

数智融合如何影响“碳解锁”？

邝嫦娥,黄嘉信,狄亚轩

(湖南科技大学 商学院,湖南 湘潭 411201)

[摘要]随着全球气候变化的加剧和环境问题的日益突出,中国经济正面临从传统碳基技术路径向绿色低碳经济转型的巨大挑战。如何有效打破这种“碳锁定”,实现“碳解锁”,已成为中国乃至全球经济可持续发展的重要课题。基于中国 2011—2022 年 279 个地级及以上城市数据,实证检验了数智融合对“碳解锁”的影响。实证结果表明:(1)数智融合发展有利于促进“碳解锁”,该促进作用在非资源型城市和非老工业基地城市中表现更为突出。从“碳解锁”的不同维度来看,数智融合发展的促进程度由高到低依次为科技维度、制度维度、产业维度与文化维度。(2)机制检验表明,数智融合可以通过提高市场一体化水平促进“碳解锁”。(3)进一步研究发现,新型数字基础设施建设、宽带中国建设等硬环境政策支持以及数据要素市场化和公共数据开放等软环境政策支持都有助于增强数智融合对“碳解锁”的促进作用。研究旨在深入探讨数智融合如何通过影响市场一体化促进“碳解锁”,以期为中国经济绿色低碳转型和“双碳”目标的实现提供新的视角和理论支持。

[关键词]数智融合;市场一体化;碳解锁;碳锁定;绿色低碳;经济转型;数字化发展

[中图分类号]F279 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1004-4833(2025)05-0118-10

一、引言

近年来,在习近平生态文明思想的指引下,我国坚定不移地推进碳达峰与碳中和战略目标的实现,国务院相继出台了《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》和《2024—2025 年节能降碳行动方案》等一系列双碳政策,旨在促进社会经济发展方式绿色转型。然而,自工业革命以来,以化石能源为基础的技术体系与相应制度框架紧密结合,形成了自我强化的“技术-制度”复合体。随着高碳技术的广泛应用,规模报酬递增使其成本降低,进一步巩固了其主导地位,同时,社会文化和行为习惯倾向于维持现状,形成强大的路径依赖,使得经济系统被锁定在高碳发展路径上,对我国实现绿色转型形成了阻碍^[1]。因此,寻找“碳解锁”路径尤为重要。在第四次工业革命与结构调整阵痛期、新动能培育期等“四期叠加”的时代背景下,数字化与智能化能通过绿色技术创新、产业结构优化等方式促进低碳转型^[2-3],从而成为“碳解锁”的重要潜在突破口。

在以往研究中,学者积极探讨了数字化和智能化对社会经济变革产生的影响。其中,对“碳解锁”的研究多从数字经济对“碳解锁”的影响入手,尤其关注政府其中的作用^[4-5]。实际上,数字化与智能化相辅相成,数字化为智能化奠定基础,智能化是数字化的进阶方向,两者协同促进信息系统赋能^[6]。当前研究仅讨论数字经济对“碳解锁”的影响而忽视了智能化与数字化的一体性。在全球贸易动荡、外循环不稳定的背景下,我国经济发展战略布局中内循环的重要性愈发凸显。构建全国统一大市场作为畅通国内大循环的基础性支撑,具有重要意义。自 2022 年《中共中央国务院关于加快建设全国统一大市场的意见》发布以来,我国积极建设市场一体化。市场一体化能通过优化资源配置、促进技术流通、协同产业发展等方式打破区域壁垒,为“碳解锁”创造有利条件^[7]。数智融合下的异地投资与并购,能引导资金和技术向低碳潜力大、产业基础好的地区流动,助力“碳解锁”。而当前针对数智融合与“碳解锁”的研究中对市场一体化、异地投资和异地并购研究不足。故本文利用全国城市层面数据,实证检验数智融合、市场一体化与“碳解锁”三者之间的内在逻辑关系。

[收稿日期]2025-01-14

[基金项目]国家自然科学基金项目(42371192);湖南省社会科学基金重大项目(23ZDAJ023);湖南省社会科学基金一般项目(23YBA133);湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30100)

[作者简介]邝嫦娥(1979—),女,湖南郴州人,湖南科技大学商学院副教授,硕士生导师,从事区域经济研究,E-mail:kuangchangep@163.com;黄嘉信(2000—),男,江西萍乡人,湖南科技大学商学院硕士研究生,从事数智融合与碳解锁研究;狄亚轩(2000—),女,宁夏中卫人,湖南科技大学硕士研究生,从事数字经济与绿色发展研究。

二、文献述评

不同于碳排放、碳排放强度和碳排放效率等概念,“碳锁定”是指技术、制度、关联产业和消费者等要素的相互演化导致的对碳基能源系统的路径依赖^[8]。“碳锁定”强调的是经济、技术和制度等层面对高碳路径的依赖和难以转型的特性,关注的是阻碍低碳转型的各种因素及其相互作用。“技术-制度”综合体需要通过低碳技术创新和政府环境控制等外部条件进行改造,以实现脱碳目标^[9]。由此,有学者提出“碳解锁”概念。“碳解锁”是指在破除“技术-制度”综合体惯性的基础上,从碳基技术、制度体制的替代或者低碳化转型等方面实现“解锁”的过程^[1]。现有“碳解锁”或“碳锁定”的测算方式主要分为两种:一种是以使用碳超载与碳汇的比率测算“碳锁定”为代表的单一指标测算法^[10],另一种为综合指数构建法^[1,11]。但是目前两种方法都存在不足之处,国内研究大多集中于省级层面研究,并未深入到城市层面,而国外指标体系的构建未能合理地体现出“碳解锁”的内涵。如何结合国内外研究优点构建新的测算方法亟待探索。

数智融合的本质是大数据和人工智能技术的融合应用,通过大数据技术的数据收集、储存、处理与分析功能获得决策信息,人工智能利用自身算法模型处理海量数据实现自我提升,两者相互配合。而数智化强调运用数字化、智能化手段提升产业效率和效益,推动资源优化配置和创新驱动发展,是一个更广泛的概念^[12]。相比之下,数智融合更能体现出数字化与智能化的有机联系。部分学者认为数智融合是数字化和智能化的融合,以“数字化+智能化”的融合为特征,是一种新颖的战略组织形式^[13]。另一部分学者则认为数智融合是在数字化基础上的进一步升级,认为数智化是在前阶段“数据化”基础上主题关注的跨越式变迁,体现了信息系统赋能的显著进阶^[6,14]。还有部分学者认为数智融合既包涵融合,又包涵在数字化基础上进一步升级,将数智融合定义为数字化与智能化的融合与应用,是数字化与智能化的升级与再配置^[15]。数智融合的测算方式主要有主成分分析法、熵权法、内容分析方法、耦合协调度模型^[15-18]。其中耦合协调度模型更能体现出数字化与智能化系统各自发展水平和两者相互结合的程度。

