

引用格式: 韩留明, 赵建吉, 闫明涛, 等. 中国无人机产业空间格局演化特征及影响因素[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1745-1757. [Han L M, Zhao J J, Yan M T, et al. Evolution characteristics and influencing factors of spatial pattern of China's unmanned aerial vehicle industry[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1745-1757.] DOI:10.18402/resci.2025.08.11

# 中国无人机产业空间格局演化特征及影响因素

韩留明<sup>1</sup>, 赵建吉<sup>1,2</sup>, 闫明涛<sup>1</sup>, 王雅娜<sup>1</sup>

(1. 河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心/黄河文明省部共建协同创新中心, 开封 475001;

2. 河南大学 地理科学与工程学部, 郑州 450046)

**摘要:**【目的】无人机产业是低空经济的重要支撑。深入揭示中国无人机产业的空间格局演化特征及其驱动机制, 能够为低空经济发展与区域产业布局优化提供理论依据与决策参考。【方法】本文基于2010—2022年中国280个地级市的45070家无人机企业数据, 结合核密度估计、空间自相关和地理探测器等方法, 研究了无人机产业的空间格局特征及影响因素。【结果】①2010—2022年无人机产业在珠三角、长三角和京津冀等地区表现出明显的空间集聚特征, 且产业空间格局从“点状分布”向“多核集聚”演化; ②创新驱动、产业关联与应用场景是影响无人机产业空间格局的核心因素; ③创新产出、人力资本与科技服务等要素之间的协同增强效应显著, 经济基础、制度保障与产业集聚等因素在不同环节表现出差异化的协同作用。【结论】无人机产业的空间演化体现出以创新为核心的特征。未来应通过提升创新资源配置效率、完善产业协同体系、优化空间布局与应用生态, 推动产业集聚升级与区域协调发展。

**关键词:** 无人机产业; 空间格局; 影响因素; 产业链; 技术创新; 产业关联

DOI:10.18402/resci.2025.08.11

## 1 引言

随着科技的迅猛发展和国家战略的引领, 低空经济正逐步成为全球经济和航空产业的重要组成部分。当前, 低空经济不仅是战略性新兴产业的重要组成部分, 也被视为新质生产力的重要体现<sup>[1-4]</sup>。无人机产业作为低空经济的核心驱动力<sup>[5]</sup>, 展现出巨大的发展潜力和广泛的应用前景。无人机在物流、农业、城市治理、应急救援等领域的广泛应用, 显著提升了空域资源利用效率和社会生产效益<sup>[6,7]</sup>, 在促进经济转型升级中发挥着日益关键的作用。为推动无人机产业的发展, 中国政府出台了一系列政策措施, 自2010年国务院和中央军委发布《关于深化我国低空空域管理改革的意见》以来, 我国逐步放开低空空域管控, 为无人机产业发展营造了良

好的制度环境<sup>[8]</sup>。在此背景下, 系统研究无人机产业的空间分布特征及其演化规律, 对于把握低空经济发展趋势、优化产业布局具有重要现实意义。

产业空间格局的演化及其动力机制一直是经济地理学与区域研究的重要议题。早期的产业区位理论, 如韦伯的最优区位理论<sup>[9]</sup>和胡佛的工厂区位理论<sup>[10]</sup>, 强调交通成本、资源禀赋和规模经济等静态因素对产业布局的决定作用<sup>[11]</sup>, 在解释传统制造业区位行为中具有广泛适用性。然而, 随着经济网络化及高技术产业的兴起, 这些传统理论在解释新兴、知识密集型产业的空间分布方面具有局限性<sup>[12]</sup>。对此, 学者们提出了以创新资源、制度环境和网络联结为核心要素的理论框架。例如, 集聚理论通过知识外溢、专业劳动力市场和中介服务共享等

收稿日期: 2025-03-12; 修订日期: 2025-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371188); 教育部人文社会科学重点研究基地重大招标项目(22JJD790016); 中宣部宣传思想文化青年英才资助项目(2021QNYC073)

作者简介: 韩留明, 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 研究方向为产业地理与区域发展。E-mail: hanliuming2023@163.com

通讯作者: 赵建吉, 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为产业集群与区域创新。E-mail: zhaojianji@126.com

机制解释技术密集型产业的集聚优势<sup>[13]</sup>;新制度经济学强调政策引导、制度安排在高新技术产业区位中的关键作用<sup>[14]</sup>;演化经济地理学进一步指出产业空间布局具有路径依赖性,区域先发优势、产业积累与知识基础可持续推动新兴产业沿原有轨迹深化演进<sup>[15]</sup>。

在此基础上,已有实证研究发现,新兴产业普遍呈现显著的集聚性、多中心发展和路径依赖特征<sup>[16]</sup>。中国长三角、珠三角、京津冀等地区依托雄厚的创新资源与产业配套,形成了多个高技术产业集群,展现出由要素驱动向创新驱动的转型趋势<sup>[17]</sup>。以长三角新材料产业为例,区域创新一体化与地方创新合作网络强度存在“U”型关系,高质量的区域创新一体化有助于促进地方创新体系再造<sup>[18]</sup>。政府政策作为外部动力,通过设立高新区、出台财政补贴等措施,深刻重塑了区域产业格局<sup>[19]</sup>;企业创新能力、区域知识基础与社会网络等内在因素也构成了重要的空间演化机制<sup>[20,21]</sup>。Storper<sup>[22]</sup>和 Audretsch<sup>[23]</sup>进一步指出,认知邻近性、社会资本与创业导向对产业集聚与扩散具有重要影响。

尽管产业区位理论及其演化机制在传统及部分高技术产业中得到了广泛应用,但对无人机产业的空间格局演化研究仍显薄弱。现有关于无人机产业的研究大多聚焦于技术创新<sup>[24]</sup>、应用拓展<sup>[25]</sup>和监管<sup>[26]</sup>等方面,较少从产业空间区位的视角展开系统探讨。已有研究普遍缺乏对区位因素如何影响无人机产业布局演变的深入分析,也缺乏对低空经济兴起背景下无人机产业空间区位演化过程的系统性探讨。这在一定程度上限制了对无人机产业空间动态变化规律与发展机制的全面理解。

本文的创新主要体现在两个方面:①从时空演变视角出发,系统揭示中国无人机产业的空间分布特征及动态演化趋势,弥补现有研究多局限于技术或应用层面、缺乏对产业空间演变过程深入探讨的不足;②结合传统区位论、新经济地理学与演化经济地理学理论,构建综合指标体系,系统研究无人机产业空间格局的多元驱动因素,为理解其空间演化提供理论与实证支持。

## 2 研究框架

无人机产业不同于传统产业,作为战略性、创

新性和高技术密集型产业,其在发展过程中具备较强的前瞻性以及伴随着较大的不确定性<sup>[27]</sup>。无人机产业成长不仅依赖于区域和社会资源的支持,还受到政策环境、制度框架和产业集聚等因素的影响<sup>[28]</sup>。本文将从传统区位论、新经济地理学以及演化经济地理学的视角出发(图1),探讨影响中国无人机产业空间布局与发展的主要驱动因素。

