

中国能源韧性与科技创新的 协调演化及影响因素研究

王守文¹, 郭蕊², 王树斌²

(1. 三峡大学法学与公共管理学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:地缘政治冲突加剧全球能源市场动荡, 凸显了总体国家安全观下国家能源韧性的重要性。立足创新驱动发展战略, 构建“资源禀赋—产业发展”二维评价矩阵, 采用熵权 TOPSIS 法、耦合协调度模型、核密度估计和 Catboost 算法, 多维度探讨 2011—2022 年中国 30 个省(不含西藏及港澳台地区)能源韧性与科技创新的协调关系及其时空演化规律, 同时借助 SHAP 解释框架揭示其主要影响因素。结果表明: (1) 两者均呈稳步增长态势, 但在发展进程中存在不平衡现象和不充分特征; (2) 两者的协调度在时序上呈跨越式进步, 但各区域空间分异规律明显, 逐渐形成“产业主导型区域领先、创新发展型区域和综合发展型区域凹陷、资源主导型区域追赶”的区际梯次格局; (3) 各区域的影响因素存在不同的阈值特征和促进机制, 科技创新水平差异是造成协调度差异的根本原因。基于此, 提出势能治理跨越“科技鸿沟”、资源协同践行“能源革命”和因地制宜推进协调发展的策略。

关键词:能源韧性; 科技创新; 耦合协调; 机器学习; SHAP

中图分类号: F206 文献标识码: A 文章编号: 1005-0566(2025)01-0208-17

Research on the coordinated evolution and influencing factors of energy resilience and scientific and technological innovation in China

WANG Shouwen¹, GUO Rui², WANG Shubin²

(1. School of Law and Public Administration, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Economics and management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Geopolitical conflicts have exacerbated volatility in global energy markets, highlighting the importance of national energy resilience within the overall national security perspective. This paper, anchored in an innovation-driven development strategy, develops a two-dimensional evaluation matrix of “resource endowment-industrial development”. Utilizing the entropy weight TOPSIS method, coupling coordination degree model, kernel density estimation, and the Catboost algorithm, the research examines the coordination between energy resilience and technological innovation, as well as their spatio-temporal evolution across 30 Chinese provinces (excluding Tibet, Hong Kong, Macao, and Taiwan) from 2011 to 2022. Additionally, the SHAP framework is employed to identify key influencing factors. The findings indicate that: (1) Both energy resilience and technological innovation have steadily increased, though their development

收稿日期: 2024-09-26 修回日期: 2024-12-28

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(19BGL208); 国家自然科学基金项目(51877122); 湖北省人民政府智力成果采购项目(2022HB-ZLCG-06)。

作者简介: 王守文(1978—), 男, 山东潍坊人, 教授、博士生导师, 研究方向为科技政策与科技管理。通信作者: 郭蕊。

is marked by imbalances and inadequacies. (2) The coordination between them has improved markedly over time, yet distinct regional spatial differentiation persists, forming a hierarchical pattern of "industry- leading regions, innovation-driven and comprehensive development lagging regions, and resource- dominated regions pursuing growth". (3) Influencing factors vary by region, exhibiting different thresholds and facilitative mechanisms, with disparities in technological innovation levels being the primary drivers of coordination differences. Based on these results, the study recommends governance strategies to bridge the "technology gap" synchronize resource management to implement an "energy revolution" and promote coordinated development tailored to local contexts.

Key words: energy resilience; scientific and technological innovation; coupling and coordination; machine learning; SHAP

党的二十届三中全会强调要进一步全面深化改革,构建支持全面创新体制机制,聚焦建设更高水平平安中国^[1]。能源是经济社会平稳发展的命脉,也是国家安全体系和能力现代化进程的重要动态场域^[2]。通过提升科技创新能力增强能源韧性,既是转方式调结构、推动能源发展转型变革的必然路径,也是补短板强弱项、提高能源自主安全保障能力的战略举措。当前,科学研究、技术创新、产业发展一体化发展趋势更加明显,强化科学研究原始创新、根技术颠覆性创新的支撑地位,健全能源领域关键核心技术攻关和集成应用的新型举国体制,抢抓能源革命推动产业革命的历史机遇,以科技自立自强为战略基点增强能源韧性,锚定强国目标,建设新型能源体系,是实现“中国式现代化”的基本保障。

近年来,国际能源市场频频受到“黑天鹅”“灰犀牛”事件冲击,大国博弈导致能源逐渐政治化、武器化^[3]。拜登政府对于韧性建设的关注度达到前所未有的高度,在《国家安全战略》《国防战略》(National Defense Strategy)和《国家情报战略》(National Intelligence Strategy)等主要安全战略文件中反复出现“加强韧性”(enhance resilience)的相关表述,明确要求将其贯穿经济、能源、粮食、太空、科技等多个领域^[4];2025年1月20日,特朗普就职新一届美国总统,基于其上任期间(2017—2021年)推行的“美国优先”“能源独立”与“韧性建设”战略取向,预示着美国未来能源政策可能出现重大不确定性,重塑全球能源格局;德国于2023年出台二战后首份《德国的综合安全:国家安全战略》(Integrierte Sicherheit für Deutschland—Nationale Sicherheitsstrategie)以“防御性”“韧性”和“可持续性”为出发点,着重强调原材料与能源

供应链、基础设施、科技与太空等方面安全建设^[5];俄罗斯作为全球主要能源供应国,2022年以来能源对外贸易政策呈现明显“向东移”特征,其目的是降低因对欧洲市场的过度依赖而产生的风险,追求能源出口的多元化和平衡化^[6],以期增强全球能源市场的韧性与稳定性^[7]。

中国已连续多年是世界上最大的能源生产与消费国。随着经济持续回升向好,能源需求刚性增长。然而,中国的能源高质量发展仍面临能源结构偏煤、产业结构偏重的现实困境。2023年人均能源消费总量为57.2亿吨标准煤,约占世界能源消费总量的27.4%。近年来,受气候变化^[8]、贸易摩擦^[9]、地缘政治冲突^[10]的影响,国际能源市场跌宕起伏,同时“双碳”目标的承诺,对新型能源体系建设提出了更高要求。在此背景下,客观评价中国能源韧性,发掘科技创新体系中能够切实提高能源韧性的关键核心力量和前沿引领的要素变得尤为重要。探讨科技创新与能源韧性的协调关系及其时空演化规律,通过新型举国体制统筹协调,为建设能源科技强国提供借鉴,也是“科技自立自强”国家发展战略的重要实践。

一、文献回顾与机理分析

(一)文献回顾

现有关于能源韧性特征的研究主要集中于3个方面:①工程学特征:工程属性关注能源系统在遭受冲击后能否迅速恢复到原有状态,以及恢复的速度与程度^[11],并总结出能源韧性的四个标准化历程,即避免、抵抗、适应和恢复,强化了对能源系统在面临外部冲击时动态响应能力的研究;②生态学特征:生态属性不仅关注受到冲击后,更强调受到冲击前能源系统吸收扰动的能力,尤其是在面对多重扰动时表现出的减缓冲击、抵御伤

害、恢复平衡及自我适应的能力,并且要与生态系统和社会系统协调发展^[12];③管理学特征:强调能源韧性的状态而非对冲处理的过程,且能源具有多样性和可持续性的明显特征^[13],与能源安全的特征有一定的相似性,因此除了能源工程韧性与能源生态韧性外,还应包括能源经济韧性、能源社会韧性以及能源资源韧性等多个维度。

对于能源韧性的量化和评价,学术界主要采用以下 3 种方式:一是采用韧性演化曲线^[13]等工具衡量能源系统的韧性,这种方式考虑了能源系统的动态变化过程,可直观反映韧性水平的变化,但缺少可持续发展的战略视角研判长期变化趋势;二是根据能源韧性的理论内涵构建评价指标体系,其中国外学者大多是从环境、社会与经济方面,以能源效率、可再生能源、能源获取性 3 个维度构建评价指标体系^[14-15],国内学界对于能源韧性的研究大部分是将其作为能源安全的一部分,以国家能源安全战略中的“系统韧性”思维为指导,主要分析受到供应中断、价格大幅波动及其他严重的经济、社会、生态环境、治理条件影响时能源系统的响应^[16],这种方式评价指标的选取与计算方式等方面没有权威统一的标准,因而其测度结果的准确性有待考量^[17];三是引入某个核心变量到计量模型,如绿色金融政策^[14]、R&D 投入水平^[18]等,测算对比受到核心变量的冲击前后变化,并进行韧性水平分析,其优点是可评估单次冲击对于研究主体的影响,但容易忽略研究主体的动态变化特征与其他变量的边际贡献。

科技革命与工业革命共同促进了世界现代化发展,每一次科技革命都加速了工业现代化进程^[19],以蒸汽机和内燃机为标志的两次现代化工业革命推动了社会生产力的显著提升和人类文明的重大进步,社会发展历程不断经历能源转型。目前,新一轮科技革命和产业变革正在加速重构全球能源格局,新的能源技术和新兴业态不断涌现,正推动能源产业从资源和资本主导向技术主导的转变^[20]。全球能源科技创新进入了前所未有的密集活跃期,近年来世界主要科技强国纷纷制定能源科技战略计划,如美国的《全面能源战略》《美国优先能源计划》积极部署发展核能、页岩油气、可再生能源等先进能源技术,实现全链条集成

化创新;日本举政府之力加快发展可再生能源,颁布《2050 能源环境技术创新战略》提出全面建设“氢能社会”;欧盟升级了战略能源技术规划(SET-Plan),聚焦能源转型中的跨学科和跨领域的困境,旨在贯通“研究、技术开发及示范框架”能源发展全链条,打造能源创新生态系统^[21]。

