

doi. 10. 3724/1005-0566. 20250710

人工智能应用、研发要素流动与 区域创新生态系统竞争力

文 文^{1,2}, 顾成敏¹

(1. 郑州大学马克思主义学院, 河南 郑州 450001;

2. 新乡学院马克思主义学院, 河南 新乡 453003)

摘 要: 基于 2010—2023 年我国 30 个省级行政区面板数据, 实证检验人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的影响作用。研究结果显示, 人工智能应用有利于增强区域创新生态系统竞争力。异质性检验结果表明, 人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的提升效应在南方地区与人力资本水平较高地区更为显著。传导路径检验证实, 研发资本要素流动与研发人员要素流动在人工智能应用与区域创新生态系统竞争力的关系中发挥中介效应。空间溢出效应检验发现, 人工智能应用可有效增强本省份与相邻省份的创新生态系统竞争力。剖析人工智能应用影响区域创新生态系统竞争力的作用路径, 以期为我国科技创新实现跨越式赶超提供理论借鉴和经验启示。

关键词: 人工智能应用; 区域创新生态系统竞争力; 研发要素流动; 新质生产力

中图分类号: F062.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0566(2025)07-0109-11

Artificial intelligence application, the flow of R&D factors, and the competitiveness of regional innovation ecosystems

WEN Wen^{1,2}, GU Chengmin¹

(1. School of Marxism, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Marxism, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Based on the panel data of 30 provincial administrative regions in China from 2010 to 2023, this paper empirically examines the impact of artificial intelligence application on the competitiveness of regional innovation ecosystems. The research results show that artificial intelligence applications is conducive to enhancing the competitiveness of regional innovation ecosystems. The heterogeneity test results indicate that the empowerment effect of artificial intelligence application on the competitiveness of regional innovation ecosystems is more significant in southern regions and regions with higher levels of human capital. The mediation path test confirms that the flow of R&D capital and R&D personnel plays a mediating role in the relationship between artificial intelligence application and the competitiveness of regional innovation ecosystems. The spatial spillover effect test finds that artificial intelligence application can effectively enhance the innovation ecosystem competitiveness of the province itself and its neighboring provinces. This paper deeply analyzes the path through which artificial intelligence application affects the competitiveness of regional innovation ecosystems, with the aim of providing

收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-06-14

基金项目: 国家社会科学基金项目“中国式现代化的动力机制及运行优化研究”(23BKS058)。

作者简介: 文文(1984—), 男, 河南信阳人, 郑州大学马克思主义学院博士研究生, 研究方向为马克思主义中国化、社会学。

theoretical references and practical inspirations for China's scientific and technological innovation to achieve.

Key words: artificial intelligence application; competitiveness of regional innovation ecosystems; flow of R&D factors; new quality productivity

伴随新一轮科技革命和产业变革加速深化,科技创新对推动我国综合国力竞争与生产力巨大飞跃的重要性更加凸显。纵观世界格局演变,全球科技竞争态势日益激烈,抢占科技创新制高点逐渐成为国际战略角逐的主战场^[1]。着眼国内发展实际,我国现已步入高质量发展阶段,依赖传统要素增量驱动的发展模式难以为继,迫切需要强化高质量科技供给,加速培育新质生产力^[2]。在此情形下,我国高度重视创新并将其置于现代化建设全局的核心地位^[3],接连在党的二十大报告、党的二十届三中全会公报与 2025 年政府工作报告提出“提升国家创新体系整体效能”的行动部署,为激活国家战略科技力量指明方向。作为国家创新体系的基础单元^[4],区域创新生态系统肩负着落实国家创新战略的重要使命,其可借助政策引导与资源整合推动本区域创新活动蓬勃发展,从而确保整体创新系统向更高能级跃迁。然而,原始创新能力相对薄弱、科技生态建设存在短板、关键核心技术受制于人等问题依旧存在^[5-6],对提升区域创新生态系统竞争力造成一定掣肘。面对错综复杂的国内国际形势,积极探索提升区域创新生态系统竞争力的切实路径,已成为我国跻身创新型国家前列乃至世界科技强国的应然之举。

人工智能是综合运用大数据技术与智能算法,使计算机能够模拟、拓展并超越人脑智能的前沿技术^[7]。置身于“弱人工智能”向“强人工智能”酝酿新突破的过渡局面,人工智能技术不断发展并深度渗透至经济社会各领域,并重塑着区域创新生态系统价值共创模式。一方面,人工智能应用可依托数据挖掘、深度学习与知识图谱技术,辅助区域研发主体对海量科研数据实施自动标记与特征提取,精确定位科技研发关键数据与突破方向,从而塑造技术核心能力,增强区域创新生态系统竞争力。另一方面,凭借大数据库与精密算法模型,人工智能应用可加速构建高效知识传播

网络,突破研发要素流动约束,促进区域间内部资源与外部异质资源有机衔接,弥补区域创新主体知识结构短板,提高区域创新生态系统竞争力。综上所述,本文实证考察人工智能应用助推区域创新生态系统竞争力提升的影响效应与作用机制,以期为我国在大国博弈中实现“换道超车”提供思路借鉴与实践价值。

一、文献回顾

竞争力(competitiveness)肇始于达尔文进化论所提出的竞争(competition)概念。在生态学视角下,种群通过不断竞争获取外部资源,最终凭借更强的适应能力实现存续。随后,竞争力这一概念逐步延伸至经济学领域,并拓展至国家、产业、企业层面的经济活动^[8]。创新生态系统(innovation ecosystem)概念同样脱胎于生物学中的生态系统理论^[9],并被广泛引入经济学、管理学领域。伴随美国科技顾问委员会(PCAST)于 2004 年正式使用“区域创新生态系统”概念,使得区域创新生态系统概念引发部分学者关注。在理论演进过程中,学术界对区域创新生态系统的认知经历由表及里的深化过程,逐渐从早期侧重要素构成等基础层面,逐渐转向动力机制、影响因素等深层问题探索。要素构成层面,杨力等^[10]认为创新群落、资源、技术和环境是区域创新生态系统的构成要素。解学梅等^[11]研究表明区域创新生态系统可分为创新群落、资源生态位、生境生态位与技术生态位四大要素。动力机制层面,储节旺等^[12]着眼于知识协同视角,强调长三角一体化区域创新生态系统是由管理协同、制度协同、文化协同三大动力机制共同作用演化的结果。王德起等^[13]研究提出,“利润回馈—技术溢出—保障机制”是区域创新生态系统的重要动力机制。影响因素层面,刘家树等^[14]立足韧性视角,分析发现多主体协同对区域创新生态系统韧性具有增强作用。陈邑早等^[15]聚焦运行效率角度,研究认为环境宏观因素优化、原始创新研发拟合投入、技术创新应用拟合投入、技

