				(−3.230)	(−3.260)
trs					2.021***
					(−3.650)
常数项	2.122***	−6.603	−19.38***	−23.83***	−16.60**
	(6.890)	(−1.500)	(−3.090)	(−3.770)	(−2.550)
样本数	330	330	330	330	330
R^2	0.067	0.079	0.103	0.134	0.171

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1%的显著水平;括号内为 t 值。

能通过造成巨大损失与影响、引发社会关注与舆论压力等多维机制，倒逼政府加大公共安全支出。列(3)在引入公共安全支出这一变量后，森林火灾的直接效应系数从0.515降低为0.307，但仍保持统计显著性($P<0.01$)，满足中介效应第2阶段条件。这一发现说明在考虑公共安全支出的中介作用后，森林火灾仍对消防无人机产业产生显著正向的直接影响。这一发现验证了需求拉动理论中政府需求侧牵引假说的有效性，即政府通过公共安全支出加大对消防产业的投入，推动了消防无人机产业的发展。

在此分析基础上，采用Bootstrap方法对中介变量进行检验。为规避混合效应假设下因忽视个体效应导致的模型估计结果偏差，对原始样本进行1 000次随机抽样以解决样本分布不对称问题。结果表明，森林火灾通过公共安全支出对消防无人机产业存在显著的间接效应，见表5。

表4　公共安全支出的中介效应回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	fuav	pse	fuav
ff	0.515***	0.040***	0.307***
	(5.000)	(4.610)	(3.190)
pse			5.168***
			(8.350)
控制变量	Yes	Yes	Yes
常数项	−16.602**	−6.513***	17.055**
	(−2.550)	(−11.810)	(2.400)
个体固定效应	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes
样本数	330	330	330
R^2	0.171	0.841	0.330

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著水平；括号内为t值。

表5　公共安全支出的Bootstrap检验结果

效应类别	中介效应	Boot标准误	Boot CI下限	Boot CI上限
间接效应	0.208***	0.043	0.126	0.291
直接效应	0.307***	0.114	0.108	0.534

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著水平。

3.2.2　低空经济产业链集聚的中介效应分析

表6汇报了低空经济产业链的中介效应回归结果。直接效应维度部分已经进行描述，此处不再赘述。在中介效应机制方面，列(2)的回归结果表明，森林火灾(ff)对低空经济产业链(lei)存在显著正向驱动作用($\beta=0.088$，$P<0.05$)，满足中介效应第1阶段条件。这一发现揭示，森林火灾可能通过推动应急救援设备制造与升级、催生新技术与新应用模式与吸引政策支持与资金投入等方式促进低空产业链的发展。列(3)在引入低空经济产业链这一变量后，森林火灾的直接效应系数从0.515降低至0.462，但仍保持统计显著性($P<0.01$)，满足中介效应第2阶段条件。这一发现说明在考虑低空经济产业链的中介作用后，森林火灾仍对消防无人机产业发展产生显著正向的直接影响。因此“森林火灾—低空经济产业链集聚—消防无人机产业”的这一传导路径成立。

在此分析基础上，继续采用Bootstrap方法对中介变量进行检验。为规避混合效应假设下因忽视个体效应导致的模型估计结果偏差，对原始样本进行1 000次随机抽样以解决样本分布不对称问题，结果表明森林火灾通过低空经济产业链对消防无人机产业存在显著的中介效应，见表7。

表6　低空经济产业链的中介效应模型回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	fuav	lei	fuav
ff	0.515***	0.088**	0.462***
	(5.000)	(2.100)	(4.580)
lei			0.607***
			(4.37)
控制变量	Yes	Yes	Yes
常数项	−16.602**	7.412***	−21.099***
	(−2.550)	(2.800)	(−3.290)
个体固定效应	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes
样本数	330	330	330
R^2	0.171	0.130	0.222

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著水平；括号内为t值。

表7　低空经济产业链的Bootstrap检验结果

效应类别	中介效应	Boot标准误	Boot CI下限	Boot CI上限
间接效应	0.068**	0.032	0.005	0.131
直接效应	0.498***	0.111	0.279	0.717

