【区域经济与产业发展】

新质生产力背景下中国人工智能发展的时空格局与驱动因素*

王家庭 齐嘉瀚 王浩然

摘 要：智能时代的生产力是人工智能(AI)技术全面改造和加持的新质生产力，人工智能是推动新质生产力发展的核心动力。借鉴“物理—事理—人理”(WSR)系统方法论，构建人工智能发展的评价指标，定量刻画了2011—2022年中国31个省份人工智能发展的时空演变特征，并利用随机森林算法识别了新质生产力背景下中国人工智能发展的关键驱动因素及其演进特征。结果显示：中国人工智能发展水平呈现稳步提升的演进趋势，在时间上可以划分为探索起步、稳步发展和快速发展三个阶段，在空间上呈现东部地区领先发展、中部地区稳步发展、西部地区追赶发展的格局；中国人工智能发展演变具有空间溢出效应，人工智能发展的增长趋势呈现一定的马太效应；中国人工智能的空间分异显著，但整体不均衡程度有所下降；关键驱动因素中，技术创新、市场化水平、研发强度、绿色金融发展水平为主要驱动因素，大部分驱动因素同人工智能发展水平呈非线性响应关系。

关键词：新质生产力；人工智能；WSR系统方法论；随机森林算法

中图分类号：F49；F127 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-5766(2025)03-0046-20 **收稿日期**：2025-02-15

***基金项目**：国家社会科学基金项目“我国区域塌陷的多维测度、形成机制与治理模式研究”(21BJL057)。

作者简介：王家庭，男，南开大学中国城市与区域经济研究中心教授，博士生导师(天津 300071)。

齐嘉瀚，男，南开大学中国城市与区域经济研究中心硕士生(天津 300071)。

王浩然，男，南开大学中国城市与区域经济研究中心硕士生(天津 300071)。

一、引言

大力发展新质生产力，对于加快建设中国式现代化具有重大意义。2023年9月，习近平总书记在黑龙江主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会时提到了新质生产力这一概念，强调要积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业，积极培育未来产业，加快形成新质生产力，增强发展新动能(习近平，2023)。人工智能作为生产力智能化、数字化的典型代表，是新质生产力的重要组成部分和驱动力量。

人工智能是新一轮科技革命的重要驱动力，其发展直接关系中国能否抓住产业变革机遇。新质生产力的核心特征是生产要素的智能化升级，而工业机器人是人工智能技术在生产领域最直接的物化形式。此外，机器人密度反映人工智能对劳动力的替代程度，是衡量生产力质变的重要指标。根据国际机器人联合会(IFR)所公布的2006—2019年机器人存量数据，中国的机器人存量在统计期间不断增长，机器人安装量年均增速43.77%，2019年达到140500台，以超过第二位日本90600台的绝对优势达到了世界第一。与此同时，预计2030年中国人工智能在全球经济中将贡献15.7万亿美元，提高全

球GDP年均增速1.2个百分点。在此背景下，推动人工智能的高质量发展已成为中国现代化产业体系建设的内在要求，对于加快形成新质生产力、塑造高质量发展的新动能及新优势具有重要意义。

与此同时，中国区域经济仍面临发展不平衡问题，发达地区与欠发达地区间的“数字鸿沟”依然存在，区域间人工智能的不均衡发展可能会加剧区域增长动能差距，从而为实现社会公平和区域协调发展带来新挑战（陈楠等，2023）。研究中国人工智能发展的时空格局演进规律，识别其关键驱动因素及响应方式，对于推动人工智能产业的高质量发展和新质生产力的合理布局具有重要现实意义。

随着人工智能技术的不断进步与推广应用，国内学者围绕人工智能发展这一主题展开了广泛的探讨。从研究内容来看，现有研究集中于以下三个方面。第一个方面是人工智能发展的现实状况、问题挑战与路径机制的定性分析。例如，Atack et al.（2019）认为人工智能暂时难以完全替代创造型和情感型劳动的工作岗位，但会增加高技能劳动岗位，推动劳动技能需求的高级化；张鑫等（2019）通过与美国等发达国家对比，对中国人工智能发展的现状、问题与路径进行探索；罗映宇等（2023）运用系统文献综述法，对人工智能发展现实问题的研究进展进行梳理与解析。第二个方面主要聚焦人工智能发展的量化评估方法和指标体系构建。陈凤先（2022）从经济学视角梳理了人工智能发展水平的测度文献，总结出综合发展、渗透率和经济影响等指标体系及数据处理方法；顾国达等（2021）构建了涵盖环境支撑力、知识创造力和产业竞争力的人工智能动态评价指标体系，并利用智能算法对人工智能发展水平进行量化评估。第三个方面主要关注人工智能发展的经济效应评估。从经济增长方面来看，程文（2021）从经济发展角度构建动态模型，揭示了“索洛悖论”下无形资本在短期抑制但长期促进劳动生产率增长的机制；曹静等（2018）系统综述了人工智能对经济增长、就业和收入不平等的影响，探讨了缓解其负面效应的政策措施和未来研究方向。从产业升级方面来看，郭凯明（2019）构建了多部门动态一般均衡模型，探讨了人工智能如何通过促使生产要素跨产业流动，推动产业结构转型升级和劳动收入份额变化；王文等（2020）通过理论与实证研究，分析工业机器人的广泛应用对中国服务业结构升级的助推作用；汝刚等（2020）探讨了如何利用人工智能这一新型要素改造传统农业、提升农产品质量与效益、促进农业与第二、第三产业融合，从而推动农业产业升级。从劳动力就业方面来看，Michaels et al.（2015）、David（2017）考察了机器人应用对劳动力就业的替代效应，发现工业机器人的应用对低技能职业就业规模产生了负面影响；李磊等（2021）基于中国微观企业数据实证分析了机器人使用对工业企业的影响，揭示出工业机器人通过扩大产出规模和提高生产效率促进了企业劳动力需求；王永钦等（2020）利用中国行业机器人应用数据和制造业上市公司微观数据，从企业层面实证研究了工业机器人应用对中国劳动力市场的替代效应和就业极化现象及其影响机制。总体来看，现有文献仍有以下待完善之处：首先，现有研究构建的人工智能发展指标体系包含较多宏观粗放的经济指标，与人工智能发展的相关性有待提升；其次，现有研究对中国人工智能发展驱动因素的探讨大多局限于显著性层面，对驱动因素的重要性排序和响应方式尚未有清晰认识；最后，现有研究所探讨的驱动因素大多为经济统计数据，未能充分体现出新质生产力的时代背景和发展要求。有鉴于此，本文基于2011—2022年中国省域层面的面板数据，运用核密度估计法、空间马尔科夫链、Dagum基尼系数等方法刻画中国人工智能发展的时空分异特征，并在此基础上利用随机森林算法深度剖析新质生产力背景下中国人工智能发展的驱动因素及其影响机理，探寻新时代中国人工智能发展水平的提升路径。

与现有研究相比，本文的边际贡献如下：其一，基于物理—事理—人理（WRS）系统方法论构建人工智能发展的指标体系，并从阶段特征、区域差异、动态演进和长期增长趋势等多角度探索和揭示了中国人工智能发展的时空分布格局和动态演进规律，为把握中国人工智能发展的演化特征提供了新视角。其二，基于新质生产力的理论内涵解析中国人工智能发展的动力机制，并进一步利用机器学习算法探讨了人工智能发展驱动因素的重要性排序，是对现有研究的拓展延伸。其三，分析了中国人工智能发展同驱动因素的非线性响应关系，并精准识别了非线性路径拐点，为推动中国人工智能产业的高质量发展提供理论支撑与实践参考。

二、理论分析

为进一步认识新质生产力背景下人工智能发展与区域经济的内在联系及其驱动因素，本部分从理论层面展开深入分析。

（一）人工智能、新质生产力与区域经济转型的内在联系

新质生产力是新一轮科技革命和产业变革背景下推动区域经济转型的重要动能。区别于传统生产力，新质生产力更加突出创新驱动、产业升级和数字赋能，摆脱了传统增长路径，更符合高质量发展要求（张占斌等，2024）。在生产力发展的动力机制方面，传统生产力发展模式表现为要素规模扩张驱动与投资驱动，而新质生产力的发展动力源于自主创新能力的跃升、生产要素组合方式的创新以及产业体系的深度转型，这使得新质生产力能够在降低实体性要素消耗强度的前提下实现经济发展的“量质齐升”。在生产力要素结构方面，新质生产力的本质特征表现为劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的跃升。这种要素结构的优化不仅拓展了生产可能性边界，更通过要素间的协同创新效应，推动形成以创新为核心动力的生产力发展新范式。在生产力载体方面，新质生产力的发展伴随着产业体系的结构性变革，新质生产力的发展要求构建战略性新兴产业的培育机制、前瞻性布局未来产业，并通过技术的突破推动传统产业转型升级，从而加快产业链供应链的现代化重构，最终实现产业体系整体效能的提升。在生产力评价方面，新质生产力通过技术进步、生产组织优化、资源合理配置等方式推动全要素生产率的大幅提升，推动区域经济的可持续发展。

人工智能与新质生产力发展之间的关系主要体现在以下三个方面：首先，人工智能的发展驱动新质生产力核心技术的进步。新质生产力的核心在于创新驱动，而创新所需的资本基础和劳动力基础则依赖新技术的突破与应用。作为当前科技发展中最前沿、最具代表性的技术之一，人工智能凭借其强大的算法和数据处理能力以及显著的知识溢出效应，能够持续推动新技术的涌现，不仅能够促进区域内相关智能行业的技术进步，还能够为其他行业的智能化转型提供有力支持，从而推动区域生产力向更高层次、更先进的形态迈进。其次，人工智能的发展促进产业的深度转型。现代化产业体系是新质生产力发展的具体实践与成果展示的载体。主导产业和支柱产业的迭代升级是新质生产力生成的核心机制。人工智能技术的发展，可以通过不断的技术迭代与创新，持续催生出新的制造业、服务业和新兴业态，进而推动区域产业结构的系统性重构。这一过程不仅促进了区域主导产业和支柱产业的迭代升级，还增强了区域产业链的完整性与竞争力。通过AI技术的应用，传统产业得以实现智能化转型，提升生产效率和产品质量，同时催生出新的产业形态和商业模式，从而不断壮大区域新质生产力发展的产业基础，推动区域经济向高附加值和高技术含量方向延伸。最后，人工智能的发展促进新质生产力三要素的动态优化组合。在人工智能赋能下，区域内的新质生产力要素展现出新的特性和状态。具体而言，具有颠覆性和通用性的人工智能技术能够催生更多新型生产工具，并推动数据作为关键生产要素的广泛应用。同时，智能化的生产资料与高素质的劳动者相互协同，通过从训练数据等新型劳动对象中获取决策支持，能够更好地应对复杂的生产环境和不断变化的市场需求，实现区域全要素生产率的显著提升。