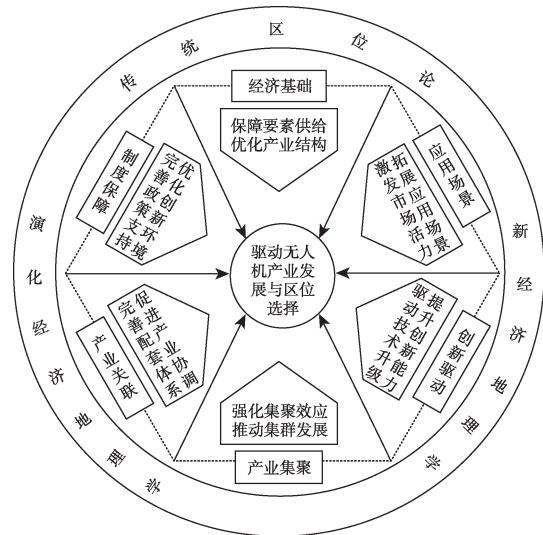


图1 无人机产业发展的驱动机制逻辑框架

Figure 1 Logical framework of driving mechanisms of UAV industry development

根据传统区位论,无人机产业作为高新技术产业,区域经济社会发展水平是其发展的基础性因素<sup>[29]</sup>。高水平的经济发展为无人机产业提供了充足的资金支持、完善的基础设施和广阔的市场空间,并促进产业创新的持续升级。随着产业结构的不断优化,无人机产业依托现有产业的协同效应,实现互补发展,进一步推动技术进步与产业升级<sup>[30]</sup>。与此同时,应用场景作为无人机产业成长的重要因素,决定了产品技术的落地路径和商业模式的可行性。除传统区位因素中的“市场容量”以外,还应关注新兴技术产品的适配空间与扩展潜力。此外,居民收入水平反映了对智能终端与服务的支付能力<sup>[31]</sup>。同时,空域资源的可利用性与创业生态的活跃度也影响着产业的落地效率和创新迭代速度<sup>[32]</sup>。

自21世纪以来,以Krugman与Fujita为代表的 新经济地理学派逐步强调制度转向与产业区位演化的紧密关联,认为良好的制度环境与集聚条件不

2025年8月

仅塑造了区域要素配置格局,也深刻影响高技术产业的空间集聚与成长路径<sup>[33]</sup>。在无人机产业发展早期扩张与制度探索阶段中,制度安排的有效性不仅体现在财政与政策支持力度上,更表现在政府如何通过政策激励、投资导向与营商环境优化引导产业生态系统的形成和演化。产业集聚因素作为推动高技术产业空间集群化与区域竞争力提升的关键机制,在无人机产业布局演化中发挥着不可忽视的作用<sup>[34]</sup>。集聚带来的知识溢出、技术共享与要素匹配效应,不仅降低了企业运营成本,也促进了产业链协同与创新扩散,进而增强区域产业体系的整体活力与稳定性<sup>[35]</sup>。

演化经济地理学关注产业路径依赖与演化路径的形成机制,强调区域内既有产业结构与技术能力如何通过产业之间的技术和知识关联驱动新兴产业的生成与成长<sup>[36]</sup>。无人机产业的发展并非孤立发生,而是嵌入于电子信息、软件、科技服务等相关产业网络之中。产业关联不仅带来潜在的技术协同与市场互补,也有助于形成跨行业的知识融合和创新共创机制,为无人机产业提供持续演化所需的能力支撑和资源基础。创新发展能力作为突破路径依赖、实现新兴产业自主演进的关键机制<sup>[37]</sup>,在无人机产业空间格局中具有决定性作用。区域创新系统的成熟程度不仅取决于人力资本供给、研发投入力度,更依赖于技术产出的效率与应用转化的能力。从长期来看,只有具备持续创新能力的区域,才能在产业演化过程中保持领先,吸引高附加值企业的集聚与扩张。

### 3 研究对象、数据来源与研究方法

#### 3.1 研究对象

《2020年全球智库指数报告》指出,无人驾驶飞机(简称无人机),是一种通过无线电遥控设备或自主控制系统进行操作的飞行器,它具有不需要搭载飞行员即可自主完成飞行任务的能力。无人机由机载动力系统驱动,并通过远程操作或预设程序进行控制,能够执行多种任务,并可重复使用。虽然无人机上不载人,但其配备了自动导航系统和程序化控制器,能够自主飞行。地面人员、舰船或军舰上的遥控站可以通过雷达和其他设备对无人机进

行追踪、定位、遥控操作和数据传输。无人机集成了传感器、通信技术、数据处理、智能控制以及动力系统等多个先进技术,代表了信息时代技术集成的高度发展<sup>[38]</sup>。

从应用角度来划分,军用无人机和民用无人机是无人机的两个主要大类,而在民用无人机中又可以细分为专业级无人机和消费级无人机两个方向<sup>[39]</sup>。由于军用无人机系统的使用场景与民用存在较大差异,其产业链的复杂程度会明显高于民用无人机,且军事无人机的数据不易获取,本文研究对象聚焦于民用无人机产业。

#### 3.2 数据来源

本文选取中国280个地级市作为研究区域(因数据缺失未包含港澳台地区及西藏自治区),围绕无人机产业链的全流程展开分析。借鉴相关产业链划分框架与空间分析方法,本文将无人机企业划分为上游设计与测试环节、中游整机制造环节以及下游运营服务环节<sup>[40]</sup>。2010—2022年为无人机产业政策逐步放开和快速发展的关键期,数据较为完整和连续。企业数据来源于天眼查网站(<https://www.tianyancha.com>),通过关键词“多旋翼飞行器 OR 多旋翼无人机 OR 旋翼飞行器 OR 旋翼系统 OR 旋翼机 OR 无人机 OR 飞行器”进行检索<sup>[41]</sup>。为确保数据聚焦于低空经济相关领域,本文结合企业经营范围与产品应用场景,剔除涉及航天器、高轨飞行器、空间飞行平台等明显超出低空空域范围的企业。经过筛选后,截至2024年12月31日,共筛选出2010—2022年间在全国280个地级市中状态为“正常、存续、在业、注销、吊销、撤销、已歇业”的无人机相关企业共计45070家。为准确识别企业所属产业链环节,本文依据既有研究方法<sup>[42]</sup>,结合企业经营范围信息,通过关键词自动识别筛选出38133家企业;其余未区分的6937家则依据行业分类及经营内容进行人工甄别和匹配。部分企业的经营范围覆盖上、中、下游多个环节,因此在分类统计时同一企业可能被计入多个环节。共识别出无人机上游、中游和下游企业数量为21112、24663和31473家(表1)。运用Python通过百度开放平台(<https://lbsyun.baidu.com>)获取被识别企业注册地址的经纬度坐标后,将其坐标转换成WGS1984坐标。

表1 无人机产业链分类

Table 1 Classification of UAV industry chain

产业链	关键词筛选	企业数/家
上游	系统设计,系统研发,无人机设计,技术研发,无人机研发,零部件设计,配件研发,材料研发,飞行测试,性能测试,整机测试,芯片研发,传感器研发,飞控算法,控制算法,AI算法,风洞试验,测试验证,嵌入式开发,通信协议,软件开发,飞行器的研发,飞行控制系统研发	21112
中游	整机制造,组装,无人机制造,无人飞行器制造,无人机生产,系统集成,飞行平台,硬件集成,电子集成,动力系统,传感器,电池,嵌入式系统,纤维材料,复合材料,合成纤维,图像识别,导航系统,系统仿真,电子元器件,电子器件,电调,旋翼,通信模块,图传模块,机架,制造,组件制造,零部件生产,配件的生产,飞行控制系统,无人机系统,无人飞行器系统,导航模块	24663
下游	无人机运营,运营服务,飞行服务,测绘服务,航拍,培训服务,无人机服务,农业喷洒,植保,电力巡检,线路巡检,林业巡检,森林防火,环境监测,生态监测,数据采集,数据处理,物流配送,物资运输,安防监控,无人机应用,市场应用,客户需求,应用解决方案,无人机销售,操作培训,无人机培训,飞手培训,教培课程,飞防服务,城市治理,交通巡查,边境巡逻,应急救援,自然灾害监测,灾情评估,视频拍摄,技术推广,电影航拍,活动直播,市场推广,客户服务,售后服务,维保服务,服务外包	31473