在数智融合对“碳解锁”的影响机制方面,直接相关的研究不多。但有研究表明数字经济在“碳解锁”方面发挥着重要作用,认为数字经济能通过提高技术市场交易额和能源消耗效率、促进技术创新等方式破解“碳锁定”^[5,11,19]。也有部分研究认为智能化对“碳解锁”具有促进作用,研究结果显示大数据政策以及人工智能的发展能提升绿色全要素生产率,促进绿色发展^[20-21],其内在影响机制为激发数字技术创新活力、优化产业结构布局以及增进要素配置效率。但鲜有研究将数字化和智能化纳入统一框架对“碳解锁”进行研究。此外,已有研究对市场一体化关注较少,在与本文相似的研究中,利用中国省级数据证实了市场一体化能推进区域协同减排,且数字经济能促进市场一体化的区域协同减排效应^[22]。然而,在研究框架上,该研究把视角集中于市场一体化和区域协同减排,并未深入探讨数字经济与区域协同减排效应的直接关系。在研究内容上,该文研究数据停留在省级层面,且对市场一体化的测算方式仅仅停留在整体,未明确从哪个独特视角切入。

已有研究为本文奠定了坚实的理论基础,但也存在一些不足之处。与现有研究相比,本文可能存在的边际贡献体现在以下三方面:其一,融合国内外研究优点,结合数据可得性,从产业、制度、科技、文化四个维度构建了一套新的城市层面“碳解锁”评价体系,补充了“碳解锁”测量方面的研究;其二,既有研究主要侧重于数字化或智能化单一因素对“碳解锁”的影响,本文利用耦合协调度模型将两者融合对“碳解锁”进行研究,扩展了研究视角。其三,当前数智融合对“碳解锁”的影响机制研究中较少涉及市场一体化,本文从异地投资与异地并购视角切入,探讨市场一体化在数智融合推动“碳解锁”过程中的作用,丰富了数智融合与“碳解锁”的研究内容。

三、理论分析与研究假设

(一)数智融合与“碳解锁”

在社会经济发展数字化和智能化转型的背景下,传统的“不完全信息”假设受到挑战。不同个体之间的交互方式和资源配置效率产生巨大变革^[23]。这些变化对“碳解锁”的影响体现在技术、产业、制度以及社会文化四个方面。在促进技术“碳解锁”方面,协同理论强调系统各要素通过相互协作配合,产生超越各要素单独作用之和的整体效应。数智融合借助互联网平台等途径,能够快速、广泛地传播低碳技术相关知识与信息,构建低碳技术知识共享平台,加快绿色技术创新^[24]。还能突破地理与信息壁垒,提升资金跨期流动性,吸纳金融市场长尾

资金,从而为低碳技术创新开拓更广泛的资金来源,缓解企业融资约束,达成降低成本与提高创新融资效率双赢的局面,有力推动低碳技术的研发与应用^[19]。在促进产业“碳解锁”方面,数智融合孕育出一系列新兴低碳产业,具备低碳、高效、创新的特质,成为推动“碳解锁”的新动力^[25]。还有助于传统产业转型升级,促使其向高附加值、低能耗方向发展,降低高碳产业比重,优化产业结构^[26]。在促进制度“碳解锁”方面,“碳解锁”的关键是对“碳解锁”的过程和效果进行预测和监控^[27]。政策制定者通过数智融合相关技术能够收集和分析大量的经济、环境和社会数据,获取更全面、准确的信息。通过对不同地区、行业的碳排放数据和经济发展数据进行分析,可制定差异化的碳减排目标和政策措施,提高政策的针对性和有效性,更好地应对“碳锁定”问题。在促进社会文化“碳解锁”方面,数智融合带来的信息传播方式变革,使低碳消费观念得到更广泛传播。通过互联网、社交媒体等平台,消费者更易获取低碳产品和生活方式的信息,从而提升对低碳消费的认知和接受度,在购买决策中更倾向于选择低碳产品,抑制对高碳产品的需求^[28]。基于此,本文提出假设 1。

假设 1:数智融合发展有利于促进“碳解锁”。

(二)数智融合、市场一体化与“碳解锁”

市场一体化的核心特征是资源和要素能够在不同地区之间自由流动^[29],要求在区域内建立统一的市场规则和标准,包括统一的法律法规、质量标准、技术规范等,以确保不同地区的市场主体在相同的规则下进行竞争和交易^[30]。市场一体化还需要政府之间的协调与合作,各地方政府需要在政策制定和执行过程中加强沟通与协调,共同制定有利于市场一体化的政策和措施,避免地方保护主义和政策冲突,形成统一的市场环境^[22]。

数智融合的高效性、共享性、精确性等特征能通过多种方式满足市场一体化的需求。具体而言,数智融合能通过降低信息不对称、促进竞争合作,改善政府治理提高市场一体化水平。首先,数智融合相关技术能够快速、准确地收集、传递和处理大量经济信息,提升信息获取与传递效率。企业、消费者和政府等市场主体可以实时获取市场供需、价格、产品性能等信息,从而做出更加精准的决策。其次,数智融合打破了地理和时间的限制,使得企业能够更容易进入其他地区市场,使得市场竞争更加激烈。企业为了在竞争中获得优势,会不断优化产品和服务质量,提高生产效率,推动技术创新,这种竞争压力促使企业更加注重市场规则和公平竞争,有助于形成统一开放、竞争有序的市场环境^[30]。最后,政府也可以通过数字化平台利用智能化手段共享政策信息,加强政策制定和执行过程中的沟通与协调,避免政策冲突和重复建设,有助于形成统一的市场规则和标准,为市场一体化提供良好的制度保障。同时,市场一体化也能通过以下三种路径促进“碳解锁”。其一,促进资源优化配置。市场一体化打破了区域间的市场壁垒,使得资源和要素能够在更大范围内自由流动和优化配置,有助于将碳排放较低或减排潜力较大的资源和要素更有效地配置到需要的地方,从而促进实现区域间的协同减排^[29]。其二,加强技术创新与扩散。市场一体化为低碳技术的创新和扩散提供了良好的环境,使得先进的减排技术和清洁能源技术能够更快地得到推广和应用,从而推动“碳解锁”进程^[31]。其三,优化环境规制与政策协调。各地区在市场一体化的背景下,更倾向于制定和实施协调一致的环境政策和标准,避免因政策差异导致的碳排放转移和不公平竞争^[22],有利于提高环境规制的有效性,促使企业更加重视碳减排工作,推动“碳解锁”。基于上述分析,本文提出假设 2。