经过众多学者梳理对比发现,相较于世界科技强国,中国在能源领域的科技创新还存在以下差距:一是能源技术装备对外依存度较高,由于能源科技的创新与发展需要融合大量多元化知识及基础研究积累,而基础研发能力较低导致了技术空心化和对外依存度偏高的现象尚未得到有效解决^[22];二是科技水平存在“局部领先、部分先进、总体落后”的明显特征,能源系统中的煤、油、气、风、光、水、核等各分系统形成不同创新单元,同质化发展、无序竞争、低效率及低收益问题较为突出,呈现出条块割裂的现状;三是科技创新政策机制不完善,重大能源科技创新产学研“散而不强”^[23],科技成果转化过程不通畅,易受到诸多体制机制等因素滞碍,创新要素的过程配置急需优化。

基于此,结合国内外发展局势与现状,本文根据能源韧性理论和科技创新发展新形势建立新的评估框架,定量分析能源韧性与科技创新之间的协调与影响关系。可能的创新之处在于:一是现有关于能源韧性的评价体系并不充分,因此本文从抵抗防御能力、恢复适应能力和改善再生能力 3 个维度构建能源韧性评估框架,并从年度时间、省域空间层面考察了能源韧性指数的变化趋势和空间差异,更加客观评价了近年来中国能源韧性的发展态势,以期对能源韧性的区域协调发展产生可能的参考意义;二是虽然科技创新如今已经被放在能源高质量发展的突出位置,但是多数研究仍处于定性分析的阶段,本文基于能源韧性和科技创新协调演化视角,丰富了二者的量化研究,深化了能源韧性与科技创新在中国式现代化发展中的应用,以期为实现创新驱动的能源高质量发展、为落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略提供科学支撑;三是突破传统的行政区划或经济区域划分方式,通过构建基于能源资源禀赋和产业发展特征的分类框架,实现区域特征的精准画像和靶向分析,这不仅更准确地刻画了区域能

源利用实态和产业演进轨迹,深入剖析不同类型区域在资源配置、技术需求和创新动力等方面的异质性特征,系统性地识别了能源与科技协同发展的关键驱动要素与作用机制,也为揭示能源韧性与科技创新的内在耦合机理提供了新视角,以期制定差异化的能源韧性和科技创新协调度的提升策略提供科学依据。

(二)机理分析

增强能源系统韧性,是推动能源系统低碳转型、供需多极演化和安全独立的必然路径^[13],增强能源韧性的需求引导着科技创新的发展方向,同时科技创新又是提升能源韧性的驱动力与保障,但由于受到多种内外部因素干扰,能源韧性与科技创新在耦合互动过程中可能面临诸多挑战,二者可能因此造成颀颀关系,从而阻碍高质量发展。随着深入贯彻总体国家安全观与科技自立自强发展战略,能源韧性与科技创新的关系势必将日益紧密,并逐步朝着良性互动方向发展。为此,本文将能源韧性与科技创新耦合互动过程抽象为一个开放复杂的巨系统,两个子系统及其内部要素之间相互促进、彼此赋能、协调共进,如图1所示。

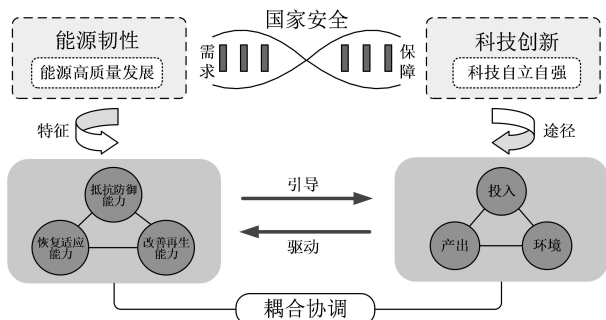


图1 能源韧性与科技创新协调机理

1. 能源韧性对科技创新的作用分析

能源韧性引导着科技创新的发展方向和场景。①抵抗防御能力:能源韧性强调在极端事件中的应急响应能力,在利用外部能源渠道收紧、变数增多、风险加剧的现实背景下^[3],亟须发展先进的监测、预警和恢复技术,这引导了大数据和人工智能技术进行电力需求预测、设备故障预测和灾害预警,能够提前采取措施,降低能源系统的脆弱性。②恢复适应能力:为了增强能源系统在灾后恢复和适应变化的能力,需要开发更具韧性的基础设施,例如新型电池材料(如钠离子电池、硅纳

米线电池等)能够提高储能设备的效率和寿命、新型电网材料(如高温超导材料、耐腐蚀合金等)坚固电力基础设施。此外,当能源系统受到冲击后,需要快速部署应急恢复技术(如可控分布电源、临时储能设备),能够在灾后迅速恢复能源供应,减少停电时间和影响。③改善再生能力:基于可再生能源对化石能源的替代效果偏弱的现状、能源绿色转型效果不明显的现状^[24],增强能源韧性需要降低对单一化石能源的依赖性,这将激励对各类可再生能源技术的创新,推动能源系统的多样化和分布式能源的发展,有助于提升能源系统的灵活性。

2. 科技创新对能源韧性的作用分析

科技创新是增强能源韧性的重要驱动力和保障。①投入。首先,高等院校是基础研究的主力军与策源地,通过高水平科学研究和重大国家科技任务培育了众多硕博生,具有多学科、强交叉的明显特征,能够产生具有颠覆性和引领性的原创性成果^[25]。其次,在国家重大科研基础设施的平台上,发挥新型举国体制加强能源领域应用基础研究,可有效激发颠覆性技术创新。如清华大学清洁能源研究院、中国科学院大气物理研究所等国家实验室通过创新研究,推动了太阳能、风能、生物质能等能源技术的发展,提升了能源利用效率,如全超导托卡马克实验装置(EAST)和中国散裂中子源(CSNS)等大科学装置的研究进展,极大增强能源系统的可持续性稳定性。②产出。首先,借助新知识、新观念、新技术以及新工艺等手段,高质量的科技成果转化可以不断调整能源产业结构,促进能源体系安全转型、安全降碳,缓解紧缺的资源约束,促使能源由“资源禀赋型”向“技术主导型”发展,提高资源的产出效率与利用效率。其次,颠覆性技术创新成果为能源发展提供无限可能性,油气、氢能、储能、核聚变能等方面的技术变革,都有可能改变未来能源图景,重塑能源格局。最后,科技创新能显著降低能源生产成本、提高能源利用效率,这有助于优化和完善能源产业链,带动上下游企业协同共进,最终形成良性市场竞争环境,促使企业增收,带动经济增长,进一步优化社会资源有效配置。(3)环境。党的十八大以来,国家高度重视能源发展改革工作,致力于加快能源治理体系和治理能力现代化建设,各级

政府转化为实际政策和资金支持能源发展。此外,良好的公众知识水平可以提高参与需求响应(demand response)的积极性与参与度,优化用电行为,再加上较高的能源数字化水平提供实时监测与控制,精准数据分析与预测,从而提升能源系统灵活性、精准度和响应速度,增强能源韧性。

二、研究设计

(一)评价指标体系

1. 能源韧性评价指标体系

评价指标体系的科学性程度直接影响评价结果的可信度,因此本文设计能源韧性评价指标体系时,在前人研究基础上总结出能源韧性应具备以下 3 个特征,能提前感应风险并抵抗干扰的能力、在受到干扰时快速灵活应对的能力和在干扰结束后快速恢复并适应未来风险格局的能力。①抵抗防御能力,通常认为能源系统面对自然灾害的抵抗能力是衡量能源韧性的重要标准之一^[26],另外,通过提高能源效率减少不必要的能源消耗,也是衡量抵抗力的重要指标^[27],因此主要从生态负荷和能源消耗两方面选择指标表征。②恢复适应能力,不同国家或地区的资源禀赋差异,直接影响了能源的恢复能力^[14],能源禀赋的评估应涵盖煤炭资源^[28]、油气资源^[29]和新能源^[30]发展,其中天然气管道作为能源供应链的关键基础设施,长度的增加意味着覆盖范围的扩大和分配效率的提升,适度的冗余管道和互通互联的管道网能够在受到冲击后以最快速度恢复能源供应^[31],此外有效的环境治理对实现碳中和也至关重要,森林不仅提供生物多样性和生态系统服务,减轻自然灾害的影响,还有助于保护生态系统和水土质量,从而增强能源韧性^[32],因此主要考虑能源禀赋和环境治理两个方面选择指标进行测度。③改善再生能力,不仅关注系统的持续供能能力,更强调能源结构的多元化发展,特别是可再生能源在能源系统中的整合程度。为了进一步增强能源系统的韧性,需要强大的能源供应能力,不仅是持续的能源供应,还应包括多元化的能源结构,尤其是可再生能源整合进入能源系统的比重^[33],还必须考虑国家或地区对特定能源的依赖程度,高度依赖可能导致能源供应缺乏稳定性和多样性,从而对能源韧性产生负面影响^[34]。此外,能源不仅是

工业和服务业等关键领域的基础,而且与经济增长的持续性密切相关^[35],较高的从业人员占比意味着更强的技术创新潜力和应急处置能力,有利于系统从内部恢复和改善。因此,应从外部保障和内部驱动两个维度来衡量能源系统受到干扰后的改善能力。具体能源韧性评价指标体系如表 1 所示。