图2展示了2010—2022年中国无人机产业企业数量变化趋势。2016年之前,中国无人机产业企业数量很少。2015年6月,国务院出台《中国制造2025》,将无人机产业作为我国现阶段的十大重点领域之一,推动中国无人机产业步入新阶段,无人机企业数量增长速度加快。2019年以后由于市场竞争激烈、政策监管加强、技术创新门槛提高、经济环境变化(如疫情和全球经济增长放缓)、行业整合等多重因素的综合作用,无人机企业单年增加量逐渐减少。但累计数量仍持续上升。

### 3.3 空间分析方法

#### 3.3.1 核密度分析

通过对企业经纬度位置点数据的核密度分析,可视化表达产业分布格局与演化规律<sup>[43]</sup>,其公式为:

$$f(y) = \frac{1}{nh} \sum_{z=1}^n k\left(\frac{y-y_z}{h}\right) \quad (1)$$

式中: $k(\cdot)$ 为核函数方程; $(y-y_z)$ 为估计点 $y$ 到样本点 $y_z$ 的距离; $h$ 为带宽; $n$ 为无人机产业企业数量。

#### 3.3.2 空间自相关

空间自相关分析是通过空间自相关指数来反

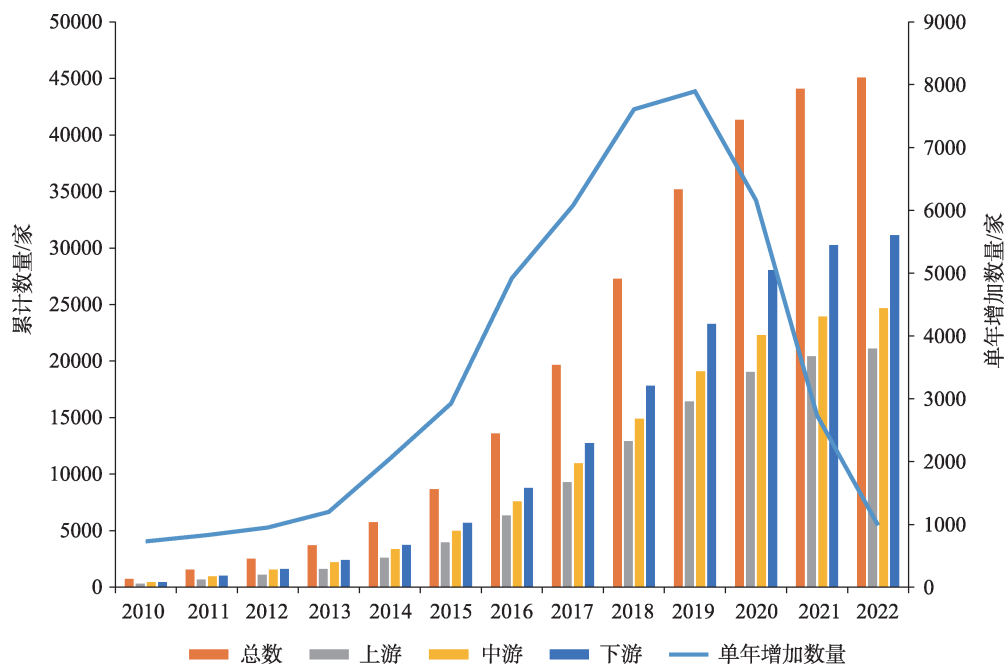


图2 2010—2022年中国无人机产业企业数量

Figure 2 Number of enterprises in China's UAV industry, 2010-2022

2025年8月

映自然或社会要素在空间上的关联程度,揭示其空间分布规律的一种空间统计方法<sup>[44]</sup>。其公式如下:

$$\text{Moran's } I = 280 \times \frac{\sum_{i=1}^{280} \sum_{j=1}^{280} W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{280} \sum_{j=1}^{280} W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: $x_i$ 和 $x_j$ 分别为*i*市和*j*市无人机企业数量; $\bar{x}$ 为无人机企业数量的平均值; $W_{ij}$ 为空间权重。全局空间自相关系数取值范围为[-1, 1],当全局 Moran's *I* > 0 时,表明因子在空间上是聚集的;当全局 Moran's *I* < 0 时,表明因子在空间上呈现分散现象;当全局 Moran's *I* = 0 时,表明因子是随机分布的。

### 3.3.3 地理探测器

地理探测器是用于探测地理现象的空间分异性并揭示其驱动因子的统计学方法,它不仅可以探测单一因子驱动力,也可以探索两个因子交互作用的驱动力<sup>[45]</sup>。本文通过地理探测器识别无人机企业分布的影响因素及因子间的交互作用,公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\beta^2} \sum_{p=1}^L N_p \beta_p^2 = 1 - \frac{SSR}{SSQ} \quad (3)$$

$$SSR = \sum_{p=1}^L N_p \beta_p^2$$

$$SSQ = N\beta^2$$

式中: $q$ 为影响因素的探测力值, $q$ 值的增大表示该自变量对无人机产业企业在市级行政单元数量分布的解释力增强,反之则越弱; $N$ 和 $N_p$ 分别为整体和次一级区域内的总样本数; $L$ 为各因素的分类; $\beta^2$ 和 $\beta_p^2$ 分别为整体和次一级区域因变量样本离散方差; $SSR$ 和 $SSQ$ 分别为层内方差和全区总方差。因子交互探测旨在研究影响因子之间的相互作用,以确定它们对无人机产业时空演变格局的影响是增强还是减弱,或者这些影响是否彼此独立。

### 3.4 指标选择

结合前文的分析和已有研究,本文选取经济基础、应用场景、制度保障、产业集聚、产业关联、创新驱动6个维度,构建中国无人机产业空间格局影响因素指标体系(表2)。**①经济基础:**选取人均GDP( $X_1$ )表征区域经济发展水平,每百人互联网宽带用户数( $X_2$ )表征数字基础设施建设,衡量区域在数字化支撑方面的能力,以第三产业增加值占GDP比重( $X_3$ )衡量产业结构优化水平。**②应用场景:**选取城镇居民人均可支配收入( $X_4$ )衡量市场潜力,民用机场数量( $X_5$ )表征空域条件,单位面积地区生产总值( $X_6$ )反映经济密度,私营及个体从业人员占就业人

表2 中国无人机产业空间格局影响因素指标体系

Table 2 Indicator system for spatial pattern influencing factors of China's UAV industry

维度	变量	变量描述	单位	变量表示
经济基础	经济发展	人均GDP	元/人	$X_1$
	数字基础设施	每百人互联网宽带用户数	户/百人	$X_2$
	产业结构	第三产业增加值占GDP比重	%	$X_3$
应用场景	市场潜力	城镇居民人均可支配收入	元/人	$X_4$
	空域条件	民用机场数量	个	$X_5$
	经济密度	单位面积地区生产总值	万元/km <sup>2</sup>	$X_6$
	创业精神	私营及个体从业人员占就业人员比重	%	$X_7$
制度保障	财政状况	一般公共预算收支占GDP比重	%	$X_8$
	对外开放	进出口总额占GDP比重	%	$X_9$
	营商环境	政府财政支出占GDP比重和税金附加占利润总额比重(熵值法)	—	$X_{10}$
产业集聚	开发区	省级与省级以上的开发区数量	个	$X_{11}$
	高水平企业	专精特新企业中无人机企业数	家	$X_{12}$
产业关联	电子制造业	主要业务为计算机、通信和其他电子设备制造的企业数	家	$X_{13}$
	软件和信息技术	主要业务为软件开发和信息技术服务的企业数	家	$X_{14}$
	科技服务业	主要业务为科学研究和技术服务的企业数	家	$X_{15}$
创新驱动	人力资本	每万人在校大学生数	人/万人	$X_{16}$
	科技投入	科学技术支出占一般公共预算支出的比重	%	$X_{17}$
	创新产出	无人机专利申请数	个	$X_{18}$