术创新服务拟合投入等因素可驱动区域创新生态系统效能提升。

当今时代全球正历经前所未有的数字化变革浪潮,学者纷纷探究在数字化转型背景下,区域创新生态系统的运行机制与价值共创路径。李晓娣等^[16]利用 fsQCA 法研究发现,数智情形下存在“资本—数字平台主导型”“人才—资本—数字平台主导型”“人才—资本主导型”3条驱动区域创新生态系统高能级运行的组态。姜红等^[17]研究获悉数字化转型可通过多主体协同、多元化生产、多维度开放、多行为控制、多过程激励、多轨道演化的提升机制,增强区域创新生态系统效能。值得注意的是,人工智能作为数字技术发展的高阶形态,可借助深度学习技术、卷积神经网络、循环神经网络等前沿技术,重塑创新生态系统价值创造机制。沈志锋等^[18]以华为鸿蒙作为案例研究对象,系统解析人工智能在技术研发阶段、知识物化阶段、商业化阶段重构创新生态系统的具体路径。刘潇等^[19]基于人工智能创新生态系统中的技术互补与协同创新视角,利用社会网络分析法、NK模型、百度大脑 AI 开放平台实例研究平台企业对创新活动的影响。

总体可见,当前已有较多有关区域创新生态系统及数字情境下的区域创新生态系统的研究,并揭示出数字技术是重塑区域创新生态系统的关键路径。然而,有关人工智能应用与区域创新生态系统之间的聚焦性考察则较为稀缺,且多立足企业微观视角,侧重于案例探讨与理论推断。需要明确的是,作为数字技术的延伸与深化形态,人工智能凭借深度学习与大模型训练技术,可能在具体创新应用过程中,打造不同于数字技术的价值创造路径。此外,尽管人工智能应用对创新活动的助推作用已得到广泛证实^[20-21],但其对区域创新生态系统竞争力的驱动路径尚不明晰。由此,本文可能在下述3个层面存在突破空间:第一,将人工智能应用列入区域创新生态系统竞争力的分析框架,从理论与实证层面深入剖析二者间内在联系,丰富区域创新生态系统竞争力的影响因素分析;第二,以研发要素流动为切入点,细致论

释人工智能应用增强区域创新生态系统竞争力的潜在路径,为理解二者传导机制提供可靠证据;第三,系统探析人工智能应用影响区域创新生态系统竞争力的空间规律,以丰富二者相关研究。

二、理论分析

(一)直接效应影响

区域创新生态系统竞争力是指在特定地理空间内,创新主体围绕共同的发展诉求与价值目标,通过持续开展物质流动、知识共享与信息传递等交互行为,形成兼具资源共享、能力互补、价值共生特征的自组织系统^[22],且该系统具备创造超越竞争对手价值增量的能力。而人工智能在应用过程中可凭借强大的训练数据模型、深度学习与强化学习技术,引领科研范式向人机协同研发(AI for science)的第五范式转型跃迁,为提升区域创新生态系统竞争力注入动能。

创新主体层面,人工智能在应用过程中可凭借高效精准的网络连接能力,强化科研机构、龙头企业与高等院校等多元主体之间的合作黏性,提升系统内部知识流动效率与技术转移效能,从而实现关键技术供给与产业链需求的无缝衔接,驱动区域创新生态系统竞争力的激活与迸发。与此同时,人工智能在应用过程中亦可带动创新技术路线由“以人中心”向“人机交互”转变,驱使研发人员能够应用人工智能技术对海量科研数据进行系统处理、定向检索与精准调取,进而提升创新活动产出效率,实现区域创新生态系统竞争力的质效双增。

创新环境层面,人工智能在应用过程中可实现政府与产业组织、创新组织之间的信息互通与多方互动,驱动政府治理体系与治理模式的深刻变革^[23]。这一过程中,政府部门能够借助算法模型精准识别产业链缺口与创新潜力区,加速政策保障、税收优惠与知识产权保护等制度体系在创新领域的落地实施,从而强化系统内部各主体开展创新活动的事前、事后激励,为提高区域创新生态系统竞争力营造良好条件。

创新成果层面,人工智能在应用过程中可基于大规模语料库深度挖掘数据间的复杂关联、隐

藏趋势与潜在规律,有效打破研发人员认知壁垒,以此缩短创新主体技术研发进程与产业化转化周期,助推区域创新生态系统竞争力跃升。不仅如此,人工智能在应用过程中可借助构建智能预测系统与仿真实验平台,助力研发人员实现高强度、高频率、高精度的科学实验^[24],增强区域创新生态系统竞争力。

创新开放层面,人工智能应用能够有效提升创新主体间的跨区域、跨国界协同度,引领其与外部先进科研力量深度对接,驱动异质性知识实现跨境流动与精准投递,为增强区域创新生态系统竞争力提供强大势能。除此之外,人工智能在应用过程中可精准捕捉跨区域、跨国界范围内的技术前沿动态,识别并引进与创新主体发展需求高度适配的尖端技术,引领区域创新生态系统竞争力跃升。综上,本文提出如下假说。

假说 H1:人工智能应用能够助推区域创新生态系统竞争力攀升。

(二)间接效应影响

依据要素空间流动理论,高频次要素空间流动往往能够催生更具活力的创新生态,通过创新要素空间上的集聚产生正外部性,进而显著提升创新活动的边际收益^[25]。而人工智能在应用过程中凭借高精度算法与复杂推理模型,能够优化研发资本要素与研发人员要素的时空分布效率,释放区域创新生态系统竞争力跃升动能。

