

引用格式: 赵瑞彤, 胡海晨, 李斌, 等. 中国企业低空技术创新的组态机制[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1809-1820. [Zhao R T, Hu H C, Li B, et al. The configuration mechanisms of low-altitude technology innovation in Chinese enterprises[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1809-1820.] DOI: 10.18402/resci.2025.08.15

中国企业低空技术创新的组态机制

赵瑞彤¹, 胡海晨¹, 李斌², 郝国明³

(1. 石河子大学经济与管理学院, 石河子 832000; 2. 北京理工大学管理学院, 北京 100080; 3. 浪潮智能终端有限公司, 济南 250101)

摘要:【目的】针对低空技术创新的复杂性、颠覆性、立体性和前瞻性所带来的技术管理难题, 揭示企业低空技术创新的内外协同机制, 为新兴产业的技术布局与政策制定提供理论与实践指引。【方法】整合动态能力理论与资源依赖理论, 选取中国2023年参与低空技术创新的296家A股上市公司为样本, 运用模糊集定性比较分析(fsQCA)与机器学习方法, 探究企业低空技术创新的多元组态路径。【结果】研究发现: ①低空技术创新存在政策引导型、校企依赖型、校政依赖型、创新联合型和自主突破型5类等组态, 其核心驱动机制体现为动态能力与外部资源的非线性协同和动态转化; ②权变分析表明, 数智化转型、组织冗余和企业规模较大时, 会通过强化内部能力或重构外部依赖关系, 影响创新模式选择; ③机器学习结果验证了fsQCA结果的稳健性, 揭示了创新能力、政企关系与校企关系的关键作用。【结论】企业低空技术创新需基于内部能力与外部资源的精准匹配和有效协同, 综合考虑权变因素, 依据自身资源禀赋与外部环境动态灵活地选择适合自身的创新模式。

关键词: 低空经济; 技术创新; 动态能力; 资源依赖; fsQCA; 机器学习; A股上市公司; 中国

DOI: 10.18402/resci.2025.08.15

1 引言

低空经济作为新质生产力的重要形态, 通过对通航飞机、无人机、电动垂直起降飞行器等装备及其相关技术的综合应用, 将经济活动由平面拓展至立体空间, 成为我国经济高质量发展的重要引擎^[1]。2023年中央经济工作会议首次将低空经济确立为战略性新兴产业, 2024年、2025年全国两会连续将“低空经济”写入政府工作报告; 2024年低空经济市场规模已突破5000亿元, 预计2035年相关产业体量将达到3.5万亿元^[2,3]。统计数据显示, 截至2024年我国已形成涵盖744家通用航空企业、1.9万家无人机运营企业的全产业链生态, 低空经济应用场景正加速向城市治理、应急救援、现代农业、物流配送、生产管理、立体交通等领域延伸, 充分彰显出其

“空间赋能”的独特价值^[2,3]。

技术创新构成了低空经济发展的核心动能^[4], 直接决定了产业升级的路径与边界。低空经济要充分激发其渗透力, 亟须依靠低空技术创新在关键核心技术上实现突破。当前低空技术创新面临的主要困境表现为两个层面: ①核心技术自主创新能力薄弱。主控芯片、航空发动机等产业链上游核心部件国产化率低, 且飞行控制、智能避障等关键系统技术尚待突破^[5], 部分企业仍停留在仿制阶段, 尚难以形成有利的技术溢价空间^[6]。②企业、政府、高校、科研院所和用户之间的联动机制缺乏系统性, 资源共享与协调沟通机制不够完善^[5]。特别是企业在研发合作、成果转化、场景验证等环节难以获得高效支持, 技术创新生态系统协同效能不足^[6]。

收稿日期: 2025-05-22; 修订日期: 2025-07-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(24&ZD083); 国家社会科学基金一般项目(23BGL115); 兵团研究生科研创新项目(BTYJXM-2024-K71)

作者简介: 赵瑞彤, 男, 山东临沂人, 博士研究生, 研究方向为企业技术创新管理。E-mail: zhruitong@163.com

通讯作者: 胡海晨, 男, 四川南充人, 教授, 博士生导师, 研究方向为企业转型、企业创新管理。E-mail: 318499179@qq.com

上述现实困境深刻反映了低空技术创新过程中企业内部能力不足与外部协同不畅的问题。因此,要突破低空技术创新瓶颈,一方面,企业要不断整合和重构内部资源,以增强自身动态适应与创新能力;另一方面,企业要积极与政府、高校、产业链合作伙伴等外部主体协同互动,以更高效地获取外部资源,弥补自身能力短板。目前学术界对低空经济的研究多聚焦宏观政策、产业布局及其对经济增长的拉动效应^[6-8],对低空技术创新的概念内涵以及企业如何在复杂的技术产业生态中实现有效突破缺乏系统性、针对性的分析。已有文献虽指出国家需求^[1]、产业集群^[1]、数字化转型^[4]、基础设施建设^[7]等外部环境要素对低空技术创新存在影响,但鲜少从动态能力与资源依赖协同视角系统分析企业如何在复杂环境下实现低空技术突破。

基于此,本文从企业微观视角切入,整合动态能力理论与资源依赖理论,重点关注“内生动力”与“外部资源”如何在高度不确定的低空经济环境中实现有效耦合。本文通过模糊集定性比较分析(fsQCA)与机器学习相结合的方法,系统辨识企业低空技术创新的多元组态路径,并进一步探讨数智化转型、组织冗余等权变因素对企业在不确定环境中创新策略选择的影响。

2 理论分析与框架

2.1 低空技术创新的内涵

低空技术创新是低空经济发展的基石^[6],其本质是关键技术的自主研制^[1],其独特的发展路径和模式区别于传统产业技术创新的线性范式。其典型特征可以概括为“C-D-E-F”:即技术体系的复杂

性(Complexity)^[7]、技术经济的颠覆性(Disruptiveness)^[6]、技术空间的立体性(Elevation)^[8]和技术布局的前瞻性(Foresight)。这四大特征构成相互强化的有机整体:复杂性奠定技术基础,颠覆性释放经济动能,立体性拓展价值空间,前瞻性确保可持续发展。具体如下:

(1)技术体系的复杂性。低空技术创新涉及航空与宇航技术、信息与通信工程、控制科学与工程等多个学科交叉融合^[5,9],其发展要求技术成熟度和系统成熟度同步提升,因而突破了传统技术研发的线性思维,呈现出典型的非线性特征。