综上所述，新质生产力是区域经济转型的重要动能，而新质生产力的培养与发展离不开人工智能发展所带来的生产力提升。人工智能不仅引领了技术的颠覆性突破、生产要素的创新配置和产业的飞跃升级，其智能属性更能加快新质生产力的发展，成为区域经济现代化的重要体现和衡量新质生产力发展水平的关键指标。人工智能、新质生产力与区域经济转型的内在联系机制如图1所示。

（二）中国人工智能发展的驱动因素分析

立足新质生产力背景下中国人工智能高质量发展的现实需求，本文从经济发展、产业结构、创新能力和政府政策四个维度出发（见表1、图2），分析中国人工智能发展驱动因素的影响机制。

1.经济发展是中国人工智能发展的物质保障

经济发展水平是影响人工智能发展的基础性因素。作为高度知识密集型的产业，人工智能的发展离不开高素质人才的集聚，而经济发展水平越高，对人力资本的吸引力越强，越有利于促进区域人力资源的互补和高效集聚。同时，对外开放

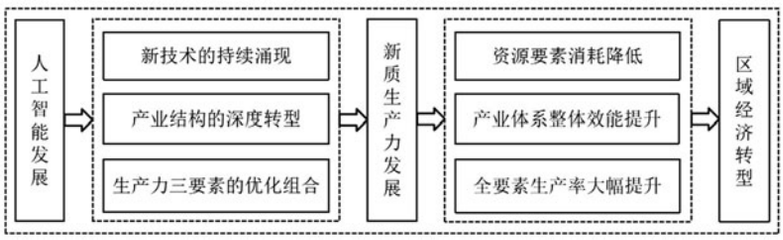

图1　人工智能、新质生产力与区域经济转型的内在联系机制

资料来源:作者整理绘制。

表1　中国人工智能发展驱动因素指标

类别	影响因素	具体指标
经济发展	经济发展水平	人均GDP
	对外开放	进出口总额/地区生产总值
	市场化水平	地区市场化指数
	消费水平	社会消费品零售总额/地区生产总值
	绿色金融发展水平	利用熵权法测度的绿色金融发展指数
产业结构	产业结构高级化	产业结构高级化指数
	战略性新兴产业	战略性新兴产业上市公司数量
创新能力	技术创新	万人创新专利申请数
	协同创新	Web of Science合作论文数量(千篇)
	研发强度	R&D经费内部支出/地区生产总值
	创新人才	R&D研发人员全时当量
政府政策	知识产权保护力度	知识产权保护指数
	政府干预	财政支出/地区生产总值

资料来源:作者整理绘制。

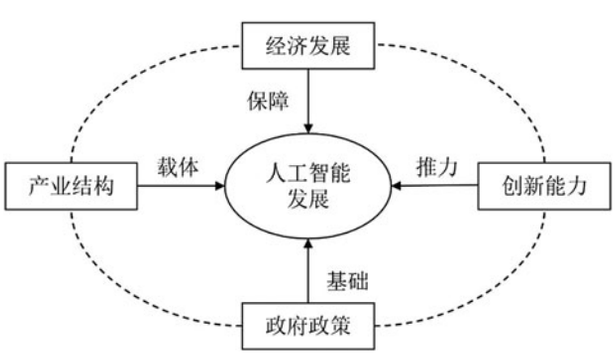

图2　中国人工智能发展驱动因素的影响机制

资料来源:作者整理绘制。

和市场化水平的提高有助于吸引高质量外资进入,促进本地劳动力学习和吸收外资企业的人工智能技术与知识,并通过人员流动带来的溢出效应促进人工智能发展水平的提升(刘斌等,2021)。消费升级有助于催生新业态、新模式,拓宽了人工智能的应用领域和发展空间,对人工智能发展具有重要的赋能作用。最后,人工智能研发、应用场景拓展等各环节均需大量资金。绿色金融通过绿色信贷等多元化融资渠道,能够为人工智能技术与绿色低碳技术的结合提供资金保障,此外,绿色金融在支持绿色产业发展的同时,还会带动人工智能在这些产业中的应用需求,促进人工智能产业与绿色产业协同发展,拓展人工智能应用市场。因此,本文选取经济发展水平、对外开放、市场化水平、消费水平和绿色金融发展水平作为中国人工智能发展的驱动因素。

2.产业结构是中国人工智能发展的承载主体

现代产业承接科技成果的应用与转化,是新质生产力的具体实践场域与成果展现。新质生产力的形成过程,就是产业结构向高级形态演变的过程。新质生产力背景下,战略性新兴产业是产业升级主导方向,同时也是人工智能的主要应用领域。战略性新兴产业的发展壮大有利于为人工智能的发展提供应用场景、市场需求和资金支持。因此,本文将产业结构高级化和战略性新兴产业作为中国人工智能发展的驱动因素。

3.创新能力是中国人工智能发展的核心基础

人工智能作为新质生产力的核心要素，具有鲜明的创新驱动特性，技术创新是人工智能发展所必不可少的基础性条件。同时，区域间的协同创新能够通过创新资源的共享与优势互补，释放创新要素活力，提升整体创新能力和质量（白俊红等，2015）。通过协同创新，能够有效提高创新资源的配置效率，缓解人工智能发展所面临的创新资源约束。因此，本文选取技术创新、协同创新、研发强度和创新人才作为中国人工智能发展的驱动因素。

4.政府政策是中国人工智能发展的重要推力

人工智能产业研发费用高、周期长，因此具有高投入和高风险特征。此外，人工智能技术具有公共产品属性，存在效益外溢性，关键技术研发存在激励不足的困境。政府的政策支持能够降低人工智能技术研发与应用中面临的资金不足或资金链断裂风险，并且减少研发主体因知识、技术外溢而造成的额外损失。此外，知识产权保护能够为区域内人工智能领域的创新人才与企业提供坚实的权益保障。这降低了创新的风险，使得创新者更有勇气探索高风险的技术路径，为人工智能技术的突破提供强大的内在动力。因此，本文将知识产权保护力度和政府干预纳入中国人工智能发展的驱动因素分析。

三、研究方法与数据说明

本部分对人工智能发展的测度指标、测度方法及数据来源进行说明，并给出初步测算结果。

（一）研究方法

1.中国人工智能发展的测度指标

关于人工智能发展水平的测算，现有文献主要采用工业机器人安装密度（Cheng et al.，2019；Acemoglu et al.，2020）、专利申请数（邹伟勇等，2022）和复合指标体系（孙早，2019）等方法。然而，这些方法虽然有效量化了人工智能技术的发展和应用范围，但对于技术背后的人文和社会因素的关注尚存在局限性。相较之下，“物理—事理—人理”（WSR）系统方法论提供了一种更为全面的分析框架。这种方法论不仅涵盖了人工智能的物理实现，也包括了事理层面的系统高效合理的运行方式以及人理层面的主观能动性分析。本文参考张铭等（2022）的研究，基于WSR系统方法论对人工智能发展水平进行测算。这种测算方法的优点在于，其可以有效地弥补传统测度方法的不足，实现对人工智能技术社会适应性和影响的较为全面的评估。人工智能的发展需要多方面因素的紧密合作，这包括系统的物质基础（物）、系统的运行机制（事）以及参与者之间的互动和影响（人），这些都契合WSR系统方法论的分析框架。基于现有研究，本文将从物理、事理、人理三个层面探讨人工智能发展的评价指标。

“物理”涉及物质运动的原理，通过自然科学的知识来解释和研究客观现象及实体存在（顾基发等，2007）。本文以人工智能发展水平为分析单元，其物理因素是指人工智能发展演化过程中的客观存在。人工智能发展的资源依赖主要由该区域或组织的相关产业规模和基础决定，这是制约其技术进步和成熟度的基础。人工智能企业数代表了人工智能产业集聚水平（叶琴等，2022），而人工智能产业集聚一方面可以产生规模效应，实现规模报酬递增，通过共享交通、能源、通信等基础设施和各类服务设施，以及企业间的协同合作，形成完整的AI产业链条，降低AI产业发展的成本压力；另一方面，人工智能产业集聚还可以产生知识溢出效应，当AI企业和科研机构在地理空间上相互邻近时，企业之间、企业与科研机构之间能够更加便利地交流和学习新知识、新技术、新工艺，这种紧密的互动加速了知识的创造、传播和应用，促进人工智能技术的迭代升级，为人工智能的发展提供技术保障。因此，本文将区域内人工智能企业数量作为衡量人工智能发展水平的主要物理因素。

“事理”指的是从客观现实世界存在的规律中总结出的方法，是指导人类认识世界及改造世界的重要工具（顾基发等，2007）。从人工智能发展的角度看，“事理”因素包括政府的介入、执行和管理方式，是调节人工智能发展环境和效率的关键机制。政府人工智能关注度作为引导人工智能发展方向与激发人工智能创新活力的关键力量，是影响人工智能发展的“事理”因素。政府的关注和重视为人工智能的发展提供资金投入和政策支持，为人工智能技术的创新提供了强大的动力（刘刚等，2022）。政府的政策支持和投入不仅促进了技术创新，还吸引了大量的科技人才流入人工智能领域，为相关产

业的发展提供了智力支持(张贵兰等,2022)。此外,政府还能通过建设人工智能创新平台等方式,为企业和科研机构提供创新的环境和资源,加速技术的转化和应用。进一步夯实其物理基础,增强人工智能的发展潜力。因此,本文将人工智能发展政府关注度作为衡量人工智能发展水平的主要事理因素。

"人理"指的是基于人的行为和思维原则,利用人的思想对"事"和"物"的发展进行指导(张铭等,2022)。人工智能技术的创新和发展离不开人的支撑。人的创新力是塑造与推动人工智能产业发展的核心要素。因此,"人理"层面的因素聚焦体现人的创新力的区域特征,即人工智能专利申请数。一方面,劳动者是创新的主体,也是创新成果转化的主体。人工智能专利的产生需要劳动者投入大量的创造性思维和努力。从技术研发的角度来看,劳动者需要深入理解问题、提出创新的解决方案,并通过不断的实验和改进来实现技术的突破。另一方面,人工智能专利申请数是人主观能动性的充分体现(朱文韵等,2023)。随着人工智能技术的不断发展,劳动者需要积极主动地探索新的技术方向和应用场景。通过不断学习和实践,提高自己的技术水平和创新能力,从而为人工智能专利的申请提供了坚实的基础。因此,人工智能相关专利的申请情况体现了"人理"层面的特征。