员比重( $X_7$ )代表创业精神。③制度保障:选取一般公共预算收支占GDP比重( $X_8$ )作为衡量政府财政能力的指标,进出口总额占GDP比重( $X_9$ )反映区域对外开放程度,政府财政支出占GDP比重和税金附加占利润总额比重( $X_{10}$ )量化营商环境质量<sup>[46]</sup>。④产业集聚:选取省级与省级以上的开发区数量( $X_{11}$ )代表开发区水平,以专精特新企业中的无人机企业数量( $X_{12}$ )反映高水平企业。⑤选取主要业务为计算机、通信和其他电子设备制造的企业数( $X_{13}$ )、主要业务为软件开发和信息技术服务的企业数( $X_{14}$ )、主要业务为科学研究和技术服务的企业数( $X_{15}$ )作为衡量区域产业关联度的核心指标,表征支撑无人机产业链条的协同能力与相关多样性水平。⑥创新驱动:选取每万人在校大学生数( $X_{16}$ )表征人力资本供给水平,以科学技术支出占一般公共预算支出比重( $X_{17}$ )衡量区域科研投入强度,以无人机专利申请数量( $X_{18}$ )反映区域在无人机领域的创新产出能力。

## 4 空间格局及其演变

### 4.1 总体特征

通过计算全局莫兰指数(表3)可以发现,2010—2022年中国无人机产业的莫兰指数均为正值,且均通过显著性检验( $P < 0.1$ ),表明产业空间分布整体呈现显著的正向空间自相关性,具备明显集聚特征。其中,2010年莫兰指数为0.112,2016年下降至

0.093,并在2016—2021年持续下降,但到2022年上升至0.144,显示产业空间集聚程度在阶段性波动中整体增强,尤其在2022年达到较高水平。2016—2021年莫兰指数的持续下降可能与2015年6月国务院出台的《中国制造2025》规划有关,该规划将无人机产业列为重点发展领域,推动了全国范围内企业快速扩张,使产业逐渐扩散到更多城市,产业链布局趋于分散,从而使原有较高的空间集聚程度相对减弱。

借助 ArcGIS Pro 3.4 软件,绘制中国无人机产业企业数量及上游、中游以及下游构成分布图(图3)。中国无人机产业的主要分布区域集中在珠三角、长三角和京津冀地区,这些地区集中了大量的无人机企业,且产业链相对完善。此外,省会城市的数量也较为集中,形成了一定的产业集聚区。产业链构成方面,除了珠三角、长三角和京津冀地区以及省会城市外,其他地区大多数城市的无人机产业链较为单一,通常只涵盖上游、中游或下游中的某一个环节。下游运营环节在很多城市的企业中占据主导地位,而上游设计与测试环节、中游整机制造环节较为薄弱,导致产业链不够完善,整体创新能力和市场竞争力较为局限。因此,除了这些核心区域之外,其他城市的无人机产业链发展仍然面临部分环节缺失、企业间协同水平较低等问题。

### 4.2 演化格局

依据相关研究以及相关政策背景对无人机产业发展阶段的划分,为确保研究时段具有代表性与分析价值,并充分反映产业发展的阶段性特征,本文综合考虑国务院2015年出台的《中国制造2025》等关键政策节点,选取2010年、2016年和2022年3个具有重要意义的时间点开展分析。从图4可以看出,2010年无人机企业的高核密度区域主要集中在长三角、珠三角和京津冀地区,其中珠三角的核密度值最高,表明该地区具有显著的产业集聚效应;到2016年,整体核密度值显著提升,但集聚效应呈现分散化趋势,且高密度区域仅集中于珠三角;至2022年,整体核密度值较2016年有所下降,但珠三角依然维持高密度核心地位。此外,长三角和京津冀地区的高核密度区域仍然显著,其中京津冀地区出现了两个新的高密度核心区域,表明该地区产业

表3 中国无人机产业发展的全局莫兰值及检验结果

Table 3 Global Moran's  $I$  values and test results of the development of China's UAV industry

年份	Moran' $I$	Z值	P值
2010	0.112	3.820	0.000
2011	0.145	4.886	0.000
2012	0.122	4.300	0.000
2013	0.106	4.103	0.000
2014	0.102	3.640	0.000
2015	0.104	4.120	0.000
2016	0.093	3.924	0.000
2017	0.082	3.425	0.001
2018	0.067	2.850	0.004
2019	0.058	2.510	0.012
2020	0.073	2.651	0.008
2021	0.047	1.878	0.060
2022	0.144	4.724	0.000

2025年8月

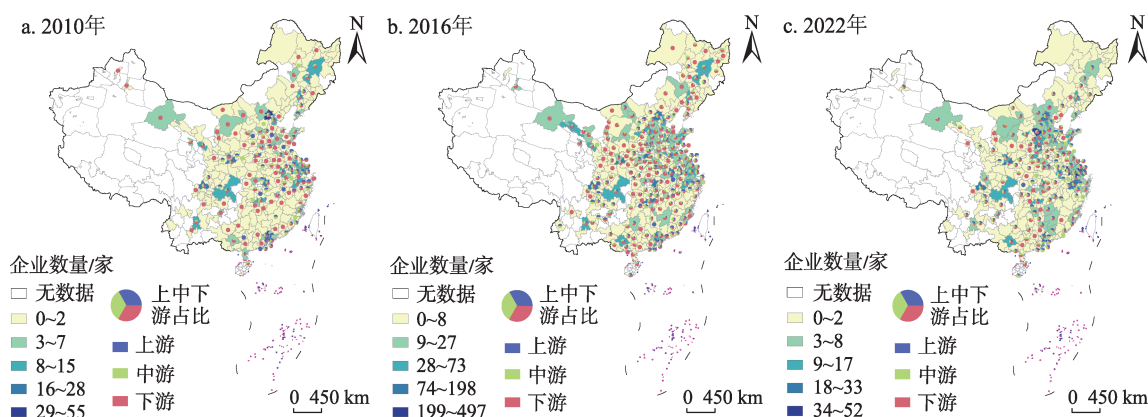


图3 2010、2016、2022年中国无人机产业企业数量及上中下游构成

Figure 3 Number of enterprises in China's UAV industry and their upstream, midstream, and downstream composition in 2010, 2016, and 2022

注:基于自然资源部标准地图服务系统的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

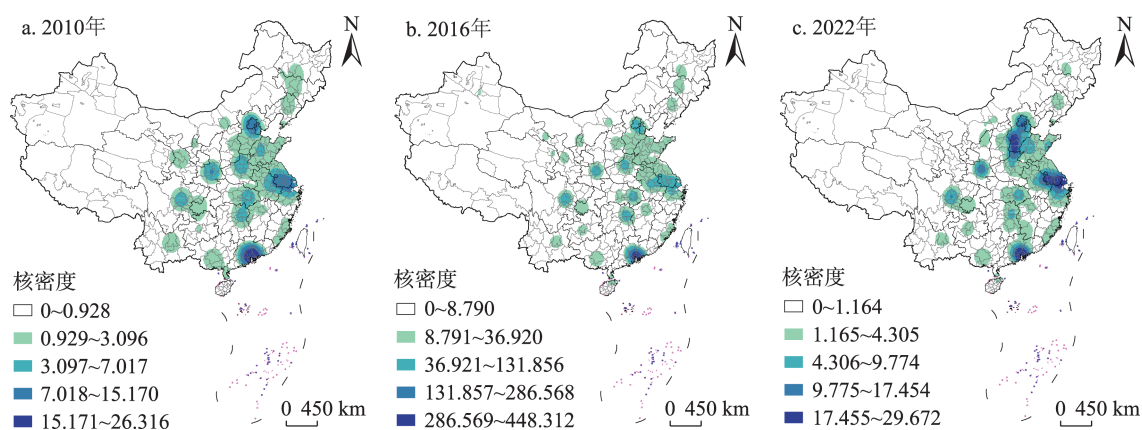


图4 2010、2016、2022年中国无人机产业核密度演化

Figure 4 Kernel density evolution of China's UAV industry in 2010, 2016, and 2022