(2)技术经济的颠覆性。与数字技术相似,低空技术能够深度融合具体场景、重构生产要素配置范式、催生新经济形态^[2,6],驱动物流、农业、城市管理、应急救援等领域,实现商业模式与产业形态的颠覆式发展^[7],创造万亿级立体经济空间。

(3)技术空间的立体性。低空技术创新意味着“空间生产力”的升级^[4],通过技术手段重构人类对三维空间资源的利用方式,在有限空域内实现效率提升、服务升级和产业变革,是对低空空域资源的科学配置和对空间价值的深度挖掘^[10]。

(4)技术布局的前瞻性。低空技术发展处于市场与政策环境波动期^[6]。企业须具备前瞻布局能力,提前抢占新兴技术领域与产业链关键环节^[6],克服低空技术创新的可行性障碍与未来价值创造的不确定性^[2]。

基于上述特征,低空技术创新的内涵可以大致概括为:以空域资源为新要素载体,通过多学科交叉与应用场景深度融合,引起产业结构与价值链重塑的系统性创新行为(图1)。

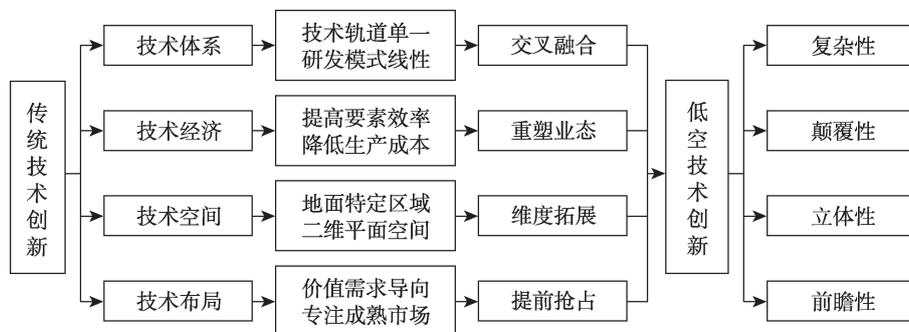


图1 低空技术创新的内涵与特征

Figure 1 Connotation and characteristics of low-altitude technological innovation

2025年8月

2.2 “动态能力-资源依赖”理论框架:企业低空技术创新的形成机制

低空技术创新的“C-D-E-F”特征要求企业的内部动态能力与外部资源依赖密切交互,形成完整的创新生态系统。

2.2.1 动态能力:企业低空技术创新的内部动力机制

低空技术创新的内部动态能力通过适应、吸收和创新3个维度,使企业能够动态重构内部资源并快速响应环境变化,进而主动识别和获取外部资源^[1]。

具体而言:①适应能力是企业响应外部变化、灵活调整内部结构的能力^[11]。企业快速调整战略和组织结构,有利于应对低空技术的立体性和前瞻性带来的政策波动、市场变化、技术标准复杂等不确定性。②吸收能力是企业将外部知识内化并予以应用的能力^[11]。低空技术的复杂性和颠覆性要求企业主动获取外部多学科知识,并内化为创新养分,从而弥补企业自身知识短板、促进技术成熟^[12]。③创新能力是低空技术创新的直接驱动力,即企业将资源聚焦于研发并融合各类新技术进而获得低空技术突破性成果的能力。

2.2.2 资源依赖:企业低空技术创新的外部协同机制

企业低空技术创新不仅需要依托于内部研发,更依赖于外部智力资源与多方协同,从而形成跨界融合的创新网络^[13]。资源依赖体现为企业在外部资源网络中的位置与互动模式^[14],即通过企业关系、政企关系与校企关系的协同运作,企业能够持续获得必要的产业、政策与知识资源^[7]。

具体而言:①企业关系,强调企业通过横向或纵向的战略合作整合产业资源。企业关系之所以能够为企业低空技术创新提供资源,源于企业之间的资源互补性与分工协同效应。低空技术的复杂性与跨领域性要求企业间以产业联盟等形式构建横向合作机制,从而快速弥补自身在特定技术领域的短板^[2]。纵向合作则指企业借助产业链上下游企业的专业优势与稳定资源,保障关键资源的持续供应,降低资源供给的不确定性^[9]。②政企关系,强调企业与政府紧密合作,从而更精准地获取政策支持与制度资源。低空经济发展离不开政府对核心技术突破和产业生态建设的战略引导与资源支持^[9]。政企关系的构建机制源于政府掌握空域资源和政

策准入,这使其对低空领域稀缺的制度资源和政策权力具有控制性^[10]。企业通过参与低空经济示范区建设、承担政府采购项目等方式获得政策认可和资源倾斜,降低市场准入与研发过程中的制度风险与不确定性。③校企关系,强调企业与高校和科研机构深度合作,从而获得前沿理论、人才资源和智力支持。高校和科研机构在基础理论研究和前沿技术开发中具备优势地位^[15]。通过联合实验室等产学研深度合作,企业可以迅速引进并内化前沿技术,实现技术突破与场景创新的有机融合^[1]。

2.2.3 “D-D”理论框架:低空经济场景下动态能力与资源依赖的交互作用

基于上述分析,本文尝试整合动态能力理论和资源依赖理论,提出一个低空技术创新的D(Dynamic)-D(Dependence)理论框架,用以系统阐释企业如何在充满不确定性与外部约束的环境中推动低空技术创新。

以动态能力为基础,企业对核心技术短板和潜在合作领域形成具象化认知,可以更有针对性、更高效地与外部主体对接。动态能力直接构成了企业在外部资源获取谈判中的“权力”,以更主动的地位撬动更多的政策支持、研发补贴、产学研协同等关键资源。企业通过与外部主体建立依赖关系,在知识共享、标准制定、行业规范等方面开展合作,能够不断反哺企业内部的适应能力、吸收能力和创新能力。

在低空经济这一高度复杂性与不确定性的场域中,动态能力与资源依赖的交互机制更为明显。一方面,企业通过适应能力敏锐捕捉低空政策信号,在空域分层与适航认证等制度变革中获取先发优势^[8],将“政策依赖”转化为“政策协同”;借助吸收能力快速整合低空领域外部知识,推动跨学科合作由被动转为主动^[7];依托创新能力实现低空商业模式的颠覆性重构,提升产业链价值共创能力。另一方面,低空空域管控、产业联盟竞争与市场需求变化也倒逼企业形成政策导向的适应能力、结构化的知识吸收能力与场景导向的创新能力。在这一持续互动过程中,动态能力与资源依赖相互强化,共同推动低空技术突破与产业发展。

