

智能化如何提高地区能源效率?*

——基于中国省级面板数据的实证检验



张万里¹ 宣 旻²

(1. 西北工业大学公共政策与管理学院, 陕西 西安 710072;

2. 西安电子科技大学人文学院, 陕西 西安 710126)

内容提要:“十四五”规划指出,要深入实施智能制造和绿色制造工程,推动制造业高端化、智能化、绿色化,使能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高。目前,中国制造业存在能耗高、污染严重等问题,在智能化发展迅猛的时代背景下,深入探究其对能源效率的影响机制,实现智能能源、智慧能源的目标,有着重要意义。本文采用2004—2016年中国省级平衡面板数据,使用静态和动态面板模型分析智能化对能源效率的影响,并研究技术创新、环境规制和外商直接投资的调节作用。得到的结论如下:(1)智能化促进能源效率,即增加绿色全要素能源效率、降低能源消耗;(2)随着技术创新水平提高,智能化对能源效率的提升作用加强;(3)环境规制加速智能化对能源效率的正向作用;(4)随着外商直接投资增加,智能化更加促进能源效率;(5)不同地区智能化对能源效率的作用不同,西部地区智能化的作用最弱,但调节作用最大。政府和企业要通过提高技术创新、完善环境规制和合理使用外商直接投资等方式来应用智能化技术,提高能源效率。

关键词:智能化 能源效率 技术创新 环境规制 外商直接投资

中图分类号:F241 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2022)01—0027—20

一、引言

国际能源署发布的《能源效率2019》指出,2018年全球一次能源强度增加1.2%,虽然低于2017年,但总体能源消耗呈上升趋势。在第七十五届联合国大会一般性辩论上,习近平总书记指出,应对气候变化《巴黎协定》代表了全球绿色低碳转型的大方向,是保护地球家园需要采取的最低限度行动,各国必须迈出决定性步伐。国务院总理李克强2021年在政府工作报告中指出,扎实做好碳达峰、碳中和各项工作。因此,提高制造业能源效率是我国经济发展、可持续生态文明建设的迫切任务。“十四五规划”指出,要加快数字化发展,建设数字中国,推进数字化智能化改造和跨界融合,使能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高。因此,将智能化技术应用到能源利用和企业生产中已刻不容缓。智能化正在实现能源效率的现代化,惠及所有部门和最终用途,利益规模相

收稿日期:2021-05-28

* 基金项目:教育部人文社会科学青年基金项目“数字经济推动消费升级的机理与路径研究:供需动态平衡的视角”(21YJC790163);陕西省社会科学基金年度项目“基于数字经济复杂网络的陕西省产业空间布局的路径及机制研究”(2021D005);中央高校基本科研业务费资助项目“基于数字经济复杂网络的产业空间布局:辐射效应与区域协调对策研究”(D5000210962)。

作者简介:张万里,男,副教授,博士,研究领域是数字经济,电子邮箱:zhangwanli623@163.com;宣旻,女,博士研究生,研究领域是数字经济,电子邮箱:360598433@qq.com。通讯作者:张万里。

当乐观。

智能化与应用部门间技术的关联效应和互动效应推动能源生产、传输、储存、消费等过程的技术溢出,通过模仿学习的示范效应,促进经济个体间能源利用技术的扩散传播。大数据、云计算和物联网等智能化技术推动研发平台的发展,促进智能化等技术创新的资源共享,通过要素流动效应带动技术溢出,构建能源互联互通和全球配置的能源互联网,影响能源的传输和销售模式,提升节能减排及绿色发展意识,推动全社会向节能低碳的行为方式转变。依据深度学习、自主决策等智能化技术,提供有效快速的决策建议,促进原材料、中间品和能源等生产要素的合理配置,降低物流成本和交易成本,提高能源效率(汪东芳和曹建华,2019)^[1]。区块链技术使企业的能源交易、利用和生产等流程更加公开透明,政府通过数字化治理,监管企业能源生产行为,防止能源滥用、环境污染和产能过剩现象(罗良文等,2021)^[2]。全球经济一体化加快各国间的合作,以外商直接投资为主的合作模式也在完善企业生产模式、技术研发、销售和管理。这不仅能提高企业生产效率和产能利用率,还能带来先进的污染处理技术,发挥智能化的知识溢出效应,促使企业能源交易和生产等流程新技术的产生,提升智能化对能源效率的促进作用(韩国高和王昱博,2020)^[3]。那么,我国区域能源效率是否受到智能化的影响?智能化通过哪些路径影响区域能源效率?研究这些问题意义重大。

智能化最主要的特征是对低技能劳动力的替代和高技能人才的互补,而深度学习和自主决策能力使得智能化和高技能人才的结合创造出更高的生产率,通过大数据、云计算、物联网和人工智能等技术降低交易成本和运输成本,有效配置资源(Acemoglu 和 Restrepo,2020)^[4]。智能化作为一种通用技术进步,能够提高劳动生产率,并通过人工智能更快、更准确地做出决策,降低运输成本和交易费用,制定和设计出更合理的能源利用策略与监管系统,提高能源效率(余东华,2019)^[5]。技术创新作为地区经济发展的核心竞争力,完善了传统生产模式,创造出更多的能源利用技术和污染物处理技术,有效降低污染物排放水平。技术创新水平越高,地区高端人才越多,对智能化的使用就越充分迅速;同时,技术创新也能够加速智能化与能源利用相结合技术的产生,减少能源消耗(Graetz 和 Michaels,2018)^[6]。随着气候变迁、环境污染等现象的加剧,各国更加重视生态系统的维护,逐步推行绿色可持续发展战略。政府提高企业利用能耗的门槛,制定能源使用量和污染排放量的标准,对违反规定的企业进行处罚,促使企业提高能源效率。智能化为企业生产和决策带来便利的同时,也通过提高生产率和相关技术创新来降低能耗;政府环境规制的加强和数字治理能力的提升促进企业使用智能化技术进而提升能源效率(郁亚娟和郭怀成,2007)^[7]。此外,外商直接投资可以带来先进的管理经验、技术创新和高端人才,通过相互交流和学习,增强环保意识和增加清洁能源的使用,促使智能化和能源相关技术的产生。综上所述,智能化不仅提升地区能源效率,随着技术创新、环境规制和外商直接投资等不断提升,也能加速降低能源消耗,减少环境污染。

基于此,本文采用2004—2016年省级平衡面板数据,衡量地区智能化指数和能源效率,分析两者之间的关系,探讨技术创新、环境规制和外商直接投资的调节作用,研究地区异质性的影响。本文的边际贡献主要有:第一,建立智能化和能源效率的理论分析框架,考虑人工智能、大数据、云计算、区块链、物联网等更全面的智能化技术,使用主成分分析法和多指标构建地区智能化指数,采用SBM-Malmquist-Luenberger指数法衡量绿色全要素能源效率;第二,使用静态面板模型和动态面板模型分析智能化对能源效率的影响,研究技术创新、环境规制和外商直接投资的调节作用,为新发展格局背景下提高我国能源效率的内在机理提供借鉴;第三,现有文献关于地区异质性下的能源效率研究比较多,但鲜有学者考虑其内在作用机理,本文分析不同地区三个调节变量的差异化影响,为更好地实现中国经济转型和高质量发展提供政策启示。

二、文献综述与假设提出

1. 智能化与能源效率

《2015 智能制造试点示范项目》指出,智能制造是智能机器人和人类专家相结合的人机一体化智能系统,在生产过程中进行分析、推理、推断、构思和决策等行为,存在于装备智能化、生产智能化、产品智能化、管理智能化和服务智能化五个方面,应用在农业、工业、服务业等领域的技术变革,主要包括人工智能、物联网技术、互联网+、工业机器人等(韩江波,2017^[8];Jarrahi,2018^[9])。早在2016年,国家发展改革委员会、国家能源局、工业和信息化部联合印发《推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》和《中国制造2025——能源装备实施方案》,指出要以改革创新为核心,以“互联网+”为手段,以智能化为基础,促进能源和信息深度融合,将智能化与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合,使能源全流程具有设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放等特征。

智能化影响区域能源效率的途径如下:(1)智能化的技术推进效应。Seamans 和 Raj(2018)^[10]指出,智能化作为一种通用技术进步,拥有类人的思维能力,通过大数据、云计算和人工智能等技术进行深度学习和自我决策,能最快地对能源等生产要素的交易、生产、运送等流程进行有效配置和监控,并通过互联系统构建能源网络,将能源分配到最需要的企业,防止产能过剩和环境污染。智能化还能通过机械设备实现能源生产的自动化,提高能源效率。智能化提高高技能人才的需求,而高技能人才拥有更强的环境保护和更高的能源利用率特征,有利于企业内、企业间和地区间的溢出效应。智能化为交流提供便利,线上会议、视频通话等交流方式能够提高关于能源等生产要素的管理效率和生产效率(DeCanio,2016)^[11]。此外,区块链技术为企业提供公开透明的能源信息,帮助企业获得关于能源价格、产量和质量等更详细准确的信息,同时,物联网技术为企业运输能源产品、原材料提供便利,降低有关能源的内部交易成本和运输成本,提高能源效率(Chui等,2018)^[12]。(2)智能化的上下游关联效应。对于上游企业而言,智能化的实施提高了企业规模和生产技术,产品数量和质量实现质的飞跃,为下游企业提供质量更好的原材料和中间产品;下游企业设备性能和原材料质量的提升改善能源效率,降低能耗和污染(陈永伟,2018)^[13]。如部分国家为了争夺石油等能源,进行了政治、军事和经济干预,而其他国家由于技术和资源禀赋不足,只能通过贸易获得能源,严重阻碍能源效率。此外,下游企业智能化的应用会增加上游企业原材料和中间产品的需求,推动对能源产品质量的重视和新产品的完善,导致上游企业增加和下游企业的合作和监督,推进上下游企业进行技术和经验交流,共同应用智能化、能源使用和污染处理等技术,提高产品质量,促进能源效率。因此,本文提出如下假设:

H_1 :智能化提高地区能源效率。

2. 技术创新的调节作用

智能化对不同类型劳动力产生不同影响。虽然可能导致失业和收入分配不平等,但生产率的提高和高端人才技能水平的提升促使企业加速技术创新,通过与智能化的联动作用促进能源利用、污染处理等新技术的诞生,降低不良产出,为企业和地区带来经济奇点(Acemoglu 和 Restrepo,2020)^[4]。

本文通过以下三个方面说明技术创新如何影响智能化与能源效率的关系:(1)挤入效应。全球智能化还处于发展初期,以自动化、机械化、信息化等为主。智能化的主要目的是达到和人类一样的思维能力,这需要投入更多的研发人员和研发支出。地区技术创新水平高,意味着研发支出和高端人才充沛,企业有能力和精力进行与能源生产、污染物处理相关的技术研发。同样地,高端人才也更能适应智能化技术。也就是说,智能化和技术创新的双向联动加速能源相关技术进步,包括能源

网络、能源区块链和能源物联网等产生,并通过智能化的大数据监管系统对企业污染物进行监控。因此,技术创新不仅提升能源效率,还能促使智能化改善能源效率(左世全等,2020)^[14]。(2)资源配置效应。智能化帮助上级领导通过线上线下相结合的方式管理企业生产流程并提供有效的决策,减少大量的中间流程和管理人员。且技术水平越高的地区,高端人才越愿意聚集在智能化水平高的企业,为实现能源信息的大数据网络智能化创新系统提供硬件和软件,更快地对能源信息进行智能处理,制定合理的配置决策,促进能源效率(Brynjolfsson 和 Hitt,2000)^[15]。(3)知识溢出效应。技术水平越高,企业高技能人才就越多,员工更愿意、也更有能力使用智能化设备和技术,不仅加速智能化应用到能源生产流程中,还带动地区内和地区间企业的模仿和学习效应,同时改善能源要素的智能化交易、生产和处理等环节,降低能耗和污染排放量。技术创新水平越高,越能促进其他企业通过模仿和学习智能化技术,创新和使用智能化相关的能源技术和污染处理技术(陈秋霖等,2018)^[16]。因此,本文提出如下假设:

H₂:技术创新提高能源效率,并加强智能化对能源效率的正向作用。

3. 环境规制的调节作用

通过资源密集开采和能源快速消耗实现城镇化和工业化的中国经济,随着环境污染和气候变迁不断加重,正在面临前所未有的压力。节能减排、污染处理的公益性、外部性和动力缺乏性导致市场机制失灵,需要通过政府的环境规制制度来寻找突破口(周肖肖等,2015)^[17]。现有理论表明,环境规制一方面使企业不得不支付一部分资金来治理污染物,导致生产成本的提高,降低生产效率,称为“遵循成本说”;另一方面,合理的政府环境规制能产生倒逼机制,刺激企业进行技术研发,使用先进的管理经验、能源利用和污染处理技术,抵消成本带来的负面影响,并促进技术进步和产业结构升级,称为“创新补偿说”。

本文从以下两个方面说明环境规制如何影响智能化和能源效率的关系:(1)成本效应。高志刚和尤济红(2015)^[18]认为,环境规制的引入提升企业的额外成本,企业被迫支出部分资金和人力用于污染防治和处理。对于能源类密集型行业,政府制定的能耗高门槛和污染排放标准会限制企业生产,降低企业生产绩效,如果污染超过政府规定,还会支付一定的排污税费和罚款等,不利于企业短期发展。本文使用的是考虑环境污染的能源效率,虽然环境规制提高成本,降低产量,但也减少污染物的排放(陶长琪等,2018)^[19]。环境规制提高企业成本,但智能化却能替代低技能劳动力,节省劳动成本,并通过大数据、云计算和物联网等技术提供有效决策,提高能源等生产要素的配置效率和生产效率,实现能源方面的技术创新,提升污染处理技术,抵消环境规制带来的高成本和产能过剩现象。因此,环境规制水平越高,企业更愿意通过智能化技术提高能源效率和生产规模,扩大市场份额和收益。环境规制在当下能否促使企业应用智能化改善能源效率,取决于其带来的直接成本效应和倒逼的智能化推动效应谁更大一些。(2)技术效应和结构效应。李颖等(2019)^[20]指出,环境规制最直接的影响是通过能源、生产设备等需求供给变化来影响产业结构,并通过提高消费者环境保护意识,改变产品消费结构,影响企业生产行为。环境规制也会迫使企业加速对能源利用和污染技术进行创新,放弃由于能耗高门槛和污染标准而带来的生产缩减和排污税费成本。一部分企业可能难以适应规制而被逐渐淘汰,新企业拥有更先进的用能和治污设备,且智能化企业拥有先进的技术,通过生产的高效和劳动替代效应吸引大量高科技人才和研发补贴,高端人才通过智能化和自动化得以释放,拥有更多的时间进行污染处理技术的研发行为和创造性工作,抵消环境规制带来的成本效应,促进能源效率(Geng 和 Cui,2020)^[21]。因此,环境规制改变传统的能源和劳动密集型结构,企业会提高智能化技术的使用,向技术和资本密集型转型,而智能化通过新技术提高生产率和降低交易成本,通过吸引人才进行研发工作,使智能化与排污治理、节能减排相结合的技术更加完善。因此,本文提出如下假设:

H₃:环境规制水平越高,智能化对能源效率的正向作用越强。

4. 外商直接投资的调节作用

随着国际交流越紧密,我国外商直接投资不断增加,提供先进的管理经验的同时,也可以研发出新的技术。我国作为能源大国,稀缺的资源会吸引大量投资者来进行生产,互利共赢。但是,由于环境污染的加剧,中国政府开始限制高能耗企业的过度生产,排污税费和高监管可能会降低企业生产,阻碍外商直接投资的进入;但也会增加拥有污染处理技术、能源利用技术的外商直接投资。随着智能化技术的不断发展,国外企业和研发机构也愿意和中国企业合作进行规模化生产和技术创新(景守武和陈红蕾,2018)^[22]。

本文通过两个方面说明外商直接投资如何影响智能化和能源效率的关系:(1)竞争效应。部分发展中国家的自主创新、技术水平较差,但拥有丰富的资源和能源,这些国家对外商直接投资的吸引存在竞争关系,为了获得更多的外商直接投资,压低资源和能源价格来增强对外直接投资的吸引力,造成要素价格扭曲。外商直接投资的引入能够带来新的生产技术、管理经验和污染处理技术,一方面提高能源利用率;另一方面增强环保意识,降低环境污染(李江,2016)^[23]。此外,外商直接投资带来的先进技术、资本、管理模式和高端人才更能和智能化技术相耦合。国家提出的绿色经济、碳达峰碳中和等政策,会限制外商直接投资向降低环境污染和提高能源效率方向的转变,加速外商直接投资促使智能化与能源、环境等相结合的效率,运用互联网、大数据等构建能源网络,研发能源要素的智能分配、交易和生产等平台,改善能源效率。(2)技术溢出效应。地方政府锦标赛制度导致政府为了追求短期的经济增长,通过扭曲要素市场的方式,过度吸引高技术人才和高端产业来换取外商直接投资,并降低外商直接投资进入门槛。虽然压低了能源和资源价格,但外商直接投资带来的经验和技能却减少污染,提高生产效率(姜磊和季民河,2011^[24];李强,2019^[25])。并且,互联网、大数据等智能化技术还能将国外先进的污染处理技术、能源利用技术和环保理念传播到其他企业或地区,尤其对于智能化相关的外商直接投资而言,这部分外商直接投资额度越高,越能促进智能化带来的经济效应,配合国家制定的环境保护和减排等政策,更能促进与智能化关联的污染处理技术和能源利用技术的产生,如能源网络交易和配送系统、区块链下能源信息公开透明、能源的智能化决策和自动化生产等。这些技术随着地区劳动力的流动和先进的数字化平台传播到其他企业和地区,促进其他企业进行模仿和学习,即外商直接投资起到了智能化和能源效率之间的正向调节作用。因此,本文提出如下假设:

H₄:外商直接投资水平越高,智能化对能源效率的正向作用越强。

三、研究设计

1. 变量与数据来源

(1)被解释变量。本文借鉴史丹和李少林(2020)^[26],将能源效率分为绿色全要素能源效率和能源消耗指数,即使用 SBM-Malmquist-Luenberger 指数法,并考虑非期望产出测算地区绿色全要素能源效率。为了保证实证结果的稳健性,使用能源消耗指数分析智能化对能源消耗的作用是否与对绿色全要素能源效率的作用相同。

1)绿色全要素能源效率(ENE)。史丹和李少林(2020)^[26]使用 SBM-Malmquist-Luenberger 指数法测算地区绿色全要素能源效率,本文同样使用该方法衡量各省份的绿色全要素能源效率(ENE),并考虑非期望产出。选取的指标如下(杨志江和朱桂龙,2017^[27];刘自敏等,2020^[28]):