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著水平。

3.3　稳健性检验

(1)替换关键变量。为了对研究结果的稳健性进行验证，将原被解释变量即经营范围是无人机的企业数量替换为经营范围是无人机的高新技术企业数量重新进行回归分析。高新技术企业须符合技术实力、创新能力和研发投入等多项严格标准，样本范围显著收窄。回归结果显示，森林火灾对上述替换后的被解释变量的回归系数$c_2=0.265$。具体而言，首先，在纳入中介变量公共安全支出之后，森林火灾规模对消防无人机的回归系数变为$\gamma_1=0.185$。这种情况的出现可能源于公共安全支出变量吸收了部分森林火灾对消防无人机推动作用的

影响。与此同时,公共安全支出的回归系数 $\gamma_2=1.998$。其次,当把中介变量低空经济产业链纳入考量时,森林火灾规模对消防无人机的回归系数 $\gamma_1=0.228$。这表明低空经济产业链也吸收了一部分森林火灾对消防无人机的推动作用,此时低空经济产业链的回归系数 $\gamma_2=0.417$。这些回归系数均在 1% 的水平下显著,验证了研究假设。

(2)去除直辖市。考虑到部分发达地区可能会引发区域性偏误,从现有样本中剔除所有直辖市样本后重新进行回归发现,森林火灾强度对消防无人机产业的回归系数 $c_2=0.608$。进一步而言,一方面,加入中介变量公共安全支出后,森林火灾规模对消防无人机的回归系数降低至 $\gamma_1=0.408$,推测可能是公共安全支出变量吸收了森林火灾对消防无人机的部分推动作用,而公共安全支出的回归系数 $\gamma_2=4.605$;另一方面,引入中介变量低空经济产业链后,森林火灾规模对消防无人机的回归系数 $\gamma_1=0.524$,意味着低空经济产业链同样吸收了森林火灾对消防无人机的部分推动作用,低空经济产业链的回归系数 $\gamma_2=0.645$。这些回归系数均在 1% 的水平下显著。

(3)缩尾处理。由于数据异常值可能会对回归结果造成干扰,借鉴相关研究中使用的稳健性检验方法[30],对所有变量在 1% 和 99% 分位上实施缩尾处理,随后利用处理后的数据重新进行回归。回归结果显示,森林火灾对替换后的被解释变量的回归系数 $c_2=0.554$。一方面,当把中介变量公共安全支出纳入模型后,森林火灾规模对消防无人机的回归系数变为 $\gamma_1=0.347$,公共安全支出的回归系数 $\gamma_2=5.247$;另一方面,加入中介变量低空经济产业链后,森林火灾规模对消防无人机的回归系数 $\gamma_1=0.500$,反映出低空经济产业链对森林火灾推动消防无人机的作用有一定吸收,对应的低空经济产业链回归系数 $\gamma_2=0.592$。这些回归系数均在 1% 的水平下显著。

稳健性检验结果见表 8。

3.4　异质性检验

应急管理部数据显示,近年来中国森林火灾总体呈下降趋势,2025 年全国森林火灾仅 225 起,但区域分布差异显著,西部省份仍是火灾高发区,这为区域异质性检验提供了现实基础。进一步对东部、中部和西部地区作异质性检验。借鉴沈小波等[31]的方法,将全国划分为东部、中部和西部 3 个区域。表 9 显示,东部、西部地区的森林火灾对消防无人机产业的直接效应均显著为正,说明东、西部地区森林火灾对无人机产业存在促进作用。但中部地区的作用系数不显著。这可能是与中部地区森林火灾的爆发数量以及无人机企业的发展水平有一定关联。中部地区森林火灾多以小型火灾为主,且多发生在城乡交错带,火势易控制,对高效消防装备需求的迫切性不足,同时区域内无人机企业多以中小型为主,缺乏核心技术支撑,产业规模化程度较低。比较 3 个区域的系数值可知,西部地区表现最佳,其次是东部,最后是中部。这很可能与地理和生态因素有关。以新疆、青海、云南、甘肃等为代表的西部省份多属于生态脆弱区,森林火灾规模大,且频率高,加之其复杂的地形,使得传统消防手段难以高效覆盖。尤其是西南高山峡谷地带和西北荒漠林区,山高坡陡、交通不便,地面扑火队员难以抵达,传统人工巡护也无法实现全域覆盖,火情监测与处置面临诸多难题。因此,在西部省份的森林火灾场景中,无人机的需求明显增加。例如,