假设 2:数智融合能通过提高市场一体化水平促进“碳解锁”。

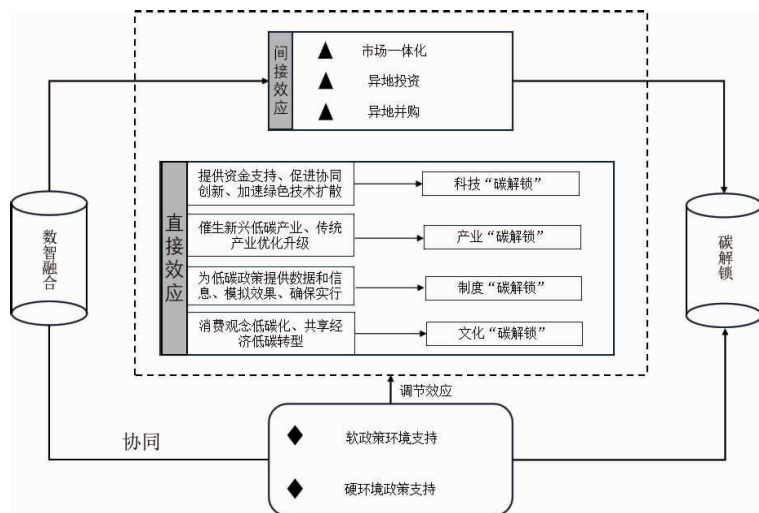


图 1 数智融合影响“碳解锁”的作用机制图

四、研究设计

(一)样本选择与数据来源

以 2011—2022 年中国 279 个地级及以上城市为研究对象,所选指标的主要数据来源于《中国城市统计年

鉴》各城市统计年鉴以及统计公报和国泰安数据库;工业互联网发明专利授权数、5G 发明专利授权数、电子商务发明专利授权数、人工智能发明专利授权数数据来源于企研·中国数字经济专题数据库;碳排放强度、节能降碳产业、绿色能源产业和绿色基础设施产业数据来源于企研·中国公共政策与绿色发展数据库(CPPGD);环境处罚数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS);专利相关数据来源于中华人民共和国国家知识产权局专利检索系统;数字普惠金融数据来源于蚂蚁金服与北京大学数字金融研究中心。

(二)模型构建

为验证假设 1,本文构建数智融合对“碳解锁”影响的双重固定效应回归模型:

$$Culi_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 Dii_{i,t} + \alpha_n Control_{i,t} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中, i 表示样本城市; t 表示年份; $Culi_{i,t}$ 表示“碳解锁”; $Dii_{i,t}$ 表示数智融合; $Control_{i,t}$ 为一系列控制变量; α_0 、 α_1 、 α_n 、分别为相应变量的回归估计系数; μ_i 为城市固定效应、 v_t 为年份固定效应, $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项。

(三)变量选择及测度

1. 被解释变量:“碳解锁”(Culi)

参考相关文献^[1,19]。依据“碳解锁”的概念,结合数据可得性,从产业、制度、科技、文化“碳解锁”四个维度构建“碳解锁”水平指标体系(表 1)。第一,从产业层面来看,第二产业在生产过程中通常消耗大量能源并排放大量温室气体。通过监测第二产业增加值在地区生产总值中的份额,可以评估高碳排放产业在整体经济体系中的比例,有助于评估产业“碳解锁”的有效性^[19]。同时,节能降碳产业和绿色能源产业等绿色产业的发展也能表征产业结构的“碳解锁”,这里分别用节能降碳产业和绿色能源产业的企业数量来衡量。第二,从制度层面来看,根据“波特假说”,在长期内,严格的环境规制会促使企业寻找更清洁的生产技术^[32]。本文以环保词频所在句子的字数占整个政府工作报告总字数的比重来衡量环境规制强度^[33]。绿色基础设施产业包括可再生能源产业、绿色交通、生态环保设施等,是实现低碳经济的关键支撑,需要公共政策支持建设,能反映地方政府对绿色发展的资金投入和重视程度,本文以绿色基础设施产业企业数量衡量。第三,从科技层面来看,用碳排放与 GDP 比值衡量的碳排放强度能直观表现绿色技术水平,且绿色专利申请量能表现绿色技术的创新成果和技术进步水平。第四,从社会文化层面来看,较高的生活垃圾无害化处理率和建成区绿色覆盖率意味着社会对环境质量的要求较高,人们的环保意识较强。同时,选取各城市环保关键词的百度指数来衡量公众环境关注^[34]。本文运用熵权法测算得到“碳解锁”水平。

2 核心解释变量:数智融合(Dii)

数智融合是数字化与智能化的融合与应用,通过运用数字与智能技术,实现数智化的管理与分析,是数字化与智能化的升级与再配置^[15]。因此,本文采用式(2)、式(3)耦合协调度模型,将城市数字化与智能化水平代入其中进行计算。城市数字化(Dig)测算方面,以赵涛等的研究为基础,构建了涵盖数字基础设施、数字经济关注、数字产业发展、数字普惠金融四个维度的城市数字化水平评价指标体系^[35],如表 2 所示,并运用熵值法对城市数字化水平予以测度。智能化(Int)的测算方面,参考张云和柏培文的做法^[15],选取人工智能产业专利授权数、5G 产业专利授权数、区块链产业专利授权数、工业互联网专利授权数,运用主成分分析法测算得到。