综上,本文在WSR系统方法论的指导下,将人工智能企业数量、人工智能发展政府关注度、人工智能专利申请数分别作为"物理"、"事理"和"人理"的代理指标。鉴于各指标在量纲和数值范围上存在显著差异,本文首先对各指标进行归一化处理以消除这些影响,之后利用熵值法测算中国人工智能发展水平。为便于可视化分析,本文将熵值法得到的测算结果放大100倍。

2.中国人工智能发展的测度方法

本文选取核密度估计法、马尔科夫链方法、Dagum基尼系数方法、随机森林模型等四个方法来研究人工智能发展。作为一种常用的非参数估计方法,核密度估计能够更直观地比较不同地区或时间段之间的经济增长分布差异,从而识别潜在的异质性特征,因此,本文采用高斯核密度函数来分析研究人工智能发展的动态演进过程,计算公式参考王家庭等(2023)。考虑到人工智能发展的动态特征,本研究引入了马尔科夫链方法来分析中国人工智能发展的动态转移特征、考察相邻地区人工智能发展对本地区状态转移概率的影响,分析空间因素对人工智能发展的影响,计算公式参照穆学青等(2022),通过构建传统马尔科夫链模型,能够量化不同人工智能发展状态之间的转移概率,揭示人工智能发展的稳定性和可持续性。考虑到中国人工智能发展的复杂性和多样性,为分析人工智能发展水平的空间分布特征,本文运用了Dagum(1997)所提出的基尼系数子群分解法,参考杨骞等(2019)的研究,对中国人工智能发展的空间分异特征展开分析。随机森林是一种基于集成学习的有监督机器学习算法,它由多个决策树组成,通过对每个决策树进行投票或平均预测结果来得到最终的预测结果,其对于多重共线性不敏感,对缺失数据和非平衡数据也相对稳健,具有较高的预测准确率且不容易陷入过拟合(赵艳艳等,2021)。因此,本文基于Python语言进行随机森林模型的运算,构建人工智能发展与驱动因素的回归分析模型。

(二)数据来源及处理

本文使用的统计数据均来自CEIC数据库和EPS数据库,专利数据来自CNRDS数据库和PatentHub专利数据库。知识产权保护指数数据依据国家知识产权局公布的全国知识产权发展状况报告整理得出。战略性新兴产业上市公司的识别依据《战略性新兴产业分类(2018)》和《上市公司行业分类指引》(2012年修订)。人工智能企业数来自天眼查。本文参考张国友等(2020)的方法,利用熵权法构建省级绿色金融指数指标。为衡量人工智能政府关注度,本文参考金灿阳等(2022)的做法,利用Python对各省政府工作报告进行分词处理,统计人工智能相关词频数量并计算占比。同时,通过Python对Web of Science论文平台的区域间论文合作数据进行爬虫,将Web of Science合作论文数量作为协同创新的代理变量。部分指标需要进一步计算获得。对于部分缺失数据,本文采用插值法补全。产业结构高级化指数的计算参考付凌晖(2010)的做法,地区市场化指数的计算参考樊纲等(2011)的做法。

(三)中国人工智能发展水平的测算结果

本文基于WRS系统方法论,利用熵权法对中国人工智能发展水平进行测算。表2展示了2011年、

2015年、2019年和2022年中国31个省区市（不含港澳台）的人工智能发展水平测算结果。

首先，整体来看，全国平均人工智能发展水平由2011年的0.96增长到了2022年的13.07，表明中国人工智能总体上呈现良好的发展势头。

其次，分发展阶段来看，根据增量，可以将中国人工智能发展分为探索起步、稳步发展和快速发展三个阶段。其中，2011—2015年是中国人工智能发展的探索起步阶段，在这一阶段，随着国家相关政策的制定与实施以及政府财政资金的投入，人工智能产业渐渐得到重视并初步发展。2015—2019年是中国人工智能的稳步发展阶段，在这一阶段，由于大数据的广泛应用及深度学习技术的发展，人工智能在机器翻译、语言学习等方向的发展取得了重要成果，华为、阿里等企业也在此时加大对人工智能产业的投入，中国人工智能产业的规模逐步提升。2019—2022年是中国人工智能的快速发展阶段，在这一阶段，随着《中国制造2025》等相关产业政策的逐步落实，中国将发展战略的重心移向人工智能产业，人工智能应用领域逐渐扩大，人工智能产业进入发展的快车道。

再次，从空间格局来看，在东西差距方面，中国

表2 中国人工智能发展水平的测度结果

	2011年		2015年		2019年		2022年	
	发展水平	排名	发展水平	排名	发展水平	排名	发展水平	排名
北京	3.70	2	9.46	1	32.69	1	73.95	1
天津	2.25	3	5.33	5	13.84	4	16.73	8
河北	0.60	14	1.91	23	2.65	27	3.41	31
山西	0.23	25	1.30	29	3.00	25	6.49	24
辽宁	0.23	26	2.54	15	4.12	18	9.08	13
吉林	0.46	17	1.36	28	4.54	16	6.26	25
黑龙江	1.33	9	1.60	25	3.58	22	6.65	22
上海	4.01	1	7.49	2	16.28	3	21.15	4
江苏	1.26	10	3.92	8	7.79	8	20.09	5
浙江	2.16	4	7.39	3	6.14	11	15.39	9
安徽	0.55	16	3.18	11	6.06	12	11.32	12
福建	1.74	7	3.97	7	7.85	7	17.04	7
江西	0.34	22	1.42	26	3.94	19	7.09	19
山东	0.96	12	2.85	13	5.37	14	11.68	11
河南	0.97	11	3.20	10	2.61	28	6.83	21
湖北	0.57	15	2.95	12	5.04	15	8.69	14
湖南	1.77	6	1.66	24	3.30	24	7.03	20
广东	1.64	8	3.87	9	10.30	5	22.61	3
广西	0.41	19	2.11	20	4.23	17	6.06	26
海南	0.44	18	2.23	18	5.97	13	40.56	2
重庆	1.82	5	6.47	4	17.00	2	19.18	6
四川	0.39	20	2.41	17	3.59	21	7.22	18
贵州	0.03	31	2.80	14	6.92	10	8.27	16
云南	0.34	21	2.44	16	10.18	6	4.67	28
陕西	0.76	13	1.96	21	7.14	9	12.08	10
甘肃	0.24	24	1.37	27	2.40	29	3.52	30
内蒙古	0.06	29	1.18	30	2.70	26	7.56	17
宁夏	0.12	27	5.11	6	3.47	23	8.47	15
青海	0.12	28	1.92	22	3.78	20	6.58	23
西藏	0.03	30	0.90	31	1.26	31	4.21	29
新疆	0.31	23	2.17	19	1.89	30	5.35	27
全国平均	0.96		3.18		6.76		13.07	
标准差	1.02		2.11		6.24		13.68	

数据来源：作者计算。

人工智能发展整体呈现“东部地区领先发展、中部地区稳定发展、西部地区追赶发展”的态势。根据新经济地理学的核心—边缘理论，区域经济差距的形成源于产业空间集聚的循环累积效应。东部地区凭借规模经济、知识溢出和市场可达性优势吸引数据、人才、资金等人工智能发展要素集聚，随着要素的不断集聚，以北京、上海为首的东部省份逐渐形成了人工智能发展的新增长极，与其他地区的发展差距逐渐扩大。随着中部各省产业转型的加快以及对于数字技术研发和人才培养力度的加大，中部地区人工智能发展水平持续稳步提高。西部地区由于经济和技术基础较为落后，人工智能的发展水平也相对较低，但随着西部各省对于《新一代人工智能发展规划》等国家人工智能产业政策的积极响应以及自身对于新质生产力发展的高度重视，多数省份的人工智能发展水平在2011—2022年间取得了长足进步。一方面，中国人工智能发展南北差距的重心整体向华东和华南偏移，这是由于华东和华南地区有较充足的新质生产力资源，对人工智能发展的要素资源产生了较强的虹吸效应。另一方面，中国人工智能发展水平东西差距较大的格局并未发生根本性转变，在东部地区逐渐形成人工智能增长极的背景下，未来应加强东部地区对西部地区人工智能发展的帮扶力度，着力解决东西部人工智能发展的不平衡问题

最后，从区域差距来看，一方面，中国人工智能发展水平的标准差从2011年的1.02增至2022年的13.68，增幅显著，表明中国各地区人工智能发展并不均衡；另一方面，中国人工智能发展水平的间隔差距较大，表明中国人工智能发展的两极分化现象较为严重。为此，必须高度重视中国人工智能发展过程中出现的区域差距拉大的问题，通过合理的产业规划和政策倾斜提升中国不同区域间人工智能发展的协调性。

四、中国人工智能发展水平的时空演变特征

本部分深入分析中国人工智能发展水平的时空演变特征及其与经济发展的一致性。

（一）中国人工智能发展的时间演变特征

1.基于核密度估计法的时间演变特征分析

本文采用核密度估计法对中国人工智能发展的动态演化及区域差异进行分析。由于各省份人工智能发展水平随时间的推移变化较大，在全部时间范围内人工智能发展水平的极差较大，进行核密度估计时波动性强且不能很好的观测动态演化过程。因此，为缩小数据范围并保留各省份人工智能发展水平的数据特征，消除极差过大导致的不良影响，本文对各省份人工智能发展数据进行归一化处理，并绘制全国、东部地区、中部地区以及西部地区的人工智能发展水平核密度估计图（见图3）。

从全国总体来看，根据图3（a），首先，核密度曲线中的主峰于发展初期处于人工智能发展水平的中下位置，之后向右逐渐偏移，说明中国人工智能发展水平总体呈上升趋势。其次，主峰峰值整体上波动上升，主峰宽度整体上波动下降，说明中国人工智能发展的区域差异存在较大波动，但整体上仍存在下降趋势。再次，通过对分布延展性的分析，波动曲线存在右拖尾现象，说明发展过程中存在较高人工智能发展水平的省份，对中国整体人工智能发展具有拉动作用。最后，从极化趋势来看，核密度曲线在发展中期及以后呈现出较为明显的双峰状态，一个在较低的发展水平区间，另一个在中高发展水平区间。这种分化表明，不同地区在人工智能发展过程中开始出现极化现象，部分地区发展迅速，而另一些地区的发展则相对滞后。