能源韧性动态演变过程(即抵抗防御、恢复适应和改善再生阶段)如图 2 所示, $F(t)$ 是 t 时刻的能源韧性水平, F_0 是能源系统的韧性阈值, F_M 是在 t_1 之前的能源系统性能。韧性损失量对应的三个时间点分别为能源系统最初受到冲击时的 t_1 、受到破坏冲击后的 t_2 以及系统恢复之后的 t_3 ,韧性损失量最长边在横轴上的投影距离 $t_3 - t_1$ 为持续时间,这几个时间变量共同决定了能源系统在遭受冲击的损失程度。

2. 科技创新评价指标体系

设计科技创新评价指标体系时,主要遵循习近平总书记在全国科技大会上对于科技创新的重要论述,并在前人的研究基础上,本文从投入、产出、环境 3 个方面构建评价指标体系。①投入,强大的原始创新能力需要依靠创新载体,其中高质量创新载体如大科学装置和国家实验室,一般性创新载体指高等院校^[42],而且 R&D 经费投入直接反映了对科技创新的重视程度,科技人才集聚对创新具有一定的促进作用^[43],因此主要从创新载体与资源投入两方面选择指标表征;②产出,创新成果数量是直接产出,代表同行和专业认可程度,经济收益是间接产出,代表市场和社会的认可程度,因此在成果数量方面选择专利授权量与科技论文数作为代表^[44-45],经济收益选择高技术产业主营业务收入与规模以上工业企业新产品销售收入作为代表^[44,46];③环境,中国具有能够集中力量办大事的制度优势,政府在组织和引导科技发展方向上的作用愈发重要^[47],因此选择科技支出占地方财政支出的比重和省级政府工作报告中“科技创新”词频统计作表征政府关注^[41,46],此外完善的基础设施可以显著提升区域创新效率^[46],选择人均公共图书馆藏书量和人均互联网宽带接入端口代表基础设施水平^[48]。具体科技创新评价指标体系如表 2 所示。

表 1 能源韧性评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	计算公式	属性	权重	参考文献
抵抗防御能力	生态负荷	二氧化碳排放强度(万元/吨) X_1	碳排放量/GDP	-	0.015	[36]
		人均二氧化硫排放量(吨/人) X_2	二氧化硫排放量/总人口	-	0.011	[36]
		自然灾害损失(亿元) X_3	-	-	0.004	[14]
	能源消耗	能源消费结构低碳化水平 X_4	见参考文献	-	0.017	[37]
		单位 GDP 能源消费量(吨/万元) X_5	能源消耗总量/GDP	-	0.019	[40]
		人均能源消耗(吨/人) X_6	能源消耗总量/总人口	-	0.011	[38]
恢复适应能力	能源禀赋	能源工业固定资产投资比例(%) X_7	国有经济能源工业固定资产投资/全社会固定资产投资额	+	0.141	[28]
		人均可再生能源装机总量(千瓦/人) X_8	可再生能源装机总量/总人口	+	0.147	[29]
		天然气管道长度(公里) X_9	天然气管道长度	+	0.128	[31]
	环境治理	工业固废综合利用率(%) X_{10}	一般工业固体废物综合利用量/一般工业固体废物产生量	+	0.042	[39]
		环境规制强度(%) X_{11}	工业污染治理投资额/第二产业增加值	-	0.003	[39]
		森林覆盖率(%) X_{12}	森林面积/土地总面积	+	0.111	[40]
改善再生能力	外部保障	对外依存度(%) X_{13}	能源净进口量/能源消耗总量	-	0.007	[41]
		调入能源率(%) X_{14}	能源净转入量/能源消耗总量	-	0.009	[9]
		单位 GDP 工业产值(%) X_{15}	工业产值/GDP	+	0.029	[38]
		第三产业贡献率(%) X_{16}	第三产业增量/国内生产总值增量	+	0.003	[38]
	内部驱动	能源生产多样性指数 X_{17}	见参考文献	+	0.097	[14]
		能源转型(%) X_{18}	可再生能源发电装机容量/总发电装机容量	+	0.068	[33]
		能源自给率(%) X_{19}	(天然气生产+发电)/能源消耗总量	+	0.067	[14]
		能源相关行业从业人员占比(%) X_{20}	电力、煤气和水生产及供应行业的雇员人数/常住人口	+	0.071	[9]

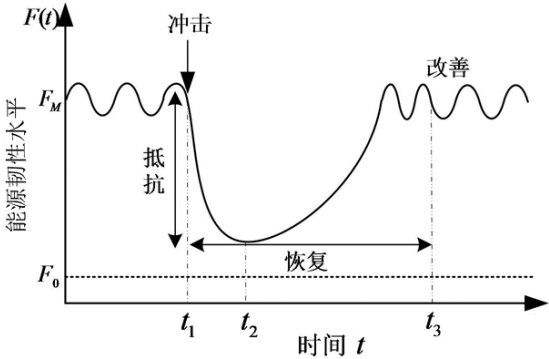


图 2 能源韧性动态演变过程

(二)研究方法

1. 熵权 TOPSIS 法

本文采用熵权 TOPSIS 法(通过客观确定权重,避免了主观因素的干扰,通过逼近理想解技术处理多指标决策问题)对指标进行赋权并进行综合评价,各指标权重如表 1 和表 2 所示,具体计算公式参考穆雅晴等^[49]的研究。

2. 耦合协调模型

第一步,计算耦合度:

$$C = 2 \sqrt{U_1 \times U_2} / (U_1 + U_2) \quad (1)$$

表 2 科技创新评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	计算公式	属性	权重	参考文献
投入	创新载体	大科学装置和国家实验室数(个) X_{21}	大科学装置数+国家实验室数	+	0.204	[42]
		高等院校数(个) X_{22}	-	+	0.024	[42]
	资源投入	R&D 经费内部支出(亿元) X_{23}	-	+	0.094	[42]
		科技人才集聚程度 X_{24}	见参考文献	+	0.084	[43]
产出	成果数量	科技论文数(篇) X_{25}	-	+	0.051	[45]
		专利授权量(件) X_{26}	-	+	0.122	[44]
	经济收益	高新技术产业主营业务收入(万亿元) X_{27}	-	+	0.132	[44]
		规模以上工业企业新产品销售收入(万元) X_{28}	-	+	0.112	[46]
环境	政府关注	科技支出占地方财政支出的比重(%) X_{29}	科技支出/地方财政支出总额	+	0.051	[46]
		省级政府工作报告中“科技创新”词频统计(次) X_{30}	-	+	0.038	[41]
	基础设施	人均公共图书馆藏书量(册/人) X_{31}	公共图书馆藏书量/总人口	+	0.057	[46]
		人均互联网宽带接入端口(个/户) X_{32}	互联网宽带接入端口数/互联网宽带接入户数	+	0.031	[46]

第二步,计算耦合协调度:

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2, \alpha + \beta = 1 \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中,为了反映系统之间的整体协调效应,设耦合协调度为 D 、耦合度为 C 、协调效应指数为 T 。 α 、 β 为待定系数,考虑到能源韧性和科技创新具有同等重要性,故借鉴通行的做法^[50],

本文取 $\alpha = \beta = 0.5$,并将耦合度类型和耦合协调等级划分如表 3 所示。

3. 核密度估计

核密度估计是一种统计非参数密度估计的方法,具体公式为:

$$f(D) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\bar{D} - D_i}{h}\right) \quad (4)$$

表 3 耦合协调度等级划分

协调等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
耦合协调度区间	(0.0-0.1)	[0.1,0.2)	[0.2,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1.0)
耦合协调关系	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调

式(4)中, $K(D)$ 表示高斯核密度函数, n 表示观测值的数量, h 表示带宽, D_i 表示独立分布的观测值, $\bar{D}$ 表示观测值的平均值,文章主要通过高斯核密度绘制能源韧性与科技创新之间的耦合协调度核密度曲线,通过观察曲线的位置和形状,得到区域差异的动态分布和演化规律。

4. Catboost 模型及 SHAP 值分析

Catboost 在传统的梯度提升决策树基础上进行了改进和优化,以对称树为基学习器,提高了模型的稳定性,并且能够有效的回避变量的共线问题和模型的过拟合问题,同时还可以识别变量的重要性,此外通过 SHAP 值可以计算每个特征在不同组合中对预测结果的边际贡献,深入分析特征如何影响输出结果,为模型解释提供了可行性。其核心公式为:

$$\hat{f}_s(x) = b + \sum_{i=1}^M a_i h_i(x) \quad (5)$$

$$SHAP^j_* = \sum_{S \subseteq F \setminus \{j\}} \frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!} (\nu_*(S \cup \{j\}) - \nu_*(S)) \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, $\hat{f}_s(X_s)$ 为模型对样本 x 的输出值, b 为模型的偏置项, M 为模型中决策树的数量, a_i 为第 i 棵树的权重, $h_i(x)$ 为第 i 棵树的输出值。 $SHAP^j_*$ 为特征 j 的 SHAP 值,表示该特征对模型输出的整体贡献度。 F 表示所有特征的集合, S 表示不包含特征 j 的特征子集, $(\nu_*(S \cup \{j\}) - \nu_*(S))$ 表示特征 j 的边际贡献。

(三)数据来源

鉴于数据可得性,本文以中国 30 个省份(不

含西藏和港澳台地区)为研究样本,以 2011—2022 年为研究时段。2011 年作为国家“十二五”的开局之年,明确提出调整优化能源结构,构建安全、稳定、经济、清洁的现代能源产业体系,因此以 2011 年定为研究起点。原始数据均源自历年《中国能源统计年鉴》《中国电力统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》和各省统计年鉴等,少量缺失数据用插值法填补。