从研发资本要素视角来看,人工智能在应用过程中能够深度嵌入金融大数据模型,加速催生线上融资、智能投顾、视频签约等精准式金融服务,以此驱动资本要素“有的放矢”地汇入区域创新生态系统。与此同时,人工智能在应用过程中亦可构筑高效的信息传播网络,强化区域创新生态系统内部各创新主体之间的互通性,带动资本要素在系统内部实现高效流动与顺畅配置,进而为突破性技术研发提供持续资金保障,驱动区域创新生态系统竞争力跃升。

从研发人员要素视角来看,研发人员出于趋利性的特质,往往倾向汇聚于经济条件优越、就业机会密集、公共服务完善的区域^[26]。而人工智能

应用可加速各行各业数智化转型进程,驱动当地经济高质量发展,形成对优质研发人员的“虹吸”效应。此外,人工智能应用可驱使以人机协同、人智协同的数智化岗位逐渐成为现阶段主流就业趋势,带动当地劳动收入份额持续跃升,增强对研发人员等高素质脑力劳动者的吸引力。另外,人工智能应用有助于催生“人工智能+”公共服务平台,实现远程医疗、智慧养老、在线教育等公共服务资源的供需精准对接,提高研发人员要素流入意愿。进一步来看,研发人员要素流动可有效释放知识外溢效应,引领前沿知识实现空间转移,加快流入地整合重构外部知识并增加知识存量,继而增强区域创新生态系统竞争力。综上,本文提出如下假说。

假说 2:人工智能应用可以研发资本要素流动为传导机制,有效增强区域创新生态系统竞争力。

假说 3:人工智能应用可以研发人员要素流动为传导机制,有效增强区域创新生态系统竞争力。

综上所述,本文的理论机制分析见图 1。

三、模型选择、指标选取与数据说明

(一)模型选择

为考察人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的影响,构建以下模型。

$$Innovation_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Artificial_{it} + \alpha_2 \sum X_{it} + Province_i + Year_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中,下标 i 与 t 分别指代省份与年份; $Innovation_{it}$ 表示区域创新生态系统竞争力; $Artificial_{it}$ 表示人工智能应用;控制变量以 X_{it} 表征; $Province_i$ 为省份固定效应; $Year_t$ 为年份固定效应; ε_{it} 为残差项; α_0 表示截距项; α_1 表示人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的影响效应; α_2 指代控制变量相应的估计系数。

(二)指标选取

1. 被解释变量

区域创新生态系统竞争力 ($Innovation$)。区域创新生态系统竞争力与区域创新竞争力、区域创新系统竞争力等近似概念易产生混淆情况,因而在构建指标体系之前,亟须厘清各个概念之间的区别与侧重点。

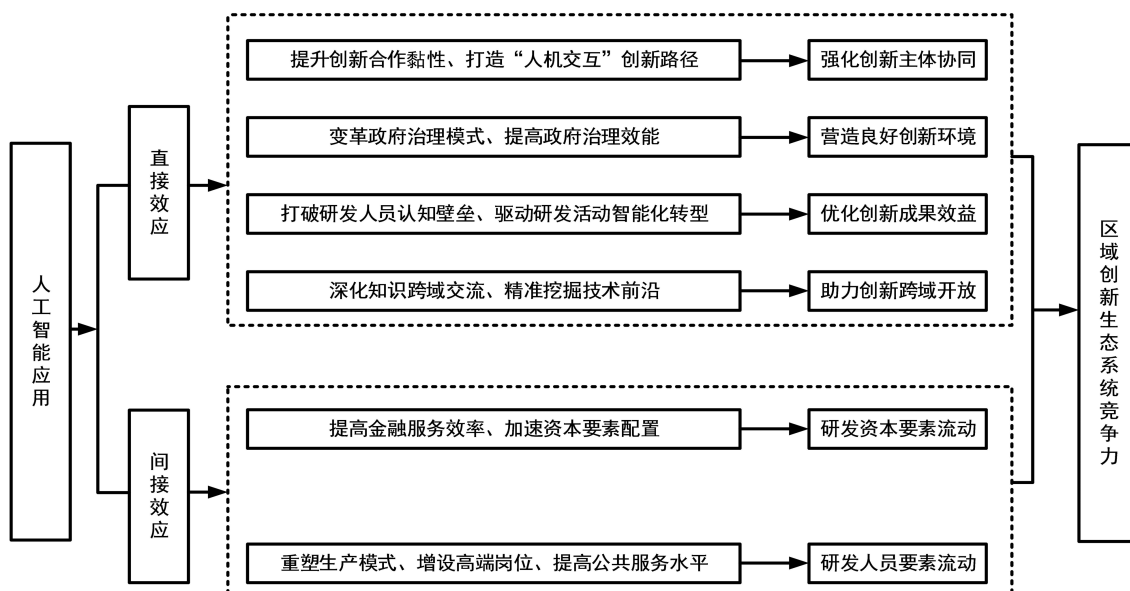


图1 人工智能应用影响区域创新生态系统竞争力的理论机制分析

区域创新竞争力指在特定地理范围内,各类创新主体通过集结、调动与运用创新资源,将前沿知识与技术成果转化为新产品、新工艺与新服务的相对能力^[27]。此概念主要聚焦于创新资源协调与创新活动开展本身,较少涉及创新主体间复杂的系统性关联与制度协调。区域创新系统将制度环境纳入区域创新研究范畴,认为区域创新系统是由彼此关联的创新主体,通过持续互动而形成的区域协作网络组织^[28]。区域创新系统竞争力则是在此基础上相较于其他区域所具备的竞争优势。然而,区域创新系统竞争力主要聚焦静态视角,而对区域创新的开放共享与动态演化缺乏深入探讨。

区域创新生态系统竞争力是将创新主体视作生态学理论中的物种、种群及群落,其概念指在特定地理范围内各类创新主体基于共同价值主张,依托所处创新环境开展物质流动、知识传递与信息交互活动,继而实现价值创造目标的自组织系统^[29],并在此基础上展现出潜在上升空间与相对竞争优势。与上述概念不同的是,区域创新生态系统竞争力具有自组织性、动态性、演化性与开放性特征^[30],其是创新主体、创新环境、创新成果与创新开放等各个子系统之间相互作用、有机整合、协同进化的共同结果。在综合考虑区域创新生态系统竞争力内涵与特征的基础上,借鉴既有学者研

