

投资驱动全要素碳生产率跨区域协同改进机理

——京津冀碳达峰不同情景下的模拟分析

王文平^{1,2} 秦颖博¹ 陈国安¹

(1. 东南大学 经济管理学院,江苏 南京 211189;2. 东南大学 国家发展与政策研究院,江苏 南京 211189)

[摘要] 为研究投资驱动下跨区域协同碳达峰的内在机理,分别在经济关联、能源关联和碳排放关联下分析全要素碳生产率改进的系统动力学机理,并通过差异化的空间关联模拟分析京津冀碳达峰情景条件,研究得到:空间关联方式对京津冀全要素碳生产率协同改进效应的发挥产生显著影响;对全要素碳生产率的分解分析表明,技术进步和效率改进是推动碳排放提前达峰的动力来源。优化情景下,京津冀全要素碳生产率协同改进推动碳达峰的显著变量和主要动力呈现阶段化差异特征:2020—2023年,经济影响力系数为显著变量,固定投资驱动跨区域优势产业发挥带动效应,主要以效率改进的方式摒弃无序低效模式,压缩碳排放冗余空间;2023—2028年,显著变量则转换为碳排放影响力系数,减排投资倒逼跨区域高碳产业加快减排技术创新,并借助空间溢出效应,进一步发掘碳减排潜力;2028—2030年,显著变量则调整为经济感应度系数,固定投资强化跨区域产业链联动效应,重在技术合作刺激全行业绿色转型,全面抑制碳排放。结果显示,京津冀将保持年均约6%的经济增速平稳发展,预计2028年提前实现碳达峰,有效助力碳中和。

[关键词] 全要素碳生产率 碳达峰 空间关联 区域协同

一、引言

2020年我国在联合国大会上承诺,力争于2030年前使二氧化碳排放量达到峰值,并努力争取在2060年前实现碳中和的“双碳”目标,这对通过节能减排投资引导我国产业体系加速转型提出了更高要求。同一时期内国内生产总值与碳排放总量之比——碳生产率,是衡量一个国家(地区)低碳经济发展效率的重要指标^[1],碳生产率改进速度反映了国家(地区)应对气候变化的努力^[2]。尽管碳生产率强调了碳排放与经济增长的直接关系,但割裂了碳排放与资本、劳动、能源及技术要素间的内在有机联系,难以体现多投入、多产出的综合效应。相关研究进一步将资本、劳动、能源等纳入要素投入,并将碳排放作为非期望产出,基于多投入多产出的数据包络分析(DEA)和方向性距离函数(DDF)测算的全要素碳生产率,包含了资本、劳动、资源及技术等投入要素的综合效应,可以全面测度低碳经济发展效率指标^[3]。但碳排放和资本、劳动等生产要素一样,具备很强的空间流动性^[4],因此,全要素碳生产率的研究应在面对多投入要素综合效应的同时,考虑区域协同下的改进空间。京津冀作为我国四大经济圈之一,2021年,人口占比7.8%,经济总量占全国GDP的8.4%,但各区域间生态经济发展水平却极不平衡^[5]。京津冀协同发展作为中国的三大发展战略之一,如何在保证经济平稳增长的基础上快速实现碳达峰,成为衡量跨区域高质量发展的核心指标之一。本文拟从京津冀各区域节能、减排投资及其产生的差异化空间关联影响入手,分析投资驱动的全要素碳生产率跨区

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目“基于‘一带一路’资源场域绿色重构的我国传统制造业生态化转型”(71973023),“智慧制造业价值共同体区域一体化脱碳发展机制研究”(42277493);江苏省社科基金重点项目“数字经济时代产业自主可控价值链构建的江苏行动路径及策略研究”(19GLA003)成果之一。