本文构建了基于能源资源禀赋与产业发展水平的二维评价矩阵,突破了传统行政区划或经济区域划分可能导致的“泛区域化”问题,为深入剖析省域能源资源禀赋和产业发展的异质性特征提供了新视角。在具体划分方法上,借鉴 WANG 等^[51]的研究成果,以研究期内人均一次能源生产量作为能源资源禀赋的量化指标,选取前 15 名省份作为资源优势区域;根据《中国能源统计年鉴》的划分标准,将能源产业限定为煤炭开采与洗选业,石油和天然气开采业,电力、热力生产和供应业,石油、煤炭及其他燃料加工业,燃气生产和供应业五大类,借鉴苏屹等^[52]、蔡曦等^[53]的研究方法,以研究期内固定资产投资总额均值作为产业发展水平的评价标准,选取前 15 名省份作为产业发展优势区域。通过构建“资源禀赋—产业发展”二维矩阵,系统识别出四种典型的区域发展模式:Ⅰ—综合发展型区域(双高类型)、Ⅱ—产业主导型区域(高产业—低资源类型)、Ⅲ—创新发展型区域(双低类型)、Ⅳ—资源主导型区域(高资源—低产业类型),为后续各区域能源韧性与科技创新协调发展机制的对比研究奠定了科学基础。

三、实证分析

(一) 中国能源韧性水平分析

研究期内中国能源韧性水平在 2016 年出现小幅度下跌,总体基本维持上升态势,从 2011 年的 0.345 增至 2022 年的 0.511,标准差和变异系数分别从 2011 年的 0.077、0.346 变化为 2022 年的 0.096、0.337,平均值为 0.413,这表明省际能源韧性水平绝对差距逐渐拉大,且相对差距持续存在。分区域来看,综合发展型区域的能源韧性水平波动较大,在 2016 年显著下降,研究期内平均值为 0.422;资源主导型区域同样在 2016 年骤降,且 2018 年跌至谷底,随后维持小幅增长,平均值为 0.408;产业主导型区域与全国发展趋势基本一致,平均值为 0.469;创新发展型区域除 2020 年出现下降外,其增长态势与全国相似。总体而言,4 个区域能源韧性水平由高到低依次为:综合发展型、产业主导型、创新发展型和资源主导型。

研究期内中国省域能源韧性差异明显,江苏、山东和青海 3 个省份上升一个梯队,黑龙江、山西、贵州、陕西和甘肃 5 个省份下降一个梯队,其余省份变化不大,地域分布上总体呈现“西高东低”的空间格局,从具体区域来看:①综合发展型区域形成以山东和内蒙古为核心的增长极,这些省份不仅能源资源禀赋丰富,通过产业结构优化、技术创新、资源多样化开发及政策支持等多维助力,如内蒙古加大对传统能源产业进行技术升级,提高能源利用效率,同时山东等风电、光伏等新能源资源优势突出的省份,积极推动传统制造业向高端制造业转型;②资源主导型区域形成以天津和安徽为核心的增长极,在能源结构优化、基础设施建设和政策支持方面取得显著进展,如天津生态城是一个集成了大量可再生能源和智能电网技术的示范项目,通过采用太阳能、风能等多种清洁能源,实现了能源的多元化和自给自足,增强了整体能源系统的稳定性,此外合肥光伏产业园是安徽省重要的太阳能发电项目之一,拥有大规模的光伏发电设施,并与周边省份的电网互联,形成了区域性能源网络;③产业主导型区域形成以河北、浙江为核心的增长极,以河北为代表的传统煤炭大省,积极推进煤炭产业的转型升级,如邯郸和唐山等地建设了多座超低排放煤电厂,减少对高污染煤炭

的依赖,推动清洁煤技术的发展,以浙江为代表的新型产业优势区,推动能源密集型产业向高效、低耗方向转型,如宁波智慧能源城集成了智能电网、分布式能源和能源管理系统,通过高效的能源管理和智能化技术,为浙江提供了稳定且低碳的能源来源;④创新发展型区域形成以辽宁和湖北为核心的增长极,这些省份在区域合作与互联互通、生态保护与可持续发展等方面创新发展,如辽宁加强与东北亚邻国和国内其他省份的能源合作,优化能源资源配置,在东北地区在电力和天然气领域开展合作,实现了能源资源的共享和互补,湖北将生态保护与能源发展相结合,推动绿色能源项目快速发展。

(二) 中国科技创新水平分析

研究期内中国科技创新水平呈持续上升态势,从 2011 年的 0.491 增至 2022 年的 0.918,标准差和变异系数分别由 2011 年的 0.089、1.020 变化为 2022 年的 0.149、0.878,表明中国各省份之间相对差距不断缩小,科技创新水平取得了显著进步和提升,均值为 0.636。分区域来看,综合发展型区域和资源主导型区域始终维持平稳增长态势,平均值分别为 0.092 和 0.078;产业主导型区域增速较快,且从 2016 年后维持领先,平均值为 0.254;创新发展型区域于 2016 年以前处于领先,随后维持小幅增长,平均值为 0.229。总体而言,四个区域的科技创新水平由高到低依次为:产业主导型、创新发展型、综合发展型和资源主导型。

研究期内中国省域科技创新差异明显,广东、江苏、浙江、山东 4 个省份上升一个梯队,而黑龙江、青海 2 个省份下降一个梯队,其余省份变化不大,地域分布上呈现“东高西低”的空间格局,从具体区域来看:①综合发展型区域形成以山东和四川为代表的强势增长极,分别代表东部沿海省份;②资源主导型区域总体来说科技创新水平较弱,可能归咎于人才流失和科研经费不足,尤其黑龙江省虽然拥有较多高校和科研院所,但经济增速放缓导致地方政府在科技领域投入受限,迫使人才外流,间接影响了科技创新活动的持续性与广度;③产业主导型区域形成以广东为核心的强势增长极,广东由于民营经济发达,企业创新能力强,已形成“重投入、高产出”的良性循环,此外江

苏和浙江作为全国创新型省份建设试点省份,超常规加大科技投入,布局了一批高能级科创平台,创新策源能力得到了极大提升;④创新发展型区域拥有北京怀柔和上海张江综合性国家科学中心,逐步形成了龙头企业引领、高新技术企业迅速增长、科技型中小企业突破发展的新格局,随着长江经济带发展战略深入落实,从上游的重庆、到中游的湖北和江西,丰富的教育资源和众多知名高校及科研院所极大地推动了科研成果的高质量转化,为区域科技创新注入了强大动力。

综上所述,研究期内中国能源韧性与科技创

新水平均呈上升趋势,二者在一定程度上能形成协调发展的态势,但仍存在同步性不高的问题,如综合发展区域能源韧性水平全国最强,但科技创新水平较低,因此需要进一步分析不同地区能源韧性与科技创新耦合协调的发展趋势、状态和相关影响因素,因地制宜推动两者协调发展。

(三)中国能源韧性与科技创新协调关系分析

研究期内中国能源韧性与科技创新协调度整体不高,年均值为 0.713(见表 4),位于中级协调阶段,说明中国能源韧性与科技创新的高质量协调发展还未实现。

表 4 2011—2022 年中国及四大区域能源韧性与科技创新协调度

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
全国	0.641	0.648	0.654	0.671	0.681	0.689	0.700	0.720	0.743	0.782	0.799	0.828
综合发展型	0.414	0.408	0.388	0.408	0.421	0.425	0.425	0.432	0.445	0.472	0.494	0.523
资源主导型	0.419	0.369	0.334	0.353	0.359	0.370	0.367	0.364	0.385	0.400	0.418	0.430
产业主导型	0.437	0.462	0.468	0.475	0.491	0.508	0.518	0.543	0.559	0.589	0.613	0.630
创新发展型	0.490	0.492	0.494	0.496	0.500	0.504	0.514	0.525	0.533	0.556	0.561	0.578

从时序变化来看,研究期内中国能源韧性与科技创新协调度呈现出逐步增长的积极发展态势,从空间变化来看,虽然研究期内全国整体协调度实现了跨越式提升,但中国能源韧性与科技创新协调度具有明显的区域分异规律(见表 4)。依据协调度等级标准(见表 3),大致可分为 3 个阶段:2011—2016 年全国整体协调度由 0.641 增至 0.689,增速为 1.45%,处于初级协调阶段;2017—2021 年由 0.700 增至 0.799,增速高达 3.35%,协调度已达到中级协调;2022 年协调度达到 0.828,处于良好协调阶段。

(1)综合发展型区域在研究期内经历阶段性失衡和多次协调等级转换后实现质的飞跃。其协调度从 2011 年的 0.414 上升到 2022 年的 0.523,先后经历了濒临失调(2011—2012 年)—轻度失调(2013 年)—濒临失调(2014—2021 年)—勉强协调(2022 年)的起伏演变,这一过程可分为 3 个阶段:第一阶段表现为传统能源依赖与创新要素投入不足之间的强烈张力,协调度波动明显;第二阶段开始探索创新转型但受制于存量产业惯性,协调度徘徊于濒临失调状态;第三阶段在政策引导和技术进步双重推动下实现突破,跃升至勉强协调水平。这一演变轨迹的根本原因在于区域内初期经济增长更多依托煤炭、矿产等传统能源产业,能源利用效率与结构优化水平较低,随着国家层

面不断深化创新驱动发展战略以及清洁能源转型政策的推进,是能源供给侧改革重点区域,政策重点关注传统能源清洁高效利用和新能源产业集群培育。如 2014 年《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》提出优化能源结构的具体目标,2016 年《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》明确了能源革命的战略方向,2021 年《“十四五”现代能源体系规划》进一步强化了能源创新发展要求,同时省域颁布如《山西省煤炭供给侧结构性改革行动方案》和《内蒙古自治区加快新能源发展实施方案》等文件,通过持续的政策激励,逐步重视科技创新对能源发展的支撑作用,并最终取得了实质性转型与提升。