综上所述,“D-D”理论框架反映了动态能力与

资源依赖在低空技术创新中形成内外协同机制(图2)。动态能力提高企业在外部资源网络中的主动性与领导力,资源依赖网络则持续输入创新所需资源和知识反馈,强化企业内部动态能力。二者在低空技术创新的具体实践中不断交互、强化,形成企业持续的技术突破与产业升级动力,确保企业能够有效应对低空技术创新的复杂性、颠覆性、立体性和前瞻性挑战,实现低空经济的长期健康发展。

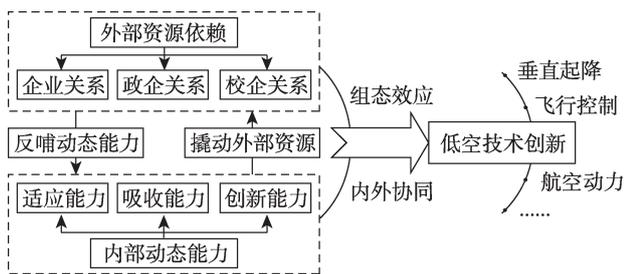


图2 低空技术创新的“D-D”组态理论框架

Figure 2 Theoretical framework of “D-D” configuration for low-altitude technological innovation

3 研究方法 with 数据

3.1 定性比较分析方法

结合低空技术创新的特质,企业开展低空技术创新要统筹多主体、跨领域、新市场、新资源^[8],是一种典型的复杂管理过程。其复杂性源于技术系统与空域生态的深度耦合:企业需协调供应商、空管机构、投融资方等异质主体的利益^[2],同时突破技术研发、标准制定、政策适配等多重壁垒^[13]。在知识管理、研发治理与生态建构3个层面上,涉及多学科知识融合^[9]、产权共享机制设计^[5]与供需协同培育^[2],形成高度耦合的非线性系统。这种多维互动使低空技术创新呈现典型的“涌现性”,需要以系统视角理解其组织与路径机制。

因此,本文采用模糊集定性比较分析(Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis, fsQCA)方法,该方法融合定量与定性优势,通过布尔代数挖掘多重并发因果关系。该方法既适用于复杂管理问题的路径识别,也适合中小样本研究背景,能够有效应对低空技术创新中样本有限、路径多样的实际情境,符合本文研究需求^[16]。

3.2 样本选取与数据来源

2024年政府工作报告首次明确提出“低空经

济”概念,该时间节点处于政策释放与产业响应的初期阶段,能够更好地体现企业在应对不确定环境时的战略前瞻性与资源配置逻辑,符合本文分析动态能力与资源依赖组态的视角。考虑到低空技术仍处于技术扩散的成长期,企业的创新路径尚在形成中,成功案例对于行业具有较强的示范意义,故本文聚焦于已参与低空技术创新的企业样本,以更具针对性地提炼可行的组态机制。基于此,本文以A股上市公司为总体样本,筛选出2023年当年存在低空技术相关专利申请的企业共296家。数据来自CSMAR数据库、CNRDS数据库和国家知识产权局公开数据。

3.3 低空技术创新衡量方法

衡量低空技术创新较为简单的方式是直接依据IPC(International Patent Classification,国际专利分类法)分类为B64(飞行器;航空;宇宙航行)的专利量,但该方法易遗漏智能控制、动力系统等非B64类相关专利。为提升识别准确性,本文采用改进的机器学习方法构建低空技术专利词典并进行检索。具体步骤为:①利用Python软件,从国家知识产权局爬取了2023年专利申请的摘要文本,利用JieBa库进行分词处理;考虑到低空技术的专业性,将低空技术的专有名词一并加入分词模块中。②参考《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》《上海市低空经济产业高质量发展行动方案(2024—2027年)》《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案(2024—2027年)(征求意见稿)》等国家及地方低空经济相关政策,结合多个大语言模型的建议获得种子词“无人机”“飞行控制”“航空动力”“航测”“垂直起降”,并逐一筛查其是否在专利摘要中出现。③使用Word2Vec技术,采用Skip-gram模型,设置向量维度200、窗口大小5、训练轮数20,将2023年全部专利摘要作为语料进行训练,基于种子词获得与其语义最相近的20个词。④清洗并验证词典覆盖效果,根据验证结果反复修订优化词典。⑤统计并匹配各上市公司低空技术专利的申请数量,作为企业低空技术创新的代理变量。

3.4 前因变量选取与衡量方法

基于张明等^[16]提出的前因变量选取的5种模式,结合前文的理论分析与“D-D”分析框架,本文采

2025年8月

用研究框架法和理论视角法选择表征动态能力和资源依赖的前因变量。

动态能力参考Wang等^[11]所划分的适应能力、吸收能力和创新能力3个核心变量。适应能力以研发支出、广告支出和资本支出的变异系数衡量;吸收能力以研发支出占营业收入的比例衡量;创新能力以研发支出与技术人员标准化之和衡量^[12,17]。

本文中低空技术创新的资源依赖维度为企业关系、政企关系和校企关系。供应链集中度是衡量企业与供应链上下游企业合作关系的重要指标,揭示了供应链网络中企业合作伙伴的数量及其分布格局^[18],故企业关系用供应链集中度指代。企业与政府的关联有助于其获取更多政府补助,因此政府补助很大程度上可以反映政企关系^[19],故政企关系用政府补助占营业收入的比例来衡量。产学研合作的创新成果反映了企业与高校之间的互动^[20],校企关系用校企联合研发专利的数量来衡量。各变量具体衡量方式如表1所示。

表1 前因变量的测量方式

Table 1 Measurement methods of antecedent variables

理论维度	前因变量	变量衡量方式
动态能力	适应能力	研发支出、广告支出和资本支出的变异系数
	吸收能力	研发支出占营业收入的比例
	创新能力	研发支出与技术人员标准化之和
资源依赖	企业关系	供应链集中度:前5大供应商采购占比与前5大客户销售占比的平均值
	政企关系	政府补助占营业收入的比例
	校企关系	校企联合研发专利的数量