①非能源投入:主要包含劳动力投入和资本投入,分别用各省份年末从业人员和资本存量表示,资本存量数据借鉴于斌斌(2017)^[29]的方法,即根据永续盘存法,假定资本折旧率为 10.6%,根据各省份资本存量和新增社会固定资产投资计算得出,所有数据均折算为 2000 年的价格水平。

②能源投入:各省份的能源消费结构不同,本文使用能源消费总量(万吨标准煤)来衡量。

③合意产出:即各省份实际生产总值(亿元),全部折算为2000年的价格水平。

④非期望产出:由于数据限制,本文使用各省份工业二氧化硫排放量(万吨)、工业废水排放量(万吨)和废物产生量(万吨)来衡量。

数据均来自2004—2016年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》。

2)能源消耗(*ENC*)。本文借鉴Ang和Goh(2018)^[30],使用各省份能源消费总量(万吨标准煤)与实际GDP的比值来衡量能源消耗(*ENC*)。需要指出的是,潘雄锋等(2018)^[31]使用实际GDP与能源消费总量的比值,而这两个指标互为倒数,对本文实证结果影响不大。

(2)解释变量。张万里等(2021)^[32]指出,智能化是以人工智能、3D打印、物联网、大数据分析等技术为主,以数字经济为发展起源,通过网络化和信息化,逐步过渡形成的。与传统媒体不同,智能化是机器设备具备类人的感知能力、记忆和思维能力、学习能力、自适应能力和行为决策能力,能够主动感知外界事物,通过思考、决策、判断等行为,对数据进行处理和反馈的过程。智能化将相关技术运用到居民生活、企业生产、技术创新以及政府行为等各个领域,改变传统模式(Cockburn等,2018)^[33]。因此,本文继续沿用Caselli和Manning(2019)^[34]、孙早和侯玉琳(2019)^[35]、张万里等(2021)^[32]的方法,使用樊纲等(2011)^[36]的主成分分析法构建各省份的智能化指数(*INT*):①机器人,所有类型机器人的进出口总价值占生产总值的份额;②智能仪器设备,电子元件、电子仪器、计算机和电子器件的进出口总额占生产总值的份额;③数据处理,运营、数据和信息技术咨询设计服务的收入占生产总值的比重;④软件使用程度,支撑、嵌入式、应用和基础软件进出口总额与生产总值的比值;⑤信息采集,互联网使用人数占总人口的比例;⑥信息平台维护,运营维护服务、信息系统集成业务和电子商务平台服务的收入与生产总值的比例;⑦智能化技术创新,智能化相关企业的专利数^①。所有指标均来自2004—2016年《中国统计年鉴》《中国电子信息产业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和《中国信息产业年鉴》,机器人进出口数据来自2004—2016年中国海关进出口数据库^②。

(3)调节变量。调节变量主要包含三个方面,即技术创新、环境规制和外商直接投资,它们均改变智能化与地区能源效率的关系。

1)技术创新(*INN*)。拥有更高技术意味着更高产出、更高效率和更低能耗,更有利于智能化与生产环节相结合,产生出与能源相关的技术,降低能源消耗和环境污染。我国的技术创新包含发明专利、实用新型专利和外观设计专利。其中,发明专利拥有更高的技术水平,体现地区核心创新能力,并且受到国家部门更加严格的审核;实用新型专利和外观设计专利的创新水平相对较低,实用新型专利是产品内部和外部性能的改进,外观设计专利则是形状和颜色的创新(吴尧和沈坤荣,2020)^[37]。因此,本文借鉴姚东旻等(2017)^[38],使用发明专利授权量与专利授权总量的比值来衡量各省份的技术创新(*INN*)。数据来源于2004—2016年《中国统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》。

2)环境规制(*ERI*)。环境规制是指政府以环境保护和资源节约为目的,对企业资源利用进行直接或间接的控制和干预的行为,包括行政法规、经济手段以及市场机制。沈坤荣等(2017)^[39]利用二氧化硫、废水和固体废弃物等污染物的处理率、去除率或达标率等子指标,构造环境规制指数。何玉梅和罗巧(2018)^[40]则使用每千元工业增加值的工业污染治理投资作为环境规制的衡量指标。这些方法均单一地说明环境规制的某方面。本文将不同污染物排放量的相对变化作为环境规制的

① 智能化相关企业来源于智能制造网(<https://www.gkzhan.com/>),专利数通过佰腾网(<https://www.baiten.cn/>)匹配所得。

② 由于海关进出口数据来自于RESSET中国海关进出口全口岸数据库,但只能获取到2016年的数据,并且本文的核心变量机器人进出口总价值来源于海关数据库,因此,数据获取的局限性使本文的数据跨度为2004—2016年。

表现,考虑到环境污染和能源消耗的主要源头是工业部门,使用工业二氧化硫、工业废水的排放量和固体废弃物的产生量来构造环境规制,具体如下:

$$ERI_{it} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (p_{ij} / \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} p_{ij}) \quad (1)$$

其中, p_{ij} 为 i 省份工业总产值与 j 污染物排放量或产生量的比值,所有数据均折算为 2000 年的价格水平。因此,当工业污染物排放量和产生量越低,而工业总产值越高的地区,其环境规制 ERI 就越强。以上的数据均来自 2004—2016 年《中国统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》。

3) 外商直接投资 (FDI)。外商直接投资是指外国企业、经济组织或个人按照我国政策和法规,用技术、实物等在中国境内开办企业、与我国境内企业共同经营或进行投资等。本文使用各省份外商直接投资总额与生产总值的比值来衡量地区外商投资 (Hanif 等, 2019)^[41]。数据来源于《中国统计年鉴》,生产总值折算为 2000 年的价格水平。

(4) 控制变量。能源结构、产业结构、人力资本、市场化和政府干预等也会作用于地区能源效率。因此,本文选取如下控制变量:①能源禀赋 (EAD),使用各省份当年能源生产总量占全国当年能源生产总量的比值来衡量;②能源消费结构 (EST),即各省份煤炭消费与能源消费总量的比值;③工业结构 (INS),使用各省份规模以上工业主营业务收入与生产总值的比例来衡量;④人力资本 (EDU),使用 6 岁以上地区人均受教育年限来表示;⑤人均生产总值 (GDP),即各省份工业总产值与年末总人口的比值,代表经济发展水平;⑥市场化水平 (MAR),采用樊纲等 (2011)^[36] 的主成分分析方法计算得出市场化指数,即考虑政府与市场的关系、非国有经济的发展、产品市场的发育程度、要素市场的发育程度和市场中介组织的发育与法律制度环境五个一级指标,对每个一级指标下的二级指标进行标准化处理,再使用主成分方法测算各个二级指标的贡献度和权重,加权得到最终的市场化指数;⑦政府干预程度 (GOV),使用各省份政府财政支出占生产总值的比例。以上指标均通过 2004—2016 年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《中国人口统计年鉴》获得,相关数据折算为 2000 年的价格水平。

2. 模型构建

本文借鉴芦锋和韩尚容 (2015)^[42],首先使用静态面板模型分析智能化对区域能源效率的影响:

$$ENE_{it} = \alpha + \beta INT_{it} + \sum \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, ENE_{it} 为被解释变量,代表 i 省份 t 年份能源效率; INT_{it} 为核心解释变量,为智能化指数; X_{it} 为控制变量。 μ_i 为个体固定效应, λ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项,服从正态分布。

能源效率存在一定的滞后性和惯性,即过往的能源效率也会影响当期的能源效率。因此,使用周再清等 (2017)^[43] 的模型,加入滞后期,通过系统 GMM 和差分 GMM 模型来估计结果,模型如下:

$$ENE_{it} = \alpha + \sum_{j=1, \dots, N} \varphi_j ENE_{it-j} + \beta INT_{it} + \sum \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, ENE_{it-j} 为能源效率的 j 阶滞后项,用来控制滞后效应。

本文继续加入技术创新、环境规制和外商直接投资与智能化的交互项分析调节作用,即:

$$ENE_{it} = \alpha + \sum_{j=1, \dots, N} \varphi_j ENE_{it-j} + \beta_1 INT_{it} + \beta_2 MED_{it} \times INT_{it} + \beta_3 MED_{it} + \sum \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, MED_{it} 为调节变量,主要指地区发明专利授权量占比 INN_{it} 、环境规制 ERI_{it} 和外商直接投资 FDI_{it} 。

3. 描述性统计分析

表 1 为所有变量的描述性统计分析结果,除人均生产总值 (GDP) 的标准差为 10.717,其他变量的

标准差均小于 2, 说明数据波动不大。绿色全要素能源效率 (*ENE*) 和能源消耗 (*ENC*) 的均值分别为 0.687 和 1.153, 标准差为 0.329 和 0.276, 即所有值在均值附近, 而绿色全要素能源效率的均值较低, 说明我国能源的利用相对不充分。由于智能化 (*INT*) 是使用主成分分析计算得出, 已经进行标准化处理, 最大值和最小值相差 6.798, 而标准差为 1, 数据波动不大。技术创新 (*INN*)、环境规制 (*ERI*) 和外商直接投资 (*FDI*) 的标准差分别为 0.072、1.498 和 0.369, 均在均值附近, 变化幅度较小。以控制变量为例, 虽然人均生产总值的标准差为 10.717, 但最大值与最小值相差 76.378, 标准差相对较小。而其他控制变量的标准差均小于 2, 说明所有变量在均值附近波动, 数据稳定性较高。