从东部地区来看，根据图3（b），核密度曲线的主峰位置随时间向右偏移，且峰值在考察期内呈现出波动上升的情况，主峰宽度整体呈下降趋势，并且在发展中后期表现出一定的双峰特征。这说明东部地区总体的人工智能发展水平呈现升高趋势，地区间的人工智能发展差距波动下降，存在一定程度上的发展水平两极化的现象。

从中部地区来看，根据图3（c），核密度曲线的主峰位置总体呈右移趋势，峰值波动上升，宽度波动下降。这说明中部地区的人工智能发展水平总体呈升高趋势，地区间人工智能发展差距下降。

从西部地区来看，根据图3（d），核密度曲线的主峰位置总体右移，峰值呈现波动上升的趋势，宽度波动下降。这说明西部地区的人工智能发展水平总体呈上升趋势，地区间人工智能发展水平的差异在不同年份变动较大，总体波动下降。

从上述结论可以看出，考察期内，中国不同区域的人工智能发展水平总体上均呈现逐步提升的

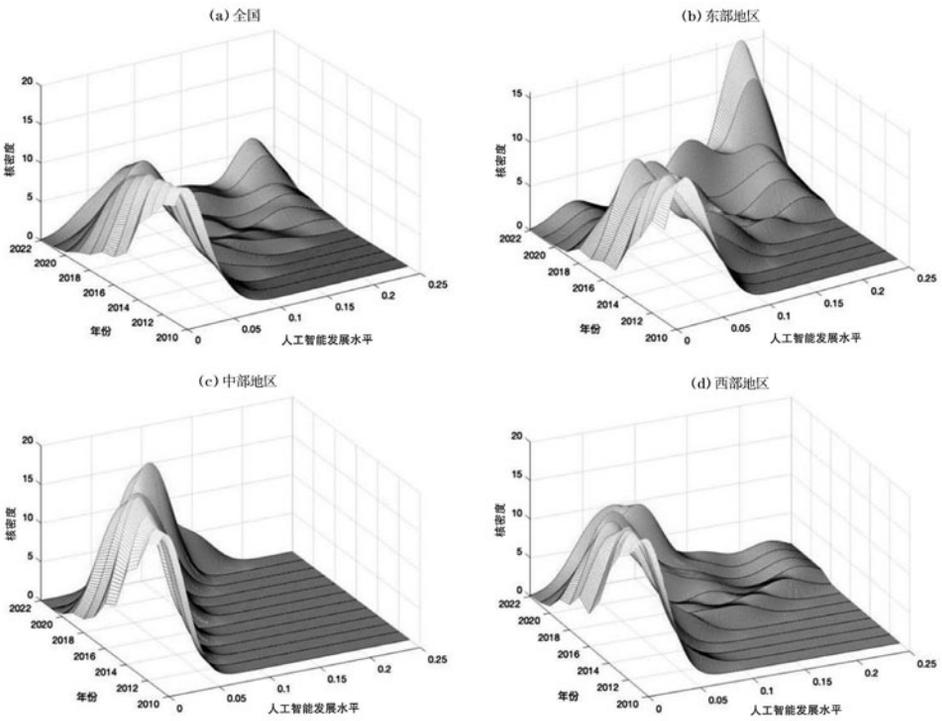

图3 2011—2022中国人工智能发展水平的核密度估计

资料来源:作者整理绘制。

良好态势,但在区域差异方面存在差异,中部地区和西部地区人工智能发展的区域差异与全国总体区域差异的变动方向相一致,呈先增大后减小的态势,而东部地区人工智能发展的区域差异波动上升。为此,在人工智能发展的区域政策制定中,需要结合不同区域的现实状况进行因地制宜的调整,增强政策的合理性和可行性。

2.基于马尔科夫链方法的长期演进趋势预测

传统马尔科夫链方法分析。本文按照分位数分级法将样本省份的人工智能发展水平划分为五个等级,分别为低水平(1)、中低水平(2)、中等水平(3)、中高水平(4)和高水平(5),并采用马尔科夫链方法对中国人工智能发展的长期演进趋势进行预测。以滞后一年为条件,计算得到中国人工智能发展水平的转移概率矩阵如表3所示。

首先,对角线元素的概率大于非对角线元素的转移概率值,表明中国人工智能发展类型维持现状的概率大,即高水平地区和低水平地区继续维持自身发展水平,存在着一定的"俱乐部趋同"效应。这种现象产生的原因可能是相对落后的省份人工智能发展的"内驱力"不足,要素水平较低,难以支撑其向更高等级的跨越。其次,五种等级向上转移的概率均大于向下转移的概率,表明整体上中国人工智能发展存在上升趋势。同时,人工智能发展水平较低的区域向上提升趋势更为显著,发展水平较高的区域提升等级的难度更大,更容易维持现状,表明在政策引导和科技进步的推动下,中国人工智能发展整体向好,相对落后的地区存在向更高水平演进的趋势,这与前文结论一致。最后,非对角线等于0的元素呈现远离对角线的现象,说明中国人工智能发展水平的等级转移主要发生在相邻状态,绝大部分地区跨等级转移概率较低。这一结果反映出中国人工智能的不断发展是渐进的过程,发展水平的跨越式增长较难实现。

表3 2011—2022年中国人工智能发展水平的马尔科夫链转移概率矩阵

t_i/t_{i+1}	1	2	3	4	5
1	0.635	0.311	0.054	0	0
2	0.080	0.453	0.387	0.080	0
3	0	0.125	0.444	0.389	0.042
4	0	0	0.127	0.571	0.302
5	0	0.018	0	0.070	0.912

数据来源:作者计算。

本文利用空间马尔科夫链方法,通过分析在不同邻域条件下各省份人工智能发展水平的转移概率,研究邻域因素对中国人工智能发展等级转移的

影响。计算结果如表4所示。首先，中国人工智能发展水平的转移过程受到邻域因素的影响。与传统马尔科夫链方法得到的结果进行对比，可以发现，在不同邻域状况的影响下，中国人工智能发展水平的转移概率矩阵均发生了显著变化。其次，某一区域的人工智能发展与其相邻地区存在较为明显的趋同现象。例如，当邻域等级为1时，在t时段处于人工智能发展水平低和较低地区的省份数量显著多于其他类型；当邻域等级为5时，在t时段处于人工智能发展水平较高和高地区的省份数量明显高于其他类型。最后，当与人工智能发展较低水平区域相邻时，该省份人工智能发展向更低等级转移概率增大；当与人工智能发展较高区域相邻时，该省份人工智能发展向更高等级转移概率增加。例如，在邻域等级为4的条件下，等级为3的省份向更高一级转移的概率为53.9%，大于不考虑空间邻域背景时的43.1%，而在邻域等级为2的条件下，等级为3的省份向更高一级转移的概率变为33.3%。其原因在于，高水平邻域具有资金、技术、人才等优势，能够产生较强的溢出效应，从而带动相邻地区的人工智能的发展。

表4　2011—2022年中国人工智能发展水平的空间马尔科夫链转移概率矩阵

邻域类型	t_i/t_{i+1}	n	1	2	3	4	5
1	1	43	0.767	0.209	0.023	0	0
	2	10	0.300	0.500	0.100	0.100	0
	3	4	0	0.250	0.500	0.250	0
	4	1	0	0	1.000	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
2	1	24	0.500	0.417	0.083	0	0
	2	32	0.094	0.563	0.250	0.094	0
	3	12	0	0.250	0.417	0.333	0
	4	9	0	0	0.333	0.444	0.222
	5	0	0	0	0	0	0
3	1	7	0.286	0.571	0.143	0	0
	2	22	0	0.455	0.500	0.045	0
	3	24	0	0.042	0.542	0.375	0.042
	4	10	0	0	0.200	0.500	0.300
	5	8	0	0	0	0	1.000
4	1	0	0	0	0	0	0
	2	11	0	0.091	0.818	0.091	0
	3	26	0	0.154	0.308	0.462	0.077
	4	28	0	0	0.071	0.643	0.286
	5	21	0	0.048	0	0.095	0.857
5	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	6	0	0	0.667	0.333	0
	4	15	0	0	0	0.600	0.400
	5	28	0	0	0	0.071	0.929

数据来源：作者计算。

（二）中国人工智能发展的空间演变特征

利用Dagum基尼系数方法测度2011—2022年全国及各地区人工智能发展水平的总体基尼系数、区域内基尼系数、区域间基尼系数及贡献率，并对中国人工智能发展的空间演变进行分析，测度结果如表5和图4所示。

对全国及三大区域内人工智能水平分异程度进行分析。从全国总体来看，根据图4（a），在2011—2022年间全国人工智能发展水平的基尼系数呈现先降低后回升的时间变化趋势，整体上由2011年的0.52降低到了2022年的0.42，其中2015年的基尼系数最低为0.34。这一结果表明中国人工智能发展水平的空间发展不平衡程度先减少后增加，尽管有所波动，但空间发展不平衡程度整体呈减少态势。从三大区域内部的空间分异程度来看，东部地区和西部地区的区域内分异程度较大，样本期间内基尼系数的均值均为0.37。中部地区的地区内分异程度较小，基尼系数均值为0.19。从变动趋势来看，东部地区基尼系数变化虽有波动，但整体较为平稳，2011年和2022年的基尼系数均为0.38，总体维持不变。中部和西部地区的基尼系数变化呈现较明显的波动下降态势，变化幅度相对较大，基尼系数在样本期间分别下降0.25和0.29。以上结果表明，中国人工智能发展水平仍旧存在明显的空间分异特征，全国层面、中部和西部地区人工智能发展水平的地区内分异程度均呈现波动下降趋势，而东部地区则变化不大。

对三大区域间人工智能水平分异程度进行分析。图4（b）刻画了样本期间中国人工智能发展水平区域间基尼系数的变化趋势。根据图4（b），整个样本期间内东部与西部、东部与中部的基尼系数均值分别为0.48和0.46，分异程度较大。中部与西部的分异程度较小，为0.32。从变动趋势来看，东部与西部、中部与西部的空间分异程度总体上成缩小趋势，下降幅度分别为22.38%和62.05%。其中，东部与西部间基尼系数变化呈现明显的“U型”走势，说明东西部的发展差距在初期有所缩小，随着时间