3.5 变量校准方法

模糊集定性分析实施前需对前因变量与结果变量的隶属度进行考察。fsQCA中各条件及结果被界定为独立集合,所有案例在不同集合中均对应特定隶属度。校准过程的核心任务即通过量化分析,为每个案例确定其在对应集合中的隶属度数值。本文采用直接校准法,使用四分位数作为校准锚点对案例数据进行校准^[21],即上四分位数(75%)为完全隶属锚点、二分之一分位数(50%)为交叉隶属锚点、下四分位数(25%)为完全不隶属锚点。

4 结果与分析

4.1 必要性分析

定性比较分析强调多个变量组合的并发因果

关系,需要排除对于结果的产生起到不可或缺作用的单个条件。因此,开展组态分析前需要进行必要性分析。表2汇报了必要性分析的结果,当一致性水平大于0.90时,前因条件被认定为必要条件,可见本文前因变量均不构成结果变量的必要条件,即单个前因条件的出现均不足以产生低空技术创新。

表2 前因变量的必要性检验

Table 2 Necessity test of antecedent variables

前因变量	低空技术创新		~低空技术创新	
	一致性	覆盖度	一致性	覆盖度
适应能力	0.582	0.731	0.597	0.480
~适应能力	0.587	0.695	0.666	0.505
吸收能力	0.601	0.731	0.614	0.477
~吸收能力	0.570	0.698	0.654	0.512
创新能力	0.619	0.725	0.628	0.471
~创新能力	0.548	0.697	0.634	0.516
企业关系	0.582	0.714	0.624	0.490
~企业关系	0.584	0.709	0.635	0.493
政企关系	0.571	0.736	0.578	0.477
~政企关系	0.594	0.687	0.680	0.504
校企关系	0.530	0.844	0.518	0.325
~校企关系	0.606	0.608	0.591	0.395

注:“~”表示布尔运算中的“非”,如“~适应能力”即“非高适应能力”。

4.2 组态分析

组态分析是fsQCA方法的核心内容,通过构建真值表并进行逻辑最小化,得到低空技术创新的多元组态。①构建真值表。首先,列举出每个条件变量的“存在(高)”与“缺失(非高)”两种状态下所有可能的变量组合,本文共涉及6个条件变量,因此可能形成的潜在组态数为 2^6 (即64种);随后,根据每个案例在各变量上的隶属度,识别其在真值表中所属的特定变量组合,构建出包含实际案例的真值表。实际中仅部分组合存在有效案例,参考已有研究,本文以频数阈值(≥ 1 个案例)、一致性阈值(≥ 0.90)和PRI分数阈值(≥ 0.90)为筛选标准,提取符合条件的组合^[21]。②逻辑最小化。利用布尔代数法对真值表进行逻辑最小化运算,考虑条件变量“存在”或“缺失”两种情况,在不预设反事实条件方向的前提下,计算出简约解和中间解。中间解保留必要条件且避免过度简化,适合作为本文的最优解。③组态命名原则。在简约解和中间解中共同出现

的条件被视为核心条件,仅在中间解中出现的条件则为边缘条件。依据已有研究提出的组态命名原则——“简洁清晰”“捕捉整体”和“唤起组态本质”^[22],每一条组态均以其核心条件特征为依据进行语义命名,例如,以“高政企关系+高吸收能力”为核心条件的配置命名为“政策引导型”(H1)。本文最终识别出政策引导型(H1)、创新联合型(H2)、校企依赖型(H3a)、校政依赖型(H3b)、自主突破型(H4) 5种组态模型,结果如表3所示。并依据各组态核心条件是否涉及动态能力或资源依赖特征,将上述5种组态进一步分类,以凸显组态间的理论关联与差异。同时,检验因果非对称性,非低空技术创新组态(L1-L3)与低空技术创新组态不存在匹配关系。

表3 高/非高低空技术创新的驱动路径
Table 3 Driving paths of high/non-high low-altitude technological innovation

前因变量	H1	H2	H3a	H3b	H4	L1	L2	L3
适应能力	×			○	●	●	⊗	●
吸收能力	●		⊗	⊗	●			⊗
创新能力		●			●	⊗	⊗	●
企业关系		×	○		⊗	●	●	⊗
政企关系	●			○	⊗	⊗	●	⊗
校企关系		●	●	●		×	×	
一致性	0.951	0.961	0.998	1.000	0.984	0.853	0.839	0.900
覆盖度	0.164	0.012	0.012	0.004	0.095	0.148	0.157	0.122
总体一致性			0.956				0.832	
总体覆盖度			0.231				0.308	

注:●表示核心条件存在;⊗表示核心条件缺失;○表示边缘条件存在;×表示边缘条件缺失;空白表示无关条件;下同。

4.2.1 内外协同组态

组态 H1 与 H2 反映了低空技术创新中内部能力与外部资源的协同过程。H1 为“政策引导型”,政策引导型体现了企业通过强大的外部知识吸收能力和政策资源支持,弥补内部适应能力不足,建立稳固的低空技术创新驱动体系。尽管高吸收能力有助于企业快速整合航空、通信、自动控制等低空跨学科技术,高政企关系能够确保企业获得稳定的低空飞行许可与政策资源支持,但这并不能自动转化为企业内部对低空经济环境变化的敏捷响应^[1],企业在市场或技术环境发生突变时可能依然呈现响应缓慢或迟滞的状态。因此,该组态体现了一种能

力补偿逻辑:企业通过强大的吸收能力迅速内化外部先进技术,依靠稳定而明确的政府政策资源保障技术发展的持续投入,从而有效弥补适应能力不足造成的短板,建立稳固的低空技术创新驱动体系。典型案例有威海广泰空港设备股份有限公司、江西联创光电科技股份有限公司等。以威海广泰空港设备股份有限公司为例,公司凭借国家级研发平台与高比例研发团队,快速吸收并内化低空技术知识;长期以来,与消防应急管理部门深度合作,参与消防救援无人机课程培训及设备供应定制化项目;依托山东省和地方政府提供的明确政策支持,实现无人机的产业化布局。

组态 H2 为“创新联合型”,体现企业高强度自主研发与高校深度合作的联合攻关,同时伴随灵活多元的供应链体系。企业高水平研发投入为低空技术应用与场景落地提供技术承接基础,而高校院所的理论突破则有利于提升企业在低空领域的原始创新能力^[20],二者形成正向互动,共同推动低空技术创新。此外,多元化供应商体系既规避了技术路径锁定的风险^[23],又为低空技术的校企联合研发提供多技术路线验证场景。典型案例有潍柴动力股份有限公司和海尔智家股份有限公司。以潍柴动力股份有限公司为例,公司依托国家级创新平台,联合 120 多家供应商成立了潍柴动力产品研发应用共同体,与清华大学等联合攻克了氢燃料电池关键技术,建立了多元供应链,推动创新成果迅速产业化落地。其中,新型氢电混合动力系统集成控制关键技术获中国交通运输行业技术发明特等奖。