表 1 变量描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值	中位数
<i>ENE</i>	390	0.687	0.144	0.329	1.247	0.568
<i>ENC</i>	390	1.153	0.722	0.276	4.323	0.941
<i>INT</i>	390	0.000	1.000	-0.924	5.874	-0.356
<i>ERI</i>	390	1.318	1.498	0.112	9.951	0.829
<i>INN</i>	390	0.153	0.072	0.046	0.388	0.140
<i>FDI</i>	390	0.377	0.369	0.056	1.849	0.209
<i>EAD</i>	390	0.045	0.049	0.002	0.253	0.026
<i>EST</i>	390	0.959	0.369	0.300	1.991	0.897
<i>INS</i>	390	1.274	0.433	0.436	2.396	1.200
<i>EDU</i>	390	9.078	0.659	7.832	11.428	8.988
<i>GDP</i>	390	25.816	10.717	10.684	87.062	24.196
<i>MAR</i>	390	6.317	1.770	2.640	10.270	6.200
<i>GOV</i>	390	0.063	0.087	0.001	0.312	0.001

资料来源:作者整理

四、实证结果分析

1. 单位根检验

本文采用 IPS 检验来验证面板数据的平稳性 (Jin 和 Kim, 2018)^[44]。由于不同截面之间可能存在相关性, 需要使用第二代单位根检验和 CD 检验来验证数据是否存在截面相关性和单位根 (Mensah 等, 2019^[45]; Wei 等, 2020^[46])。从表 2 得出, 技术创新 (*INN*)、外商直接投资 (*FDI*)、工业结构 (*INS*)、人均生产总值 (*GDP*) 和市场化指数 (*MAR*) 的 IPS 检验分别为 -0.043、-0.166、0.059、-1.148 和 -0.121, 没有在 10% 的水平上拒绝不存在单位根的原假设, 说明这些变量是非平稳的。进一步可知, 所有变量的 CD 检验均在 1% 的水平上拒绝原假设, 说明所有变量的截面存在相关性, 传统的 IPS 检验失效。除智能化 (*INT*) 的 CIPS 检验没有拒绝原假设, 其他变量均在 10% 的水平上拒绝原假设, 并且所有变量的 CADF 检验也在 10% 的水平上拒绝原假设。因此, 考虑截面相关性后, 所有变量是平稳的。

表 2 截面相关性检验与面板单位根检验

变量	截面相关性检验		面板单位根检验		第二代面板单位根检验			
	CD 检验	P 值	IPS 检验	P 值	CIPS 检验	P 值	CADF 检验	P 值
<i>ENE</i>	18.600	0.00	-8.228	0.00	-2.615	0.00	-4.455	0.00
<i>ENC</i>	53.952	0.00	-48.499	0.07	-4.906	0.00	-15.865	0.00
<i>INT</i>	61.013	0.00	-4.101	0.00	-1.758	0.15	-3.459	0.00

续表 2

变量	截面相关性检验		面板单位根检验		第二代面板单位根检验			
	CD 检验	P 值	IPS 检验	P 值	CIPS 检验	P 值	CADF 检验	P 值
<i>ERI</i>	61.044	0.00	-5.995	0.00	-2.222	0.00	-2.189	0.00
<i>INN</i>	18.428	0.00	-0.043	0.48	-2.011	0.05	-2.482	0.00
<i>FDI</i>	38.696	0.00	-0.166	0.13	-1.763	0.01	-1.404	0.07
<i>EAD</i>	60.684	0.00	-7.917	0.00	-2.983	0.00	-1.309	0.09
<i>EST</i>	8.837	0.00	-4.903	0.00	-2.635	0.00	-3.424	0.00
<i>INS</i>	27.812	0.00	0.059	0.52	-4.060	0.00	-1.821	0.01
<i>EDU</i>	60.190	0.00	-6.217	0.00	-2.427	0.00	-3.519	0.00
<i>GDP</i>	49.366	0.00	-1.148	0.13	-2.699	0.00	-4.104	0.00
<i>MAR</i>	51.157	0.00	-0.121	0.18	-3.006	0.00	-3.518	0.00
<i>GOV</i>	74.878	0.00	-3.990	0.00	-4.232	0.00	-5.748	0.00

资料来源:作者整理

2. 基准回归结果分析

本文使用静态面板模型和系统 GMM 模型进行估计,结果如表 3 所示。首先,以静态面板回归为例,列(1)和列(3)智能化(*INT*)的系数分别为 0.069 和 0.063,均在 1%的水平上显著,智能化与绿色全要素能源效率的关系为正。而列(2)和列(4)智能化(*INT*)对能源消耗的作用分别为 -0.044 和 -0.030,说明智能化降低单位生产总值的能源消费量,两者关系为负。其次,以动态面板回归为例,列(5)绿色全要素能源效率滞后一期和二期的系数分别为 0.422 和 -0.032,只有滞后一期的系数在 1%的水平上显著,说明随着时间推移,绿色全要素能源效率的滞后效应减弱,而智能化(*INT*)的系数为 0.042,较为显著,但小于静态面板回归的结果,说明滞后项部分解释当期绿色全要素能源效率。列(6)滞后一期和二期的系数均在 1%的水平上显著,且分别为 0.852 和 0.020,即能源消耗的作用随着时间推移减弱,智能化对能源消耗的作用为 -0.084,在 1%的水平上显著,即智能化对能源消耗的作用为负。通过以上分析可知,智能化与绿色全要素能源效率的关系与假设 H_1 相同。智能化相关技术一方面为员工、管理人员带来便利,通过自动化、信息化等提高产品质量和生产效率,提高能源等生产要素的使用率,并且通过产品质量提升的方式为上下游企业提供更好的原材料和中间产品;另一方面,智能化为人们提供更好的建议和判断,通过大数据、云计算等技术,合理制定能源等生产要素的使用量,并且通过低技能劳动力的替代和高技能人才的互补提高知识溢出效应和生产技术,改善能源使用过度现象。

控制变量方面,以列(5)和列(6)为例,能源禀赋(*EAD*)对绿色全要素能源效率的作用为 -0.036,对能源消耗的作用显著为 0.562,即能源禀赋越高,越不利于促进能源效率,这与潘雄锋等(2017)^[31]的结论相同。能源消费结构(*EST*)在 1%的水平上显著降低绿色全要素能源效率,系数为 -0.048,虽然对能源消耗的作用为负,但不显著,说明地方煤炭消费越多,产生的污染就更严重,不利于提升能源效率(姜磊和季民河,2011)^[24]。人力资本(*EDU*)显著提升绿色全要素能源效率,并降低能源消耗,即知识水平的提升有利于提升效率。受教育水平越高,素质水平就越高,更能提高环保意识。人均 GDP 越高,说明地区经济发展水平越快,科技水平、产业结构等更加合理超前,能源效率也就越高。市场化指数越高,地区产业的发展就越自由,企业为了提升市场竞争力和降低成本,不愿意进行污染处理,导致地区能源效率下降。最后,政府干预程度(*GOV*)对绿色全要素能源效率的作用在 1%的水平上显著为正,而对能源消耗的作用在 1%的水平上为负,说明政府干预程度越高,对企业污染的监督越严格,更能促进企业进行污染处理技术的研发,提升能源效率。

表 3 智能化对地区能源效率的基准回归结果

变量	固定效应		随机效应		动态面板	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>
滞后一期					0.422*** (10.62)	0.852*** (54.13)
滞后二期					-0.032 (-1.60)	0.020*** (3.11)
<i>INT</i>	0.069*** (7.90)	-0.044*** (-2.74)	0.063*** (8.18)	-0.030*** (-2.58)	0.042*** (8.02)	-0.084*** (-5.14)
<i>EAD</i>	0.031 (0.34)	0.324 (0.52)	0.074 (0.86)	0.735 (1.28)	-0.036 (-0.83)	0.562*** (6.16)
<i>EST</i>	-0.009 (-0.31)	-0.247 (-1.20)	-0.043** (-2.07)	0.250* (1.95)	-0.048*** (-2.96)	-0.040 (-1.28)
<i>INS</i>	-0.021 (-1.44)	-0.440*** (-4.37)	-0.009 (-0.70)	-0.269*** (-3.11)	-0.003 (-0.34)	-0.018 (-0.80)
<i>EDU</i>	-0.000 (-0.04)	0.084 (0.99)	0.010 (1.00)	0.030 (0.45)	0.023*** (4.25)	-0.031*** (-2.70)
<i>GDP</i>	0.005*** (8.60)	-0.009** (-2.39)	0.005*** (9.79)	-0.005* (-1.70)	0.005*** (14.07)	-0.001 (-1.04)
<i>MAR</i>	0.000 (0.10)	-0.110*** (-3.28)	0.015*** (3.67)	-0.132*** (-5.11)	-0.002 (-1.25)	0.021*** (4.44)
<i>GOV</i>	0.124** (2.50)	3.041*** (8.94)	0.124*** (2.67)	3.381*** (10.85)	0.263*** (11.44)	-0.474*** (-8.61)
常数项	0.496*** (4.24)	1.906** (2.36)	0.320*** (3.38)	1.716*** (2.80)	0.064 (1.31)	0.304*** (3.04)
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Obs	390	390	390	390	330	330
R ²	0.713	0.341	0.843	0.658		
Chi ²					2345.763	2316.085