表 1 “碳解锁”水平指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	属性
产业“碳解锁”	非绿色产业发展	第二产业增加值占 GDP 比重	—
	绿色产业发展	节能降碳产业	+
		绿色能源产业	+
制度“碳解锁”	政府环境治理	环境规制强度	+
	绿色基础设施	绿色基础设施产业	+
科技“碳解锁”	绿色技术水平	碳排放强度	—
	绿色技术创新	绿色专利申请	+
文化“碳解锁”	绿色生态意识	生活垃圾无害化处理率	+
		建成区绿色覆盖率	+
		公众环境关注度	+

表 2 城市数字化水平指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明
数字化	数字基础设施	互联网普及率	每万人互联网宽带接入用户
		移动电话普及率	每万人移动电话用户数量
	数字经济关注	上市公司数字化关注度	上市公司年报中有关数字化的关键词统计加总到市级层面
		政府数字经济发展关注度	政府工作报告中与数字技术、数字应用相关的关键词的词频数量
	数字产业发展	信息企业基础	信息传输、计算机服务和软件业从业人员数
		电信企业发展	电信业务收入
	数字普惠金融	数字化企业上市公司数量	与数字经济相关的行业企业数量
		覆盖广度	数字普惠金融覆盖广度
		使用深度	数字普惠金融使用深度
		数字化程度	数字普惠金融数字化程度

$$C=2\times [Dig\times Int_i/(Dig_i+Int_i)^2]^{1/2}$$
 (2)

$$D=\sqrt{C\times T},T=\alpha Dig_i+\beta Int_i$$
 (3)

式中,C 表示耦合度,Dig 代表数字化,Int 代表智能化,T 为数字化和智能化的总和协调指数,D 代表耦合协调度,其含义为数智融合水平 *Dii*,能够体现两者的发展水平对整体协调度的贡献。 α 和 β 为待定系数,分别是数字化和智能化的影响权重,参考相关文章将 α 和 β 赋值为 0.5^[18]。

3. 中介变量

市场一体化(*Mar*)。市场一体化指数结合价格因素、贸易流量因素和生产要素流动等多个对市场一体化至关重要的方面,能全面地反映地区内部市场一体化的真实水平。参考相关文献使用利用市场分割指数算得的市场一体化指数作为市场一体化的代理变量^[36]。

异地投资(*Osi*)。参考何凡等的方法^[37],利用国泰安数据库公布的 2011—2022 年我国 A 股上市公司财务数据及其子公司信息,先识别出具有关联的子公司,再统计各个城市的子公司数量,最后计算出非注册地所在市的子公司数量作为异地投资的代理变量,并进行取对数处理。

异地并购指标参考潘爽和叶德珠从国泰安数据库中获取中国上市公司并购重组数据与财务数据^[38],得到异地并购成功的次数(*Tcma*)和异地并购成功率(*Vcma*)作为异地并购的代理变量。

4. 控制变量

参照 Wang 等和 Zhao 等^[5,11]。本文选取以下变量作为控制变量:①经济发展(*Pgdp*),采用人均 GDP 衡量,并进行取对数处理;②社会消费(*Trscg*),采用社会消费品零售总额衡量,并进行取对数处理;③产业结构(*In*),采用第三产业产值占比衡量;④外商投资(*Fdi*),采用外商投资衡量;⑤基础设施(*Inf*),如果当年及之前开通了高铁则取 1,否则取 0;⑥科技发展(*Tec*),采用科学技术支出衡量。各变量定义及描述性统计如表 3 所示。

表 3 描述性统计

变量类型	变量名称	符号	样本	均值	中位数	标准差	最小值	最大值
被解释变量	碳解锁	<i>Culi</i>	3348	0.037	0.018	0.063	0.005	0.696
解释变量	数智融合	<i>Dii</i>	3348	0.072	0.046	0.086	0.003	0.938
中介变量	异地投资	<i>Osi</i>	3348	2.467	2.302	2.006	0	9.009
	异地成功并购	<i>Tcma</i>	3348	0.403	0	1.428	0	21
	异地并购成功率	<i>Vcma</i>	3348	0.113	0	0.271	0	1
控制变量	市场一体化	<i>Mar</i>	3096	16.6	16.506	2.424	1.169	24.64
	经济发展	<i>Pgdp</i>	3348	1.785	1.747	0.461	0.194	4.687
	社会消费	<i>Trscg</i>	3348	15.66	15.622	1.047	12.61	19.01
	产业结构	<i>In</i>	3348	43.11	42.698	10.13	10.15	83.87
	外商投资	<i>Fdi</i>	3348	8.989	2.202	21.2	0	243.3
	基础设施	<i>Inf</i>	3348	0.623	1	0.485	0	1
	科技发展	<i>Tec</i>	3348	13.16	3.040	41.19	0.075	555

表 4 基准回归结果

	(1) <i>Culi</i>	(2) <i>Culi</i>	(3) <i>Culi</i>	(4) <i>Culi</i>
<i>Dii</i>	0.6783 *** (0.0640)	0.4325 *** (0.0540)	0.3787 *** (0.0205)	0.4365 *** (0.0467)
<i>Pgdp</i>		-0.0036 (0.0022)	-0.0005 (0.0008)	-0.0049 *** (0.0016)
<i>Trscg</i>		-0.0057 *** (0.0018)	0.0008 (0.0006)	-0.0009 (0.0014)
<i>In</i>		-0.0002 *** (0.0001)	0.0001 *** (0.0000)	-0.0001 (0.0001)
<i>Tec</i>		5.4657 *** (0.6101)	6.2813 *** (0.3858)	5.6066 *** (0.6454)
<i>Fdi</i>		-0.0000 (0.0001)	0.0003 *** (0.0000)	0.0000 (0.0001)
<i>Inf</i>		-0.0025 *** (0.0007)	-0.0036 *** (0.0004)	-0.0023 *** (0.0006)
<i>Constant</i>	-0.0122 *** (0.0047)	0.1044 *** (0.0238)	-0.0139 (0.0086)	0.0249 (0.0198)
年份固定效应	是	是	否	否
城市固定效应	是	是	否	否
N	3348	3348	3348	3348
R ²	0.9708	0.9811	0.9439	0.9388

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上通过显著性检验;括号内为城市层面的聚类稳健标准误,下表同。