究^[31-32],并结合《中国区域创新能力评价报告》中的细分指标,构建包含创新主体、创新环境、创新成果、创新开放4个一级指标在内的区域创新生态系统竞争力指标体系(见表1),并利用熵权TOPSIS法对区域创新生态系统竞争力进行测算。

(1)创新主体。创新主体作为区域创新生态系统竞争力的能动主体,主要集中于创新组织与创新平台两类组织形态。其中,创新组织是直接开展科研探索与技术攻关的实体机构,选取研究与开发机构数、高技术产业企业数、高技术产业企业数增长率与高等教育学校数进行衡量。创新平台旨在依托服务空间与专业支持,为各类创新组织提供物理环境及服务体系,包括大学科技园数、科技孵化器和众创空间数。

(2)创新环境。创新环境是区域内部创新主体开展创新活动的基础支撑条件,不仅包括硬性层面的物质基础,还包括软性层面的政策保障。其中,物质基础体现为区域内部支撑创新活动的基础设施完备程度,包括移动电话用户数、移动电话用户数增长率。政策保障强调地方政府营造的制度支持体系,包括市场化指数、科技财政拨款与财政支出的比值、政府研发投入增长率、知识产权保护指数。

(3)创新成果。创新成果是对系统内部知识生

产与技术开发水平的综合性评价,反映创新主体在知识交换、合作协同过程中的最终成果,包括基础研究与技术开发两个方面。其中,基础研究虽不直接产生经济效益,但可为创新活动提供原理支撑,包括国内论文数、国内论文增长率与科技著作数。技术开发集中体现区域创新生态系统的成熟度水平与市场价潜力,包括专利申请授权量、发明专利授权数增长率、高技术产业新产品开发项目数、高技术产业技术改造经费支出与技术市场成交额。

(4)创新开放。创新开放强调构建具有开放性与创新活力的共生网络,可有效增强创新主体从外界获取信息与能量的能力,覆盖知识交流与技术引进两个层面。知识交流关注跨区域、跨国界智力资源的双向流动水平,具体以国际论文数、国际论文增长率、作者异省合作科技论文数、作者异国合作科技论文数进行呈现。技术引进聚焦区域对国际前沿技术的吸收能力,主要以国外技术引进合同数衡量。

表 1 区域创新生态系统竞争力指标体系

一级指标	二级指标	测算方式	方向
创新主体	创新组织	研究与开发机构数(个)	正
		高技术产业企业数(个)	正
		高技术产业企业数增长率(%)	正
		高等教育学校数(个)	正
	创新平台	大学科技园数(个)	正
		科技孵化器和众创空间数(家)	正
创新环境	物质基础	移动电话用户数(万户)	正
		移动电话用户数增长率(%)	正
	政策保障	市场化指数(—)	正
		科技财政拨款与财政支出的比值(%)	正
		政府研发投入增长率(%)	正
创新成果	基础研究	知识产权保护指数(—)	正
		国内论文数(篇)	正
		国内论文增长率(%)	正
	技术开发	科技著作数(种)	正
		专利申请授权量(项)	正
		发明专利授权数增长率(%)	正
		高技术产业新产品开发项目数(个)	正
		高技术产业技术改造经费支出(万元)	正
创新开放	知识交流	技术市场成交额(亿元)	正
		国际论文数(篇)	正
		国际论文增长率(%)	正
		作者异省合作科技论文数(篇)	正
	技术引进	作者异国合作科技论文数(篇)	正
		国外技术引进合同数(个)	正

注:市场化指数数据来源于《中国分省份市场化指数报告》;知识产权保护指数数据来源于国家知识产权局公布的《全国知识产权发展状况报告》。

2. 核心解释变量

人工智能应用 (*Artificial*)。人工智能应用指将机器学习、深度学习、自然语言处理等细分技术借助工程化手段部署于特定应用场景,强调将人工智能技术转化为解决具体问题的实践路径。需要特别阐明的是,本文将人工智能应用定位为技术成果在特定场景中的功能化应用,但在界定区域创新生态系统竞争力这一概念的过程中,未将技术终端产出的产业化、市场化与实际应用等相关指标纳入其中,仅涉及基础研究与技术开发环节。因此,人工智能应用并非区域创新生态系统中自身的构成部分或内生要素,具有一定外部性。

工业机器人是人工智能技术在实际生产过程中的具体应用载体,可较为精准地反映人工智能的实际应用状况。由此,借鉴王永钦等^[33]的研究方法,依据 Bartik 工具变量的思路构造工业机器人渗透度变量。参考《国民经济行业分类与代码》(GB/T 4754 - 2011),在将我国二位数行业分类代码统一至 2002 年标准的基础上,选取国际机器人联合会(IFR)发布的六大行业(农业、采矿业、制造业、燃气业、建筑业与教育业)机器人安装数量与国民经济行业二位数分类代码进行匹配,计算出我国行业层面的工业机器人渗透度。随后,将各行业层面的机器人渗透度加总至省份层面,得到省份层面每年的工业机器人渗透度指标,作为人工智能应用的代理变量,具体公式为:

$$Artificial_{it} = \sum_{j=1}^N [(L_{ij}^{2010}/L_j^{2010}) \times (R_{jt}/L_i^{2010})] \quad (2)$$

式(2)中, $Artificial_{it}$ 为 i 省份 t 年份的机器人渗透度,即人工智能应用的代理变量; L_{ij}^{2010} 表示我国 2010 年(基期) i 省份 j 行业的就业人数; L_j^{2010} 为我国 2010 年(基期) j 行业的就业人数; R_{jt} 表示全国层面 j 行业 t 年份的机器人安装量; L_i^{2010} 为 2010 年(基期) i 省份的就业人数。

3. 机制变量

研发要素流动 (*Research*)。参考白俊红等^[34]的研究方法,分别选取研发资本要素流动 (*Capital*) 与研发人员要素流动 (*Personnel*) 衡量研发要素流动。以各省份平均利润水平与金融市场发展水平作