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上显著,下同

资料来源:作者整理

3. 智能化影响地区能源效率的作用机理

(1)技术创新的调节作用。由表 4 可知,所有滞后一期和二期的系数均在 10% 的水平上显著为正,并且随着时间推移,动态效应逐渐减弱,这与前文结论相似。列(1)智能化的系数在 1% 的水平上显著为 0.038,而技术创新(*INN*)的系数为 0.100,在 5% 的水平上显著为正,说明智能化和技术创新对绿色全要素能源效率产生正向作用。列(2)智能化对绿色全要素能源效率的作用不显著,但仍为正,技术创新的系数为 0.127,交互项 *INN* × *INT* 的系数为 0.133,即技术创新强化智能化对绿色全要素能源效率的正向作用。列(3)智能化和技术创新对能源消耗的作用均为负,即 -0.087 和 -0.193,且在 5% 的水平上为正,即智能化和技术创新均降低单位生产总值的能源消费量。列(4)智能化(*INT*)和技术创新(*INN*)的系数分别为 -0.068 和 -0.181,交互项的系数在 1% 的水平上显著为 -0.087,意味着技术创新能强化智能化对能源消耗的负向作用。以上结论与假设 H₂ 相同,技术创新的提升,尤其是发明专利占比的提高,能够产生出智能化与企业生产过程

相结合的各种颠覆式新技术,包含能源利用技术、能源替代技术等,并且加速智能化技术的发展,使机器的深度学习能力、数据处理、自主决策能力更完善,让企业更自动化和智能化,提高能源效率(李平和丁世豪,2019)^[47]。

表 4 技术创新的调节作用

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ENE</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENC</i>
滞后一期	0.414 *** (10.40)	0.345 *** (8.26)	0.859 *** (53.79)	0.861 *** (53.54)
滞后二期	-0.025 (-1.21)	-0.037 * (-1.84)	0.020 *** (3.13)	0.020 *** (3.12)
<i>INT</i>	0.038 *** (6.79)	0.010 (1.17)	-0.087 *** (-5.34)	-0.068 *** (-2.71)
<i>INN × INT</i>		0.133 *** (4.44)		-0.087 *** (-3.01)
<i>INN</i>	0.100 ** (2.25)	0.127 *** (2.90)	-0.193 ** (-2.07)	-0.181 * (-1.92)
个体效应	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES
Obs	330	330	330	330
Chi ²	2360.819	2502.667	2347.564	2347.373

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著;由于篇幅限制,其他变量的结果备索,下同

资料来源:作者整理

(2)环境规制的调节作用。由表 5 可知,绝大多数变量的滞后项在 1% 的水平上拒绝原假设,并且滞后二期的系数均小于滞后一期,说明能源效率存在动态性,且这种滞后性随时间推移而减弱。列(1)智能化(*INT*)对绿色全要素能源效率的作用为 0.026,在 1% 的水平上显著,并且环境规制(*ERI*)的系数也显著为正,即智能化和环境规制提高绿色全要素能源效率。列(2)智能化和环境规制的系数均显著为正,并且交互项 *ERI × INT* 的系数为 0.001,即环境规制水平越高,智能化对绿色全要素能源效率的正向作用越强。列(3)智能化和环境规制的系数分别为 -0.076 和 -0.008,在 10% 的水平上显著,即智能化和环境规制均有利于降低单位生产总值的能源消费量。最后,列(4)智能化和环境规制对能源消耗的作用在 1% 的水平上显著为负,而交互项的系数为 -0.005,说明环境规制提高智能化对能源消耗的负向作用。以上结论均与假设 H₃ 相似,当政府对企业污染物排放监督更严格,企业为了减少政府罚金,在保证收益最大化的前提下,更愿意使用提高企业生产率的智能化技术,提高能源效率。企业为了降低污染,加速能源处理、能源利用等相关技术的创新,智能化也会提高污染企业的有效决策,降低成本,提高智能化与污染处理技术的结合(郭文,2016)^[48]。

表 5 环境规制的调节作用

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ENE</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENC</i>
滞后一期	0.420 *** (11.01)	0.422 *** (10.98)	0.857 *** (53.85)	0.854 *** (53.40)
滞后二期	-0.029 (-1.50)	-0.026 (-1.32)	0.019 *** (3.00)	0.018 *** (2.78)
<i>INT</i>	0.026 *** (4.79)	0.028 *** (4.91)	-0.076 *** (-4.43)	-0.088 *** (-4.87)

续表 5

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ENE</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENC</i>
<i>ERI</i> × <i>INT</i>		0.001* (1.98)		-0.005** (-2.22)
<i>ERI</i>	0.015*** (8.39)	0.017*** (6.60)	-0.008* (-1.75)	-0.017*** (-2.80)
个体效应	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES
Obs	330	330	330	330
Chi ²	2619.699	2602.282	2319.939	2306.423

资料来源:作者整理

(3)外商直接投资的调节作用。外商直接投资带来能源要素的积累和能效技术的提升,采用严格的能耗标准,减少能源浪费,还能加速智能化技术的引进和研发,通过自动化、智能化生产,提高生产绩效,解决能源消耗过高和环境污染问题(汪莉等,2019)^[49]。由表6可知,绿色全要素能源效率存在滞后性和动态性,滞后作用不断减弱。列(1)智能化(*INT*)和外商直接投资(*FDI*)的系数均为正,在10%的水平上显著,即智能化和外商直接投资提升绿色全要素能源效率。而加入交互项后,列(2)智能化同样提升绿色全要素能源效率,外商直接投资系数不显著,但仍为正,交互项*FDI* × *INT*的系数为0.025,在1%的水平上显著,说明外商直接投资的增加促进智能化对绿色全要素能源效率的正向作用。列(3)智能化降低能源消耗,系数在1%的水平上显著为-0.074,而外商直接投资的系数为0.160,说明外商直接投资提高单位生产总值的能源消费量。列(4)的结论和列(3)几乎相同,交互项的系数为-0.031,但不显著,说明外商直接投资不能加强智能化对能源消耗的负向作用。以上结论与假设H₄相同,国外企业、个人和资金的加入会加速能源企业的生产,由于利益要与国外分享,更侧重生产规模。虽然国外存在先进的技术,能减少资本和劳动的使用,并降低污染物的排放和处理,但为了获得更多利益,他们会使用更多的能源加速生产,占领市场,提高竞争力,提高单位生产总值的能耗。而智能化不仅提高能源企业生产,也可以降低交易成本、交流成本、运输成本等,外商直接投资也更愿意使用智能化来提升能源效率(李锴和齐绍洲,2016)^[50]。

表 6 外商直接投资的调节作用

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ENE</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENC</i>
滞后一期	0.391*** (9.57)	0.378*** (9.31)	0.862*** (54.83)	0.865*** (54.75)
滞后二期	-0.040** (-1.99)	-0.045** (-2.25)	0.024*** (3.77)	0.023*** (3.69)
<i>INT</i>	0.045*** (8.50)	0.028*** (3.69)	-0.074*** (-4.51)	-0.056*** (-2.68)
<i>FDI</i> × <i>INT</i>		0.025*** (3.13)		-0.031 (-1.36)
<i>FDI</i>	0.032* (1.65)	0.022 (0.80)	0.160*** (6.07)	0.160*** (6.08)
个体效应	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES

续表 6

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ENE</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENC</i>
Obs	330	330	330	330
Chi ²	2403. 254	2474. 669	2348. 238	2366. 393

资料来源:作者整理

4. 地区异质性

虽然我国地大物博、资源多样充沛,但中部地区和东部沿海地区要比西部偏远地区的优势更大。由于距离港口较远,西部地区贸易发展较弱,高端人才、技术创新、融资以及外商直接投资更愿意集中到沿海城市。因此,本文考虑地区异质性,分析不同地区智能化对能源效率的影响,结果如表 7 所示。

第一,分析智能化的直接影响。从样本 1 得出,能源效率滞后一期的系数均显著为正,而滞后二期的系数显著性降低。以绿色全要素能源效率为例,东部和中部地区智能化的系数分别在 1% 的水平上显著为 0. 056 和 0. 069,而西部地区智能化的作用不显著,且为负,因为中部和东部地区对环境污染的治理要强于西部地区,加上西部地区地处偏远,气候较差,不利于污染物的扩散,因此,西部地区对绿色全要素能源效率的作用不如中部和东部地区。以能源消耗为例,列(4)~列(6)智能化(*INT*)的系数分别为 -0. 032、-0. 082 和 -0. 146,均在 1% 的水平上显著,西部地区对单位生产总值的能源消费量的降低最明显,因为智能化提高资源配置效率,减少低技能劳动力需求,提高高端人才需求,促进知识溢出和经验交流,对于生产效率较差的西部地区来说,更能提高单位能耗带来的生产总值。

第二,分析不同地区技术创新的调节作用。如样本 2 所示,绝大多数变量滞后一期和二期的系数均显著,动态效应减弱。以绿色全要素能源效率为例,西部地区智能化的作用为 -0. 022,不显著,而技术创新提高绿色全要素能源效率,交互项的系数也在 1% 的水平上显著为正,即技术创新加强智能化对绿色全要素能源效率的正向作用。以能源消耗为例,虽然只有东部地区智能化的系数显著,但所有地区智能化均对能源消耗产生负向作用。除中部地区,东部和西部地区技术进步均降低单位生产总值能耗,中部地区拥有大量西部地区流出的劳动力和企业,为了能够和东部地区竞争,提高生产规模,而不重视能源消耗。列(3)~列(6)交互项系数均显著为负,即技术创新加强智能化对能源消耗的负向作用。