注:基于自然资源部标准地图服务系统的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

集聚的扩展性和空间分布的多样化趋势。这一过程表明,2010—2022年,中国无人机产业的空间分布从珠三角、长三角和京津冀为核心的高密度集聚区域,逐步扩展至其他地区,呈现出区域布局多样化和扩展性的演化趋势。

## 5 影响因素分析

### 5.1 单因子探测分析

根据地理探测器对18个影响因子进行的单因子探测结果(表4),从整体看,推动无人机产业链发展的因素具有多元复合特征。创新驱动是影响无人机产业空间格局的第一驱动力,其中创新产出这一指标的解释力达0.404,如深圳无人机专利申请量持续领先,支撑了大疆等企业在飞控系统与智能识别技术领域的全球优势;科技投入和人力资本的解

释力也达到0.147和0.140。产业关联也对于无人机产业空间格局产生重要影响,其中软件和信息业与科技服务业等为无人机产业的发展提供了技术服务等关键支撑,解释力达到0.365、0.324。应用场景也是无人机产业快速发展的重要推动力,其中经济密度这一指标的解释力为0.288,这也体现了无人机产业作为新兴产业的特殊性。与此同时,经济基础、制度保障和产业集聚依然是影响无人机产业空间格局的重要因素。总体来看,创新驱动、产业关联、应用场景是无人机产业空间格局的核心影响因素。而经济基础、制度保障与产业集聚同样也发挥了重要作用。

从产业链环节来看,产业链不同环节在空间格局上表现出显著的差异化特征,体现出产业内部功

表4 中国无人机产业空间格局影响因素地理探测结果

Table 4 Geodetector results for spatial pattern influencing factors of China's UAV industry

变量	总体	上游	中游	下游
$X_1$	0.127***	0.139***	0.118***	0.117***
$X_2$	0.040***	0.039***	0.030***	0.043***
$X_3$	0.108***	0.113***	0.093***	0.103***
$X_4$	0.102***	0.112***	0.095***	0.108***
$X_5$	0.030***	0.029***	0.023***	0.032***
$X_6$	0.288***	0.272***	0.238***	0.219***
$X_7$	0.015***	0.013***	0.011***	0.014***
$X_8$	0.115***	0.120***	0.116***	0.109***
$X_9$	0.068***	0.075***	0.063***	0.061***
$X_{10}$	0.017***	0.022***	0.018***	0.014***
$X_{11}$	0.003***	0.004***	0.004***	0.003***
$X_{12}$	0.104***	0.109***	0.079***	0.086***
$X_{13}$	0.073***	0.061***	0.059***	0.042***
$X_{14}$	0.365***	0.347***	0.291***	0.319***
$X_{15}$	0.324***	0.343***	0.349***	0.350***
$X_{16}$	0.140***	0.145***	0.132***	0.159***
$X_{17}$	0.147***	0.155***	0.141***	0.137***
$X_{18}$	0.404***	0.428***	0.352***	0.397***

注:\*\*\* $p < 0.01$ 。

能分工与区域要素禀赋的协同适配关系。上游环节主要依赖创新驱动与产业关联支撑,其中创新产出在上游的解释力达到0.428,人力资本和科技投入的解释力分别为0.145和0.155,显示出上游对高强度研发投入和技术积累的高度依赖。同时,电子制造业企业数和科技服务业的解释力分别为0.061和0.347,表明产业关联在硬件制造与技术支撑方面具有关键作用。中游环节更加依赖产业关联的综合支撑。科技服务业在中游的解释力达到0.349,软件和信息业为0.291,反映出中游在整机制造、系统集成等过程中对技术服务和智能系统的高度依赖。这一阶段的企业往往位于基础设施完备、技术服务体系成熟的都市,表现出较强的集聚趋势,形成以整机制造为核心的产业节点。下游环节则主要受到应用场景和创新驱动等因素的推动,其中经济密度(0.219)和人力资本(0.159)的解释力较高,说明该环节对市场容量、终端需求和技术应用能力有较强依赖,尤其是在农业、物流、安防等典型领域,区域市场活跃程度与产业落地能力密切相关。

## 5.2 交互探测分析

地理探测器两因子交互探测结果显示,多个影响因素之间存在显著的协同增强效应,进一步强化了对无人机产业空间分布格局的解释力(图5)。从整体来看,创新产出与多个关键变量之间的交互作用尤为突出,与电子制造业和人力资本的交互解释力分别高达0.676和0.596,远超单因子探测值。这表明,创新产出不仅依赖研发能力本身,也高度依赖产业基础与人才支撑。电子制造企业为创新成果的落地提供了载体,而高素质人力资本则通过技术转化和企业孵化推动产业集聚与扩张。此外,经济密度在多组交互中也展现出较强的增效作用,其与人力资本的交互解释力高达0.737,说明经济活动集中区域汇聚了大量资源要素,为人才流动、产业配套和技术扩散提供了优越环境,进一步增强了对产业空间布局的整合能力。从交互结果看,表征产业关联的科技服务业和软件信息业也与创新产出、科技投入、人力资本等因素形成高度协同关系,交互解释力普遍超过0.5,凸显了产业链内部知识密集型环节之间的耦合效应。产业空间格局已不再是由单一资源禀赋驱动,而是多重要素在创新链条和产业网络中的作用结果。总体而言,创新驱动、应用场景和产业关联在交互机制中占据核心地位,通过协同增强效应系统性推动了无人机产业的集聚与扩散。

基于无人机产业链上中下游不同环节的交互探测分析结果可以看出,各环节驱动因素的协同作用存在显著差异。在上游环节中,创新产出与人力资本、研发投入及经济密度之间的交互作用较强,交互 $q$ 值普遍超过0.5,最高达到0.665,表明技术创新和人才集聚在上游推动产业空间格局形成中发挥了关键作用。同时,市场需求与制度保障的配合使得交互解释力进一步增强,推动了上游产业布局优化。中游环节中,产业关联与创新能力的提升之间的交互作用显著,交互 $q$ 值多在0.5以上,突出体现了产业链内外的紧密协作和技术进步对于中游产业空间分布的重要影响。下游环节的交互主要体现在经济基础、应用场景多与创新驱动的共同作用上,交互 $q$ 值同样保持在0.4~0.6区间,显示下游产业更侧重于市场需求与应用环境适应性,创新能