(2)资源主导型区域在研究期内表现出协调度持续低位运行的特征,即大部分处于轻度失调状态,2021 年后跌至濒临失调状态。这种发展停滞主要源于区域陷入典型的“碳锁定”困境,即传统能源依赖所引致的技术路径依赖和制度嵌入依赖,进而引致新型能源变革弱化和应用不足^[54],具体表现为三重路径依赖:技术路径依赖(传统能源开采和使用技术的沉没成本高)、制度路径依赖(能源产业链上下游利益固化)以及认知路径依赖(对传统能源依赖型发展模式的惯性认知)。这三重路径依赖相互强化,导致区域新型能源技术应用不足、创新动力不强。形成这一

困境的深层原因在于历史积累的结构性矛盾,主要包括:一是传统工业基地长期形成的重化工业空间集聚,二是资源类产业链配套体系完整但升级动力不足,三是创新要素供给与区域转型需求不匹配。因此,资源主导型区域的能源韧性与科技创新协同改进仍然面临严峻挑战,是能源结构调整攻坚区,政策重点关注传统能源转型升级和可再生能源消纳。如2013年《大气污染防治行动计划》和2014年《煤炭清洁高效利用行动计划(2014—2020年)》为能源结构优化提供了政策指引,2019年《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》进一步推动清洁能源发展,但受制于区域基础条件,《吉林省老工业基地振兴规划》《黑龙江省能源结构优化实施方案》《安徽省传统产业转型升级工程方案》等文件的颁布,仍需通过技术改造和产业优化为手段,以期破解低协调困境。

(3) 产业主导型区域大致经历了濒临失调(2011—2015年)—勉强协调(2016—2020年)—初级协调(2021—2022年)的渐进式改善,体现出明显的“政策—产业—创新”联动特征:第一阶段以传统制造业节能改造为主,但受限于技术水平,协调提升缓慢;第二阶段开始推进智能制造与绿色转型的深度融合,协调水平实现突破;第三阶段在数字化转型与低碳发展双重驱动下,协调度进入更高水平。这种持续改善得益于3个方面:一是产业结构优化带来的能源消费结构升级,二是技术创新推动的能源利用效率提升,三是新型产业集群带来的创新要素集聚效应。作为能源消费革命先行区,区域内制造业发达省份的政策重点关注工业节能降碳、能源需求侧管理和园区智慧能源示范。2014年发布的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》确立了能源结构优化方向,2015年发布的《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》推动能源技术创新,2021年发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》进一步明确了低碳转型要求,在国家鼓励产业升级与绿色转型的政策指导下,河北钢铁集团通过引入先进的节能技术和环保设备,显著降低了能源消耗和污染排放提高能源利用率,苏州工业园区通过引进智能制造技术和先进

的生产管理系统,大幅提升了制造业的效率和灵活性,深圳通过建设高科技产业集群,大力发展光伏、风电等新能源产业,积极推进能源结构优化,这些举措与政策导向相辅相成,使产业主导型区域能在较短时间内实现从依赖传统工业到注重创新产业发展的过渡,进而提升能源与创新协调度。

(4) 创新发展型区域呈现出从濒临失调(2011—2014年)到勉强协调(2015—2022年)的跃升过程,这一演进可分为两个发展阶段:第一阶段虽具备创新资源优势但与能源发展协同不足,表现为“创新孤岛效应”,即创新成果难以有效转化为能源技术进步;第二阶段通过构建“创新链—产业链—能源链”融合发展体系,实现协调水平的系统性提升。这种提升得益于区域特有的三重优势:一是创新资源高度集聚,二是服务业主导的产业结构,三是完善的科技创新生态系统。作为能源技术变革引领区,政策重点关注能源科技成果转化、能源互联网建设和新型储能示范应用,2011年发布的《“十二五”能源科技发展规划》开启能源科技创新新阶段,2016年发布的《能源发展“十三五”规划》进一步强化创新驱动,2022年发布的《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》为能源创新发展指明方向。在国家政策指引下,不同区域形成了各具特色的创新发展路径。第一类是以科研院所集群引领的创新路径。北京依托高校院所密集优势,建立了“能源技术创新中心—重点实验室—技术转移中心”三级联动体系,在氢能、智慧电网等领域形成了完整创新链,拥有以怀柔实验室为首的多个能源领域重要科技力量,创新成果丰硕;上海打造张江能源科技创新示范区,通过“揭榜挂帅”等机制,推动储能技术突破,储能项目示范应用装机规模屡创新高,带动长三角区域能源创新网络建设。第二类是以国企改革推动的创新路径。辽宁通过实施“央地企业协同创新工程”,推动大型能源企业与科研院所深度合作,建立产业技术创新联盟,完成重大节能技术改造项目;湖北依托“东湖能源科技创新走廊”,促进能源装备制造业升级,能源装备制造业产值增长迅猛,形成了完整的创新链与产业链融合发展格局。第三类是以开放创新驱动的创新路径。海南利用自贸港政策优势,建设清洁能源国际合作示范区,引进外资

能源技术企业,促进境外技术合同成交额指数型增长;广西依托中国—东盟能源合作平台,在智能电网、海上风电等领域开展跨境技术合作,带动本地能源技术企业“走出去”;重庆通过“两江协同创新区”,打造内陆开放创新高地,建成中新(重庆)国际能源创新中心,孵化能源科技企业带动成渝地区双城经济圈能源创新协同发展。这些省份在 2018 年发布的《清洁能源消纳行动计划(2018—2020 年)》和 2020 年发布的《关于做好可再生能源发展“十四五”规划编制工作的指导意见》的政策支持下,通过创新要素跨区域流动与政策叠加效应,进一步加速了能源与创新的深度融合,形成了技术创新支撑能源转型的良性循环机制。

(四) 中国能源韧性与科技创新协调关系动态分布

1. 全国总体能源韧性与科技创新协调度演化分析

研究期内中国能源韧性与科技创新协调度的动态演化有 4 个特征:①从波峰数量上看,大体上呈现双峰到单峰的变化过程,表明这一期间内中国能源韧性与科技创新协调度虽然经历了多次明显的波动,但两极分化现象逐渐减弱;②从分布位置上看,主峰出现右移—左移—右移的变化过程,说明中国大多数城市的能源韧性与科技创新协调度水平先降后升,协调程度逐渐增强;③从分布形态上看,主峰峰高下降、宽度扩大,这表明各地区间的能源韧性与科技创新协调度绝对差异增加;④从分布延展性上看,核密度曲线存在右拖尾现象,说明部分地区能源韧性与科技创新协调度远高于平均水平,同时拖尾期先延长后轻微拓宽,表明前期能源韧性和科技创新协调度高的省份在经历一段时间上升后有所回落,且协调度高的省份数量增加。总体来看,中国多数省份的能源韧性与科技创新协调度呈提升态势、两极分化现象减弱,但是幅度较小、绝对差异增大,尽管高协调度省份数量增多,但中国整体能源韧性与科技创新协调度仍存在较大提升空间。

2. 区域能源韧性与科技创新协调度演化分析

研究期内中国 4 个区域内各省份能源韧性与科技创新协调度的动态演化具有以下 4 个特征。

①从波峰数量上看,综合发展型和创新发展型区域均呈现明显单峰,无任何侧峰,表明无两极分化现象。相较之下,资源主导型区域在 2014 年以前的变化特征相对异常,2014 年以后则经历了由多峰向单峰的转变过程,这一演化表明资源主导型区域正由两极分化逐渐向多极分化演进,该现象在涵盖东北地区的传统能源大省中尤为突出,东北地区自 2014 年启动“东北振兴”战略,加速了能源密集型的中央及国有企业改革,淘汰了低效且高污染的煤矿,提升了能源利用效率,2016 年颁布的《东北振兴“十三五”规划》进一步推动东北老工业基地的转型与复苏,使其趋于更为协调的发展态势。与之相对,产业主导型区域始终保持双峰分布特征,意味着其内部长期存在两极分化的情况。②从分布位置上看,综合发展型区域内省份的核密度曲线主峰出现明显左移的现象,这可能是由于研究期内这些省份实施了更为严格的节能减排政策与产业结构调整措施,使高能耗行业受到抑制,从而使相关指标值整体下移,如《山西省关于进一步推动煤炭行业供给侧结构性改革的实施意见》《山东省工业绿色发展规划(2016—2020 年)》等政策的颁布与实施在一定程度上促成了这一现象。与此相反,资源主导型区域、产业主导型区域和创新发展型区域则呈现出主峰右移的特征,表明这些区域的能源韧性与科技创新协调度在研究期内呈现出持续上升的趋势。③从分布形态上看,四个区域内省份均呈现主峰峰高下降、宽度扩大,这说明省域间的能源韧性与科技创新协调度差异呈现增大趋势,即“同质性”降低、原有的趋同状态减弱,并出现分层与分化格局。一些省份在此期间显著提升了协调度水平,而另一些则提升缓慢甚至停滞,这一分化可能与科技创新成果与能源技术在区域间扩散与协同不均衡有关:发达或创新集聚区更早受益于新技术的应用,而欠发达地区在技术接收与应用方面存在障碍,且相关扩散机制尚不完善,使得整体分布更加分散。④从分布延展性上看,综合发展型区域核密度曲线存在右拖尾现象,说明部分地区能源韧性与科技创新协调度远高于平均水平,同时拖尾期先延长后轻微拓宽,表明区域中高协调度省份的数量在经历一段增长后有所回落,但整体仍有一定数