四、实证分析

(一) 基准回归

表 4 第(1)列为没有加入控制变量的双重固定效应模型回归,结果显示数智融合的回归系数在 1% 的置信水平上显著为正,说明数智融合发展能有效促进“碳解锁”。第(2)列为加入一系列控制变量后的双重固定效应模型,结果表明数智融合的回归系数依然在 1% 的水平上显著为正,说明排除了一系列社会因素对“碳解锁”的干扰后,数智融合仍能有效促进“碳解锁”。第(3)列为混合 OLS 回归结果,第(4)列为随机效应模型回归结果。结果表明在不控制个体和时间的情况下,数智融合的回归系数也为正,且通过了 1% 的显著性检验,从侧面映证了数智融合发展能有效促进“碳解锁”。以上分析结果与本文预期一致,验证了假设 1。

(二) 稳健性检验

为了检验回归结果的可靠性,本文采用替换被解释变量测量方式、替换核心解释变量指标、排除政策冲击影响三种方法检验回归结果的稳健性。具体而言,首先将“碳解锁”的测算方法由熵权法换为主成分分析法,结果如表5第(1)列所示,数智融合的回归系数依然在1%水平上显著为正。其次,将智能化代理变量换为工业机器人安装密度重新测算数智融合再参与回归,第(2)列结果显示数智融合回归系数仍然为正,且

通过1%水平显著性检验。最后,考虑到某些政策能直接影响“碳解锁”,对回归结果产生干扰,本文分别剔除新能源试点城市、环境保护重点城市、创新城市试点城市之后再进行回归。第(3)列至第(5)列结果均显示数智融合回归系数在1%显著性水平上为正,说明基准回归的结果是稳健的。

(三) 内生性处理

数智融合与“碳解锁”之间可能存在遗漏变量偏差、双向因果关系等内生性问题,本文使用两阶段最小二乘法(2SLS)和工具变量—广义矩估计方法(IV-GMM)解决内生性问题。其中,在实际应用中,2SLS中第二步的一致性所需的正交条件难以满足,导致第二步的估计不一致,并且忽略了变量误差问题。而IV-GMM模型能有效应对可能出现的诸如遗漏变量偏差等内生问题,有效改善了2SLS的不足^[39]。首先,本文参考赵涛等使用1984年各城市每万人电话机数量与上一年全国互联网用户数的交乘项作为工具变量(IV)进行2SLS回归和IV-GMM回归^[35],表6列(1)和列(2)分别为工具变量两阶段的回归结果,第(3)列为IV-GMM模型回归结果。其中,Kleibergen-Paap rkLM值为分别为11.102和17.318,且在1%水平上显著,说明工具变量不存在识别不足的问题。结果表明,在控制了可能存在的内生性之后,数智融合发展仍然能促进“碳解锁”。

(四) 作用机制检验

根据前文理论分析,数智融合不仅能直接对“碳解锁”产生影响,还能通过影响市场一体化、异地投资、异地并购间接对“碳解锁”产生影响。为检验市场一体化作用机制,本文借鉴江艇的研究^[40],设立如下模型:

$$mid_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Dii_{i,t} + \beta_n Control_{i,t} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

式中, $mid_{i,t}$ 为城市*i*在*t*年的中介变量,具体包括市场一体化、异地投资、异地并购; β_0 、 β_1 、 β_n 分别为相应变量的回归系数;其余变量的定义同式(1)。

当前关于市场一体化和“碳解锁”的研究中,大多数研究结果认为市场一体化有利于“碳解锁”。如王杰和王军认为市场一体化能通过技术溢出、经济溢出和环保溢出促进区域协同减排^[22],李江龙等和郭艺等也认为市场一体化可通过促进政府合作、统一区域市场制度规则、提高企业要素匹配效率等方面促进碳效率^[7,41]。就数智融合与市场一体化而言,如表7列(1)中结果显示,被解释变量为市场一体化时,数智融合对市场一体化(*Mar*)的回归

系数在5%显著性水平上为正,表明数智融合发展有利于市场一体化水平提升。数智融合能够打破地域和信息壁垒。通过数据共享和智能化分析,促进资源的优化配置,让要素在市场间更自由地流动,从而有利于提升市场

表5 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>Dii</i>	6.3643 *** (0.9044)	0.3346 *** (0.0533)	0.3482 *** (0.0511)	0.2652 *** (0.0422)	6.3643 *** (0.9044)
<i>Constant</i>	0.2211 (0.4531)	0.0027 (0.0336)	0.0942 *** (0.0220)	0.0677 *** (0.0156)	0.2211 (0.4531)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
N	3348	3348	2616	2064	2760
R ²	0.9811	0.9771	0.9827	0.9426	0.9752

表6 内生性检验结果

变量	(1) <i>Dii</i>	(2) <i>Culi</i>	(3) <i>Culi</i>
<i>IV</i>	0.097 *** (0.014)		
<i>Dii</i>		0.902 *** (0.179)	0.640 (0.124)
Kleibergen-Paap rkLM 值	11.102 ***		17.318 ***
Kleibergen-Paap Wald	42.112		26.072
rk F statistic	[16.38]		[16.38]
控制变量	控制	控制	控制
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
N	3348	3348	3348

注:[] 括号内为 Stock-Yogo weak ID test critical values 中10% 偏误的临界值。其余同表4。

表7 作用机制检验结果

	(1) <i>Mar</i>	(2) <i>Tcma</i>	(3) <i>Vcma</i>	(4) <i>Osi</i>
<i>Dii</i>	3.7323 ** (1.7436)	3.7365 ** (1.6974)	1.3015 *** (0.2809)	3.1545 *** (0.9936)
<i>Constant</i>	18.7453 *** (3.0201)	2.1879 ** (1.0090)	0.5565 * (0.3005)	0.7456 (2.0267)
控制变量	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
N	3348	3348	3348	3348
R ²	0.505	0.754	0.293	0.924

一体化水平。故数智融合通过促进市场一体化建设推动“碳解锁”,验证了假设 2。

表 7 列(2)、列(3)、列(4)的被解释变量分别是异地并购的成功次数、异地并购的成功率、异地投资企业数量。三列数据中数智融合的回归系数都为正,且都通过了 5% 显著性检验。故数智融合对异地并购的成功次数、异地并购的成功率、异地投资企业数量都有提升作用。异地并购和投资能够使资本、技术等生产要素在不同地区之间流动,有助于缩小地区之间的经济差距,推动区域经济的均衡发展,是市场一体化进程中的重要环节。企业可以通过异地并购和投资将先进的低碳技术和节能设备引入新地区,优化当地高碳产业的生产流程,减少碳排放。这种跨区域行为还能够整合资源,推动能源结构优化,使新地区的能源利用向低碳化转变,促进“碳解锁”。故数智融合可以通过促进异地投资和异地并购推动“碳解锁”,进一步验证了假设 2。