2025年8月

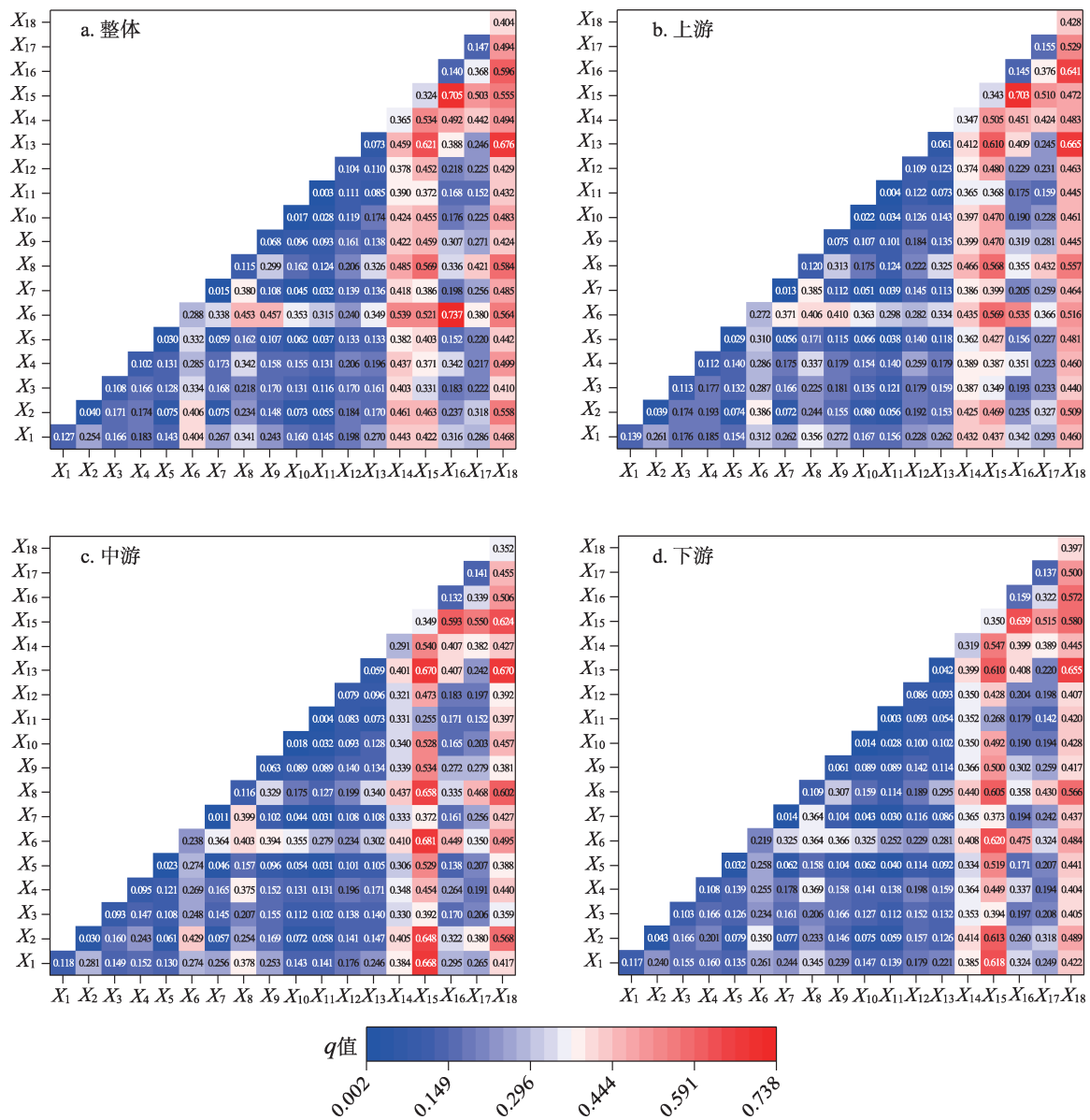


图5 2010—2022年中国无人机产业时空分布影响因子交互探测结果

Figure 5 Interaction detection results for spatiotemporal distribution influencing factors of China's UAV industry, 2010-2022

力则作为桥梁和催化剂发挥关键作用。总体来看,创新驱动贯穿产业链各环节,是影响无人机产业空间格局的重要交互因素,而经济基础、市场需求、制度保障和产业关联则在不同环节展现出各自独特的协同影响,推动产业链上下游的差异化发展和合理布局。

## 6 讨论、结论与政策启示

### 6.1 讨论

本文聚焦中国无人机产业的空间格局演化及其驱动机制,研究发现创新驱动是影响无人机产业

空间格局的第一因素,这与毛丰付等<sup>[47]</sup>在数字产业研究中强调技术创新和人力资本的重要性相一致;演化经济地理学强调的产业关联排名其次,与叶琴等<sup>[42]</sup>在人工智能产业中的发现相呼应,表明新兴产业的发展依赖于相关产业的支撑基础;应用场景的作用排名第三,表明培育应用场景能够加速推动新兴产业的发展和壮大。此外,经济基础、制度保障、产业集聚也发挥了重要作用,表明无人机产业作为新兴产业,虽然传统的区位因素对其空间布局依然起到一定作用,但是创新驱动、产业关联、应用场景

等新因素的作用更为凸显,这也为新兴产业的培育提供了一定的路径参考。

本文主要采用了空间统计方法分析中国无人机产业的空间格局,虽然为无人机产业的空间演化提供了重要的实证支持,但仍有一些局限。一方面,企业数量虽可反映产业分布,但在衡量产业发展水平和能级方面相对不足;未来可引入更精确的指标和数据,如企业产值、营业收入、专利数量与类型等。另一方面,本文未深入探讨企业间的关联关系,后续研究可进一步构建无人机产业的创新网络,从网络结构与节点互动角度揭示其演化机制与创新路径。

## 6.2 结论

本文基于核密度分析、空间自相关和地理探测器等空间统计方法,系统分析了中国无人机产业的空间格局演化特征及其影响因素,得出以下结论:

(1)中国无人机产业呈现显著的空间集聚特征,核心区主要分布在珠三角、长三角和京津冀等国家级城市群,空间分布由“点状分布”逐步向“多核集聚”演变,产业集聚水平持续增强。

(2)创新驱动、产业关联与应用场景是塑造无人机产业空间格局的核心影响因素,贯穿于产业链上中下游各环节。

(3)创新因素与人力资本、科技服务、产业基础等要素形成显著协同效应,推动产业集聚与扩散;与此同时,经济基础、制度保障与产业集聚等因素在不同环节中表现出差异化的协同作用。

## 6.3 政策启示

基于以上研究,本文提出如下政策建议:

(1)优化空间布局与产业发展环境,推动区域协调发展。持续支持珠三角、长三角、京津冀等核心区域发展无人机产业,营造有利于集聚的政策与服务环境。鼓励核心区与周边区域加强协同联动,各地应结合区域资源禀赋和应用优势,积极拓展农业、物流、安防等重点应用场景,推动技术落地与市场培育,释放区域市场潜力,增强产业发展的空间适应性。

(2)提升创新资源配置效率,强化自主研发能力。围绕关键核心技术开展攻关,推动企业、高校和科研机构深度协同,完善多主体协同创新机制。

加快构建高水平科技创新平台和成果转化体系,完善人才培养与引进机制,提升科技成果转化与产业化能力。通过优化财政投入结构、健全知识产权保护与激励制度,夯实无人机产业技术基础,持续增强核心竞争力。

(3)完善产业支撑体系,强化上下游协同与产业关联。以产业链整合为核心,推动制造、技术服务、软件信息等环节的有机协作,构建高效协同的产业网络体系。鼓励龙头企业牵头建设产业联盟或创新联合体,增强中小企业与配套服务机构间的联动,提升整体产业配套能力。通过优化产业政策、鼓励开放合作,增强产业链的系统性和抗风险能力。