量的高水平省份存在。相比之下,资源主导型区域、产业主导型区域和创新发展型区域并未出现明显的拖尾情况,表明这些区域的发展在分布尾部较为均衡。

(五) 中国能源韧性与科技创新协调关系的影响因素分析

上文分析结果表明,能源韧性与科技创新协调度存在明显的空间差异。基于 Python 3.11 平台,本文通过网格搜索法对 Catboost 进行自动参数寻优,在最优参数的基础上采用五折交叉验证,验证耦合协调度的驱动因素以及特征重要性程度,同时采用 SHAP 解释框架,揭示各特征对能源韧性

与科技创新协调度的影响机制。平均 Shapley 值大小反映了对整个模型预测能力提升的贡献程度:平均 Shapley 值越大,表示该特征变量的重要性越大,即对协调度的影响越大。如图 3 所示,条形部分代表特征变量对模型预测的平均 Shapley 值大小。结果表明,科技创新水平差异是造成能源韧性与科技创新耦合协调差异的根本原因。

基于可解释机器学习的特征重要性量化分析表明,中国 4 个区域能源韧性与科技创新协调度的驱动机制呈现出显著的空间异质性,这与各区域的资源禀赋、发展阶段和政策导向等多种因素密切相关。

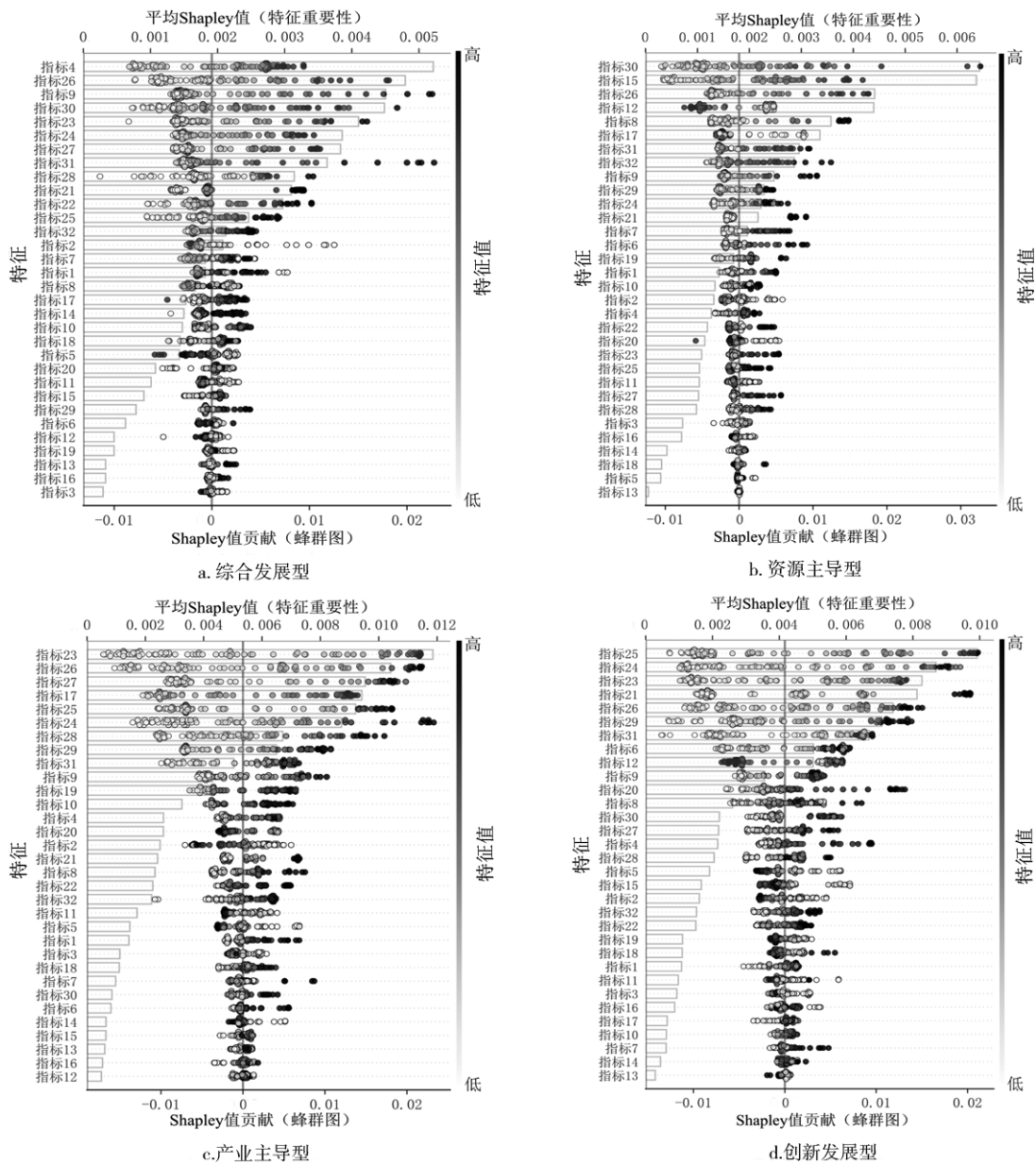


图3 基于 SHAP 值的特征重要性分布与特征变量 SHAP 值散点

(1) 综合发展型区域的协调度主要由能源消费结构低碳化水平、专利授权件数、天然气管道长度、省级政府工作报告中“科技创新”词频统计和 R&D 经费内部支出,这种驱动格局充分反映了区域发展的转型路径:从能源结构转型维度来看,能源消费结构低碳化水平的驱动作用表明区域正在积极打破传统化石能源消费格局,通过调整能源消费结构来减弱对传统能源的路径依赖;从创新发展维度来看,专利授权件数、R&D 经费内部支出和省级政府工作报告中“科技创新”词频统计驱动的驱动作用,凸显了政策支持与创新投入的正向互动关系,表明了科技创新已成为能源转型的核心支撑要素,反映出区域正在通过技术进步重构发展动能;从基础设施维度来看,天然气管道长度的驱动作用揭示了能源基础设施建设对提升区域能源韧性的重要性,同时也凸显了完善的基础设施体系对保障能源安全的积极影响。

(2) 资源导向型区域的协调度驱动要素以省级政府工作报告中“科技创新”词频统计、工业产值占 GDP 比例、专利授权件数、森林覆盖率和人均可再生能源装机总量为主,突出体现了该区域作为传统能源基地在“双碳”目标下的转型发展特征:资源导向型区域普遍陷入创新动力不足、市场机制不完善的困境,同时这些地区在工业转型升级过程中对能源效率提升和创新驱动的迫切需求,在科技创新已成为推动区域发展的关键力量的背景下,地方政府在推动能源韧性建设与创新发展中的主导作用,证实了资源导向型区域突破资源依赖、实现创新驱动转型的战略选择。

(3) 产业导向型区域呈现出以 R&D 经费内部支出、专利授权件数、高新技术产业的主营业务收入、能源生产多样性指数和科技论文数为协调度的主导驱动因素,体现了在推进产业升级与创新过程中的显著特征与内在机理:专利授权件数和科技论文数的双重驱动作用揭示了区域具备较强的创新能力转化效率,反映出创新要素高度集聚、创新生态系统较为完善的特点,R&D 经费内部支出的驱动作用凸显了区域创新发展的内生动力,体现出产业导向型区域在科技创新方面具有较强的资源配置能力和市场主导性;能源生产多样性指数的驱动

作用反映了区域在保障能源安全方面采取了多元化战略,这既是对能源需求日益增长的积极响应,也体现了在能源供给侧改革方面的创新探索。

(4) 创新发展型区域形成以科技论文数、科技人才集聚程度、R&D 经费内部支出、大科学装置和国家实验室个数和专利授权量为协调度的核心驱动力,反映出了该区域推进创新驱动发展战略中的典型特征:从创新主体维度来看,科技人才集聚程度的驱动作用揭示了人才资源在推动区域创新发展中的关键作用,反映出区域在人才引进、培养和使用方面具有独特优势;从创新投入维度来看,R&D 经费内部支出的驱动作用表明区域具备较强的创新资源配置能力,体现了持续性的创新投入对提升区域创新能力的重要支撑;从创新产出维度来看,科技论文数和专利授权量的驱动作用凸显了区域具备较强的知识创造能力和技术创新实力,体现出创新要素高度集聚和创新活动频繁活跃的特点;从创新基础设施维度来看,大科学装置和国家实验室个数的驱动作用反映了区域在科技创新基础设施建设方面的显著优势,这为能源技术创新提供了重要平台支撑。

进一步使用偏依赖关系图分析 4 个区域关键要素的边际影响,揭示了各因素对于能源韧性与科技创新协调度的非线性特征。

(1) 综合发展型区域中,能源消费结构低碳化水平指数作为第一驱动力,随着指数的上升,能源韧性与科技创新协调度也不断提升,尤其当指数达到约 5.4 后促进作用明显,达到约 5.7 后趋于稳定,超过约 6.2 时再次显现出促进作用,表明了低碳化进程对协调发展的推动具有阶段性,需在不同阶段采取相应的政策措施,以充分发挥其促进作用。专利授权量作为衡量科技创新活跃度的关键指标,能够直接反映科技成果的产出与应用,对能源韧性与科技创新的协调度有直接促进作用,当授权量达到约 1 万件时促进作用明显、当授权量达到约 28 万件后维持平稳,说明鼓励高质量的科技创新,促进科技成果的应用和产业化,更应关注创新质量而非单纯追求数量,以持续推动协调发展。天然气作为清洁能源的重要组成部分,其在能源结构中的占比直接关系到能源系统的自给率