[作者简介] 王文平,东南大学经济管理学院教授,博士生导师;研究方向:产业生态系统、复杂网络。

域协同改进效应,并进而研究京津冀碳达峰机理及路径,研究可为中国化解经济可持续增长与碳减排冲突提供典型样本。

由于区域间碳排放量存在巨大差异及较强的空间相关性,区域协同减排成为减少碳泄漏、降低总体碳排放的有效措施^[6-7]。一方面,从经济增长、能源消耗、对外贸易、产业调整、科技创新等方面入手的研究认为,非理性的能源需求、不合理的能源结构、高碳贸易需求、低效无序的产业结构以及技术粗放的碳排放模式,是碳减排的最大障碍^[8],需要通过降低能耗强度^[9]、加强节能减排技术创新^[10],才能解锁“碳锁定”;另一方面,对中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径的研究认为,投资规模的无序扩张是碳排放激增的首要因素,投资碳强度是引致碳排放减少的关键因素,大规模低效的固定资产投资产生了大量碳排放^[11]。造成上述现象的根本原因在于能源、技术等影响碳排放的关键要素资源在区域分布上呈现显著的供需背离特征^[12]。而众多研究表明,低碳技术标准设定、碳排放权交易、碳税等不同政策影响下的区域间投资偏好^[13-14],是决定要素是否扭曲的重要来源,合理的固定资本、节能资本、减排资本等不同类型的投资组合,不仅是市场机制和政府调控碳减排的重要手段^[15-16],而且从源头对能源行业进行资本优化配置^[17],可以借助于产业链的传导放大效应,实现节能减排以及产品技术水平的提高,促进全要素碳生产率的系统性改进,从而实现显著的协同减排效果^[18]。

综上,考察区域不同投资行为如何通过影响区域间的不同空间关联方式、强度变化所引致的区域全要素碳生产率协同改进,进而驱动跨区域协同实现碳达峰的情景过程,是研究跨区域碳减排协同效应微观来源的应有之义。而如何解析跨区域全要素碳生产率协同改进的投资驱动动力学机理,以克服当前仅从区域经济系统的输入-输出研究区域间经济规模、能源结构、产业结构差异等对跨区域协同影响^[19-20]存在的“黑箱”思维,仅通过区域信息和资源特征^[21-22]、区位距离^[23]以及人均GDP差异表征的经济距离^[24]等无法反映实际区域间经济关联、生态关联效应的局限。探索通过发挥跨区域空间关联效应,实现跨区域协同碳达峰的低碳化投资策略,是“双碳”目标下的重要研究问题。

那么,跨区域空间关联、全要素碳生产率的协同改进及跨区域协同下实现碳达峰,三者间存在怎样的逻辑关系?投资驱动下,不同关联方式在全要素碳生产率改进效应中分别发挥着怎样的作用,又是如何进一步影响碳达峰的?优化情景下,投资驱动通过调整空间关联方式提高全要素碳生产率的主要动力来源是什么,如何促进碳达峰的实现?针对以上问题,本文拟从以下几点着手:第一,基于区域间固定资本、节能资本、减排资本等不同投资类型对产业间投入产出关系的影响,利用系统动力学横型剖析相应投资驱动下全要素碳生产率协同改进的内在运行机理;第二,对不同投资类型如何影响区域间经济、能源、碳排放等不同关联方式的形成进行分析,进而通过对全要素碳生产率的预测及差异比较,探寻其未来的改进空间;第三,对全要素碳生产率进行解析,明确不同时段下改进动力的主要来源,衡量区域间的协同效应以及碳达峰情景。

二、投资驱动全要素碳生产率改进的系统动力学机理

经济、能源、碳排放的空间关联是跨区域协同的具体表现和行为方式,因此,本节基于区域间投入产出关系,从投资驱动的经济、能源、碳排放的空间关联下,考察跨区域协同系统动力学机理,进而分析投资驱动下全要素碳生产率跨区域协同改进的作用路径。

(一)投资驱动全要素碳生产率改进的系统动力学模型构建

基于全要素碳生产率的内涵,模型参数围绕经济、能源和碳排放三个方面进行变量设置,变量类型主要包括水平变量、速率变量、辅助变量以及控制变量等,由于本文以空间关联特征为研究视角,因此特设关联变量。研究核心是投资驱动下全要素碳生产率的协同改进,因此,不同投资类型的资本存量被视为水平变量(也称状态变量),而直接影响水平变量的各类投资为速率变量,最终决定速率变量的各区域或产业投资配置参数为控制变量。若模拟仿真中某一变量对系统产生显著性影响,可称为显著变量,具体变量名称如表1所示。

耗强度。另外,产业系统的活动也不可避免地产生碳排放,为弱化对生态环境的影响,通过跨区域产业碳排放关联,有效促进各区域产业减排资本的高效利用,增添碳减排设备,改善碳排放技术,实现降低产业碳排放强度的目的。本文通过解析增加区域产业生产总值、降低能源消耗总量以及碳排放总量的实现路径,可以有效衡量全要素碳生产率的动态变化趋势,并为其改进提供多种选择方案,进而优化碳达峰进程。