表 8　稳健性检验结果

变量	(1)			(2)			(3)		
	替换关键变量			去除直辖市			缩尾		
	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)
ff	0.265***	0.185***	0.228***	0.608***	0.408***	0.524***	0.554***	0.347***	0.500***
	(4.860)	(3.450)	(4.390)	(5.610)	(3.930)	(4.920)	(5.360)	(3.630)	(4.940)
中介变量		1.998***	0.417***		4.605***	0.645***		5.247***	0.592***
		(5.790)	(5.810)		(6.890)	(4.350)		(8.580)	(4.240)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
常数项	−0.227	12.785***	−3.320	−23.077***	7.631	−26.649***	−20.449***	13.653*	−24.645***
	(−0.070)	(3.220)	(−1.000)	(−3.470)	(1.010)	(−4.110)	(−2.890)	(1.830)	(−3.550)
个体固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	330	330	330	286	286	286	330	330	330
R^2	0.154	0.241	0.241	0.214	0.338	0.268	0.183	0.346	0.230

注:*、**、***分别表示 10%、5%、1%的显著水平;括号内为 t 值。

表9　异质性检验结果

变量	(1)			(2)			(3)		
	东部地区			西部地区			中部地区		
	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)	fuav	fuav(pse)	fuav(lei)
ff	0.493***	0.285*	0.469***	0.712***	0.555***	0.702***	0.312	0.066	0.223
	(2.710)	(1.830)	(2.660)	(4.450)	(3.230)	(4.390)	(1.560)	(0.360)	(1.190)
中介变量		7.813***	0.696***		2.086**	0.258		8.208***	1.051***
		(6.760)	(2.910)		(2.260)	(1.280)		(4.940)	(3.670)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
常数项	−49.698**	38.041*	−54.624***	−20.832***	−6.731	−22.734***	−10.457	50.500**	−23.269
	(−2.400)	(1.750)	(−2.720)	(−2.780)	(−0.700)	(−2.980)	(−0.520)	(2.360)	(−1.240)
个体固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	121	121	121	296	296	296	88	88	88
R^2	0.209	0.450	0.268	0.393	0.421	0.402	0.062	0.295	0.207

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著水平；括号内为t值。

四川等省率先将无人机纳入森林防火指挥体系，通过立法明确空域临时开放机制，从而保障了灾时快速响应能力。相比之下，以福建和浙江为代表的东部地区尽管财政实力雄厚，但在消防采购预算中更多集中于进口消防直升机，而无人机政府采购则依赖企业自主招标，因此规模化应用受到一定限制。此外，东部地区更加严格的空域管制以及较为完善的传统消防体系，无人机在该区域往往仅发挥辅助性角色。东部地区人口密集、空域管控严格，民用无人机飞行需提前向管制部门申请，且区域内传统消防体系完善，消防直升机、地面消防队伍配备充足，无人机多作为火情侦察、辅助灭火的补充手段，难以发挥核心作用。

而进一步比较中介效应的区域异质性结果可知，东部地区森林火灾通过公共安全支出和低空经济产业链共同影响消防无人机产业发展；西部地区则主要是公共安全支出的中介效应。这一结果反映出西部地区的低空经济产业链发展相对滞后，消防无人机产业的发展更为依赖公共安全支出的财政支持。西部地区无人机企业多聚焦于硬件生产，缺乏飞控、AI视觉识别等核心技术研发能力，也未形成“感知-决策-执行”的全链条服务体系，难以依托产业链协同发展，只能依靠政府公共安全支出的财政投入推动产业发展。值得注意的是，中部地区的公共安全支出与低空经济产业链的作用系数显著为正，但核心解释变量不显著。这表明政府的财政支出和产业集聚的发展能够促进中部地区的消防无人机产业发展，但是森林火灾对政府支出和产业链集聚的影响不显著，这有可能与中部省份森林火灾发生次数相对少有关。