五、进一步研究

(一)调节效应分析

数智融合的发展和效用离不开政府政策的支持。对此,本文将从新型数字基础设施建设、宽带中国建设等硬环境政策支持和数据要素市场化、公共数据开放等软环境政策支持入手,探讨不同类型政策对数智能融合与“碳解锁”的调节效应。为此,设立以下模型:

$$Dam_{i,t} = \lambda_0 + \lambda_1 Dig_{i,t} + \lambda_2 Dig_{i,t} \times T_{i,t} + \lambda_3 T_{i,t} + \lambda_n Control_{i,t} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{i,t}$$
 (5)

式中, $T_{i,t}$ 为调节变量。 λ_0 、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_n 分别为相应变量的回归系数;其余变量的定义同式(1)。

1. 硬环境政策支持的调节效应

良好的数字基础设施硬环境会促使社会大众更广泛地接触和使用数字技术,提升全社会的数字素养,更好地发挥数智融合的作用。本文使用 Python 软件对各市政府工作报告进行分词处理,分别统计政府工作报告总词汇数量与新型数字基础设施相关词汇数量,以新型数字基础设施相关词汇数量在总词汇数量中的占比表示新型数字基础设施建设水平衡量的新型数字基础设施建设(Di)^[42]。表 8 列(1)结果显示,在加入新型数字基础设施建设之后,数智融合的回归系数仍然显著为正,且数智融合与新型数字基础设施建设的交互项回归系数符号也显著为正,与数智融合的回归系数符号一致,表明新型数字基础设施建设有助于促进数智融合的“碳解锁”效应。

宽带中国建设致力于提升全国范围内的网络覆盖和通信质量,有助于缩小区域间在数智融合基础条件上的差距,让不同地区都能更好地参与到利用数智融合推动“碳解锁”的进程中。本文以是否宽带中国建设试点城市构造虚拟变量“宽带中国建设”(Brc),如果是则赋值为 1,不是则赋值为 0。表 8 列(2)结果显示数智融合的回归系数与交互项的回归系数都显著为正,与数智融合的回归系数符号一致,说明宽带中国建设也有利于数智融合的“碳解锁”效应。

2. 软环境政策支持的调节效应

数据要素市场化意味着数据成为一种可交易的商品,能够依据市场机制在不同主体间合理流动。在数智融合推动“碳解锁”的过程中,拥有大量碳排放相关数据的企业可以将数据作为要素投入市场。参考相关文献,本文以是否设立数据交易平台衡量数据要素市场化,将在当年设立了数据交易平台的城市记为 1,否则为 0,构造虚拟变量数据要素市场化(Mde)^[43]。表 8 列(3)结果显示引入数据要素市场化与数智融合的交互项之后,数智融合对“碳解锁”的回归系数仍在 1% 显著性水平上为正,数据要素市场化与数智融合交互项的回归系数为正,并且通过 1% 显著性检验,说明数据要素市场化强化了数智融合的“碳解锁”作用。

公共数据开放能够将政府部门掌握的大量与环境、能源、经济等相关的数据释放出来,企业和科研机构可以

表 8 调节效应回归结果

变量	硬环境政策支持		软环境政策支持	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Dii	0.3891 *** (0.0570)	0.3130 *** (0.0622)	0.3818 *** (0.0470)	0.3358 *** (0.0496)
$Dii \times Di$	12.4191 * (6.7227)			
$Dii \times Brc$		0.1318 *** (0.0343)		
$Dii \times Mde$			0.1059 ** (0.0476)	
$Dii \times Opd$				0.1117 *** (0.0221)
$Constant$	0.1066 *** (0.0233)	0.0843 *** (0.0232)	0.0819 *** (0.0225)	0.1014 *** (0.0232)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
N	3348	3348	3348	3348
R ²	0.981	0.983	0.982	0.982

利用这些开放的公共数据,结合自身的业务数据,通过智能分析等手段,更全面地了解碳排放的影响因素,制定更科学合理的碳减排策略,从而为数智融合助力“碳解锁”提供更坚实的数据基础,增强其影响效果。参考相关文献,本文将在当年开通了公共数据开放平台的城市记为1,否则为0,构造虚拟变量公共数据开放(*Opd*)。表8列(4)结果显示,引入公共数据开放与和数智融合的交互项之后,数智融合对“碳解锁”的回归系数仍在1%显著性水平上为正,公共数据开放和数智融合的交互项与数智融合对的回归系数符号一致,说明公共数据开放强化了数智融合对“碳解锁”的促进作用。

(二)异质性分析

1. “碳解锁”不同维度的异质性

为了验证数智融合对“碳解锁”不同纬度的影响是否具有差异性,本文将“碳解锁”的产业、制度、科技和文化四个维度作为被解释变量进行回归分析,结果如表9列(1)至列(4)所示。其中,数智融合对产业“碳解锁”、制度“碳解锁”和科技“碳解锁”的回归系数显著为正,而对文化“碳解锁”不显著,这表明产业、制度和科技“碳解锁”可通过数智融合的“硬干预”快速见效,而文化“碳解锁”需要“软渗透”与长期培育,且回归系数从大到小依次为科技、制度和产业“碳解锁”。根本原因在于不同领域对数字技术的需求强度、融合深度及见效周期存在差异。科技“碳解锁”以技术创新为核心,数智融合作为现代科技的重要载体,能直接嵌入低碳技术研发、测试与应用全链条,故回归系数最大。制度“碳解锁”依赖数字技术对治理体系的重塑,虽能提升制度运行效率与政策精准性,但制度变革受限于政策传导机制、利益协调成本等因素,效果显现存在一定滞后,回归系数次之。