表5 2011—2022年中国人工智能发展水平的基尼系数及贡献率

年份	总体系数	组内基尼系数			组间基尼系数			贡献率(%)		
		东部	中部	西部	东-中	东-西	中-西	区域内	区域间	超变密度
2011	0.52	0.38	0.35	0.55	0.48	0.69	0.53	26.31	61.46	12.23
2012	0.49	0.46	0.33	0.47	0.55	0.54	0.43	31.66	40.38	27.97
2013	0.41	0.35	0.30	0.37	0.45	0.48	0.34	29.58	44.89	25.53
2014	0.40	0.38	0.18	0.36	0.46	0.45	0.32	30.53	47.85	21.62
2015	0.34	0.28	0.20	0.30	0.41	0.38	0.29	28.80	53.13	18.07
2016	0.35	0.32	0.12	0.34	0.42	0.38	0.30	30.90	48.33	20.77
2017	0.37	0.36	0.23	0.38	0.38	0.40	0.34	32.87	38.03	29.09
2018	0.39	0.40	0.11	0.37	0.42	0.45	0.29	31.64	42.67	25.69
2019	0.40	0.38	0.15	0.39	0.46	0.46	0.33	30.91	50.57	18.52
2020	0.39	0.34	0.13	0.31	0.48	0.47	0.24	27.61	60.09	12.30
2021	0.39	0.35	0.08	0.27	0.50	0.50	0.20	26.38	63.76	9.86
2022	0.42	0.38	0.10	0.26	0.53	0.53	0.20	26.41	63.96	9.63

数据来源:作者计算。

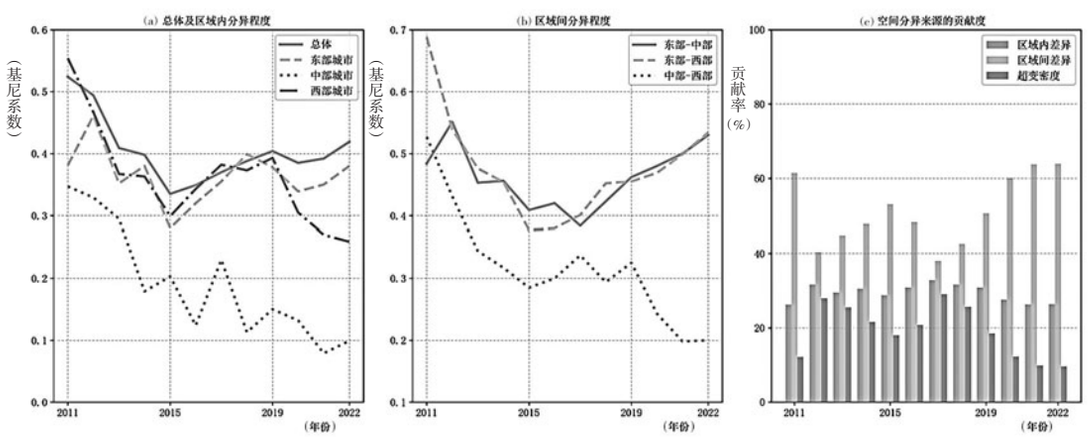

图4 2011—2022年中国人工智能发展水平基尼系数变动及贡献率

资料来源:作者整理绘制。

的推移,东西部间的不平等度再次增加。东部与中部地区间的分异程度在样本期间内变化波动较大,总体呈上升趋势,但增幅较小,仅为9.50%。上述结果表明,东部与西部、中部与西部地区间人工智能水平发展空间分异程度总体降低,区域发展趋向均衡,东部与中部地区间的发展空间分异程度有轻微上升趋势,不均衡程度有所升高。

对空间分异来源的贡献度进行分析。图4(c)刻画了样本期内各基尼系数的分解项对总体系数的贡献率变化趋势。根据图4(c),区域间分异对总体空间分异均值为51.26%,贡献程度最大,呈先下降后上升的变化趋势。然后则是区域内差异的贡献率,而超变密度对总体空间分异程度的贡献率最小,均值分别为29.47%和19.27%。以上结果表明,区域间分异是人工智能发展水平空间分异的主要来源,其次是区域内分异,超变密度对人工智能发展水平空间分异的贡献程度最小。

(三)中国人工智能发展与经济发展的一致性分析

本文对2022年中国31个省区市人工智能发展水平排名和人均GDP排名进行比较研究。将排名差值为负数,即人工智能发展水平排名高于人均GDP排名的省份划分为超前型;将排名差值为正数,即人工智能发展水平排名低于人均GDP排名的省份划分为滞后型;将人工智能发展水平排名与人均GDP排名相等的省份划分为同步型。与此同时,定义排名差值在[-3,3]之间的省份为一致性水平较高的地区;反之,则为一致性水平较低的地区。对中国2022年人工智能发展与经济发展一致性分析的结果如表6所示。

首先,从类型划分角度出发,“超前型”省份有15个,“滞后型”有14个,“同步型”省份仅有两个。由此可见,尽管中国人工智能发展态势整体良好,

但“滞后型”省份比重仍然较高，未来仍需持续加大对人工智能发展的支持力度，以提升新质生产力的数字化发展水平。其次，从一致性水平角度出发，中国各人工智能发展与经济发展具有较高一致性的省份有17个，其余14个省份均为一致性水平较低的省份，这说明中国人工智能发展与经济发展之间的协调性整体较高，但也有部分省份的人工智能发展水平不能匹配其经济发展水平。基于这一结论，各地区应针对当地的人工智能发展现状，探索制定符合本地实情、具有本地特色的产业政策，为人工智能产业的高质量发展提供政策保障。最后，分区域进一步分析，东部地区11个省份中，有六个省份为“滞后型”，但“滞后型”省份的排名之差均在五以内，滞后程度相对较低，表明东部地区人工智能发展与经济发展的一致性有待提高。其原因在于，人工智能的高质量发展需要长期性的人才建设以及科研建设，虽然部分东部发达省份的人工智能发展取得突破性进展，但仍旧不能协调其经济基础。中部地区中，“超前型”省份和“滞后型”省份数量均为四个，“一致性水平较高”和“一致性水平较低”的省份同样均为四个，这表明中部地区整体的人工智能发展与经济发展的协调状况出现了分化现象。其原因是，在发展人工智能产业上，黑龙江和吉林作为老工业基地，虽然经济发展在近些年相对落后，但在工业机器人应用和智能化技术研发方面仍具有较好的产业和科研平台基础，而山西、内

表6　2022年中国人工智能发展与经济发展的一致性分析

地区	省（区、市）	人工智能发展水平排名	人均GDP排名	排名差值	类型	一致性水平
东部	北京	1	1	0	同步	较高
	天津	8	5	3	滞后	较高
	河北	31	26	5	滞后	较低
	辽宁	13	18	−5	超前	较低
	上海	4	2	2	滞后	较高
	江苏	5	3	2	滞后	较高
	浙江	9	6	3	滞后	较高
	福建	7	4	3	滞后	较高
	山东	11	11	0	同步	较高
	广东	3	7	−4	超前	较低
	海南	2	21	−19	超前	较低
中部	山西	24	13	11	滞后	较低
	吉林	25	27	−2	超前	较高
	黑龙江	22	30	−8	超前	较低
	安徽	12	14	−2	超前	较高
	江西	19	16	3	滞后	较高
	河南	21	22	−1	超前	较高
	湖北	14	9	5	滞后	较低
	湖南	20	15	5	滞后	较低
	内蒙古	17	8	9	滞后	较低
西部	广西	26	29	−3	超前	较高
	重庆	6	10	−4	超前	较低
	四川	18	20	−2	超前	较高
	贵州	16	28	−12	超前	较低
	云南	28	23	5	滞后	较低
	陕西	10	12	−2	超前	较高
	甘肃	30	31	−1	超前	较高
	青海	23	24	−1	超前	较高
	宁夏	15	17	−2	超前	较高
	新疆	27	19	8	滞后	较低
	西藏	29	25	4	滞后	较低

资料来源：作者整理绘制。

蒙古等省份的主导产业主要为传统资源型产业，人工智能发展所需的创新环境和科技基础设施相对薄弱，导致人工智能发展的动力不足。西部地区中，有八个省份为“超前型”，四个省份为“滞后型”，且一致性水平较低和较高的省份比重相同，这说明西部地区人工智能发展整体较快，但也存在一定程度的分化现象。这主要是由于四川和重庆具有较好的经济和科技基础，在人工智能发展中处于领先地位，对周边地区人工智能的发展具有溢出效应，而经济和科技基础较为落后的甘肃、云南、贵州等地，人工智能发展起步较晚，在人才培养、科教发展等方面也存在明显短板，导致人工智能发展的动能不足，无法形成人工智能发展促进经济发展的良性循环。

五、中国人工智能发展水平的驱动因素分析

本部分对中国人工智能发展的驱动因素的排序及其边际影响进行分析。

（一）中国人工智能发展的驱动因素排序

在对中国人工智能发展的时空演变进行定量分析的基础上，本文借助随机森林算法，对中国人工智能发展的13个驱动因素进行重要性排序[①]。由于各省份的驱动因素在量纲和数值范围上存在显著差异，本文对各指标进行归一化处理以消除这些影响。决策树数量选取依据袋外误差和计算量较小的原则，特征数量选取依照平均误差最小的原则。总体来看，技术创新、市场化水平、研发强度、绿色金融发展水平、产业结构高级化、协同创新和经济发展水平的重要性程度在中位数以上，表明上述因素是中国人工智能发展的核心驱动因素。从经济因素来看，市场化水平在所有经济因素中居于主导地位，绿色金融发展水平对人工智能发展也具有重要影响，消费水平和对外开放水平影响程度相对较弱。由此可见，提高地区市场化水平是实现人工智能产业高质量发展的必要前提，同时应着重提高地区绿色金融发展水平，激发绿色金融发展在产业协同与生态构建方面对人工智能发展的赋能作用。从创新因素来看，创新能力对人工智能的发展发挥着至关重要的作用，其中，技术创新的重要性程度在所有驱动因素中居于首位，研发强度的重要性位于第三，协同创新对人工智能发展也具有不可忽视的影响。因此，推进人工智能关键核心技术创新，促进区域间协同创新发展，加强区域研发投入强度是推动人工智能产业高质量发展的重要动力源。从产业因素来看，产业结构高级化对中国人工智能发展的影响程度较高，但战略性新兴产业对人工智能发展的影响程度相对较低，主要的原因是目前我国战略性新兴产业发展仍面临科技人才短缺、区域协同程度较低和自主创新能力不足等挑战，产业规模和效益有待进一步提升。从政府因素看，知识产权保护力度对中国人工智能的发展具有推动作用，政府干预程度也会对人工智能的发展产生一定程度的影响，其原因在于，有效的知识产权保护能够确保研究成果与核心技术的排他性使用权，进而提升企业或科研机构对创新活动的预期收益。这不仅能显著激发研发投入意愿，也有助于吸引多元资本与高端人才流入AI领域，形成良性的技术创新驱动机制。良好的政策干预不仅有利于补足人工智能发展所需的资金投入，降低人工智能技术研发与应用的边际成本和风险，还能够释放出“光环信号”，带动更多资本支持人工智能产业发展，缓解人工智能发展的外部融资约束。