为研发资本要素流动的吸引力变量,具体公式为:

$$Capital_{is} = \ln C_i \times \ln(Profit_s - Profit_i) \times \ln(Finance_s - Finance_i) \times R_{is}^{-2} \quad (3)$$

$$Capital_i = \sum_{s=1}^n Capital_{is} \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, $Capital_{is}$ 代表 i 省份流动至 s 省份的资本要素数量; C_i 指代 i 省份的资本要素存量; $Profit_s$ 和 $Profit_i$ 表征各省份企业利润水平 ($s \neq i$), 利用规模以上工业企业平均利润表征; $Finance_s$ 和 $Finance_i$ 代表各省份金融市场发展水平 ($s \neq i$), 依托年末金融机构存贷款余额与固定资产投资总额的比值测度; R_{is} 表示 i 省份与 s 省份之间的实际距离; $Capital_i$ 为 i 省份在样本期间的资本要素总流动量。

以各省份工资水平作为研发人员要素流动的吸引力变量,具体模型为:

$$Personnel_{is} = \ln P_i \times \ln(Salary_s - Salary_i) \times R_{is}^{-2} \quad (5)$$

$$Personnel_i = \sum_{s=1}^n Personnel_{is} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, $Personnel_{is}$ 为 i 省份流动至 s 省份的人才要素数量; P_i 指代 i 省份的人才要素存量,利用研究与试验发展人员数表征; $Salary_s$ 和 $Salary_i$ 表征各省份工资水平 ($s \neq i$), 利用各省份城镇人员就业平均工资表征; $Personnel_i$ 为 i 省份在样本期间的人才要素总流动量。

4. 控制变量

为规避由于遗漏变量造成的结果偏差,引入以下控制变量:政府支持 (*Government*) 使用地方一般公共预算收入与地区 GDP 的比值衡量;经济发展水平 (*Economic*) 采用人均 GDP 反映;产业结构水平 (*Industrial*) 选取第三产业增加值与第二产业增加值的比值表征;对外开放水平 (*Open*) 根据进出口总额与 GDP 的比值测算。

(三)数据说明

选择2010—2023年我国30个省份(不含西藏自治区与港澳台)的数据作为研究样本。数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国区域创新能力评价报告》、国家知识产权局

官网、中国专利数据服务平台“智慧芽”、IFR 数据库、中国研究数据服务平台(CNRDS)及国泰安数据库(CSMAR)。针对少量缺失数据,运用线性插值法进行填补。

四、实证检验

(一)基准回归检验

针对人工智能应用与区域创新生态系统竞争力的基准线性回归关系开展检验,具体结果汇报于表2。观察数据可知,人工智能应用的影响系数均在1%水平上显著为正,意味着人工智能应用对区域创新生态系统竞争力具有正向促进作用,佐证假说1的论断。产生这种现象的原因可能是:人工智能在应用过程中可内嵌至智慧化数字平台,促使多元创新主体之间实现更高频、泛在、深刻的融通互动,同时驱动传统研发范式向“人智协同”转型升级,引领区域创新生态系统竞争力攀升。

表2 基准回归检验估计结果

变量	(1)	(2)	(3)
	<i>Innovation</i>	<i>Innovation</i>	<i>Innovation</i>
<i>Artificial</i>	0.710 9 *** (5.63)	0.632 9 *** (6.37)	0.577 0 *** (5.04)
<i>Government</i>	—	—	0.231 1 *** (3.35)
<i>Economic</i>	—	—	0.382 5 *** (4.92)
<i>Industrial</i>	—	—	0.338 0 *** (4.74)
<i>Open</i>	—	—	0.050 1 ** (2.05)
截距项	2.925 0 *** (13.73)	3.281 3 *** (11.65)	1.962 3 *** (8.79)
省份固定效应	未控制	控制	控制
年份固定效应	未控制	控制	控制
样本量	420	420	420
R^2	0.619 4	0.659 3	0.706 1

注:***表示 $P < 0.01$, **表示 $P < 0.05$, *表示 $P < 0.1$;小括号内为 t 值。下同。

(二)内生性检验

借鉴黄群慧等^[35]的工具变量构造思路,筛选1984年各省份每百人固定电话数、1984年各省份每百人邮局数作为工具变量,分别以 *Telephone*、*Post* 进行表征。考虑到上述工具变量皆为截面数据,参考Nunn等^[36]的做法,构建1984年各省份每百人固定电话数与上一年全国互联网端口数的交互项、1984年各省份每百人邮局数与上一年全国信息服务技术收入的交互项。选取两阶段最小二

乘法(2SLS)回归检验的结果如表 3 所列。从表 3 中可见,LM 统计量与 F 统计量均显著拒绝原假设,且人工智能应用的影响系数仍在 1% 水平上显著为正,表明在处理内生性问题后,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的正向作用依然成立。

表 3 内生性检验估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>Artificial</i>	<i>Innovation</i>	<i>Artificial</i>	<i>Innovation</i>
	工具变量法			
<i>Artificial</i>	—	1.770 3 *** (6.10)	—	1.381 8 *** (3.25)
<i>Telephone</i>	0.767 4 *** (4.38)	—	—	—
<i>Post</i>	—	—	0.443 8 *** (7.64)	—
控制变量	控制	控制	控制	控制
截距项	3.219 7 *** (10.56)	1.945 1 *** (5.78)	2.703 7 *** (3.32)	2.119 1 *** (5.43)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
<i>Kleibergen-Paap rk LM statistic</i>	243.721 5 [0.000 0]		155.251 7 [0.000 0]	
<i>Kleibergen-Paap rk Wald F statistic</i>	331.125 0		193.499 8	
<i>Stock-Yogo(10%)</i>	16.38		16.38	
样本量	420	420	420	420
<i>R</i> ²	0.664 2	0.712 6	0.690 6	0.744 9

注:中括号内表示 *P* 值。

(三)其他稳健性检验

第一,替换被解释变量。选择发明专利申请授权数作为区域创新生态系统竞争力的替代变量并开展回归,结果见表 4 列(1)。第二,滞后核心解释变量。选取人工智能应用的一阶滞后项(*L. Artificial*)作为核心解释变量并代入式(1)中进行回归,结果汇报于表 4 列(2)。第三,剔除直辖市。剔除四大直辖市样本并重新将数据代入式(1)进行回归,实证结果详见表 4 列(3)。第四,排