2. 城市类型异质性

资源型城市往往依赖高耗能、高碳排放的产业,并且生产工艺相对传统,能源利用效率较低,很难在短期内实现低碳转型。老工业基地城市同样存在类似问题,其传统制造业为主的产业结构使得工业生产长期依赖高碳能源。要向低碳生产转变,涉及整个生产流程的改造、新设备的购置安装等诸多环节,这一转型过程复杂且成本高昂,导致“碳解锁”难度增大^[44]。故本文按照是否为资源型城市 and 老工业基地划分为两组进行回归。表9列(5)和列(6)、列(7)和列(8)结果显示组间差异系数显著,数智融合系数在非资源型城市和非老工业基地城市中回归系数更大,这说明数智融合对非资源型和非老工业基地城市的“碳解锁”效应更强。

表9 异质性分析

变量	(1) 产业维度	(2) 制度维度	(3) 科技维度	(4) 文化维度	(5) 资源型	(6) 非资源型	(7) 老工业基地	(8) 非老工业基地
<i>Dit</i>	0.445 *** (0.064)	0.533 *** (0.113)	0.733 *** (0.126)	-0.021 (0.052)	0.224 *** (0.050)	0.575 *** (0.083)	0.323 *** (0.090)	0.553 *** (0.082)
常数项	0.085 ** (0.034)	0.191 *** (0.050)	0.148 *** (0.044)	0.058 ** (0.023)	0.036 *** (0.012)	0.117 *** (0.041)	0.055 *** (0.018)	0.109 *** (0.038)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
N	3348	3348	3348	3348	1332	2016	1104	2244
R ²	0.974	0.862	0.955	0.775	0.770	0.963	0.739	0.966

六、研究结论与政策建议

本文利用中国2011—2022年279个地级及以上城市的面板数据,分别从理论和实证上探讨了数智融合对“碳解锁”的影响以及市场一体化在其中发挥的作用,研究发现:(1)数智融合的发展能有效促进“碳解锁”,该结论在经历两阶段最小二乘法和IV-GMM模型的内生性检验以及一系列稳健性检验后依然成立;(2)机制检验发现,数智融合通过提高市场一体化水平、强化异地投资以及推动异地并购促进“碳解锁”;(3)进一步研究发现,新型数字基础设施建设和宽带中国建设等硬环境政策支持以及数据要素市场化和公共数据开放等软环境政策支持都有助于增强数智融合对“碳解锁”的促进效应;(4)异质性分析发现,数智融合对“碳解锁”的促进作用在高数智融合水平城市、非资源型城市和非老工业基地城市中更强,数智融合发展对“碳解锁”的促进作用由高到低依次为科技维度、制度维度、产业维度与文化维度。

基于本文结论提出以下建议:一是强化数智融合的“碳解锁”能力,强化技术创新与研发支持,设立专项科

研基金,支持高校、科研机构和企业开展数智融合与“碳解锁”相关的关键技术研发,通过政策引导,促进企业、高校和科研机构建立产学研合作联盟,共同开展技术攻关和创新实践,加速科技成果转化与应用。二是完善市场一体化机制,要健全碳排放权交易市场,依托公共资源交易平台,加快建设完善全国碳排放权交易市场,扩大市场覆盖范围,丰富交易品种和交易方式。通过市场机制,引导企业主动减排,实现碳排放资源的优化配置。还要积极推动绿色金融发展,鼓励金融机构开发绿色信贷、绿色债券等金融产品,加大对数智融合促进“碳解锁”项目的资金支持,三是加强数智融合的政策支持。不仅要加大对 5G、物联网、云计算等新型数字基础设施的建设投入,提升网络覆盖范围和质量,为数智融合提供坚实的网络基础,还要继续扩大宽带网络的覆盖范围,提高宽带接入速度和质量,缩小城乡数字鸿沟,为数智融合在更广泛区域的应用创造条件。四是针对不同类型城市制定不同战略方向,优先在低数智融合水平城市布局建设宽带网络、数据中心、物联网等基础设施,提升城市的数智化基础条件;鼓励资源型城市利用数智技术对传统产业进行改造升级,提高资源开采、加工和利用的效率,减少能源消耗和碳排放;支持老工业基地城市加快产业结构调整,推动传统产业向高端化、智能化、绿色化方向发展。

参考文献:

- [1]程娜,桑一铭,李博文.“双碳”目标下中国“碳解锁”发展研究[J].改革,2023(12):151-162.
- [2]陈洪波,张骁潇.国家大数据综合试验区如何促进城市绿色转型:基于碳排放量增速和碳生产率增幅的双重视角[J].中国软科学,2024(11):172-188.
- [3]赵培雅,高煜,孙雪.“双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应[J].中国人口·资源与环境,2023(9):59-69.
- [4]Zhao C,Zhong C,Liu C,et al. How the digital economy is empowering green strategies for breaking carbon lock-in[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2024,365(1):121670.
- [5]Wang L,Cao Y,Hu J,et al. Does digital economy development benefit low-carbon transition:Evidence based on urban carbon lock-in[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2024,5(1):1-13.
- [6]陈国青,任明,卫强,等.数智赋能:信息系统研究的新跃迁[J].管理世界,2022(1):180-196.
- [7]李江龙,彭千芸,杜克锐.区域一体化与城市碳效率——基于城市群政策的实证考察[J].财经科学,2024(3):89-102.
- [8]Unruh G C. Understanding carbon lock-in[J]. Energy Policy,2000,28(12):817-830.
- [9]Unruh G C. Escaping carbon lock-in[J]. Energy Policy,2002,30(4):317-325.
- [10]董碧滢,徐盈之,孙文远.“调结构”视角下绿色技术创新的碳解锁路径研究——环境规制的调节效应[J].研究与发展管理,2023(4):34-49.
- [11]Zhao C,Taghizadeh-Hesary F,Dong K,et al. Breaking carbon lock-in:the role of green financial inclusion for China[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2024,67(3):564-593.
- [12]张杰,刘亚琪.行之有效还是徒劳无功?数智融合发展对长三角地区减污降碳协同治理的影响研究[J].长江流域资源与环境,2024(3):1-17.
- [13]Zhang G,Wang X,Xie J,et al. A mechanistic study of enterprise digital intelligence transformation,innovation resilience,and firm performance[J]. Systems,2024,12(6):186.
- [14]Mithas S,McFarlan F W. What is digital intelligence? [J]. It Professional,2017,19(4):3-6.
- [15]张云,柏培文.数智化如何影响双循环参与度与收入差距——基于省级一行业层面数据[J].管理世界,2023(10):58-83.
- [16]孙小强,高秀云,王玉梅.制造业数智化融合转型发展的关键要素、机理分析及评价指标研究[J].中国科学院院刊,2024(2):323-332.
- [17]李婉红,李娜.绿色技术创新、智能化转型与制造企业环境绩效——基于门槛效应的实证研究[J].管理评论,2023(11):90-101.
- [18]邝嫦娥,刘江月,李文意.数智融合赋能与制造业企业绿色转型[J].当代财经,2024(5):114-127.
- [19]Liu Y,Zhao C,Dong K,et al. How does green finance achieve urban carbon unlocking? Evidence from China[J]. Urban Climate,2023,52(1):101742.
- [20]Shen N,Zhang G,Zhou J,et al. Can big data policy drive urban carbon unlocking efficiency? A new approach based on double machine learning[J]. Journal of Environmental Management,2024,372(1):123296.
- [21]邝劲松,杨坤宇,石校菲,等.省域人工智能发展对绿色全要素生产率的空间效应[J].经济地理,2024(7):144-154.
- [22]王杰,王军.数字赋能背景下市场一体化推进的区域协同减排效应[J].财贸经济,2024(12):143-159.
- [23]何大安,许一帆.数字经济运行与供给侧结构重塑[J].经济学家,2020(4):57-67.
- [24]Bouschery S G,Blazevic V,Piller F T. Augmenting human innovation teams with artificial intelligence:Exploring transformer-based language models[J]. Journal of Product Innovation Management,2023,40(2):139-153.
- [25]徐盈之,郭进,刘仕萌.低碳经济背景下我国碳锁定与碳解锁路径研究[J].软科学,2015(10):33-38.
- [26]陈晓东,杨晓霞.数字经济发展对产业结构升级的影响——基于灰关联熵与耗散结构理论的研究[J].改革,2021(3):26-39.
- [27]陈晓红,胡东滨,曹文治,等.数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J].中国科学院院刊,2021(9):1019-1029.