（二）中国人工智能发展驱动因素的边际影响

为分析中国人工智能发展同驱动因素的非线性响应关系，本文利用偏依赖关系图将驱动因素对模型输出值的边际影响进行可视化表达（见图5）。

首先，经济因素层面，从主导因素看，市场化水平对中国人工智能发展的影响呈阶梯式上升。主要拐点出现在0.003和0.0035左右，即当市场化水平由较低水平逐步提高时，其对人工智能发展的影响强度不断上升，达到0.0035后市场化水平对人工智能发展的影响强度保持稳定，直至0.004后再次增加，说明市场化水平是人工智能发展的重要基础，当前我国大部分地区依然具有较大的人工智能发展潜力。从其他因素看，绿色金融发展水平对中国人工智能发展的影响呈“先下降后阶梯式上升”的特征，主要拐点分别出现在0.0035和0.0045左右；经济发展对中国人工智能发展的影响呈波动下降的趋势；对外开放对中国人工智能发展的影响呈“先急剧下降后波动上升”的趋势，拐点出现在0.001左右；消费水平对中国人工智能发展的影响呈先下降后上升的“U型”趋势，拐点出现在0.003左右。其次，创新因素层面，从主导因素看，技术创新对中国人工智能发展的影响呈现出“阶梯式上升”

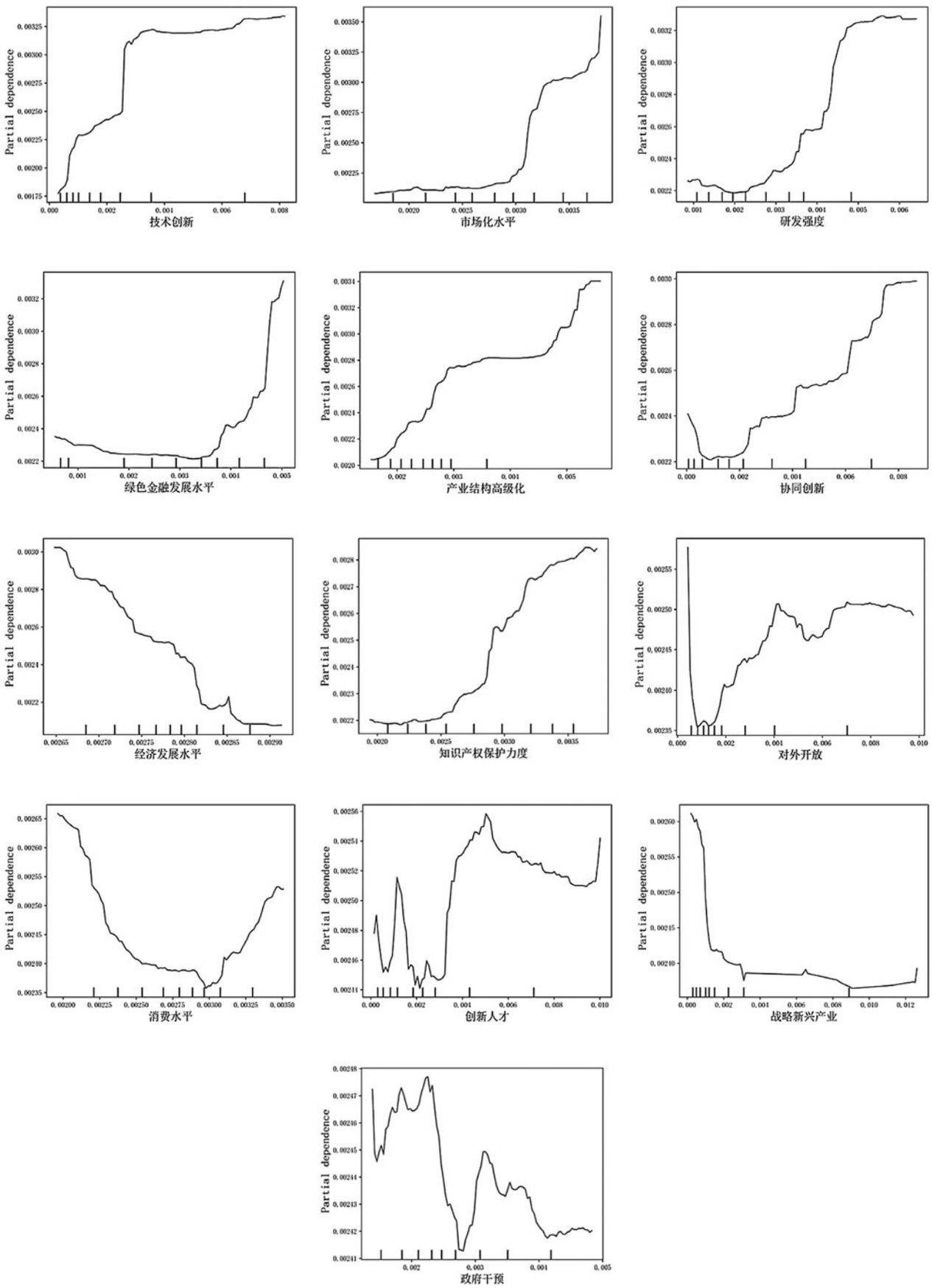

图5　中国人工智能驱动因素的偏依赖图

资料来源:作者整理绘制。

趋势，主要拐点出现在0.003和0.004左右，技术创新对人工智能发展的影响随人工智能发展水平的提升而整体不断提升，达到0.004后技术创新对人工智能发展的影响强度保持稳定，这表明技术创新是推动人工智能发展的强劲动能。背后的机制在于，技术创新不仅能够提高人工智能技术的创新效率，还能加快人工智能核心技术的迭代升级。从其他因素看，研发强度对人工智能发展的影响呈现阶梯上升的态势，即在低水平时缓慢上升，达到0.004后快速上升，达到0.005后对人工智能发展的影响强度保持稳定。协同创新对中国人工智能发展的影响呈现“波动上升”的态势，其原因可能是人工智能发展相对落后的地区也可以从创新合作中获益，通过向先发地区进行模仿和学习，发挥后发优势，提升人工智能发展水平。创新人才对中国人工智能发展的影响呈“先波动上升后缓慢下降”的态势，主要拐点出现在0.005附近。再次，产业因素层面，从主导因素看，产业结构高级化对中国人工智能发展的影响呈“先上升后稳定再上升”的演变趋势，当产业结构高级化水平在达到0.003前和0.005后，产业结构高级化对人工智能发展的影响强度不断上升，表明产业升级总体上对人工智能发展存在促进作用，但在发展过程中也存在一定的门槛效应，地方政府需要加快构建与新质生产力相适应的产业体系，为人工智能的高质量发展提供产业载体。从其他因素看，战略性新兴产业对中国人工智能发展的影响呈“先快速下降后稳定”的态势，拐点出现在0.003附近。最后，政策因素层面，从主导因素看，知识产权保护力度对中国人工智能发展的影响呈现出“先缓慢上升后快速上升”的态势。当知识产权保护力度小于0.0027左右时，知识产权保护力度对人工智能发展的正向影响作用相对缓慢；在知识产权保护力度大于0.0027后，知识产权保护力度对人工智能发展的影响幅度增长加快。从其他因素看，政府干预对中国人工智能发展的影响呈现出“先上升后快速下降，再快速回升后波动下降”的趋势，拐点分别位于0.0023、0.0028和0.0033左右。上述结果均表明，政府适当的政策支持有助于促进人工智能产业的发展壮大。

（三）中国人工智能发展驱动因素进一步分析

1.人工智能发展的驱动因素分析

首先，经济因素层面。长三角和粤港澳大湾区凭借雄厚的产业基础和资金优势，为人工智能提供了充足的发展资源，推动人工智能企业快速集聚并实现技术产业化；而中西部地区整体经济实力较弱，人工智能研发投入不足，技术成果转化路径不畅，发展后劲不足。就市场化水平而言，东部民营经济活跃、营商环境良好，如深圳、杭州等地风险资本充足，人工智能创业生态完善；而中西部不少城市市场机制不成熟，企业创新积极性不足，导致人工智能产业链难以形成。绿色金融发展水平的区域差异较显著，东部城市积极推进绿色信贷与绿色基金，人工智能在节能减排、智慧能源等领域加快落地；但中西部绿色金融体系建设滞后，难以为相关人工智能项目提供有效融资渠道。在消费水平方面，东部城市人均消费能力强，为人工智能产品提供良好试验场，如智慧家居、智能零售等广泛普及；而中西部消费能力有限，人工智能产品市场狭窄，企业本地盈利空间不足。对外开放方面，长三角和大湾区依托自贸区等平台集聚国际人才与资本，形成高水平开放格局，带动人工智能技术与全球接轨；相较而言，中西部开放程度偏低，国际合作和外资引入受限，人工智能发展缺乏外部技术支持。总体来看，东部地区实现多要素协同推动人工智能高质量发展，而中西部则面临“资源不足—转化受阻—市场受限”的循环困境，亟须加强要素供给与结构优化，弥合区域发展落差。

其次，创新因素层面。在技术创新方面，北京作为全国科技创新核心区，集聚了大量高校、研究院与龙头企业，形成了强大的人工智能原始创新能力，推动自然语言处理、计算机视觉等核心技术持续突破，而中西部和东北地区基础研究能力较弱，缺乏原创性成果，导致其在人工智能发展上长期处于跟随地位，核心竞争力不足。协同创新在长三角地区表现尤为突出，以上海、杭州、合肥为代表的城市通过高校、科研机构与企业间的深度协作，有效促进技术成果转化与跨区域创新网络的构建。但在中西部及部分环京城市中，协同机制尚未健全，资源流动受限，创新成果难以外溢，区域内创新体系碎片化严重。研发强度方面，东部发达地区研发经费投入持续增长，相较之下，西部多数城市研发投入占比偏低，企业研发意愿不足，科研项目易受财政波动影响，难以形成长期支持机制。在创新人才方面，北京、上海、深圳等一线城市因资源丰富和