与可持续性,当天然气管道长度达到约 3 万 km 时开始产生明显的促进作用,体现出基础设施规模对能源系统的自给率和可持续性具有重要作用,必须确保清洁能源基础设施的充分建设。

(2)资源主导型区域中,省级政府工作报告中“科技创新”词频统计量作为第一驱动力,当提及次数达到约 4 次时促进作用明显上升,超过约 14 次后趋于平稳,这说明政策引导与政府层面的价值宣示对创新环境塑造的基础性作用,但政策导向的“话语增量”并非无限奏效,过度重复口号本身并不能无限强化创新驱动,政策宣传存在阈值效应与饱和点。随着工业产值占 GDP 比重的持续提升,其促进作用也同步线性提升,达到约 37% 后趋于稳定,这种正向关系也意味着当工业化水平达到一定稳态或某种成熟边界后,提升空间可能受限,若无进一步结构优化与转型措施,仅靠扩大工业产值比重难以长期保持创新促进效应的增量。当专利授权量达到约 9 万件以前促进作用明显,超过约 9 万件后作用不明显。

(3)产业主导型区域中,当 R&D 经费达到一定规模(约 2 000 亿元)前,其对技术更新的促进作用逐步加速,然而边际收益超过 3 000 亿元后趋于稳定,说明在高投入阶段,可能需要更好的资源配置、研究方向聚焦以及创新生态体系的优化来实现更高质量的产出。当授权量达到约 30 万件前,促进作用明显,当授权量达到约 55 万件后维持平稳。当高新技术产业的主营业务收入达到约 3 万亿元前促进作用明显,之后趋于稳定,这意味着在发展初期,产业盈利能力的增强有助于聚集更多资源、人才和技术,提升能源韧性与技术创新联动效果,当产业规模和盈利达到一定程度,单纯的产值扩张不再显著加速创新与韧性提升,需要从产业升级、商业模式创新和质量提升等方面着手。

(4)创新发展型区域中,当科技论文数达到约 1 万篇时促进作用明显、当论文数达到约 10 万篇后维持第一次平稳、当论文数达到约 17 万篇后达到第二次平稳,这体现出在创新驱动较为成熟的区域里,论文积累对能源韧性与科技创新协调度的促进并非单一台阶式上升,而是存在多重非线性拐点,初期积累可快速激活创新生态与能源升

级效应,但在达到一定规模后,单纯靠数量增量难以持续带来明显的增值,需要寻求突破性创新与高价值专利来实现新一轮跃升。当科技人才集聚程度达到约 3 时达到峰值,随后维持平稳,在创新核心区域里,人才密度的适度提升对于能源与科技创新的双向促进至关重要,但在高密度人才聚集的前提下,边际增益递减,说明人才数量的不断增加并不能无限度地提高协调度,人才的质量、协同能力及制度与环境的优化同样关键。R&D 经费内部支出达到约 1 200 亿元后维持平稳。

以科技创新成果为例,四个区域均体现出初期的专利或论文的积累对于激活创新氛围、扩散技术成果意义重大,但在达成一定数量级后,创新成果本身的边际拉动作用有限,单纯数量扩张可能已无法成为进一步提升创新绩效的主要动力。区别在于不同区域的阈值不同,反映出区域经济基础、产业结构成熟度、创新生态环境与资源禀赋在推动科技与能源互动时的差异性条件与路径:综合发展型区域的经济结构较为均衡,多元产业并存且相互支撑,尽管具备一定的技术基础,但产业、资源、创新环境之间仍处于再平衡与再整合的过程中,要在众多要素中实现能源韧性与创新驱动的有效联动,需要更高水平的专利积累以穿透相对复杂的产业生态,提高创新扩散、技术转化及协同效应的显著性;资源型地区通常起点相对较低,创新基础薄弱,专利体系尚不完善,因而较低的专利授权量即能对能源韧性与科技创新的协调起到显著的撬动作用;产业主导型区域具有强大的制造业和产业链整合基础,在这样的高阶产业体系下,初期专利积累的边际作用已经较低,因此需要达到更高数量级,在一个成熟而竞争激烈的产业生态中形成新的技术集群效应,构建更高层次的知识产权壁垒和产业链协同创新能力;创新发展型区域已有一定创新基础和完善的科研环境,人才、资金、政策配套相对成熟,因此想要进一步提升能源与创新之间的协同,需要更高层次的论文积累来突破已有的稳定结构。

四、结论与建议

(一) 结论

(1)综合评价方面,中国能源韧性与科技创新

水平均呈稳步增长态势,其中能源韧性增速较快,但二者在发展进程中存在相互错位和非同步性的“差距相互交织”不平衡现象,并且总体上表现出“发展水平较低、提升空间显著”的不充分特征。

(2)时序演变方面,中国能源韧性与科技创新协调度实现了从“初级协调—良好协调”跨越式进步,二者虽然在相互适应和发展中逐渐强化,但创新发展型区域仍在勉强协调阶段,资源主导型区域甚至停留在失调阶段,区域整体仍处于“颀颀”关系,远未实现高质量协调发展。

(3)空间格局方面,中国能源韧性与科技创新协调度具有明显的空间分异规律,研究期内各区域均出现不同幅度的提级,逐渐形成“产业主导型区域领先、创新发展型区域和综合发展型区域凹陷、资源主导型区域追赶”的区际梯次格局。

(4)动态演化方面,中国能源韧性与科技创新协调度虽然仍存在“马太效应”,但总体协调水平呈提升态势,并且高协调度省份数量增多,正逐步缩小分化差距,从协调等级来看,研究期内各区域普遍出现了2种跨级跳跃,以“跨界跳跃型”和“低中水平协调跳跃型”为主。

(5)影响因素方面,通过偏依赖关系图分析四类区域中关键要素对能源韧性与科技创新协调度的非线性边际影响,揭示各区域在低碳化水平、科技投入、产业发展和人才集聚等方面存在不同的阈值特征和促进机制,且科技创新水平差异是造成能源韧性与科技创新耦合协调差异的根本原因。

(二)建议

(1)势能治理跨越“科技鸿沟”。中国多数省份的能源韧性与科技创新协调度不高,且表现为科技创新滞后性,部分地区受制于“碳锁定”效应制约,因此应充分发挥新型举国的体制优势和国家战略科技力量的组织优势,统筹资源吸纳和优化配置,组建能源科技工作委员会,重点解决科技创新与能源韧性发展的不平衡问题,将政府的体制势能转化为实质的治理能力。一方面,优化科学技术资源的区域空间布局,探索差异化的区域协同创新模式,以能源技术产业前沿为导向,依托前瞻性战略布局和重大能源科技专项,促进科技创新要素的集聚与扩散,实现基础研究平台、应用

研究平台、成果转化平台等科技创新要素高度集聚的空间一体化载体,探究功能的不同空间网络构建模式,最终实现科技创新资源的高效利用;另一方面,构建“政产学研用”协同创新机制,通过政府统筹协调、国家战略科技力量创新引领、科技领军企业有效参与等路径,发挥市场导向与资源整合作用,促进科技创新要素合作网络优化,推动能源技术创新与产业升级。

(2)资源协同践行“能源革命”。在“碳减排”约束条件下,处理好新能源与传统能源关系,实现优化组合,大力发展新能源的同时认清煤电、煤炭的“压舱石”地位。因此,首先加大对清洁能源的研发力度,提高可再生能源使用占比以优化国内能源供需结构,资源主导型区域发挥风、光资源集中的优势,聚焦其风电、光伏基地建设,综合发展型区域和产业主导型区域基于负荷优势,探索绿电交易,建设源网荷储一体化项目,提高负荷弹性,创新发展型区域加快新能源开发利用,推动多能互补,重视风电、光伏发电分布式开发;其次,科学合理地掌控发展节奏,强化源网荷储的协同机制,防止新能源发展过快而电网和调节电源未能同步跟进,从而避免发生大规模弃风弃光现象;最后,聚焦颠覆性能源技术基础研究与应用研究,布局低碳、零碳、负碳等前沿技术攻关,推动能源系统深度脱碳,重点围绕煤炭清洁高效利用、碳捕集与封存(CCUS)技术、氢能与燃料电池、超低排放化石能源发电技术等方面,助力双碳目标达成。

(3)因地制宜推进协调发展。充分发挥政府和市场的复合配置机制,采用差异化发展战略,统筹区域间能源与科技协调互补,把能源技术及其关联产业培育成带动我国产业升级的新增长点,推动新质生产力的发展,全面提升我国能源与科技的协调发展水平。主要分为内部驱动力和外部驱动力,其中内部驱动力包含:一是战略协同引导,如产业优势型区域首要目标是确保安全充足的能源供应,而资源优势型区域应借助自身丰富的能源和东部沿海城市开展合作以引进技术和人才资源,进而推动能源高质量发展;二是治理能力提升,推进能源治理体系和治理能力现代化,提升

监管能效、深化体制改革和市场机制建设,健全能源行业标准化管理制度。外部驱动力包含:一是市场竞争,打破垄断、放宽准入,逐步放开竞争性环节价格,以价格杠杆撬动市场供给、以价格机制助力绿色发展、以价格改革促进结构调整;二是技术推动,把握全球新一轮科技革命和产业变革趋势,依托5G技术构建能源大数据人工智能处理和区块链能源与产业协作监管平台,发挥国内市场规模巨大的优势,加大对新能源关键技术研发的支持力度,推动科技前沿与能源发展的深度融合;三是国际合作,完善多边合作和国际协调机制,以对话协商解决能源矛盾、以合作创新推动技术进步,构建国际性、多学科、产学研交叉互动合作,拓宽国际能源开放共赢的安全新格局。