## 参考文献(References):

- [1] 梁圣蓉, 罗良文. 新时代加快形成新质生产力的焦点难点与关键路径[J]. 当代经济管理, 2024, 46(7): 10-17. [Liang S R, Luo L W. Accelerating the formation of new quality productive forces in the new era: Focus, difficulties, and key pathways[J]. Contemporary Economic Management, 2024, 46(7): 10-17.]
- [2] 钟成林, 胡雪萍. 低空经济高质量发展的新质生产力逻辑与提升路径[J]. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2024, 41(5): 84-93. [Zhong C L, Hu X P. The new quality productivity logic and promotion path for high-quality development of low altitude economy[J]. Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences), 2024, 41(5): 84-93.]
- [3] 沈映春. 低空经济:“飞”出新赛道[J]. 人民论坛, 2024, (8): 74-79. [Sheng Y C. Low-altitude economy: “Flying” out of a new track[J]. People's Tribune, 2024, (8): 74-79.]
- [4] 赵建吉, 闫明涛, 王艳华. 新质生产力发展水平测度: 指标与数据[J]. 河南大学学报(社会科学版), 2024, 64(6): 7-13, 152. [Zhao J J, Yan M T, Wang Y H. Measurement of the development level of new productive forces: Indicators and data[J]. Journal of Henan University (Social Sciences), 2024, 64(6): 7-13, 152.]
- [5] 欧阳桃花. 低空经济的技术创新与场景创新[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024, (1): 57-68. [Ouyang T H. Technological innovation and scenario innovation of low-altitude economy[J]. Frontiers, 2024, (15): 57-68.]
- [6] 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. [Hong Q L. Conceptual characteristics, development conditions, and promotion measures of low-altitude service industry[J]. Economic Review Journal, 2024, (8): 45-52.]
- [7] 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空智能网与无人机产业应用[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1441-1450. [Fan B K, Li Y, Zhang

2025年8月

- R Y. Initial analysis of low-altitude internet of intelligences (IOI) and the applications of unmanned aerial vehicle industry[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(9): 1441-1450.]
- [8] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. *经济纵横*, 2024, (8): 53-62. [Zhang X L, Huang W R. Development of low-altitude economy: Global trend, China's current situation, and promotion measures[J]. *Economic Review Journal*, 2024, (8): 53-62.]
- [9] Weber A. *Theory of the Location of Industries*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1929.
- [10] Hoover E M. An introduction to regional economics[J]. *The Economic Journal*, 1972, 82(328): 1447-1448.
- [11] 张悦, 来逢波, 程钰. 市域尺度上市企业数字化转型演变及对碳排放影响[J]. *经济地理*, 2024, 44(5): 106-116. [Zhang Y, Lai F B, Cheng Y. Evolution of digital transformation of listed companies at the prefecture level and its impact on carbon emissions[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(5): 106-116.]
- [12] 许吉黎, 叶玉瑶, 罗子昕, 等. 新发展格局下粤港澳大湾区高科技产业多尺度空间联系与政策启示[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(9): 1592-1605. [Xu J L, Ye Y Y, Luo Z X, et al. Multi-scalar spatial linkages initiated by high-tech industries in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and policy implications against the backdrop of China's new development paradigm [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(9): 1592-1605.]
- [13] 任亚文, 杨宇. 珠三角地区半导体产业布局特征及其区位关联模式[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(9): 1622-1634. [Ren Y W, Yang Y. Spatial distribution and location correlation of the semiconductor industry in the Pearl River Delta region[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(9): 1622-1634.]
- [14] 赵建吉, 王艳华, 苗长虹. 全球生产网络中领先企业战略合作伙伴对区域产业发展的影响: 以郑州富士康为例[J]. *经济地理*, 2025, 45(2): 1-11. [Zhao J J, Wang Y H, Miao C H. Impact of strategic partners of leading firms in global production networks on regional industry development: A case study of Foxconn in Zhengzhou[J]. *Economic Geography*, 2025, 45(2): 1-11.]
- [15] 李伟, 贺灿飞. 经济发展阶段、要素条件变化与区域产业演化路径: 后发国家视角[J]. *地理科学*, 2024, 44(6): 929-939. [Li W, He C F. Economic development stages, changing factor endowments and regional industrial development paths: A perspective from later-development countries[J]. *Geographical Science*, 2024, 44(6): 929-939.]
- [16] 周锐波, 沈乐, 黄安晓. 中国市域战略性新兴产业技术创新发展演化机制[J]. *经济地理*, 2024, 44(12): 121-131. [Zhou R B, Shen L, Huang A X. Evolutionary mechanisms of technology innovation of strategic emerging industries in China at the prefecture level[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(12): 121-131.]
- [17] 吴爱芝, 吕爽, 李国平. 沿海三大城市群发挥高质量发展动力源作用的创新驱动机制[J]. *经济地理*, 2024, 44(8): 17-24, 180. [Wu A Z, Lyu S, Li G P. Innovation-driven development mechanism for three major coastal urban agglomerations to play the role of engine of high-quality[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(8): 17-24, 180.]
- [18] 宓泽锋, 傅竞萱, 项煜辉, 等. 新兴产业区域创新一体化与地方化的关系探究: 以长三角新材料产业为例[J]. *世界地理研究*, 2023, 32(6): 87-97. [Mi Z F, Fu J X, Xiang Y H, et al. Research on the relationship between regional innovation integration and localization of emerging industries: A case study of new material industry in Yangtze River Delta[J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(6): 87-97.]
- [19] 张延吉, 黄宏祥, 林胜. 中国城市多中心空间结构的发育程度、基本模式及影响因素: 基于297个地级及以上城市的实证研究[J]. *地理科学*, 2024, 44(5): 766-774. [Zhang Y J, Huang H X, Lin S. Development degree, basic patterns and influencing factors of urban polycentric spatial structure in China: Based on empirical study on 297 prefecture-level or above cities[J]. *Geographical Science*, 2024, 44(5): 766-774.]
- [20] 丁建军, 刘贤, 王淀坤, 等. 国家级专精特新“小巨人”企业空间分布及其影响因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(10): 109-118. [Ding J J, Liu X, Wang D K, et al. Spatial distribution and influencing factors of China's national-level "Little Giant" enterprises[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(10): 109-118.]
- [21] 阎晓, 任苏平, 涂建军. 资源型城市知识基础演化及创新合作驱动机理[J]. *资源科学*, 2024, 46(10): 1912-1929. [Yan X, Ren S P, Tu J J. Change of knowledge base and the driving mechanism of innovation cooperation in resource-based cities[J]. *Resources Science*, 2024, 46(10): 1912-1929.]
- [22] Storper M. *Keys to the City: How Economics, Institutions, Social Interaction, and Politics Shape Development*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2013.
- [23] Audretsch D B. *The Entrepreneurial Society*[M]. New York: Springer, 2009.
- [24] 汤新民, 顾俊伟, 刘冰, 等. 低空监视技术及其发展趋势综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(6): 973-993. [Tang X M, Gu J W, Li B, et al. Review on low-altitude surveillance technology and its development trend[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Natural Science Edition)*, 2024, 56(6): 973-993.]
- [25] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平, 等. 无人机应用发展关键基础设施与低空公共航路网规划[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 977-988. [Liao X H, Xu C C, Ye H P, et al. Critical infrastructures for developing UAVs' applications and low-altitude public air-route network planning[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 977-988.]
- [26] 李大朋. 论面向人工智能的无人机监管法律变革[J]. *政法论丛*, 2023, (3): 90-101. [Li D P. Study on the reform of AI-oriented UAV regulatory legal system[J]. *Journal of Political Science and*