第三,分析不同地区环境规制的调节作用。由样本 3 可知,滞后一期的系数均显著为正,滞后二期的系数小于滞后一期,甚至为负。以绿色全要素能源效率为例,智能化(*INT*)和环境规制的系数均在 5% 的水平上显著为正,即不同地区智能化和环境规制对绿色全要素能源效率产生正向作用,西部地区智能化作用最小,但环境规制作用最大。交互项的系数均显著为正,说明环境规制加强智能化对绿色全要素能源效率的促进作用,西部地区环境规制的调节作用最大,污染最严重,设备和人力资本不足,需要政府进行大力监管。以能源消耗为例,智能化和环境规制显著降低能源消耗,西部地区智能化和环境规制最能降低单位生产总值的能源消费量。交互项的系数除西部地区,均显著为负,说明环境规制加速企业使用智能化技术,降低能源消耗。

最后,分析不同地区外商直接投资的调节作用。由样本 4 可知,因变量滞后一期的系数同样在 1% 的水平上显著为正,滞后二期的系数绝对值和显著性均明显下降。以绿色全要素能源效率为例,除西部地区,其他地区智能化的系数均显著为正,这与前文结论相似。而外商直接投资的作用均不显著,除西部地区为负,其他均为正。交互项的系数全都为正,也较为显著,即外商直接投资更

愿意利用智能化技术来提高生产效率和能源效率,加强智能化对绿色全要素能源效率的正向作用。以能源消耗为例,智能化的系数均为负,但外商直接投资的作用相反,交互项的系数虽然均不显著,但全为负,说明外商直接投资更愿意使用智能化技术来提高生产效率和能源使用率。

表 7 地区异质性

样本 1		无调节变量					
变量	被解释变量:绿色全要素能源效率			被解释变量:能源消耗			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
	东部	中部	西部	东部	中部	西部	
滞后一期	0.511*** (8.59)	0.498*** (7.11)	0.679*** (10.74)	0.897*** (36.43)	0.820*** (35.30)	0.855*** (26.85)	
滞后二期	-0.121** (-2.54)	-0.019 (-0.57)	0.083 (1.56)	0.009 (1.50)	0.011 (1.18)	0.035** (2.51)	
INT	0.056*** (7.33)	0.069*** (5.37)	-0.011 (-0.84)	-0.032*** (-4.21)	-0.082*** (-3.21)	-0.146*** (-2.94)	
样本 2		调节变量:技术创新					
变量	被解释变量:绿色全要素能源效率			被解释变量:能源消耗			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
	东部	中部	西部	东部	中部	西部	
滞后一期	0.517*** (8.32)	0.407*** (5.79)	0.676*** (10.45)	0.863*** (28.81)	0.818*** (33.60)	0.861*** (27.75)	
滞后二期	-0.124** (-2.53)	-0.036 (-1.12)	0.072 (1.33)	0.010* (1.70)	0.013 (1.30)	0.040*** (2.97)	
INT	0.049*** (3.87)	0.126*** (2.81)	-0.022 (-0.89)	-0.050*** (-3.55)	-0.103 (-1.25)	-0.069 (-0.91)	
INN × INT	0.029*** (2.77)	0.848*** (4.55)	0.088*** (2.57)	-0.074* (-1.76)	-0.108** (-2.32)	-1.555*** (-3.37)	
INN	0.046*** (4.54)	0.339*** (2.89)	0.040** (2.46)	-0.114** (-2.50)	0.010*** (3.05)	-0.151 (-0.56)	
样本 3		调节变量:环境规制					
变量	被解释变量:绿色全要素能源效率			被解释变量:能源消耗			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
	东部	中部	西部	东部	中部	西部	
滞后一期	0.509*** (8.21)	0.499*** (7.14)	0.570*** (10.23)	0.892*** (33.45)	0.824*** (35.07)	0.857*** (27.53)	
滞后二期	-0.051 (-0.98)	-0.017 (-0.50)	0.086* (1.88)	0.007 (1.18)	0.010 (1.10)	0.027* (1.84)	
INT	0.070** (2.09)	0.095*** (4.32)	0.040** (2.19)	-0.031*** (-3.17)	-0.117*** (-2.76)	-0.178** (-2.28)	
ERI × INT	0.001*** (3.03)	0.038** (1.97)	0.055*** (3.70)	-0.002** (-2.52)	-0.054*** (-2.56)	0.049 (0.82)	
ERI	0.015*** (3.85)	0.018* (1.95)	0.044*** (6.54)	-0.007** (-2.48)	-0.023* (-1.73)	-0.077*** (-3.26)	

续表 7

样本 4		调节变量:外商直接投资				
变量	被解释变量:绿色全要素能源效率			被解释变量:能源消耗		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	东部	中部	西部	东部	中部	西部
滞后一期	0.476*** (7.71)	0.293*** (4.15)	0.667*** (10.22)	0.880*** (34.46)	0.820*** (35.01)	0.854*** (27.96)
滞后二期	-0.130*** (-2.69)	0.029 (0.90)	0.100* (1.74)	0.016** (2.49)	0.011 (1.11)	0.023* (1.65)
<i>INT</i>	0.067*** (3.26)	0.048** (2.13)	0.042 (1.34)	-0.027** (-2.50)	-0.127*** (-2.60)	-0.087 (-0.82)
<i>FDI</i> × <i>INT</i>	0.025*** (2.66)	0.301*** (6.04)	0.136 (1.07)	-0.001 (-0.07)	-0.138 (-1.32)	-0.322 (-0.77)
<i>FDI</i>	0.007 (0.42)	0.053 (1.45)	-0.089 (-0.92)	0.045*** (2.65)	0.052 (0.44)	0.390 (1.17)

资料来源:作者整理

五、稳健性检验

1. 核心解释变量的改变

(1)智能化的改变。本文借鉴陶静和胡雪萍(2019)^[51],使用熵权法对地区智能化指数(*INTE*)重新测算,结果如表 8 所示。由列(1)和列(2)可知,能源效率滞后一期的系数均在 1% 的水平上显著为 0.377 和 0.884,而滞后二期的系数分别为 -0.040 和 0.023,存在动态性。列(1)智能化(*INTE*)的系数为 17.719,在 1% 的水平上显著,即智能化促进绿色全要素能源效率,而列(2)智能化对能源消耗的作用也显著为负。因此,结论和前文一致。

(2)技术创新的改变。本文使用发明专利申请量占专利申请总量的比值(*INN1*)来衡量技术创新(Tong 等,2018)^[52],结果如表 8 所示。因变量的滞后期均显著,并且滞后二期的系数均小于滞后一期。列(3)和列(4)智能化(*INT*)的系数分别为 0.022 和 -0.048,即智能化提高能源效率。列(3)技术创新(*INN1*)的系数在 10% 的水平上显著为 0.046,但列(4)的系数不显著,且仍为负。此外,列(3)和列(4)交互项 *INN1* × *INT* 的系数分别为 0.115 和 -0.084,说明技术创新水平越高,智能化越能促进能源效率。

(3)环境规制的改变。本文使用杨志江和朱桂龙(2017)^[27]的方法,选取二氧化硫去除率、工业废水排放达标率和固体废弃物综合利用率,采用因子分析法构造环境规制强度(*ERI1*),结果如表 8 所示。可以看到,能源效率的滞后效应随时间减弱。列(5)智能化和环境规制对绿色全要素能源效率的作用分别为 0.022 和 17.528,在 1% 的水平上显著,交互项的系数为 6.301,即智能化和环境规制促进绿色全要素能源效率,且当环境规制强度提高时,智能化对绿色全要素能源效率的正向作用加强。列(6)智能化和环境规制的系数在 5% 的水平上显著为负,且交互项 *ERI1* × *INT* 的系数显著为 -15.636,即环境规制和智能化降低单位生产总值的能源消耗,并随着环境规制增加,智能化更能改善能源消耗。

表 8 稳健性检验:核心变量的改变

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>
滞后一期	0.377*** (9.39)	0.884*** (60.78)	0.344*** (8.04)	0.849*** (45.83)	0.388*** (9.67)	0.869*** (52.09)

续表 8

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>
滞后二期	-0.040*** (-2.02)	0.023*** (3.56)	-0.049** (-2.49)	0.020*** (3.17)	-0.038* (-1.88)	0.014** (2.11)
<i>INTE</i>	17.719*** (9.45)	-10.452* (-1.90)				
<i>INT</i>			0.005 (0.41)	-0.050 (-1.31)	0.022*** (3.29)	-0.048** (-2.49)
<i>INN1</i> × <i>INT</i>			0.115*** (4.22)	-0.084 (-0.99)		
<i>ERI1</i> × <i>INT</i>					6.301*** (3.84)	-15.636*** (-3.75)
<i>INN1</i>			0.046* (1.89)	-0.066 (-1.13)		
<i>ERI1</i>					17.528*** (5.59)	-23.005*** (-3.37)
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Obs	330	330	330	330	330	330
Chi ²	2450.026	2262.381	2583.879	2302.181	2391.053	2244.806