从现实发展出发，3大区域的异质性特征还与地方政策导向、产业基础和实战需求深度绑定。西部地区依托生态保护压力和应急需求，逐步形成“政府主导、企业参与”的消防无人机应用模式；东部地区则凭借低空经济产业优势，逐步推动消防无人机与低空智慧平台融合；中部地区虽森林火灾频次较低，但已开始布局消防无人机产业。此外，区域的异质性也与火灾成因相关，东部地区森林火灾多为人为因素引发，且多为小型火灾，而西部地区雷击火占比逐年提升，火灾规模更大、处置难度更高，这也进一步强化了西部地区对消防无人机的需求，凸显了区域异质性的现实合理性。

4　结论与建议

4.1　研究结论

整理了2012—2022年森林火灾和消防无人机产业的数据，并使用双重固定效应模型阐释了森林火灾的发生对消防无人机产业发展的影响机制，检验了公共安全支出和低空经济产业链集聚在此影响过程中的中介作用。得到如下研究结论。

(1)森林火灾的发生对消防无人机产业发展有显著的正向作用。经过多轮稳健性检验后结论仍然存在，森林火灾的发生还会显著促进生产消防无人机的高新技术企业，并且在去除直辖市样本后正向影响的程度更大。

(2)政府公共安全支出和低空产业链集聚在森林火灾影响消防无人机产业发展中具有中介作用。森林火灾会促进政府加大公共安全的财政支出，且公共安全支出的提高会显著促进消防无人机产业的发展。森林火灾的发生会促进低空产业链集聚，并进一步驱动消防无人机产业发展。

(3)森林火灾的发生对消防无人机发展的促进

效应存在东、中、西部的差异。这种促进效应在东、西部省份显著存在,但在中部省份的检验中不显著。东、西部省份政府公共安全支出存在显著的中介效应。低空经济产业链集聚的中介效应集中体现在东部省份。

4.2　对策建议

(1)将森林火灾的不确定性纳入政策设计逻辑,推动消防无人机产业的平稳发展和集聚。①应关注森林火灾的高度不确定性对消防无人机产业发展的影响,拓展无人机在高层建筑等多场景消防应用的落地空间。应通过政策引导,加强对消防无人机产业技术创新的支持,丰富无人机在消防场景的适用性,化解无人机在消防任务中的政策障碍,提升消防无人机的智慧化水平。②应建构稳定且系统的政策支持系统,增强消防无人机产业创新发展的适应能力。尤其是协同科技部、应急管理部和国家发展和改革委员会等多部门,培育消防无人机市场,并建立标准和规范,推动消防无人机产业发展的长期驱动机制,减少外部环境波动产生的市场冲击。③政府和市场应将森林火灾的外部压力转化为产业发展的内生动力,应将森林火灾作为政策创新和技术跃迁的契机,适当向消防无人机等新兴技术产业倾斜资源。

(2)加强政府公共安全支出对无人机产业的支持,提升政府对智慧消防产品的采购规划。①优化公共安全支出的结构,有针对性地支持无人机企业加大研发投入,增强消防需求场景与企业技术研发的匹配度,推动复杂消防场景下的无人机调度和消防实战应用能力,对具有自主知识产权、创新能力突出的企业给予财税优惠支持,动态调整经费支出的重点方向。②增强政府公共采购的“采购后管理”能力,形成系统性的采购规划与管理制度。制定消防无人机的采购标准和使用效果评估机制,推动行业规范发展;提升政府采购对消防无人机的维护和跟踪服务监管能力,推动消防无人机采购后绩效评估体系建立;推动采购后信息数据管理系统与使用数据对接,构建消防无人机“需求发布-采购招标-购后运维-演练联动”的全链条信息系统。