- Law, 2023, (3): 90–101.]
- [27] 郭丁铭. 低空智联视域下无人机的分类监管及其法律规制[J]. 江淮论坛, 2024, (6): 106–113. [Guo D M. Classification supervision and its legal regulation of UAVs from the perspective of low-altitude intelligent networking[J]. Jiang-huai Tribune, 2024, (6): 106–113.]
- [28] 沈映春. 低空经济的内涵、特征和运行模式[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 108–117. [Shen Y C. Low-altitude economy: Definition, characteristics and operation modes [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Edition of Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 108–117.]
- [29] 俞立平, 朱莹, 金鹏, 等. 数字化转型、高技术产业技术创新与成果转化[J]. 中国科技论坛, 2023, (12): 72–83. [Yu L P, Zhu Y, Jin P, et al. Digital transformation, technological innovation and achievement transformation of high-tech industries[J]. Forum on Science and Technology in China, 2023, (12): 72–83.]
- [30] 陈玮, 耿曙. 制度环境如何影响技术创新: 以技术周期为视角的考察[J]. 探索与争鸣, 2024, (7): 137–149, 179–180. [Chen W, Geng S. How the institutional environment affects technological innovation: Examination from the perspective of technological cycle [J]. Exploration and Free Views, 2024, (7): 137–149, 179–180.]
- [31] 张守忠, 吴相利. 中国重点生态功能区居民收入时空变化及驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 179–190. [Zhang S Z, Wu X L. Spatial-temporal changes and driving factors of residents' income in key ecological functional zones of China[J]. Economic Geography, 2023, 43(7): 179–190.]
- [32] 高志刚, 李明蕊, 韩延玲. 企业家精神对经济高质量发展的影响研究: 兼论数字普惠金融的调节作用[J]. 管理学刊, 2023, 36(2): 25–43. [Gao Z G, Li M R, Han Y L. Research on the influence of entrepreneurship on high-quality economic development: The moderating role of digital inclusive finance[J]. Journal of Management, 2023, 36(2): 25–43.]
- [33] 许吉黎, 黄耿志, 张虹鸥, 等. 可持续性转型视角下区域新兴产业形成的研究进展与展望[J]. 经济地理, 2022, 42(12): 142–151. [Xu J L, Huang G Z, Zhang H O, et al. Research progress and prospects on emerging industries in regions from the perspective of sustainability transitions[J]. Economic Geography, 2022, 42(12): 142–151.]
- [34] 毛艳华, 邱雪情, 荣健欣. 产业集群效应与企业数字化转型: 基于广东省制造业集群的调研[J]. 南方经济, 2024, (5): 150–166. [Mao Y H, Qiu X Q, Rong J X. Industrial clusters effect and enterprise digital transformation: A report based on manufacturing clusters in Guangdong Province[J]. South China Journal of Economics, 2024, (5): 150–166.]
- [35] 佟新华, 郭淑睿, 段海燕, 等. 资源产业依赖对中国资源型城市收缩的影响机制[J]. 资源科学, 2024, 46(10): 2022–2033. [Tong X H, Guo S R, Duan H Y, et al. Influencing mechanism of resource industry dependence on the shrinkage of China's resource-based cities[J]. Resources Science, 2024, 46(10): 2022–2033.]
- [36] 赵懋源, 杨永春. 中国城市本地知识相关性对新兴技术兴起的影响分析: 以新能源汽车产业为例[J]. 城市发展研究, 2024, 31(9): 7–12. [Zhao M Y, Yang Y C. Analysis of the influence of the relatedness of urban local knowledge on emerging technologies in China: A case study of new energy automobile industry[J]. Urban Development Studies, 2024, 31(9): 7–12.]
- [37] 练文华, 张晓平, 吴爱萍, 等. 中国光伏装备制造制造业空间布局演化及影响因素分析[J]. 地理研究, 2024, 43(3): 679–700. [Lian W H, Zhang X P, Wu A P, et al. Spatiotemporal evolution of photovoltaic equipment manufacturing industry in China and its influencing factors[J]. Geographical Research, 2024, 43(3): 679–700.]
- [38] 秦博, 王蕾. 无人机发展综述[J]. 飞航导弹, 2002, (8): 4–10. [Qin B, Wang L. Overview of UAV development[J]. Aerospace Technology, 2002, (8): 4–10.]
- [39] 廖小罕, 张捷, 黄耀欢. 浅析低空地理学的特征及其对地理学的拓展[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 551–564. [Liao X H, Zhang J, Huang Y H. Views on characters of low-altitude airspace geography and its impact on the geography development[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 551–564.]
- [40] 谭清美, 马俊华, Jhony C Y N. 基于“三条链”的无人机产业军民融合发展途径与策略[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(14): 122–130. [Tan Q M, Ma J H, Jhony C Y N. Research on the development path and strategy for the civil-military integration of the unmanned aerial vehicle industry based on the “Three Chain” [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2019, 36(14): 122–130.]
- [41] 李圆圆. 基于专利数据的无人机产业技术演化发展研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2024. [Li Y Y. Research on the Technological Evolution and Development of the UAV Industry Based on Patent Data[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2024.]
- [42] 叶琴, 徐晓磊, 胡森林, 等. 长三角人工智能产业空间格局及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, (3): 526–536. [Ye Q, Xu X L, Hu S L, et al. Pattern and impact factors of artificial intelligence industries distribution in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, (3): 526–536.]
- [43] 韩燕, 潘成, 金凤君, 等. 黄河流域数字经济产业空间格局演化及影响因素[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 488–504. [Han Y, Pan C, Jin F J, et al. Evolution and influencing factors of the spatial pattern of digital industry in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 488–504.]
- [44] 张赫, 黄雅哲, 王睿, 等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 744–755. [Zhang H, Huang Y Z, Wang R, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 744–755.]
- [45] 闫明涛, 李江苏, 闫明月. 资源型城市新旧动能转换的空间演化与影响机制[J]. 资源科学, 2024, 46(10): 1959–1975. [Yan M

2025年8月

- T, Li J S, Yan M Y. Spatial evolution and mechanism of influence of the transition from old to new economic drivers in resource-based cities[J]. Resources Science, 2024, 46(10): 1959–1975.]
- [46] 杨仁发, 魏琴琴. 营商环境对城市创新能力的影响研究: 基于中介效应的实证检验[J]. 调研世界, 2021, (10): 35–43. [Yang R F, Wei Q Q. Research on the impact of business environment on urban innovation capability: Based on the empirical test of mediation effect[J]. The World of Survey and Research, 2021, (10): 35–43]
- [47] 毛丰付, 高雨晨, 周灿. 长江经济带数字产业空间格局演化及驱动因素[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1593–1609. [Mao F F, Gao Y C, Zhou C. Evolution characteristics of spatial patterns of digital industry and its driving factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. Geographical Research, 2022, 41(6): 1593–1609.]

## Evolution characteristics and influencing factors of spatial pattern of China's unmanned aerial vehicle industry

HAN Liuming<sup>1</sup>, ZHAO Jianji<sup>1,2</sup>, YAN Mingtao<sup>1</sup>, WANG Yana<sup>1</sup>

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract: [Objective]** The unmanned aerial vehicle (UAV) industry is an important pillar of the low-altitude economy. A thorough analysis of the spatial pattern evolution characteristics and driving mechanisms of China's UAV industry can provide theoretical support and decision-making reference for the development of the low-altitude economy and the optimization of regional industrial layout. **[Methods]** Based on data from 45070 UAV enterprises across 280 prefecture-level cities in China from 2010 to 2022, kernel density estimation, spatial autocorrelation, and geodetector were employed to analyze the spatial pattern characteristics and influencing factors of the UAV industry in China. **[Results]** (1) The UAV industry demonstrated significant spatial agglomeration in regions such as the Pearl River Delta, Yangtze River Delta, and Beijing-Tianjin-Hebei region, and its spatial pattern evolved from scattered point distribution to multi-core agglomeration. (2) Innovation-driven development, industrial linkages, and application scenarios were the core factors shaping the spatial pattern of the UAV industry. (3) The synergistic effects between innovation output, human capital, and technological services were significant, while factors such as economic foundation, institutional support, and industrial agglomeration exhibited differentiated interactive effects. **[Conclusion]** The spatial evolution of China's UAV industry demonstrates innovation-centered characteristics. In the future, efforts should focus on improving the efficiency of innovation resource allocation, enhancing industrial collaboration mechanisms, optimizing spatial layout and application ecosystems to promote the upgrading of industrial agglomeration and coordinated regional development.

**Key words:** UAV industry; spatial pattern; influencing factors; industry chain; technological innovation; industrial linkage