参考文献:

- [1] 中共中央关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定[N]. 人民日报,2024-07-22(1).
- [2] 王超,孙福全,许晔,等. 乌克兰危机下的全球能源格局变化及能源科技发展新特点[J]. 中国科学院院刊,2023,38(6):875-886.
- [3] 龙勇,宋敏. 全球能源安全大变局下保障我国能源安全的思路与方略[J]. 改革,2023(10):74-83.
- [4] FENG Y, PAN Y, LU S, et al. Identifying the multiple nexus between geopolitical risk, energy resilience, and carbon emissions: evidence from global data [J]. Technological forecasting and social change,2024(208):123661.
- [5] CHEN S, DING Y, SONG Y, et al. Study on China's energy system resilience under the scenarios of long-term shortage of imported oil[J]. Energy,2023(270):126831.
- [6] CHYONG C K, HENDERSON J. Quantifying the economic value of Russian gas in Europe in the aftermath of the 2022 war in Ukraine[J]. Energy,2024(292):130604.
- [7] 习近平向第六届中俄能源商务论坛致贺信[N]. 人民日报,2024-07-24(1).
- [8] 方文君,邓峰,张战仁,等. 环境目标约束对能源结构低碳转型的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(1):84-96.
- [9] 朱庆缘,孟波,武良鹏,等. 权变框架下我国能源与粮食安全:一个实时测度模型[J]. 中国软科学,2024(4):154-165.
- [10] 姜洪殿,任重远,梁巧梅. 地缘政治动荡对中国能源环境的全局经济影响及其对策[J]. 中国人口·资源与环境,2023,33(9):1-13.
- [11] ZHANG Y, HU W, TAO Y, et al. How does smart artificial intelligence influence energy system resilience? evidence from energy vulnerability assessments in G20 countries[J]. Energy,2024(314):134290.
- [12] WANG Z, HAO Y. Can smart cities improve energy resilience? evidence from 229 cities in China[J]. Sustainable cities and society,2024(117):105971.
- [13] 黄建,冯升波,肖彬彬,等. 安全降碳背景下能源韧性的测度指标及其宏观分析框架研究[J]. 宏观经济研究,2022(12):115-125,151.
- [14] NEPAL R, ZHAO X, LIU Y, et al. Can green finance strengthen energy resilience? the case of China [J]. Technological forecasting and social change,2024(202):123302.
- [15] ZHANG Z, WU H, ZHANG Y, et al. Does digital global value chain participation reduce energy resilience? evidence from 49 countries worldwide[J]. Technological forecasting and social change,2024(208):123712.
- [16] 朱彤. 能源安全新风险与新逻辑:系统韧性的视角:兼论新逻辑下我国能源安全问题与战略思路[J]. 技术经济,2023,42(2):1-10.
- [17] 任保平,邹起浩. 新发展阶段中国经济发展的韧性:评价、影响因素及其维护策略[J]. 中国软科学,2024(3):15-25.
- [18] FAN W, LÜ W, WANG Z. How to measure and enhance the resilience of energy systems? [J]. Sustainable production and consumption,2023(39):191-202.
- [19] 张建刚. 科技革命视域下中国式工业现代化的发展战略与实践路径[J]. 政治经济学评论,2024,15(4):65-83.
- [20] 刘华军,石印,郭立祥,等. 新时代的中国能源革命:历程、成就与展望[J]. 管理世界,2022,38(7):6-24.
- [21] 陈伟,郭楷模,岳芳,等. 世界主要经济体能源战略布局与能源科技改革[J]. 中国科学院院刊,2021,36(1):115-117.
- [22] 顾佰和,于东晖,王琛,等. 进一步深化碳达峰、碳中和战略转型路径的若干思考[J]. 中国科学院院刊,2024,39(4):726-736.
- [23] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL]. (2021-11-29)[2024-07-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [24] 赵向琴,赵超,陈国进. 储能技术创新、政策支持与中国能源绿色转型[J]. 系统工程理论与实践,2024,44(6):1749-1767.
- [25] 陈劲,肖轶群. 加快提升高校原始创新能力助力新质生产力发展[J]. 国家教育行政学院学报,2024(6):10-19.
- [26] XU J, TIAN Y, WANG F, et al. Resilience-economy-

- environment equilibrium based configuration interaction approach towards distributed energy system in energy intensive industry parks [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2024 (191):114139.
- [27] SU R, CHEN B, WANG S, et al. Energy technical resilience assessment based on complex network analysis-a case study of China[J]. *Applied energy*, 2024(364): 123231.
- [28] YANG Z, ZHAN J. Examining the multiple impacts of renewable energy development on redefined energy security in China: a panel quantile regression approach [J]. *Renewable energy*, 2024(221):119778.
- [29] 南士敬, 李方东, 汪金伟, 等. 中国可再生能源发展水平的区域差异、分布动态与收敛性[J]. *资源科学*, 2023, 45(7):1335-1350.
- [30] 张娜, 米倩玉, 邓嘉伟, 等. 新能源崛起对中国新能源产业战略的影响[J]. *中国软科学*, 2024(2):1-8.
- [31] 李逸, 赵媛, 夏四友. 中国跨境油气运输管道安全性评价与类型区划分[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(3): 547-563.
- [32] LU Z, LIU Y, ZHANG J, et al. Carbon-oriented energy system planning using forest carbon sink [J]. *Energy*, 2024 (309):133010.
- [33] 李永武, 王宝玲, 王雅实, 等. 能源转型的宏观经济效应: 基于 DSGE 和面板模型的双重检验[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(11):3069-3093.
- [34] ZHANG Q, DU D, XIA Q, et al. Revealing the energy pyramid: Global energy dependence network and national status based on industry chain[J]. *Applied energy*, 2024(367):123330.
- [35] AZIMI M N, RAHMAN M M, MARASENI T. Powering progress: the interplay of energy security and institutional quality in driving economic growth [J]. *Applied energy*, 2025 (378):124835.
- [36] 刘自敏, 刘曦泽, 朱泓宇, 等. 水—能源—粮食系统耦合视角下的中国分省碳达峰评估: 基于 LEAP 模型的分析[J]. *经济地理*, 2024, 44(1):118-129.
- [37] 柳亚琴, 孙薇, 朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4369-4379.
- [38] 史亚荣, 赵爱清. “双碳”目标下我国能源稳定与金融安全的耦合协调机理研究[J]. *经济纵横*, 2023(7):43-54.
- [39] 刘黎明, 陈军飞, 王春宝. 长江经济带水—能源—粮食—生态脆弱性时空特征及影响机制[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8):1628-1640.
- [40] WANG F, ZHUANG L, CHENG S, et al. Spatial-temporal variation and convergence analysis of China's regional energy security [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2024 (189):113923.
- [41] 徐孝民, 刘星月, 陈平泽. 能源安全保障的驱动路径与实践策略: 基于地方财政自主度的视角[J]. *中国软科学*, 2024(7):13-24.
- [42] 王守文, 徐丽洁, 周卫华. 长江经济带科学竞争力评价及区域异质性分析[J]. *科技进步与对策*, 2021, 38(19): 47-55.
- [43] 孙红军, 张路娜, 王胜光. 科技人才集聚、空间溢出与区域技术创新: 基于空间杜宾模型的偏微分方法[J]. *科学与科学技术管理*, 2019, 40(12):58-69.
- [44] 杨武, 许红丹, 孙世强. 区域科技创新的波动周期、分布动态与空间差异研究[J]. *中国科技论坛*, 2023(9): 118-130.
- [45] 陈劲, 杨硕, 吴善超. 科技创新人才能力的动态演变及国际比较研究 [J]. *科学学研究*, 2023, 41(6): 1096-1105.
- [46] 陈佳琦, 姜海宁, 金星星. 长三角地区科技创新与绿色发展耦合协调格局及驱动机制[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(5):924-936.
- [47] 陈劲, 李根祎. 科技强国战略下新时代中国创新范式 [J]. *科学与科学技术管理*, 2024, 45(12):3-12.
- [48] 韩永楠, 葛鹏飞, 周伯乐. 中国市域技术创新与绿色发展耦合协调演变分异 [J]. *经济地理*, 2021, 41(6): 12-19.
- [49] 穆雅晴, 吴宜进, 田培, 等. 长江中游经济区“水—能源—粮食”系统与城市绿色转型适配性研究[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(9):2140-2154.
- [50] 邓宗兵, 肖沁霖, 王炬, 等. 中国数字经济与绿色发展耦合协调的时空特征及驱动机制[J]. *地理学报*, 2024, 79(4):971-990.
- [51] WANG Y, DENG X, ZHANG H, et al. Energy endowment, environmental regulation, and energy efficiency: evidence from China [J]. *Technological forecasting and social change*, 2022(177):121528.
- [52] 苏屹, 李丹. 能源产业集聚与绿色创新绩效的空间效应研究[J]. *科研管理*, 2022, 43(6):94-103.
- [53] 蔡曦, 张中华. 基础设施投资结构如何影响产业结构优化: 基于经济基础设施和社会基础设施的视角[J]. *经济问题探索*, 2024(6):107-123.
- [54] 钟军委, 李雨欣, 赵卓娅. 中国绿色税制对区域经济“碳锁定”的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(8):13-21.

(本文责编: 希 文)