4.2.2 外部依赖组态

组态 H3a(校企依赖型)与 H3b(校政依赖型)均以非高吸收能力和校企关系为核心条件,构成二阶等价组态,该核心条件反映出低空技术创新中外部资源对内部能力的替代机制。H3a 中,企业与高校、科研院所深度联合,直接获得低空领域关键技术与前沿理论,跳过复杂的知识转化过程。同时,企业通过稳定的供应链资源和外部合作网络,降低无人机或通航设备研发过程中的零部件供应和技术不确定性^[9],提升合作研发效率。H3b 中,高政企关系与高适应能力则帮助企业敏锐捕捉低空空域管理、适航认证等政策信号,及时调整技术布局与资源配

2025年8月

置,降低空域管控政策变化带来的研发风险^[24],提升创新效率。典型案例有北京建工环境修复股份有限公司、华能澜沧江水电股份有限公司和苏交科集团股份有限公司。以北京建工环境修复股份有限公司为例,公司以生态修复为主营业务,在无人机方面缺乏基本创新能力,但对污染影像采集、地下污染探查等无人机应用有较强需求。为此,企业与多所高校建立了合作机制,共同开展土壤巡查采样无人机等关键技术的攻关。并且该企业与核心供应商建立长期战略合作关系,在供应链管理方面具有较高的集中度,确保了无人机研发所需关键部件的稳定供应,为研发成果的规模化落地提供了保障。

4.2.3 内生能力组态

组态 H4(自主突破型)体现了低空技术创新过程中内部能力对外部资源依赖的松绑,依靠完善的内部动态能力,自主驱动低空技术创新,更灵活地应对政策及市场需求变化,形成高效敏捷的技术创新决策机制。企业以高水平的吸收、适应和创新能力自主推进技术突破,避免外部资源约束,降低制度性交易成本,实现灵活高效的创新决策。典型案例有浙江春风动力股份有限公司和大连华锐重工集团股份有限公司。以浙江春风动力股份有限公司为例,公司以全地形电动自行车为主营业务,公司从动力电池系统出发,依靠自主研发布局无人机技术,主动吸收前沿知识并快速转化为竞争优势,未对企业关系或政策资源形成过度依赖,成功实现自主创新突破。

综上所述,从“D-D”框架分析低空技术创新驱动组态,揭示出动态能力与外部资源的非线性协同关系(表4):①动态能力与资源依赖的互补替代作用:企业可借助特定外部资源实现能力跃迁;②政

策资源的信号替代效应:当企业适应能力不足时,通过观察政策风向形成侧面的适应能力;③校企协同在化解技术复杂性中价值突出,可有效降低企业吸收能力要求并增强创新能力。

4.3 权变分析

尽管定性比较分析不强调控制变量,但仍有部分关键因素游离于原理论框架之外,对结果变量具有重要影响^[25]。例如,数智化技术对低空技术存在内部技术嵌合和外部组织赋能的双重影响^[4],为识别这类因素的组态效应,本文借助权变分析并采用两阶段方法,在组态分析后引入数智化转型、组织冗余与企业规模3项变量,进一步探讨其对低空技术创新的组态调整机制^[26]。其中,数智化转型采用张秀娥等^[27]的衡量方式,组织冗余采用焦豪等^[12]的衡量方式,企业规模采用企业净资产的自然对数度量。变量校准方式与前文一致,因新增变量增多,真值表中案例数阈值亦相应上调至5,以更有效捕捉其影响。结果如表5所示。

(1)数智化转型通过提升企业的信息整合与决策效率,强化了企业对市场变化和技术变革的动态响应能力^[27]。较原政策引导型(H1)组态,高数智化转型下(HD1),企业通过标准化、平台化提升了知识获取效率,削弱了对企业关系嵌入的依赖,并提高了对组织快速迭代的要求,使得适应能力与吸收能力形成互补,放大政策引导对创新产出的促进作用。低数智化转型下(HD2),原自主突破型(H4)发生显著变化,企业更倾向于通过强化企业关系和政企关系实现资源互补,以缓解数智化能力不足对创新造成的负面影响。这表明数智化转型程度不同会显著影响企业实现低空技术创新的资源组合模式。

(2)组织冗余为企业快速响应环境变化提供了灵活的战略缓冲,有助于企业迅速进行资源再配置

表4 基于D-D框架的组态机制总结

Table 4 Summary of configuration mechanisms based on D-D framework

组态类型	D-D框架	机制简述
政策引导型(H1)	内部动态能力与外部资源依赖的正反馈循环	政府资源对适应能力的补充
创新联合型(H2)	内部动态能力与外部资源依赖的正反馈循环	创新能力与高校资源的互馈
校企依赖型(H3a)	外部资源依赖反哺内部动态能力	企业高校资源对吸收能力的替代
校政依赖型(H3b)	外部资源依赖反哺内部动态能力	政府高校资源与适应能力的互补
自主突破型(H4)	内部动态能力撬动外部资源依赖	完整动态能力的自主驱动

表5 权变分析结果

Table 5 Results of contingency analysis

前因变量	HD1	HD2	HR1	HR2a	HR2b	HS
适应能力	○	●	○	○	○	○
吸收能力	●	○	●	○		○
创新能力		●	⊗	●	●	⊗
企业关系	⊗	●	⊗		○	×
政企关系	●	○	○	●	●	●
校企关系		×	×			×
数智化转型	●	⊗				
冗余资源			●	⊗	⊗	
企业规模						●
一致性	0.962	0.977	0.989	0.959	0.985	0.995
覆盖度	0.149	0.099	0.098	0.151	0.121	0.079
整体一致性	0.960		0.967		0.995	
整体覆盖度	0.196		0.227		0.079	

和战略布局^[12]。在高组织冗余情景下(HR1),企业的低空技术创新路径表现为以高吸收能力、非高创新能力为核心条件,表明企业可利用冗余资源,通过市场换取技术快速布局低空技术创新领域。此外,非高外部关系意味着企业可更自主地开展内生创新。组织冗余不足情景(HR2a与HR2b)则要求企业调整资源配置策略,强化与政府部门合作,获取补贴和政策支持以弥补冗余不足,实现外部资源替代内部资源的效果。