- [28] Worsham M, Brecha R J. Carbon lock-in: an obstacle in higher education's decarbonization pathways[J]. Journal of Environmental Studies and Sciences, 2017, 7(3): 435-449.
- [29] 徐斌, 柯达, 刘杨倩宇. 中国区域一体化如何影响碳排放效率[J]. 当代财经, 2023(1): 120-131.
- [30] 祁晓凤, 周立宏. 区域市场一体化的环境治理效应研究——基于企业污染排放视角的考察[J]. 财政研究, 2024(1): 105-117.
- [31] 余典范, 龙睿, 王超. 数字经济与边界地区污染治理[J]. 经济研究, 2023(11): 172-189.
- [32] 彭文斌, 苏欣怡, 杨胜苏, 等. 环境规制视角下城市绿色创新时空演变及溢出效应[J]. 地理科学, 2023(1): 41-49.
- [33] 邵帅, 葛力铭, 朱佳玲. 人与自然何以和谐共生: 地理要素视角下的环境规制与环境福利绩效[J]. 管理世界, 2024(8): 119-146.
- [34] 吴力波, 杨眉敏, 孙可贺. 公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022(2): 1-14.
- [35] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020(10): 65-76.
- [36] 丁一兵, 梁佳杨. 国内市场一体化对利用外资“稳中提质”的影响研究[J]. 国际贸易问题, 2024(10): 1-18.
- [37] 何凡, 陈波, 黄炜. 行业规范标准化与资本跨区流动——基于企业异地投资的研究[J]. 管理世界, 2024(7): 204-225.
- [38] 潘爽, 叶德珠. 交通基础设施对市场分割的影响——来自高铁开通和上市公司异地并购的经验证据[J]. 财政研究, 2021(3): 115-129.
- [39] Zhao C, Dong K, Jiang H D, et al. How does energy poverty eradication realize the path to carbon unlocking? The case of China[J]. Energy Economics, 2023, 121(1): 106691.
- [40] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.
- [41] 郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 等. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究[J]. 地理研究, 2022(1): 181-192.
- [42] 钞小静, 廉园梅, 罗鑫皓. 新型数字基础设施对制造业高质量发展的影响[J]. 财贸研究, 2021(10): 1-13.
- [43] 戴魁早, 王思曼, 黄姿. 数据交易平台建设如何影响企业全要素生产率[J]. 经济学动态, 2023(12): 58-75.
- [44] 李江龙, 徐斌. “诅咒”还是“福音”: 资源丰裕程度如何影响中国绿色经济增长? [J]. 经济研究, 2018(9): 151-167.

[责任编辑: 杨志辉]

How Does the Integration of Digital Technology and Intelligence Affect “Carbon Unlocking”?

KUANG Chang'e, HUANG Jiaxin, DI Yaxuan

(School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: With the intensification of global climate change and the increasing prominence of environmental issues, China's economy is facing huge challenges in transforming from the traditional carbon-based technological path to a green and low-carbon economy. How to effectively break this “carbon lock-in” and achieve “carbon unlocking” has become an important topic for the sustainable development of China's and even the global economy. Based on the data of 279 prefecture-level and above cities in China from 2011 to 2022, this paper empirically examines the impact of the integration of digital technology and intelligence on “carbon unlocking”. The empirical results show that: (1) The development of the integration of digital technology and intelligence is conducive to promoting “carbon unlocking”, and this promoting effect is more prominent in non-resource-based cities and non-old industrial base cities. From different dimensions of “carbon unlocking”, the promoting degrees of the development of the integration of digital technology and intelligence are, from high to low, the technological dimension, the institutional dimension, the industrial dimension and the cultural dimension. (2) The mechanism test shows that the integration of digital technology and intelligence can promote “carbon unlocking” by improving the level of market integration. (3) Further research finds that policy support for the hard environment, such as the construction of new digital infrastructure and the implementation of the “Broadband China” strategy, as well as policy support for the soft environment, such as the marketization of data elements and the opening of public data, can help enhance the promoting effect of the integration of digital technology and intelligence on “carbon unlocking”. This study aims to deeply explore how the integration of digital technology and intelligence promotes “carbon unlocking” by influencing market integration, in order to provide a new perspective and theoretical support for the green and low-carbon transformation of China's economy and the achievement of the “dual carbon” goals.

Key Words: integration of digital technology and intelligence; market integration; carbon unlocking; carbon lock-in; green low-carbon; economic transformation; digitalized development