(3)构建低空产业生态圈推动产业链协同,提升消防无人机产业的共生共演能力。①重视低空经济产业的生态发展,形成对消防无人机的纵向技术支撑。通过无人机的上游材料与核心部件突破解决产品可靠性问题,中游智能制造提升规模化生产能力,下游服务创新拓展应用场景。激发低空经济产业链的上下游联动,拓展消防无人机的规模化生产,降低使用成本,为消防无人机的广泛应用提供可能。②加强消防无人机的技术集成能力,回应森林火灾、城市高层建筑等多种复杂的消防场景。随着极端气候导致的火情复杂化,耐高温、长航时等新需求持续涌现,人工智能、数字孪生等新技术的加速融合,以及服务模式的不断创新,消防无人机应加强对新需求和新技术的吸收能力。企业应加强消防无人机发展路径的探索,从应急需求到产品定型的研发周期、政策试点到规模推广的制度化进程,以及从单机应用到系统集成的功能演进,通过对特殊火情、抗风性能、火情识别精度等关键技术指标的持续突破,推动重点林区和城市消防装备配备率。

(4)因地制宜实施消防无人机发展战略,鼓励东中西部跨区域合作发展。东部地区应加强关键核心技术的研发,增强消防无人机的自主技术体系,并推动空域精细化管理,建立低空空域开放试点,为消防无人机的规模使用提供更大的空间;中部地区应加强推动灾害响应与产业发展之间的联动机制,推动消防应急响应与本地消防无人机企业发展的协同水平;西部地区目前在消防无人机使用上最普遍,但低空经济产业链相对薄弱。应增强低空经济产业链的集聚能力,增强消防无人机技术企业对西部森林火灾场景的精准学习,加强地面调度平台、无人机培训及低空经济产业链的系统规划,加快与东部地区优质科教资源的联动,建立创新联合体。

参考文献

[1] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于全面加强新形势下森林草原防灭火工作的意见》[EB/OL]. (2023-04-20)[2025-11-27]. https://www.spp.gov.cn/zdgz/202304/t20230420_611952.shtml.

[2] ZHANG J, SRIVASTAVA P, EACHEMPATI P. Evaluating the effectiveness of drones in emergency situations: a hybrid multi-criteria approach[J]. Industrial Management & Data Systems, 2023, 123(1): 302-323.

[3] YUAN C, ZHANG Y, LIU Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(7): 783-792.

[4] 王勇, 岑宗羲, 何正龙, 等. 低空无人机遥感技术在公路巡检中的应用进展、挑战和前景[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1675-1688.

[5] 邱佩, 罗帆. 城市无人机物流配送安全风险因素识别与管控[J]. 城市发展研究, 2025, 32(6): 18-25.

[6] 耿鹏, 杨豪杰, 薛芳琳, 等. 基于多无人机协同的林火安全探测及人员疏散[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35