(3)企业规模为企业构建了资源优势,影响获取外部资源的能力,决定了与其他主体协作的主导权和话语权^[20]。高企业规模情景下(HS),企业凭借体量与适应和吸收能力确保资源转化效率为依托,以“企业规模+政企关系”为核心条件,撬动制度资源,构成“规模+政府驱动”模式。大企业规模优势体现为更强的低空政策兑现能力,降低了企业间合作与校企合作的必要性,呈现出一种明显的资源与能力不对称状态。

综合上述分析,数智化转型为低空技术创新提供了额外的“能”,组织冗余巩固了技术资源的“基”,企业规模强化了技术合作的“势”。因此,当企业处于3种情景的高状态时,实现低空创新的技术路径更倾向于内部化和自主化,基于内部能力撬动外部资源;当这些情景非高时,企业更倾向于采取外部化和网络化的技术路线,基于外部资源反哺内部能力。

4.4 稳健性检验

4.4.1 敏感性分析

敏感性分析是fsQCA进行稳健性检验的主要方法之一,通过改变校准锚点、真值表构建过程的一致性、PRI分数和案例数阈值观察结果变化幅度^[21,28]。首先,本文将校准锚点从四分位数提高到十分位数,结果共产生7种组态,囊括了H1至H3,H4仅吸收能力从核心条件存在变为边缘条件缺失。其次,本文将一致性阈值从0.90提高到0.95,共产生2类简约解、4类中间解,与组态H1、H3a、H3b的核心条件一致。最后,将案例阈值提高到3,得到一解,与组态H1完全一致。

4.4.2 机器学习分析

为验证模糊集定性比较分析所得组态的稳健性,本文参考Jiang等^[26]的方法,引入随机森林算法建构监督式机器学习模型,建模分析各前因变量对低空技术创新的影响机制。相较于组态分析识别多路径机制,随机森林可揭示变量间的非线性交互关系并衡量其相对重要性^[29]。本文构建了以6项前因变量为主要解释变量的随机森林模型,并引入行业竞争程度、固定资产占比、无形资产占比、研发人员占比与专利申请量等控制变量,以提升结果的解释力与稳健性。

图3展示了随机森林模型对各前因变量在低空技术创新中的相对重要性排序。结果显示,校企关系、创新能力与政企关系在随机森林与fsQCA分析

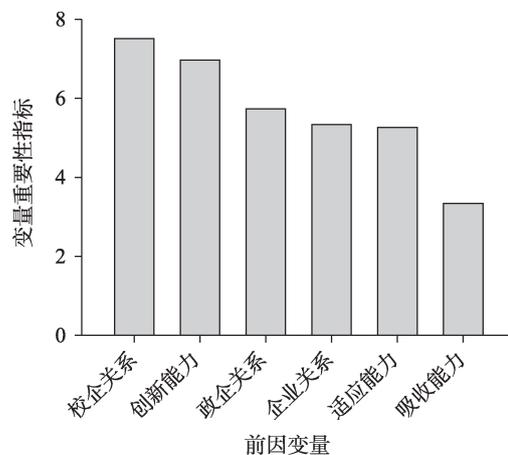


图3 基于机器学习的低空技术创新前因排名

Figure 3 Ranking of antecedents of low-altitude technological innovation based on machine learning

2025年8月

中均居核心位置,而适应能力、企业关系与吸收能力的重要性相对较低。由于两种方法虽基于不同逻辑与分析视角,却在关键变量上高度一致,排除了单一方法可能存在的偏误,对研究结论的稳健性提供了有力的相互佐证与学理支持。

基于随机森林变量重要性排序,进一步通过双

变量部分依赖图分析变量间交互效应,对组态H2和H3a、H3b进行了方法交叉验证。图4a显示,吸收能力在0.25~0.50且校企关系高于0.50时,低空技术创新显著增强,验证了H3a、H3b的组态结果;图4b显示,创新能力与校企关系协同增强创新表现,与H2组态相一致。

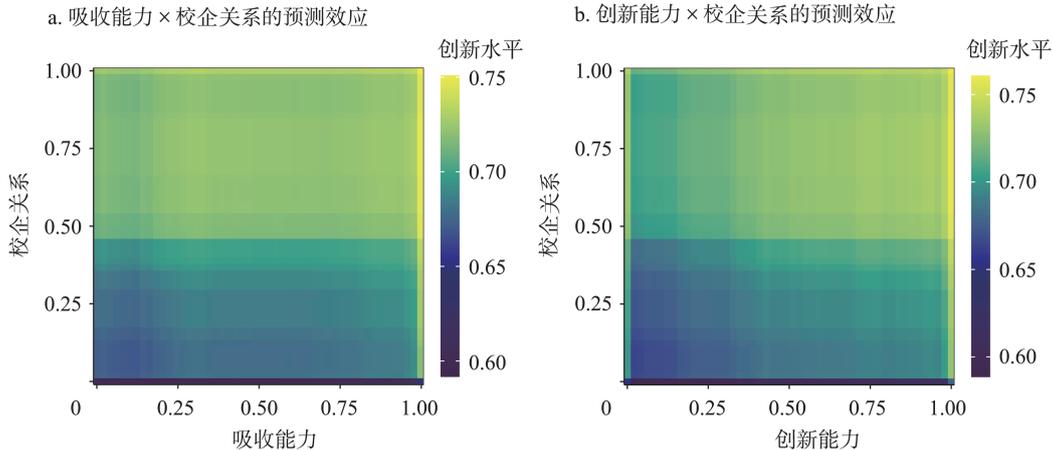


图4 吸收能力、创新能力和校企关系的相互作用对预测低空技术创新的双向部分依赖图

Figure 4 Two-way partial dependence plot of interaction effects among absorptive capacity, innovation capability, and university-enterprise cooperation in predicting low-altitude technological innovation