资料来源:作者整理

2. 方法的改变

本文借鉴 Wenbo 和 Yan(2018)^[53], 采用差分 GMM 进行拟合回归, 结果如表 9 所示。可以看到, 列(1)~列(6)能源效率滞后一期均在 1% 的水平上显著为正, 而滞后二期的显著性和系数绝对值下降。以技术创新为例, 列(1)智能化和技术创新的系数均为正, 且交互项 *INN* × *INT* 的系数也在 10% 的水平上显著为 0.015, 列(2)智能化和技术创新均显著地降低能源消耗, 且随着技术创新水平提升, 智能化越能降低单位生产总值的能源消费。以环境规制为例, 列(3)和列(4)表明, 智能化和环境规制显著提高能源效率, 列(3)交互项的系数不显著, 但仍为正, 列(4)交互项的系数显著为负, 说明环境规制加强智能化对能源效率的正向作用。以外商直接投资为例, 列(5)和列(6)智能化系数均不显著, 外商直接投资的系数为正, 这与前文结论相似。交互项 *FDI* × *INT* 的系数分别在 10% 的水平上显著为 0.143 和 -0.152, 即外商直接投资促进企业加速使用智能化技术, 提高生产率和能源使用率。因此, 本文的拟合方法是稳健的。

表 9 稳健性检验: 差分 GMM 回归结果分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>
滞后一期	0.371*** (7.32)	0.843*** (40.14)	0.408*** (8.22)	0.846*** (38.92)	0.348*** (6.89)	0.840*** (39.79)
滞后二期	-0.046* (-1.84)	0.025*** (3.00)	-0.026 (-1.08)	0.020** (2.43)	-0.046* (-1.88)	0.025*** (3.08)
<i>INT</i>	0.031*** (4.09)	-0.038* (-1.83)	0.030*** (4.47)	-0.060*** (-3.14)	0.005 (0.51)	-0.034 (-1.32)
<i>INN</i> × <i>INT</i>	0.015* (1.80)	-0.043* (-1.93)				

续表 9

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>	<i>ENE</i>	<i>ENC</i>
<i>INN</i>	0.105 ** (2.38)	-0.209 ** (-2.09)				
<i>ERI</i> × <i>INT</i>			0.000 (0.48)	-0.005 ** (-2.31)		
<i>ERI</i>			0.012 *** (4.18)	-0.022 *** (-3.13)		
<i>FDI</i> × <i>INT</i>					0.143 *** (4.29)	-0.152 * (-1.80)
<i>FDI</i>					0.013 (0.87)	0.114 *** (3.48)
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Obs	390	390	390	390	390	390
Chi ²	849.352	1126.866	890.532	1113.123	870.657	1116.449

资料来源:作者整理

六、研究结论与政策启示

1. 研究结论

目前,全球面临的温度升高、海平面增高、冰川融化等气候变化现象,与前期人类活动和企业生产产生的大量污染物有很大关系。新常态下中国经济也正在经历重要转变,国民经济进入高质量发展阶段,产业结构优化升级成为经济增长的重要方向。因此,保护环境、提高能源效率是当今中国乃至全球亟需解决的问题。本文使用 2004—2016 年我国省级平衡面板数据,实证分析了智能化对能源效率的直接影响,探讨技术创新、环境规制和外商直接投资的调节作用,并考虑地区异质性的影响。得到的结论如下:(1)智能化提高中国绿色全要素能源效率,并降低能源消耗;(2)随着技术创新水平提升,智能化对绿色全要素能源效率的正向作用加强,加快降低能源消耗;(3)环境规制加强智能化对绿色全要素能源效率的正向作用和对能源消耗的负向作用;(4)外商直接投资提升绿色全要素能源效率,但对能源消耗的作用不显著,随着外商直接投资增加,智能化更加促进绿色全要素能源效率,并降低能源消耗;(5)不同地区智能化的作用不同,西部地区智能化对能源效率的促进作用最弱,而技术创新、环境规制和外商直接投资的调节作用最大。

2. 政策启示

本文的研究表明,智能化能够提升能源效率,而技术创新、环境规制和外商直接投资也会调节智能化和能源效率之间的关系。智能化还受到地区基础设施、贸易壁垒、人力资本等因素的作用。基于此,本文提出通过提升智能化水平、加速技术创新、完善环境规制、合理引导外商投资等方面来促进能源效率提高的建议。具体如下:第一,加强各地区智能化配套设施建设,充分发挥智能化对能源效率的提升作用。智能化提升作用需要配套的技术、基础设施,以及组织结构的调整作为基础。各级地方政府应实施产业政策(产业补贴及税收减免等政策),鼓励企业配备智能化技术相关设备,并通过政府专项投资基金,建设 5G 基站、智能机器人、数据存储设备等智能化硬件,完善配套的道路、铁路等基础设施建设,保障企业的运输效率和生产效率。政府和企业应采用区块链技术对能源等生产要素进行溯源,通过物联网提高能源效率。第二,鼓励政府运用多种手段引导各创新

主体进行智能化技术、能源利用等技术革新。通过政府的协调和集成作用,缓解资源配置的低效率,合理引导企业和科研机构参与智能化技术、能源利用等技术突破过程,缓解技术突破市场供需结构失衡的矛盾。东中西部地区应加强技术交流,适当引导东部地区先进企业和人才定向扶持中西部地区,采用人工智能、大数据和云计算等数字化技术预测地区碳排放,完善碳交易市场,调整产业结构和能源利用技术。第三,构建合理的环境规制体系,提高地区环境规制的效率。政府应当完善环境激励和约束机制,使用物联网和区块链技术对能源、中间品等要素进行溯源,对污染物排放过多的违规或者不法企业及个人,处以高额的罚金并进行相应的法律制裁。地方政府应给予改用清洁能源的企业一定的税收减免。第四,优化外商直接投资结构,合理引导外资流向。政府应当调整引资政策,鼓励外资机构进入技术密集型或劳动力密集型产业,重点对拥有管理技术和能源利用技术的外资企业予以一定的倾斜,同时强化对引进外资的监管,对外资企业使用能源进行生产进行严格把关,加大能源类原材料的监督和治理力度。中央和地方政府应大力倡导外资转移到污染严重的中西部地区,发挥智能化技术和能源利用技术的作用,提升能源效率。

参考文献

- [1]汪东芳,曹建华.互联网发展对中国全要素能源效率的影响及网络效应研究[J].济南:中国人口·资源与环境,2019,(1):86-95.
- [2]罗良文,陈敏,肖莹慧.人工智能与经济发展争议述评[J].长春:社会科学战线,2021,(8):261-271.
- [3]韩国高,王昱博.环境税对 OECD 国家制造业产能利用率的效应研究——兼议对中国制造业高质量发展的启示[J].南京:产业经济研究,2020,(2):87-101.
- [4]Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets[J]. *Journal of Political Economy*, 2020, 128, (6):2188-2244.
- [5]余东华.新工业革命时代全球制造业发展新趋势及对中国的影响[J].天津社会科学,2019,(2):88-100.
- [6]Graetz, G., and G. Michaels. Robots at Work[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2018, 100, (5):753-768.
- [7]郁亚娟,郭怀成.城市生态调控的智能方法[J].北京:城市问题,2007,(1):9-14.
- [8]韩江波.智能工业化:工业化发展范式研究的新视角[J].成都:经济学家,2017,(10):21-30.
- [9]Jarrahi, M. H. Artificial Intelligence and the Future of Work: Human-AI Symbiosis in Organizational Decision Making[J]. *Business Horizons*, 2018, 61, (4):577-586.
- [10]Seamans, R., and M. Raj. AI, Labor, Productivity and the Need for Firm-level Data[R]. National Bureau of Economic Research, 2018.
- [11]DeCanio, S. J. Robots and Humans-Complements or Substitutes? [J]. *Journal of Macroeconomics*, 2016, 49, (3):280-291.
- [12]Chui, K. T., M. D. Lytras, and A. Visvizi. Energy Sustainability in Smart Cities: Artificial Intelligence, Smart Monitoring, and Optimization of Energy Consumption[J]. *Energies*, 2018, 11, (11):2869.
- [13]陈永伟.人工智能与经济学:近期文献的一个综述[J].大连:东北财经大学学报,2018,(3):6-21.
- [14]左世全,赵世佳,祝月艳.国外新能源汽车产业政策动向及对我国的启示[J].长春:经济纵横,2020,(1):113-122.
- [15]Brynjolfsson, E., and L. M. Hitt. Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2000, 14, (4):23-48.
- [16]陈秋霖,许多,周羿.人口老龄化背景下人工智能的劳动力替代效应——基于跨国面板数据和中国省级面板数据的分析[J].北京:中国人口科学,2018,(6):30-42.
- [17]周肖肖,丰超,胡莹,魏晓平.环境规制与化石能源消耗——技术进步和结构变迁视角[J].济南:中国人口·资源与环境,2015,(12):35-44.
- [18]高志刚,尤济红.环境规制强度与中国全要素能源效率研究[J].北京:经济社会体制比较,2015,(6):111-123.
- [19]陶长琪,李翠,王夏欢.环境规制对全要素能源效率的作用效应与能源消费结构演变的适配关系研究[J].济南:中国人口·资源与环境,2018,(4):98-108.
- [20]李颖,徐小峰,郑越.环境规制强度对中国工业全要素能源效率的影响——基于 2003—2016 年 30 省城面板数据的实证研究[J].北京:管理评论,2019,(12):40-48.
- [21]Geng, C., and Z. Cui. Analysis of Spatial Heterogeneity and Driving Factors of Capital Allocation Efficiency in Energy Conservation and Environmental Protection Industry under Environmental Regulation[J]. *Energy Policy*, 2020, 137, (2):1-12.