平台完备，对高端人工智能人才具有极强吸引力，进而形成集聚效应并不断强化区域创新优势。而中西部和东北高校虽有人才培养能力，但因缺乏优质就业岗位与创新平台，人才大量流出，导致本地人工智能产业发展陷入“培养—流失—空心化”的困境。总体来看，创新能力各子要素在区域间的显著不均，不仅造成人工智能技术和产业发展的空间错位，也加剧了东强西弱、中心—边缘式的发展格局，需通过提升自主创新能力、优化区域协同机制和健全人才引育体系，推动创新驱动从“局部突破”迈向“全国联动”。

再次，产业因素层面。从产业结构高级化来看，长三角、粤港澳大湾区等东部发达地区已形成较为成熟的现代服务业和高端制造业体系，为人工智能技术提供了丰富的应用场景与产业生态，推动产业智能化升级进程加快，上海的金融科技、浙江的智能制造均体现出显著的产业高级化优势。但中西部及东北地区产业结构相对传统，以资源型产业和低端制造业居多，产业链短、附加值低，人工智能技术难以有效融合，产业结构转型缓慢导致人工智能应用落地缺乏必要产业基础，形成技术与产业需求错配的困境。在战略性新兴产业方面，深圳、北京、杭州等一线城市凭借龙头企业和产业政策的双重驱动，人工智能在新能源、生物医药、高端装备制造等新兴领域应用迅速扩展，形成了产业集群效应。然而，全国范围内战略性新兴产业的发展仍呈现“点状”分布，区域协同性不足，尤其中西部战略性新兴产业发展基础薄弱，科技人才短缺、产业规模偏小，难以实现规模效应，导致人工智能技术在当地产业中的渗透率低，产业链整体创新能力弱，区域发展差距进一步拉大。这种结构性差异凸显出中国人工智能产业发展的区域失衡问题，需要地方政府因地制宜推动产业结构优化和协同发展，以解决区域产业发展不均衡、创新资源配置失衡的问题。

最后，政府因素层面。在知识产权保护力度方面，北京、上海、深圳等人工智能产业领先的城市已构建较为完善的知识产权保护体系，通过设立知识产权法院、强化专利审查机制等举措，使人工智能企业与科研机构的创新成果得到有效保护，进而强化区域创新吸引力。然而，中西部地区及东北地区由于知识产权保护体系建设滞后，侵权成本较低，导致创新主体研发动力不足、原创成果保护难度较大，影响当地人工智能技术的市场化推广与企业自主研发能力的提升。在政府干预层面，东部发达地区地方政府政策导向明确且干预精准，积极设立专项资金、产业引导基金，并通过土地、税收等政策扶持人工智能企业发展。但部分中西部地区政府虽有意扶持人工智能产业发展，但缺乏资金投入和明确的产业规划，政策落实效果有限，出现了“重园区建设、轻产业培育”等错配问题，人工智能项目缺乏持续性支持，造成政府投入与实际产业需求脱节。因此，区域间政府因素作用差异明显，表现为东部的精准干预与完善保护激发产业活力，而中西部政策干预模糊、保护不力则制约了人工智能产业的有效发展，区域创新差距由此进一步拉大。

2.人工智能发展驱动因素的边际影响分析

首先，经济因素层面。从主导因素市场化水平来看，其对中国人工智能发展的影响表现出明显的阶梯式上升趋势，这与东部地区深圳、杭州等城市民营经济活跃、风险资本充足的现实表现相吻合，有效推动了人工智能企业的集聚与产业生态完善。相较而言，中西部地区市场机制仍不成熟，创新成果转化困难，未跨越该关键门槛，制约了人工智能产业链形成。在绿色金融发展水平上，整体趋势呈现“先下降后阶梯式上升”的特征，东部地区如深圳已构建成熟的绿色金融体系，有力支持人工智能在智慧能源和环保领域的应用落地，处于趋势的高阶阶段；而中西部地区仍处于绿色金融体系不健全的阶段，未达到显著提升人工智能发展的拐点，融资渠道不畅严重制约人工智能项目的实施。在经济发展水平方面，其对人工智能发展的影响呈现波动下降趋势，这体现出单纯经济总量驱动人工智能产业发展的动力已逐步减弱，长三角和粤港澳大湾区凭借雄厚的经济基础仍占优势，但中西部地区整体经济实力弱，难以提供有效的长期支撑。对外开放水平则表现为“先急剧下降后波动上升”的趋势，长三角、大湾区通过自贸区引入国际资本与人才，人工智能产业发展已处于波动回升阶段，中西部地区开放度不足，难以跨越起始的下降阶段，缺乏与国际前沿技术的有效对接。消费水平对人工智能发展的作用则呈现“U型”趋势，东部城市已跨越拐点进入消费拉动人工智能发展的阶段，而中西部消费能力有限，尚处于下降阶段，制约了本地人

工智能产业的市场规模扩张。总体来看，东部地区多要素协同进入人工智能高质量发展阶段，中西部则亟待突破多个经济因素的临界拐点，以改善当前的资源不足与市场受限困境。

其次，创新因素层面。从主导因素技术创新来看，其对人工智能发展的影响呈明显的“阶梯式上升”趋势，尤其在0.003和0.004两个关键拐点处，影响强度持续增强并在0.004后保持稳定，这与北京、深圳等技术创新活跃城市持续推进核心算法、芯片研发并引领全国人工智能发展的现实表现高度契合。而中西部地区由于原创性技术积累薄弱，未能突破技术创新的临界值，导致其人工智能技术的升级与迭代受限，产业竞争力难以提升。在研发强度方面，影响表现为阶梯式上升态势，长三角地区以上海、杭州为代表，持续提高研发投入占比，人工智能产业呈现快速成长，而中西部地区研发投入强度不足，尚未达到显著推动人工智能产业快速发展的临界点，使区域研发成果转化效率低下。在协同创新层面，影响呈现“波动上升”的趋势，说明落后地区亦能通过跨区域创新合作实现部分赶超，部分地区依靠协同机制逐步提升人工智能产业发展水平，但中西部其他地区受限于合作机制不完善，创新要素流动受阻，协同创新效果难以持续发挥。在创新人才方面，影响呈现“先波动上升后缓慢下降”趋势，北京、上海、深圳等地人才集聚，推动了当地人工智能产业高速发展，而中西部人才外流问题突出，人才供给不足已成制约人工智能产业发展的核心瓶颈。整体上，创新要素的区域性差距明显，东部地区处于创新驱动的高阶阶段，而中西部在技术、人才等核心要素未达临界点，亟待跨区域协作与创新机制建设的强化，以实现赶超式发展。

再次，产业因素层面。从主导因素产业结构高级化来看，其对中国人工智能发展的影响呈现明显的“先上升后稳定再上升”趋势，在产业结构高级化水平达到0.003之前以及超过0.005之后，推动人工智能发展的作用明显增强，这一趋势在长三角、粤港澳大湾区等区域尤其显著，这些地区依靠先进制造业和现代服务业的升级为人工智能技术提供大量应用场景与产业支撑，构建出与新质生产力相匹配的高端产业体系，但中西部及东北地区传统产业占比较高，未跨越产业升级的临界点，导致当地人工智能技术难以与产业需求有效结合，出现产业结构与技术创新的错配问题。在战略性新兴产业方面，其对人工智能发展的影响呈“先快速下降后稳定”的态势，战略性新兴产业对人工智能的推动作用受区域产业基础制约明显。深圳、杭州等城市已跨越这一临界值，新能源、智能制造、生物医药等新兴产业与人工智能融合较深，形成产业规模效应，而中西部大部分城市战略性新兴产业规模较小且发展乏力，仍处于快速下降后的低水平稳定阶段，产业协同和创新资源不足，制约了人工智能技术在当地产业中的渗透，凸显区域产业发展不平衡的现实问题。因此，未来亟需通过优化产业结构和提升新兴产业规模效应，推动中西部地区突破产业发展的临界门槛，促进人工智能技术与区域产业需求精准对接。

最后，政策因素层面。从知识产权保护力度来看，其对中国人工智能发展的影响呈现出“先缓慢上升后快速上升”的趋势，北京、上海、深圳等城市已建立较完善的知识产权保护体系，有效提升了企业与科研机构在人工智能领域的创新动力与收益预期，而中西部地区知识产权保护相对薄弱，未达到显著推动产业发展的拐点，创新成果保护不足制约了企业的研发热情和技术转化效果。在政府干预方面，其影响呈现“先上升后快速下降，再快速回升后波动下降”的复杂态势。东部沿海城市如上海、杭州等精准政策扶持有效激发市场主体活力，并已处于政府干预作用的回升和稳定阶段，地方专项资金与引导政策对人工智能产业形成显著支撑。而部分中西部城市在政府干预上呈现投入初期短暂效果后迅速下降的趋势，出现政策导向不明确、资金落实不足等问题，难以形成持续有效的推动作用，造成政策资源投入与产业发展需求之间的明显错配。因此，强化中西部地区知识产权保护体系建设与提高政策干预的精准性，是推动区域人工智能产业高质量发展的关键路径。

六、结论与政策建议

本文基于WRS系统方法论测度2011—2022年中国31个省区市的人工智能发展水平，通过核密度估计、空间马尔科夫链等方法探究中国人工智能发展的时序演变特征，通过Dagum基尼系数法刻画中国人工智能发展的空间演变特征，并运用随机森林

算法识别了新质生产力背景下中国人工智能发展的关键影响因素及其边际响应关系。

（一）结论

第一，从总体来看，考察期内，中国人工智能发展发展水平逐步提升，在空间上呈现东部地区领先发展、中部地区稳步发展、西部地区追赶发展的态势，在时间上可以分为探索起步阶段、稳步发展阶段和快速发展阶段。第二，从长期演进趋势来看，中国人工智能发展存在“俱乐部趋同”和“马太效应”，等级转移大多发生在相邻水平，跨越式发展较难实现；空间因素对人工智能发展具有显著影响，高水平的邻域对于本地区人工智能发展具有促进作用，低水平邻域则具有阻碍作用。第三，从空间分异程度和来源来看，中国人工智能发展水平有较为明显的空间分异特征，全国层面人工智能发展水平的区域差异存在较大波动，但整体呈下降趋势，中部地区和西部地区人工智能发展水平的区域差异呈现波动下降趋势，东部地区总体较为平稳；中国人工智能发展水平的空间分异主要来源于区域间分异，其次是区域内分异，超变密度分异贡献最小。第四，从人工智能发展与经济发展的一致性来看，中国人工智能发展水平与经济发展水平之间总体上具有较强的一致性，东部地区和中部地区的人工智能发展总体滞后于经济发展，西部地区的人工智能发展整体超前于经济发展。第五，从中国人工智能发展的动力机制来看，技术创新、市场化水平、研发强度、绿色金融发展水平等驱动因素的影响强度排序靠前，且大部分驱动因素与人工智能发展水平呈现非线性响应关系。