5 讨论、结论与政策建议

5.1 讨论

在梳理了低空技术创新内涵及其驱动机制的基础上,上述研究进一步识别了中国上市公司推动低空技术创新的5种组态及其在不同禀赋情景下的变化,丰富了低空技术创新的路径与机制研究。已有研究从政策引导^[9]、生态协同^[8]、场景驱动^[1]、数字赋能^[4]等方面对低空技术发展形成了互补但各有侧重的解释框架,指出低空技术的发展需要通过政策引导促进空域开放、基础设施建设和标准制定^[9],构建开放式的创新生态^[8],通过场景驱动进行产业落地^[1]。与上述研究相比,本文以“动态能力-资源依赖”理论为桥梁,将微观企业能力建构与宏观要素供给机制相统一,认为低空技术创新并非单一路径,而是存在政策引导型、校企依赖型、自主突破型等模式,呈现多样性与等效性,通过不同内外部资源组合实现创新。这种多元化路径视角使低空技术创新的内涵由单纯的技术突破延展为更为丰富的生态协同体系,强调企业在生态网络中通过精准

匹配内部能力与外部资源以实现技术创新的综合行为。

同时,已有文献指出,低空技术创新需要紧密结合具体应用场景,重构生产要素配置范式,并实现商业模式与产业形态的颠覆式发展^[1]。本文的结果支持并扩展了这一观点,相较既有文献大多聚焦空域改革等外部场景^[9,10],本文揭示企业在不同资源禀赋约束下的应对策略与成长路径,进一步明确了企业在技术创新时必须综合考虑数智化、组织结构和企业规模等禀赋因素,通过场景化的具体实践路径推动创新落地。

5.2 结论

低空经济正成为推动中国高质量发展的重要引擎,企业开展低空技术创新既是发展新质生产力的关键,也是构建自身竞争优势的重要举措。本文基于2023年参与低空技术创新的上市公司数据,采用“动态能力-资源依赖”框架分析创新路径。研究发现:

(1)低空技术创新以空域资源为基础,通过学

科交叉与场景融合推动产业链价值链重构,具备技术体系复杂性、经济颠覆性、空间立体性、布局前瞻性四大特征。

(2)组态分析发现5种创新模式:“政策引导型”强调吸收能力与政府资源协调,“创新联合型”突出企业创新能力与高校资源的协同,“校企依赖型”和“校政依赖型”强调高校资源对企业吸收能力的弥补,“自主突破型”体现动态能力的自主驱动。

(3)权变分析表明,企业数智化转型、组织冗余和规模较高时倾向于动态能力自主创新;反之则更偏向于生态合作创新。

(4)机器学习结果显示,创新能力、政企关系和校企关系为低空技术创新的重要驱动因素,与组态分析结果相互验证。

5.3 政策建议

低空技术创新对于推动产业升级、优化产业结构和提升经济发展质量具有重要战略意义,基于以上分析结果,本文针对不同类型企业开展低空技术创新提出如下政策建议:

(1)对采取内生发展模式的企业:政府应在低空技术前沿领域给予更多创新自主权,减少对企业创新决策的直接干预,营造更加宽松的创新环境。鼓励企业自主布局前瞻性低空技术,加快自主研发进程。对于大型企业,政府可侧重于支持低空技术应用的规模化发展;对于中小型企业,鼓励跨界技术合作与灵活创新,拓展低空技术应用新领域。

(2)对采取外部依赖发展模式的企业:政府应鼓励企业与高校科研机构合作开展低空领域关键核心技术攻关,建立专项资金,构建低空技术研发联盟,促进资源互补。支持企业构建稳定的供应链体系和战略合作网络,确保关键零部件和技术服务供应,缓解企业自身技术吸收能力不足的问题;鼓励龙头企业牵头,联合上下游合作伙伴开展低空技术标准制定与关键零部件联合攻关,形成统一技术路线、共享研发成果的生态化发展。

(3)对采取内外协同发展模式的企业:完善低空经济政策体系,释放稳定信号;支持企业构建灵活快速的响应机制;鼓励建设数字化、智能化决策平台,提升企业适应技术与市场变化的敏捷性。同时,推动产业链上下游多元化合作,优化供应链体

系,支持企业依托政策资源拓展无人机应用场景,加速低空技术创新成果规模化落地。

参考文献(References):

- [1] 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, (15): 57-68. [Ouyang T H. Technological innovation and scenario innovation of low-altitude economy[J]. Frontiers, 2024, (15): 57-68.]
- [2] 欧阳桃花, 郑舒文. 基于共同演化的低空经济产业生态策略研究: 以“低空航空器+”为例[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(5): 109-119. [Ouyang T H, Zheng S W. Industrial ecological strategies of low-altitude economy based on co-evolution: Taking “low-altitude aircraft+” as an example[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 109-119.]
- [3] Askerbekov D, Garza-Reyes J A, Roy G R, et al. Embracing drones and the internet of drones systems in manufacturing: An exploration of obstacles[J]. Technology in Society, 2024, DOI: 10.1016/j.techsoc.2024.102648.
- [4] 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.]
- [5] 张嘉昕, 许倩. 低空经济产业链发展的制约因素与优化对策研究[J]. 经济纵横, 2024, (8): 63-70. [Zhang J X, Xu Q. Restrictive factors and countermeasures for industrial chain development of low-altitude economy[J]. Economic Review Journal, 2024, (8): 63-70.]
- [6] 王宝义. 我国低空经济的技术经济范式分析与发展对策[J]. 中国流通经济, 2024, 38(9): 14-26. [Wang B Y. The technological and economic paradigm analysis and countermeasures for developing low altitude economy in China[J]. China Business and Market, 2024, 38(9): 14-26.]
- [7] 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. [Zhou Y Z. Low-altitude economy: Theoretical logic, development elements and path to realization[J]. Southeast Academic Research, 2024, (4): 87-97.]
- [8] 欧阳日辉. 低空经济助推新质生产力的运行机理与路径选择[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 118-131. [Ouyang R H. Boosting new quality productive forces with low-altitude economy: Mechanisms and paths[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Edition of Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 118-131.]