(4)：43-50.
[7] 张林静，丁溢. 基于卡车-无人机协同配送的双目标应急物资运送优化[J]. 系统管理学报，2025，34(1)：81-95.
[8] 李牧南，谢天琪. 中国低空经济发展的实践进路：依托科技自立自强助力新质生产力形成[J]. 科技管理研究，2024，44(17)：1-9.
[9] MOMENI M，SOLEIMANI H，SHAHPARVARI S，et al. A multi-agency coordination resource allocation and routing decision-making problem：a coordinated truck-and-drone DSS for improved wildfire detection coverage [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction，2023，97：104027.
[10] 赵子龙，吴鹏，孙少龙，等. 重大森林火灾下考虑资源有限的应急救援调度优化研究[J/OL]. 系统工程理论与实践，1-21[2026-01-07]. https：//link. cnki. net/urlid/11. 2267. N. 20240929. 1133. 024.
[11] 王锡柱. 无人机分类监管：国际经验与中国路径[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版)，2022，35(2)：142-150.
[12] 洪群联. 低空服务业的概念特征、发展条件与推进对策[J]. 经济纵横，2024(8)：45-52.
[13] 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.
[14] 茹雨暄，王乐，盖梦瑶. 低空经济的发展态势及促进策略研究[J]. 科技和产业，2025，25(10)：32-37.
[15] 高捷. 低空空域规划与交通仿真技术发展和应用[J]. 科技和产业，2024，24(23)：230-235.
[16] 邓群刚，郭斌飞. 新中国成立初期护林防火工作的探索与实践：以四川省为中心的考察[J]. 党的文献，2024(5)：97-106.
[17] 陈仲军，陈春叶，王乐，等. 森林火灾爆燃机理与应对措施研究：以甘肃小陇山林区为例[J]. 森林防火，2024，42(1)：21-26.
[18] 崔中耀，赵凤君，赵爽，等. 基于多光谱无人机及机器学习的林木火灾受损信息提取研究[J]. 自然灾害学报，2024，33(1)：99-108.
[19] 乔莉，霍达，顾雯嘉，等. 低空经济现代化发展的路径优化研究：基于3D无人飞行的视角[J]. 科学管理研究，2025，43(2)：29-38.
[20] 何理，冯科，李姝蓓. 低空经济的研究热点与趋势展望：基于CiteSpace的文献计量分析[J]. 技术经济与管理研究，2025(7)：1-7.
[21] 王循庆，周航，刘昆，等. 基于层次分析法的城市公共安全风险评估与治理[J]. 科技和产业，2025，25(6)：340-349.
[22] 周钰哲. 低空经济发展的理论逻辑、要素分析与实现路径[J]. 东南学术，2024(4)：87-97.
[23] 张光宇，崔今天，欧春尧，等. 海外情境下本土后发企业颠覆性创新演化路径研究：价值创新视角[J]. 科技进步与对策，2022，39(22)：103-112.
[24] 赛迪顾问. 中国低空经济发展研究报告(2024)[R]. 北京：赛迪顾问，2024.
[25] 陈勇，吴志伟，彭徐剑. 公共安全视阈下的森林火灾应急产业发展对策研究[J]. 消防科学与技术，2022，41(11)：1568-1570.
[26] 郑艳. 林业资源保护和森林防火技术研究[J]. 林业科技情报，2023，55(4)：46-48.
[27] 胡海波，位鹏，周洁. 数字化创业叙事与社会创业合法性获取：博迅案例研究[J]. 科技进步与对策，2024，41(12)：12-22.
[28] 欧阳桃花，郑舒文，张凤，等. 研究型大学服务国家战略工程研究：以长鹰无人机原始创新为例[J]. 科学学与科学技术管理，2023，44(1)：20-37.
[29] 温忠麟，叶宝娟. 中介效应分析：方法和模型发展[J]. 心理科学进展，2014，22(5)：731-745.
[30] 尹志锋，叶静怡，黄阳华，等. 知识产权保护与企业创新：传导机制及其检验[J]. 世界经济，2013，36(12)：111-129.
[31] 沈小波，陈语，林伯强. 技术进步和产业结构扭曲对中国能源强度的影响[J]. 经济研究，2021，56(2)：157-173.

Impact Mechanism of Wildfire on Industry Development of Firefighting Drones

YANG Chao[1]，WU Hongxuan[1,2]，CHEN Junyu[1]，YANG Yi[1]，LIU Yaqi[1]
(1. School of Public Administration (School of Emergency Management)，China University of Mining and Technology，Xuzhou 221116，China；2. Xiamen University Institute of Education，Xiamen 361005，China)

Abstract：Using a two-way fixed-effects model and drawing on provincial data of forest fires and the firefighting drones industry across China from 2012 to 2022，an analysis was performed to identify the mechanism through which forest fire occurrences influence the development of the firefighting drone industry. The findings are as follows：the occurrence of forest fires not only drives the overall development of the firefighting drones industry but also promotes the growth of high-tech enterprises within this sector. Government public safety expenditure and low-altitude industrial agglomeration constitute the core mechanisms through which forest fires positively affect the development of the firefighting drones industry. The promoting effect of forest fires on industry development exhibits significant regional heterogeneity，being more pronounced in the eastern and western provinces but insignificant in the central provinces. Both the public safety expenditure mechanism and the low-altitude industrial agglomeration mechanism are significant in the eastern provinces，whereas only the public safety expenditure mechanism is significant in the western provinces. Accordingly，policy recommendations are put forward，such as incorporating the uncertainty of forest fires into policy design，strengthening planning for smart-firefighting procurement，and fostering industrial ecosystems and regional collaboration in low-altitude industrial chains.

Keywords：wildfire；drones；firefighting drones；low-altitude economy；public safety expenditure