（二）政策建议

为加快发展新质生产力，实现人工智能的均衡与高质量发展，基于上述研究结论，本文提出以下政策建议。第一，充分考虑地区差异，因地制宜发展人工智能产业。针对中国人工智能发展存在较大区域差异的问题，应着重结合地区实际及特色优势，探索区域特色的人工智能发展模式。北京、上海等人工智能发展领先的地区要积极主动探索人工智能发展的新路径、新机制、新模式，推广人工智能技术研发与应用的先进经验；湖北、浙江等人工智能发展水平居中的地区要加快补足短板，加快产业转型升级，为人工智能的高质量发展和高水平应用提供产业载体和拓展空间；黑龙江、甘肃等人工智能发展相对缓慢的地区要进一步提升自主创新能力，不断更新、完善人工智能基础设施，加大对人工智能产业的政策扶持和人才引进力度。具体而言，东部地区应通过建设“AI+高端制造”创新联合体，推动技术标准国际化，打造人工智能国际标杆；中部地区可依托“数字新基建”，围绕智能物流、智慧农业等特色产业，打造区域AI应用生态圈；西部地区（如甘肃、陕西、青海）则应结合当地绿色能源优势，探索“AI+绿色能源”“AI+生态保护”的特色发展路径，避免产业同质化竞争。第二，健全区域创新合作体制机制，推动人工智能的协同发展。针对中国人工智能发展过程中存在的俱乐部趋同效应和马太效应，一方面，要进一步发挥好先发地区的辐射带动作用，加快人工智能关键核心技术策源地建设，推动人工智能前沿技术的迭代升级，为人工智能产业的高质量发展提供源源不断的技术供给。另一方面，要加快培育新的创新组织形式，搭建人工智能技术的区域协同创新平台，消除区域壁垒，推动数据、技术、算力、人才、场景等人工智能发展核心要素在区域间的合理流动。尤其是要建立东、中、西部跨区域的协同创新联盟，鼓励东部发达地区的科研院所和企业通过共建实验室、产业园区等形式，带动中西部地区技术成果转化和产业应用。中西部地区应主动承接并积极融入国家人工智能发展战略，通过承接产业转移、共建产业基地等方式提升自身人工智能产业的竞争力。第三，完善人工智能政策体系，营造良好的发展环境。针对经济发展水平较高但人工智能发展相对滞后的省份，要充分发挥良好的经济基础对于技术创新的助推作用，增强研发投入力度，进一步优化人工智能产业发展的财政激励政策，建立健全多层次、多渠道、多元化的人工智能产业投融资体系，鼓励企业与科研机构合作开展前沿技术研发，加速科技成果转化应用，推动技术创新成果向现实生产力转化。此外，各地政府应进一步深化市场改革，减少不必要的市场管制，放宽市场准入门槛，加强市场监管，维护公平竞争的市场秩序，促进资源的高效配置，为人工智能产业提供良好的发展环境。东部地区应进一步完善与国际接轨的产业政策与标准体系，吸引全球优质创新资源；中西部地区则应加大政策精准支持力度，如设立专项扶持资金、实行税收优惠政策、开展定向人才引进计划，切实解决企业面

临的资金瓶颈和人才短缺问题。

注释

①西藏自治区缺失值较多，故本文在驱动因素分析部分使用2011—2022年除西藏外的30个省、自治区、直辖市（不含中国香港、澳门和台湾）的数据。

参考文献

[1]习近平主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会强调 牢牢把握东北的重要使命 奋力谱写东北全面振兴新篇章[N].人民日报，2023-09-10(001).

[2]陈楠，蔡跃洲.人工智能技术创新与区域经济协调发展：基于专利数据的技术发展状况及区域影响分析[J].经济与管理研究，2023(3).

[3]ATACK J，MARGO R A，RHODE P W. Automation of manufacturing in the late nineteenth century：the handand machine labor study [J]. Journal of economic perspectives，2019，33(2)：51-70.

[4]张鑫，王明辉.中国人工智能发展态势及其促进策略[J].改革，2019(9).

[5]罗映宇，朱国玮，钱无忌，等.人工智能时代的算法厌恶：研究框架与未来展望[J].管理世界，2023(10).

[6]陈凤仙.人工智能发展水平测度方法研究进展[J].经济学动态，2022(2).

[7]顾国达，马文景.人工智能综合发展指数的构建及应用[J].数量经济技术经济研究，2021(1).

[8]程文.人工智能、索洛悖论与高质量发展：通用目的技术扩散的视角[J].经济研究，2021(10).

[9]曹静，周亚林.人工智能对经济的影响研究进展[J].经济学动态，2018(1).

[10]郭凯明.人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动[J].管理世界，2019(7).

[11]王文，牛泽东，孙早.工业机器人冲击下的服务业：结构升级还是低端锁定[J].统计研究，2020(7).

[12]汝刚，刘慧，沈桂龙.用人工智能改造中国农业：理论阐释与制度创新[J].经济学家，2020(4).

[13]MICHAELS G，GRAETZ G. Estimating the impact of robots on productivity and employment and jobs[R/OL]. https：// robohub. org/ estimatingthe-impact-of-robots-onproductivity-and-employment，2015.

[14] DAVID B. Computer technology and probable jobdestructions in Japan：an evaluation[J]. Journal of the Japanese and international economies，2017，43：77-87.

[15]李磊，王小霞，包群.机器人的就业效应：机制与中国经验[J].管理世界，2021(9).

[16]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，(10).

[17]张占斌，陈晓红，黄群慧，等.新质生产力[M].长沙：湖南人民出版社，2024.

[18]刘斌，刘颖，曹鸿宇.外资进入与中国企业创新：促进还是抑制[J].山西财经大学学报，2021(3).

[19]白俊红，蒋伏心.协同创新、空间关联与区域创新绩效[J].经济研究，2015(7).

[20]CHENG H，JIA R，LI D，et al. The rise of robots in China [J]. Journal of economic perspectives，2019，33(2)：71-88.

[21]ACEMOGLU D，RESTREPO P. Robots and jobs：evidence from US labor markets[J]. Journal of political economy，2020，128(6)：2188-2244.

[22]邹伟勇，熊云军.中国城市人工智能发展的时空演化特征及其影响因素[J].地理科学，2022(7).

[23]孙早，侯玉琳.工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J].中国工业经济，2019(5).

[24]张铭，王冬玲，曾娜，等.如何成为疾风中的劲草？——基于WSR的创业生态系统韧性的前因组态研究[J].管理评论，2023(5).

[25]顾基发，唐锡晋，朱正祥.物理—事理—人理系统方法论综述[J].交通运输系统工程与信息，2007(6).

[26]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).

[27]刘刚，刘捷.需求和政策驱动的人工智能科技产业发展路径研究：以东莞市机器人智能装备产业发展为例[J].中国科技论坛，2022(1).

[28]张贵兰，潘云涛，郑楚华，等.城市-大学群高被引论文作者学术产出力分布规律研究：以人工智能领域为例[J].情报学报，2022(10).

[29]朱文韵，孟雅晴.竞争强度、合作强度与企业创新决策行为：基于企业专利申请动机视角的分析[J].价格理论与实践，2023(11).

[30]王家庭，王浩然.中国式超大特大城市现代化水平的多维测度：理论逻辑、时空演绎与提升路径[J].城市问题，2023(5).

[31]穆学青，郭向阳，明庆忠，等.黄河流域旅游生态安全的动态演变特征及驱动因素[J].地理学报，2022(3).

[32] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the gini income inequality ratio [J]. Empirical economics，1997，22(4)：515—531.

[33]杨骞，王珏，李超，等.中国农业绿色全要素生产率的空间分异及其驱动因素[J].数量经济技术经济研究，2019(10).

[34]赵艳艳,张晓平,陈明星,等.中国城市空气质量的区域差异及归因分析[J].地理学报,2021(11).
[35]张友国,窦若愚,白羽洁.中国绿色低碳循环发展经济体系建设水平测度[J].数量经济技术经济研究,2020(8).
[36]金灿阳,徐蔼婷,邱可阳.中国省域数字经济发展水平测度及其空间关联研究[J].统计与信息论坛,2022(6).
[37]付凌晖.我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J].统计研究,2010(8).
[38]樊纲,王小鲁,马光荣.中国市场化进程对经济增长的贡献[J].经济研究,2011(9).

The Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of Artificial Intelligence Development under the Background of New Quality Productive Forces

Wang Jiating Qi Jiahan Wang Haoran

Abstract: The productivity of the intelligent era is the new quality productive forces that are comprehensively transformed and enhanced by artificial intelligence (AI) technology. Artificial intelligence is the core driving force for the development of new quality productive forces. Using the WSR system methodology for reference, this paper first depicts the spatiotemporal evolution characteristics of artificial intelligence development in 31 provinces of China from 2011 to 2022. Then, the random forest algorithm is adopted to identify the key driving factors and evolutionary characteristics of regional artificial intelligence development in China under the background of new quality productive forces. The results show that: The development level of regional artificial intelligence in China presents a steady upward trend over time, which can be divided into three stages in time: initial exploration, steady development and rapid development. In space, it presents a pattern of leading development in the eastern region, steady development in the central region, and catch-up development in the western region; The evolution of regional artificial intelligence development in China has spatial spillover effects, and there is a certain Matthew effect in the growth trend of artificial intelligence. The development level of artificial intelligence in China has obvious spatial differentiation characteristics, but the overall imbalance is on the decline; Among the key driving factors, technological innovation, marketization level, research and development intensity, and green finance development level are the main driving factors. Most of the driving factors have a non-linear response relationship with the development level of artificial intelligence.

Key Words: New Quality Productive Forces; Artificial Intelligence; WSR System Methodology;Random Forest Algorithm

(责任编辑:江 夏)