2025年8月

- [9] 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. [Li X H. Government guidance, construction of industrial ecosystem, and the development of low-altitude economy[J]. Reform, 2025, (2): 21–35.]
- [10] 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2607–2620. [Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607–2620.]
- [11] Wang C L, Ahmed P K. Dynamic capabilities: A review and research agenda[J]. International Journal of Management Reviews, 2007, 9(1): 31–51.
- [12] 焦豪, 杨季枫, 金宇珂. 企业消极反馈对战略变革的影响机制研究: 基于动态能力和冗余资源的调节效应[J]. 管理科学学报, 2022, 25(8): 22–44. [Jiao H, Yang J F, Jin Y K. Negative feedback and firm strategic change: The moderating effect of dynamic capabilities and slack resources[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(8): 22–44.]
- [13] 沈海军. 从飞行汽车看低空经济新业态[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024, (15): 69–75. [Shen H J. Exploring the new forms of low-altitude economy from flying-cars[J]. Frontiers, 2024, (15): 69–75.]
- [14] Hillman A J, Withers M C, Collins B J. Resource dependence theory: A review[J]. Journal of Management, 2009, 35(6): 1404–1427.
- [15] 杨凡, 杜德斌, 段德忠, 等. 长三角产学研协同创新的空间模式演化[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 668–682. [Yang F, Du D B, Duan D Z, et al. The evolution of spatial patterns of university-industry collaborative innovation in the Yangtze River Delta[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 668–682.]
- [16] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向[J]. 管理学报, 2019, 16(9): 1312–1323. [Zhang M, Du Y Z. Qualitative Comparative Analysis (QCA) in management and organization research: Position, tactics, and directions[J]. Chinese Journal of Management, 2019, 16(9): 1312–1323.]
- [17] 赵丽, 胡植尧. 数据要素、动态能力与企业全要素生产率: 破解“数据生产率悖论”之谜[J]. 经济管理, 2024, 46(7): 55–72. [Zhao L, Hu Z Y. Research on the influence mechanism of data elements on total factor productivity of enterprises: Crack the “data productivity paradox” [J]. Business and Management Journal, 2024, 46(7): 55–72.]
- [18] 张冰晔, 刘紫琦, 周君, 等. 供应链集中度对中国上市企业ESG表现的影响分析: 基于企业经营视角[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(6): 1795–1814. [Zhang B Y, Liu Z Q, Zhou J, et al. How supply chain concentration affects the ESG performance of Chinese listed companies: A business perspective[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2024, 44(6): 1795–1814.]
- [19] 王昶, 王恺霖, 宋慧玲. 风险投资与政府补贴对新材料企业技术创新的激励效应及差异[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1566–1579. [Wang C, Wang K L, Song H L. Incentive effects and differences of venture capital and government subsidies on technological innovation of advanced material enterprises[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1566–1579.]
- [20] 范剑勇, 张丰, 唐为. 高校学科质量与区域科技创新[J]. 世界经济, 2024, 47(4): 65–98. [Fan J Y, Zhang F, Tang W. Quality of university subject and regional technological innovation[J]. The Journal of World Economy, 2024, 47(4): 65–98.]
- [21] Di P N, Chari S, Iannacci F, et al. Configurational theory in business and management research: Status quo and guidelines for the application of qualitative comparative analysis (QCA)[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123907.
- [22] Furnari S, Crilly D, Misangyi V F, et al. Capturing causal complexity: Heuristics for configurational theorizing[J]. Academy of Management Review, 2020, 46: 778–799.
- [23] 高鲜鑫, 王黎莹. 企业标准创新网络突破技术锁定的路径研究[J]. 科研管理, 2024, 45(8): 73–82. [Gao X X, Wang L Y. Research on the path of enterprise standard innovation networks to make breakthroughs in technology lock-in[J]. Science Research Management, 2024, 45(8): 73–82.]
- [24] 姚海琳, 罗锡铃, 曾辉祥, 等. 新材料产业公共服务平台政策对企业“卡脖子”技术创新的影响[J]. 资源科学, 2023, 45(4): 694–705. [Yao H L, Luo X L, Zeng H X, et al. Impact of the public service platform policy for the new material industry on “stuck neck” technological innovation of enterprises[J]. Resources Science, 2023, 45(4): 694–705.]
- [25] Ma T, Cheng Y, Guan Z, et al. Theorising moderation in the configurational approach: A guide for identifying and interpreting moderating influences in QCA[J]. Information Systems Journal, 2023, DOI: 10.1111/isj.12439.
- [26] Jiang Y, Feng T, Huang Y. Antecedent configurations toward supply chain resilience: The joint impact of supply chain integration and big data analytics capability[J]. Journal of Operations Management, 2024, 70(2): 257–284.
- [27] 张秀娥, 王卫, 于泳波. 数智化转型对企业新质生产力的影响研究[J]. 科学学研究, 2025, 43(5): 943–954. [Zhang X E, Wang W, Yu Y B. Research on the influence of digital intelligence transformation on the new quality productivity of enterprises[J]. Studies in Science of Science, 2025, 43(5): 943–954.]
- [28] Oana I E, Schneider C Q. A robustness test protocol for applied QCA: Theory and R software application[J]. Sociological Methods & Research, 2024, 53(1): 57–88.
- [29] Choudhury P, Allen R T, Endres M G. Machine learning for pattern discovery in management research[J]. Strategic Management Journal, 2021, 42(1): 30–57.

The configuration mechanisms of low-altitude technology innovation in Chinese enterprises

ZHAO Ruitong¹, HU Haichen¹, LI Bin², HAO Guoming³

(1. School of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100080, China; 3. Inspur Intelligent Terminal Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: **[Objective]** To address the technological management challenges posed by the complexity, disruptiveness, elevational characteristics, and foresight characteristics of low-altitude technological innovation, this study aims to reveal the internal and external coordination mechanisms of enterprises' low-altitude technological innovation, providing theoretical and practical guidance for the technology layout and policy-making of emerging industries. **[Methods]** By integrating dynamic capabilities theory and resource dependence theory, 296 A-share listed companies in China engaged in low-altitude technological innovation in 2023 were selected as the samples. Using fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA) and machine learning methods, the multiple configuration paths of enterprises' low-altitude technological innovation were explored. **[Results]** (1) Five equivalent configurations of low-altitude technological innovation were identified: policy-guided, university-enterprise dependent, university-government dependent, collaborative innovation, and independent breakthrough models. The core driving mechanism was reflected in the nonlinear synergy and dynamic transformation between dynamic capabilities and external resources. (2) Contingency analysis indicates that when enterprises exhibit higher levels of digital-intelligent transformation, organizational redundancy, and larger size, this influences the selection of innovation models by strengthening internal capabilities or restructuring external dependencies. (3) Machine learning results validated the robustness of the fsQCA results and highlighted the critical roles of innovation capability, government-enterprise relationships, and university-enterprise cooperation. **[Conclusion]** Enterprises' low-altitude technology innovation requires precise alignment and effective coordination between internal capabilities and external resources, comprehensively considering contingency factors, dynamically and flexibly selecting suitable innovation models based on their resource endowments and external environment.

Key words: low-altitude economy; technological innovation; dynamic capability; resource dependence; fsQCA; machine learning; A-share listed companies; China