表 4 稳健性检验估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>Innovation</i> 替换 被解释变量	<i>Innovation</i> 滞后核心 解释变量	<i>Innovation</i> 剔除直辖市	<i>Innovation</i> 排除极端值
<i>Artificial</i>	0.452 7 *** (4.13)	—	0.546 2 *** (5.09)	0.551 0 *** (4.94)
<i>L. Artificial</i>	—	0.309 5 *** (3.42)	—	—
控制变量	控制	控制	控制	控制
截距项	2.457 7 *** (11.34)	2.824 1 *** (9.76)	1.952 1 *** (3.11)	2.408 8 *** (5.26)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	420	390	364	420
<i>R</i> ²	0.682 9	0.690 5	0.729 8	0.708 7

除极端值。对连续变量数据进行 1% 的两侧截断调整,结果如表 4 列(4)所示。在经由一系列稳健性检验后,人工智能应用影响系数的显著性与符号均与基准回归结果相一致,意味着本文核心结论仍具稳健性。

(四)异质性检验

1. 地理区位异质性

以“秦岭—淮河”为界,将样本划分为南方地区与北方地区两类,之后分组开展回归检验,结果如表 5 列(1)与列(2)所示。可以看出,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的促进作用在南方地区大于北方地区。南方地区具有较强算力与产业发展基础,能够充分释放人工智能先发优势,率先打造“人工智能+”的区域创新生态系统,从而增强区域创新生态系统竞争力。而北方地区虽拥有核心要素集聚、服务链条完整、功能协同融合的北京海淀人工智能集群,但大多数省份存在基础设施薄弱、产业发展滞后、智能人才稀缺的弊病,致使人工智能应用对当地创新生态系统竞争力的增强效应稍显不足。

表 5 异质性检验估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>Innovation</i> 南方地区	<i>Innovation</i> 北方地区	<i>Innovation</i> 人力资本 水平较高 地区	<i>Innovation</i> 人力资本 水平较低 地区
<i>Artificial</i>	0.829 7 *** (5.94)	0.311 7 ** (2.32)	0.952 8 *** (4.64)	0.180 7 * (1.85)
控制变量	控制	控制	控制	控制
截距项	3.531 3 *** (4.62)	2.767 1 *** (5.04)	3.962 2 *** (4.91)	1.923 9 *** (5.78)
组间系数 差异 <i>p</i> 值	0.001 4		0.000 3	
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	210	210	210	210
<i>R</i> ²	0.691 4	0.738 1	0.706 5	0.740 9

注:组间差异检验 *p* 值由费舍尔组合检验抽样 500 次计算得出;南方地区包括上海、江苏、浙江、福建、广东、广西、海南、湖北、湖南、江西、安徽、重庆、四川、贵州和云南 15 个省份;北方地区包括北京、天津、河北、辽宁、吉林、黑龙江、山西、内蒙古、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆 15 个省份。

2. 人力资本异质性

以本科以上高等学校在校生人数占比作为人力资本的衡量指标,并将人力资本水平在中位数以上的地区定义为人力资本水平较高地区,反之

定义为人力资本水平较低地区,并分别进行回归检验。由表5列(3)和列(4)可以看出,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的促进作用相对更强。相比人力资本水平较低地区,人力资本水平较高地区已构建起一流学科生态体系,能够促使人才充分满足人工智能在应用过程中所需的工程思维、数字素养、人智协同等高端能力,为人工智能应用赋予智力支撑,提高区域创新生态系统竞争力。

五、拓展性分析

(一)中介效应检验

参考江艇^[37]对中介效应分析的建议,设定公式为:

$$Capital_{it} = \beta_0 + \beta_1 Artificial_{it} + \beta_2 \sum X_{it} + Province_i + Year_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

$$Personnel_{it} = \chi_0 + \chi_1 Artificial_{it} + \chi_2 \sum X_{it} + Province_i + Year_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, $Capital_{it}$ 与 $Personnel_{it}$ 分别为机制变量研发资本要素流动与研发人员要素流动,二者共同表征研发要素流动,其余变量含义设置同式(1)。表6数据揭示,人工智能应用对研发资本要素流动与研发人员要素流动的影响系数均在1%水平上显著为正,表明人工智能应用可有效驱动研发要素流动。同时既有研究发现,研发要素流动可充分发挥知识外溢效应,促使资本要素、人才要素等研发要素合理配置于创新活动当中^[38],有益于显著增强区域创新生态系统竞争力。以上结果验证了假说2与假说3,证明研发要素流动是人工智能应用增强区域创新生态系统竞争力的重要传导机制。

表6 中介效应检验估计结果

变量	(1)	(2)
	<i>Capital</i>	<i>Personnel</i>
<i>Artificial</i>	0.444 8 *** (4.95)	0.310 6 *** (3.87)
控制变量	控制	控制
截距项	0.884 7 ** (2.35)	1.137 3 *** (6.53)
省份固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
样本量	420	420
<i>R</i> ²	0.807 3	0.752 7

(二)空间效应检验

1. 模型设定

根据地理学第一定律,空间相近的事物存在更密切的关联性与依赖性^[39],因而某一区域的经济活动可对毗邻区域产生影响。人工智能应用可充分发挥空间溢出效应,带动周边区域产业主体系统整合并高效吸收外部前沿知识资源,有效赋能周边区域创新生态系统竞争力攀升。为验证该假说,构建空间杜宾模型为:

$$Innovation_{it} = \varphi_0 + \rho W \times Innovation_{it} + \varphi_1 Artificial_{it} + \theta_1 W \times Artificial_{it} + \varphi_2 \sum X_{it} + \theta_2 W \times \sum X_{it} + Province_i + Year_t + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式(9)中, ρ 指代空间自回归系数; W 表示空间权重矩阵; θ_1 为核心解释变量人工智能应用空间滞后系数; θ_2 代表一系列控制变量的空间滞后系数。其余变量含义同式(1)。