- [22] 景守武, 陈红蕾. 外商直接投资是否有助于改善中国能源环境效率? [J]. 昆明: 经济问题探索, 2018, (12): 172 - 182.
- [23] 李江. 要素价格扭曲、外商直接投资对城市能源效率的影响——以中国 260 个地级市为例[J]. 北京: 城市问题, 2016, (8): 4 - 13.
- [24] 姜磊, 季民河. 基于空间异质性的中国能源消费强度研究——资源禀赋、产业结构、技术进步和市场调节机制的视角[J]. 南京: 产业经济研究, 2011, (4): 61 - 70.
- [25] 李强. 财政分权、FDI 与环境污染: 来自长江经济带的例证[J]. 武汉: 统计与决策, 2019, (4): 173 - 175.
- [26] 史丹, 李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 北京: 中国工业经济, 2020, (9): 5 - 23.
- [27] 杨志江, 朱桂龙. 技术创新、环境规制与能源效率——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 上海: 研究与发展管理, 2017, (4): 23 - 32.
- [28] 刘自敏, 邓明艳, 杨丹, 马源. 降低企业用能成本可以提高能源效率与社会福利吗——基于交叉补贴视角的分析[J]. 北京: 中国工业经济, 2020, (3): 100 - 118.
- [29] 于斌斌. 产业结构调整如何提高地区能源效率? ——基于幅度与质量双维度的实证考察[J]. 上海: 财经研究, 2017, (1): 86 - 97.
- [30] Ang, B. W., and T. Goh. Bridging the Gap between Energy-to-GDP Ratio and Composite Energy Intensity Index [J]. Energy Policy, 2018, 119, (10): 105 - 112.
- [31] 潘雄锋, 彭晓雪, 李斌. 市场扭曲、技术进步与能源效率: 基于省际异质性的政策选择[J]. 北京: 世界经济, 2017, (1): 91 - 115.
- [32] 张万里, 宣畅, 睢博, 魏玮. 产业智能化、劳动力结构和产业结构升级[J]. 北京: 科学学研究, 2021, (8): 1384 - 1395.
- [33] Cockburn, I. M., R. Henderson, and S. Stern. The Impact of Artificial Intelligence on Innovation [R]. National Bureau of Economic Research, 2018.
- [34] Caselli, F., and A. Manning. Robot Arithmetic: New Technology and Wages [J]. American Economic Review: Insights, 2019, 1, (1): 1 - 12.
- [35] 孙早, 侯玉琳. 工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J]. 北京: 中国工业经济, 2019, (5): 61 - 79.
- [36] 樊纲, 王小鲁, 马光荣. 中国市场化进程对经济增长的贡献[J]. 北京: 经济研究, 2011, (9): 4 - 16.
- [37] 吴尧, 沈坤荣. 最优金融结构与企业创新产出质量[J]. 武汉: 宏观质量研究, 2020, (2): 95 - 109.
- [38] 姚东旻, 宁静, 韦诗言. 老龄化如何影响科技创新[J]. 北京: 世界经济, 2017, (4): 105 - 128.
- [39] 沈坤荣, 金刚, 方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗? [J]. 北京: 经济研究, 2017, (5): 44 - 59.
- [40] 何玉梅, 罗巧. 环境规制、技术创新与工业全要素生产率——对“强波特假说”的再检验[J]. 成都: 软科学, 2018, (4): 20 - 25.
- [41] Hanif, I., S. M. F. Raza, and P. Gago-de-Santos, et al. Fossil Fuels, Foreign Direct Investment, and Economic Growth Have Triggered CO2 Emissions in Emerging Asian Economies: Some Empirical Evidence [J]. Energy, 2019, 171, (6): 493 - 501.
- [42] 芦锋, 韩尚容. 我国科技金融对科技创新的影响研究——基于面板模型的分析[J]. 北京: 中国软科学, 2015, (6): 139 - 147.
- [43] 周再清, 甘易, 胡月. 商业银行同业资产特性与风险承担行为——基于中国银行业动态面板系统 GMM 的实证分析[J]. 北京: 国际金融研究, 2017, (7): 66 - 75.
- [44] Jin, T., and J. Kim. What Is Better for Mitigating Carbon Emissions-Renewable Energy or Nuclear Energy? A Panel Data Analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91, (11): 464 - 471.
- [45] Mensah, I. A., M. Sun, and C. Gao, et al. Analysis on the Nexus of Economic Growth, Fossil Fuel Energy Consumption, CO2 Emissions and Oil Price in Africa Based on a PMG Panel ARDL Approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228, (23): 161 - 174.
- [46] Wei, W., W. L. Zhang, and J. Wen, et al. TFP Growth in Chinese Cities: The Role of Factor-intensity and Industrial Agglomeration [J]. Economic Modelling, 2020, 91, (8): 534 - 549.
- [47] 李平, 丁世豪. 进口技术溢出提升了制造业能源效率吗? [J]. 北京: 中国软科学, 2019, (12): 137 - 149.
- [48] 郭文. 环境规制影响区域能源效率的阈值效应[J]. 成都: 软科学, 2016, (11): 61 - 65.
- [49] 汪莉, 于佳鑫, 邵雨卉. 外商直接投资与区域绿色全要素效率[J]. 蚌埠: 财贸研究, 2019, (10): 17 - 30.
- [50] 李锴, 齐绍洲. “FDI 降低东道国能源强度”假说在中国成立吗? ——基于省区工业面板数据的经验分析[J]. 上海: 世界经济研究, 2016, (3): 108 - 122, 136.
- [51] 陶静, 胡雪萍. 环境规制对中国经济增长质量的影响研究[J]. 济南: 中国人口·资源与环境, 2019, (6): 85 - 96.
- [52] Tong, T. W., K. Zhang, and Z. L. He, et al. What Determines the Duration of Patent Examination in China? An Outcome-Specific Duration Analysis of Invention Patent Applications at SIPO [J]. Research Policy, 2018, 47, (3): 583 - 591.
- [53] Wenbo, G., and C. Yan. Assessing the Efficiency of China's Environmental Regulation on Carbon Emissions Based on Tapio Decoupling Models and GMM Models [J]. Energy Reports, 2018, (4): 713 - 723.

How to Improve the Regional Energy Efficiency via Intelligence? Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data in China

ZHANG Wan-li¹, XUAN Yang²

(1. Public Policy and Administration, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072, China;

2. School of Humanities, Xidian University, Xi'an, Shaanxi, 710126, China)

Abstract: The “14th five year plan” points out the importance about the implementation of intelligent manufacturing and green manufacturing projects, which need to promote the high-end, intelligent and green manufacturing industry. The “fifth Plenary Session of the 19th CPC Central Committee” also stressed that the plan of “stable and declining carbon emissions after peaking” must be considered into “China’s long-term goal of 2035”. The policy of “Carbon Peak and Carbon Neutrality” has been incorporated into the production of enterprises, residents’ lives and government governance gradually. Moreover, we must achieve rational allocation of energy resource and improvement of utilization efficiency. At present, China’s manufacturing is characterized by high energy consumption, heavy pollution, and depending on the rapid development of intelligence. It is of great significance to study the effect of intelligence on energy efficiency.

This paper studies how intelligence affects energy efficiency, and analyzes the influence of innovation, environmental regulation and foreign direct investment. Based on the provincial balanced panel data of China from 2004 to 2016, static and dynamic panel models are used to analyze the effect of intelligence on energy efficiency. Moreover, the energy efficiency is divided into green total factor energy productivity and energy consumption. We also study moderation impacts of innovation, environmental regulation and foreign direct investment with regard to regional heterogeneity. The following conclusions are noted. Firstly, intelligence promotes the green total factor energy productivity and reduce the energy consumption. Secondly, the improvement of innovation accelerates the positive effect of intelligence on energy efficiency. Thirdly, the positive effect of intelligence on green total factor energy productivity through environmental regulation increases, and the negative effect of intelligence on energy consumption per GDP through environmental regulation decreases. Fourthly, intelligence promotes green total factor energy productivity and reduces the energy consumption per GDP with the increase of foreign direct investment. Finally, the positive effect of intelligence on energy efficiency in western region is smallest, while the moderation impact is largest.

This paper may deliver the following contributions. Firstly, we establish a theoretical analysis framework of intelligence and energy efficiency. Based on artificial intelligence, big data, cloud computing, blockchain, Internet of Things and other intelligent technologies, this paper uses the principal component analysis and multiple indicators to calculate regional intelligence index, and uses SBM (slacks-based measure)-Malmquist-Luenberger method to measure green total factor energy productivity to study the relationship between intelligence and energy efficiency. Secondly, we use static panel model and dynamic panel model to analyze the impact of intelligence on energy efficiency, and study the moderation influence of innovation, environmental regulation and foreign direct investment. Finally, there are a lot of literatures of energy efficiency about regional heterogeneity, but few researchers analyze the mechanism between intelligence and energy efficiency considering regional heterogeneity. This paper analyzes different effects of intelligence on energy efficiency with regard to innovation, environmental regulation and foreign direct investment in different regions.

The government and enterprises should improve innovation, environmental regulation and foreign direct investment to apply intelligent technology and increase energy efficiency. Therefore, the following policy suggestions are put forward. Firstly, the central and regional government must promote the development of intelligent technologies and facilities. Secondly, the intelligent technology and energy utilization technology must be created reasonably and efficiently. Thirdly, the government and enterprises also need to improve the environmental regulation system and supervise the production of enterprise strictly. Finally, the government should attract foreign direct investment reasonably, and enterprises must increase the spillover influence of foreign direct investment.

Key Words: intelligence; energy efficiency; innovation; environmental regulation; foreign direct investment

JEL Classification: L86, O13

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2022.01.002

(责任编辑: 闫 梅)