2. 空间自相关检验

通过全局莫兰指数发现人工智能应用与区域创新生态系统竞争力存在显著空间相关性,符合空间计量模型建立条件,具体数据如表7所示。

表7 全局莫兰指数

年份	人工智能应用			区域创新生态系统竞争力		
	邻接矩阵	地理距离矩阵	经济距离矩阵	邻接矩阵	地理距离矩阵	经济距离矩阵
2010	0.321 5 ***	0.224 6 ***	0.451 9 ***	0.107 0 ***	0.193 6 ***	0.337 9 ***
2011	0.318 4 ***	0.235 1 ***	0.432 4 ***	0.147 9 ***	0.230 8 ***	0.317 6 ***
2012	0.266 1 ***	0.175 1 ***	0.388 6 ***	0.125 6 ***	0.243 2 ***	0.297 8 ***
2013	0.253 3 ***	0.199 5 ***	0.414 3 ***	0.136 1 ***	0.213 2 ***	0.330 1 ***
2014	0.275 9 ***	0.209 3 ***	0.425 7 ***	0.116 1 ***	0.191 7 ***	0.357 1 ***
2015	0.244 2 ***	0.191 2 ***	0.419 0 ***	0.142 7 ***	0.190 7 ***	0.332 3 ***
2016	0.231 5 ***	0.178 5 ***	0.435 7 ***	0.129 0 ***	0.204 9 ***	0.326 9 ***
2017	0.278 4 ***	0.165 6 ***	0.443 8 ***	0.097 4 ***	0.237 2 ***	0.392 5 ***
2018	0.289 5 ***	0.174 8 ***	0.455 2 ***	0.101 9 ***	0.230 6 ***	0.375 6 ***
2019	0.243 0 ***	0.162 2 ***	0.451 3 ***	0.085 7 ***	0.213 4 ***	0.374 2 ***
2020	0.262 5 ***	0.183 0 ***	0.464 6 ***	0.132 3 ***	0.187 3 ***	0.427 8 ***
2021	0.283 1 ***	0.188 3 ***	0.473 4 ***	0.115 3 ***	0.200 0 ***	0.442 5 ***
2022	0.266 0 ***	0.202 3 ***	0.480 5 ***	0.083 5 ***	0.225 8 ***	0.479 0 ***
2023	0.276 3 ***	0.211 8 ***	0.488 1 ***	0.076 3 ***	0.213 2 ***	0.468 9 ***

3. 空间效应检验结果

本文通过 LM 检验、Hausman 检验、LR 检验与 Wald 检验确定最优空间计量模型,结果表明应选定双向固定效应的空间杜宾模型(SDM)开展空间效应检验。表8列出了在邻接矩阵、地理距离矩阵与经济距离矩阵3种不同权重矩阵下,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的空间溢出效应。从表8可以看出,人工智能应用及其空间滞后项对区域创新生态系统竞争力的影响系数均显著为

正,佐证人工智能应用同时能够提升本地及邻近区域的创新生态系统竞争力。进一步地,将人工智能应用的空间溢出效应分解为直接效应、间接效应及总效应。由表 8 数据可知,人工智能应用的直接效应、间接效应及总效应系数均为正值,且至少通过 5% 的显著性检验。比较而言,在 3 种不同权重矩阵下,经济距离矩阵的间接效应表现最为显著。综上所述,人工智能应用可充分发挥空间外溢效应,强化区域之间创新主体互联互通与要素交换,在带动本本地区创新生态系统竞争力的同时,对邻近区域创新生态系统竞争力同样具有较强赋能作用。

表 8 空间效应检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
	邻接矩阵	地理距离矩阵	经济距离矩阵
	Innovation	Innovation	Innovation
Artificial	0.438 3 *** (4.16)	0.515 5 *** (6.79)	0.948 4 *** (3.31)
$W \times Artificial$	0.145 6 *** (3.82)	0.570 8 *** (4.34)	1.133 6 *** (7.54)
直接效应	0.452 4 *** (5.30)	0.605 2 *** (7.28)	1.238 6 *** (5.95)
间接效应	0.232 2 ** (2.29)	1.055 4 ** (2.37)	2.925 5 *** (4.37)
总效应	0.684 6 *** (3.55)	1.660 6 *** (5.21)	4.164 1 *** (5.05)
Rho	0.165 0 *** (3.42)	0.288 9 *** (2.93)	0.378 2 *** (3.97)
$Sigma2_e$	0.043 3 *** (5.01)	0.046 5 *** (4.57)	0.065 4 *** (5.90)
控制变量	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
样本量	420	420	420
R^2	0.624 9	0.633 6	0.640 5
Log-L	889.112 7	786.065 4	898.204 4

六、结论与建议

设置 2010—2023 年我国 30 个省份面板数据作为研究样本,采用多种计量模型深入分析人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的内在关联,主要得出以下研究结论:第一,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力存在正向影响;第二,在南方地区与人力资本水平较高地区,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的强化作用更为突出;第三,人工智能应用可通过驱动研发资本要素流动与研发人员要素流动,间接增强区域创新生态系统竞争力;第四,人工智能应用对区域创新生态系统竞争力的影响存在正向空间溢出效应。

一方面,加快人工智能技术迭代升级。首先,

应扎实推进人工智能领域基础研究与应用研究,牵头打造以人工智能领军型企业为引领、以高水平研究型大学与科研院所为支撑的高能级创新联合体,集中力量强化类脑芯片、超算芯片、高速网络芯片等关键技术供给,以此发挥人工智能应用赋能效力,增强区域创新生态系统竞争力。其次,应积极打造人工智能工程化创新中心及人工智能技术孵化器,着力开发高度适应科技研发领域的科创数据大模型,从而增强人工智能复杂场景推理能力,为区域创新生态系统突破开拓优势。最后,应构建起覆盖“基础层 + 技术层 + 应用层”的全栈式人工智能产业链,形成“硬科技底座 + 算法创新 + 场景辐射”的协同格局,进而全力打造人工智能先锋地区,助推区域创新生态系统竞争力攀升。

另一方面,着力完善研发要素流动环境。从研发资本要素来看,金融机构与商业银行应加速推进“人工智能 + 金融”行动,打造集成用户行为画像、全域识图构建、风险行为识别等功能于一体的智慧金融平台,从而实现“历史交易数据授信 + 实时交易数据用信 + 贷后履约数据预警”的全流程管控,强化研发资本调配能力,为增强区域创新生态系统竞争力提供资金保障。从研发人员要素来看,应积极探索柔性引才、异地用才机制,运用人工智能技术全面整合研发人才需求动态、储备现状、流动趋势等数据资源,为畅通区域创新生态系统人才匹配通道提供技术加持。另外,应重点完善研发人才职称考评机制,开辟以创新成果为导向的晋升通道。同时,应同步建立区域、企业、高校间研发人才评价标准互通互认机制,消除人才双向流动的制度障碍,打造研发人才跨地域顺畅流动的良好环境,驱动区域创新生态系统竞争力跃升。

参考文献:

[1] 贺德方,曾建勋,陈涛,等. 科技创新政策分析体系研究[J]. 中国软科学,2025(1):1-9.
[2] 周文,许凌云. 论新质生产力:内涵特征与重要着力点[J]. 改革,2023(10):1-13.
[3] 刘华军,郭立祥. 中国创新力的空间差异及其来源结构分解[J]. 经济与管理评论,2021,37(4):125-136.
[4] 王德起,何晶彦,吴件. 京津冀区域创新生态系统:运行机理及效果评价[J]. 科技进步与对策,2020,37(10):53-61.

- [5]盛朝迅. 高水平科技自立自强的内涵特征、评价指标与实现路径[J]. 改革, 2024(1): 40-50.
- [6]王一鸣. 百年大变局、高质量发展与构建新发展格局[J]. 管理世界, 2020, 36(12): 1-13.
- [7]孙伟平. 智能时代的社会基本矛盾与社会发展动力[J]. 中国社会科学, 2025(3): 42-59, 205.
- [8]徐雷, 唐晓华. 企业竞争力的“双能力”与经营绩效[J]. 软科学, 2013, 27(10): 87-91.
- [9] TANSLEY A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms[J]. Ecology, 1935, 16(3): 284-307.
- [10]杨力, 刘敦虎, 魏奇峰. 共生理论下区域创新生态系统能级提升研究[J]. 科学学研究, 2023, 41(10): 1897-1909.
- [11]解学梅, 刘晓杰. 区域创新生态系统生态位适宜度评价与预测: 基于 2009—2018 中国 30 个省市数据实证研究[J]. 科学学研究, 2021, 39(9): 1706-1719.
- [12]储节旺, 李振延. 长三角一体化区域创新生态系统及其知识协同机制研究[J]. 现代情报, 2023, 43(5): 14-22.
- [13]王德起, 何昌彦, 吴件. 京津冀区域创新生态系统: 运行机理及效果评价[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(10): 53-61.
- [14]刘家树, 张慧, 周梦琦. 多主体协同增强区域创新生态系统韧性的机制研究: 基于知识流动视角[J]. 财贸研究, 2024, 35(10): 31-43.
- [15]陈邑早, 黄诗华, 王圣媛. 我国区域创新生态系统运行效率: 基于创新价值链视角[J]. 科研管理, 2022, 43(7): 11-19.
- [16]李晓娣, 饶美仙, 原媛. 数智情境下如何提升区域创新生态系统能级? [J]. 科学学研究, 2024, 42(9): 1988-1999.
- [17]姜红, 盖金龙, 杨静萱. 数字化转型背景下区域创新生态系统效能提升机制研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2025, 46(1): 74-89.
- [18]沈志锋, 李静, 李智慧. 人工智能参与下的创新生态系统构建研究[J]. 科研管理, 2024, 45(10): 12-23.
- [19]刘潇, 李家宝. 人工智能创新生态系统中的技术互补与协同创新[J]. 科技进步与对策, 2025, 42(3): 14-26.
- [20]李玉花, 林雨昕, 李丹丹. 人工智能技术应用如何影响企业创新[J]. 中国工业经济, 2024(10): 155-173.
- [21]刘华珂, 李旭超, 聂禾, 等. AI 时代: 城市数智化转型与企业创新[J]. 中国软科学, 2024(2): 38-54.
- [22]彭奕潇, 朱李鸣, 俞翔. 数字化区域创新生态系统: 概念、特征和展望[J]. 科学管理研究, 2024, 42(5): 75-86.
- [23]高奇琦. 智能革命与国家治理现代化初探[J]. 中国社会科学, 2020(7): 81-102, 205-206.
- [24]余江, 张越, 周易. 人工智能驱动的科研新范式及学科应用研究[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(2): 362-370.
- [25] ACEMOGLU D, DELL M. Productivity differences between and within countries[J]. American economic journal: macroeconomics, 2010, 2(1): 169-188.
- [26]王欣亮, 汪晓燕, 刘飞. 税收竞争有利于提升区域创新绩效吗: 基于创新要素流动的空间机制分析[J]. 财贸研究, 2021, 32(6): 98-110.
- [27]王鹏, 李硕硕. 政府支持下省域创新竞争力评价及创新集群寻优模型研究: 基于粒子群算法的实证分析[J]. 经济经纬, 2018, 35(4): 15-22.
- [28] COOKE P, URANGA M G, ETXEBARRIA G. Regional innovation systems: institutional and organisational dimensions[J]. Research policy, 1997, 26(4/5): 475-491.
- [29]杨博旭, 柳卸林, 吉晓慧. 区域创新生态系统: 知识基础与理论框架[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(13): 152-160.
- [30]栗志慧, 刘洁. 数字化背景下京津冀城市群区域创新生态系统评价研究[J]. 中国软科学, 2024(增刊1): 191-202.
- [31]吕鲲, 潘均柏, 林志森, 等. 创新型省份建设、区域数智化和区域创新生态系统竞争力: 影响机制与准自然实验[J]. 研究与发展管理, 2024, 36(6): 137-150.
- [32]蒋瑜洁, 郝鑫. 区域科技创新中心建设政策对区域科技创新能力的影响: 基于省级面板数据的实证分析[J]. 改革, 2025(3): 142-158.
- [33]王永钦, 董雯. 机器人的兴起如何影响中国劳动力市场: 来自制造业上市公司的证据[J]. 经济研究, 2020, 55(10): 159-175.
- [34]白俊红, 王钺, 蒋伏心, 等. 研发要素流动、空间知识溢出与经济增长[J]. 经济研究, 2017, 52(7): 109-123.
- [35]黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济, 2019(8): 5-23.
- [36] NUNN N, QIAN N. US food aid and civil conflict[J]. American economic review, 2014, 104(6): 1630-1666.
- [37]江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.
- [38]卓乘风, 邓峰. 创新要素流动与区域创新绩效: 空间视角下政府调节作用的非线性检验[J]. 科学学与科学技术管理, 2017, 38(7): 15-26.
- [39] TOBLER W R. A Computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. Economic geography, 1970, 46(1): 234-240.

(本文责编: 润 泽)