(二)投资驱动全要素碳生产率对碳排放的影响路径及数理解析

在跨区域协同系统动力学模型中,经济关联、能源关联、碳关联作为影响全要素碳生产率最直接的变量,决定了不同的反馈回路,从而形成差异化的影响路径,具体参见图2。

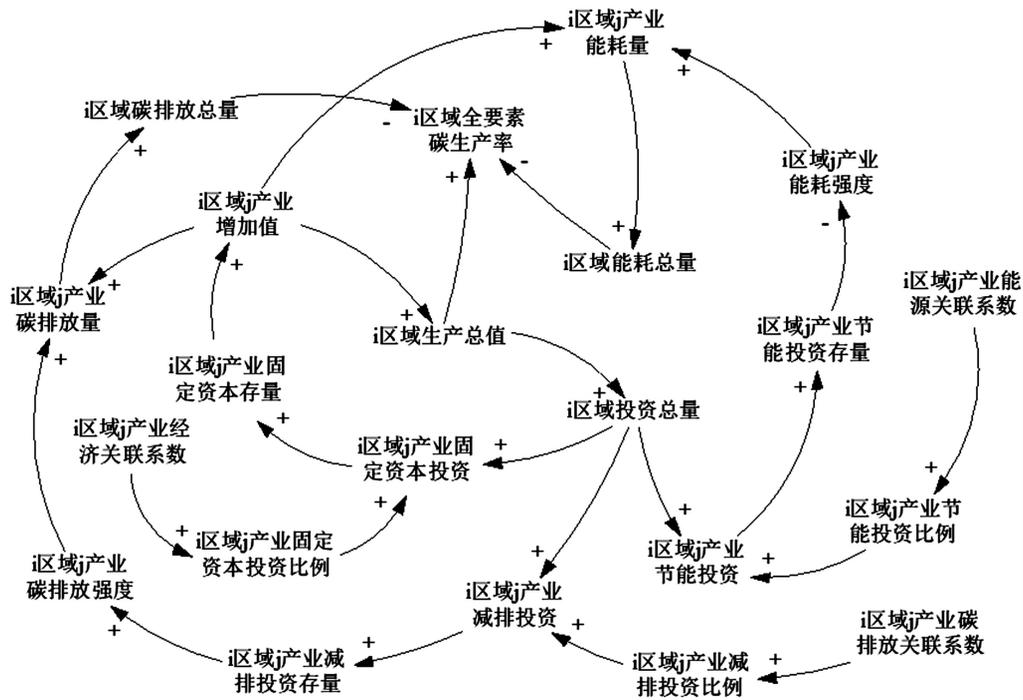


图2 投资驱动全要素碳生产率影响碳达峰的总路径

若基于跨区域产业间在经济方面的关联关系,即通过经济关联系数,合理调整固定资本在不同区域产业间的配置比例,尤其是优势产业,则可以有效改善固定资本的利用效率,提高产业增加值,扩大地区生产总值;而地区生产总值规模的扩张,则会进一步加大固定资本投资力度,同时刺激能源需求,增加碳排放,但强化了资本利用水平。整个过程形成了经济增长正反馈强化路径。若基于跨区域产业间在能源方面的关联关系,即通过能源关联系数,合理调整节能资本在不同区域产业间的配置比例,则可以更有针对性地提高高能耗产业的能源利用水平,降低能耗强度;另外,节能降耗本身又可以降低生产成本,从而扩大产业利润空间,为进一步强化节能资本的利用水平提供支持。整个过程形成了节能降耗负反馈平衡路径,从能源效率视角减少碳排放。若基于跨区域产业间在碳排放方面的关联关系,即通过碳排放关联系数,合理调整减排资本在不同区域产业间的配置比例,则可以有效改善高碳排放产业的碳减排水平,降低碳排放强度,使碳排放总量稳定在合理水平,减少非期望产出,从而弱碳排放对经济的负效应,为进一步强化减排资本的利用水平提供支持,整个过程形成了碳减排负反馈平衡路径,从末端严控碳排放。综上所述,投资驱动下的跨区域协同可以从经济关联、能源关联、碳关联来决定全要素碳生产率改进的路径与程度,进而推进碳达峰进程。

根据索罗余值的定义^[26],以下对上述三条路径分别予以数理解析。

$$TFCP^{(t,t+1)} = \frac{\tau_{t+1}(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 IVA_{ij})_{t+1} - \eta_{t+1}\mu_{t+1}(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 CE_{ij})_{t+1}}{\tau_t(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 IVA_{ij})_t - \eta_t\mu_t(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 CE_{ij})_t} - \alpha \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (FCL_{ij} - FCD_{ij} + FCS_{ij}))_{t+1}}{(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (FCL_{ij} - FCD_{ij} + FCS_{ij}))_t} - \beta \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 LI_{ij})_{t+1}}{(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 LI_{ij})_t} - \gamma \frac{\varphi_{t+1}(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 EC_{ij})_{t+1}}{\varphi_t(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 EC_{ij})_t} \quad (1)$$

其中, $TFCP^{(t,t+1)}$ 表示从 t 到 $t+1$ 时期的全要素碳生产率改进, α 、 β 、 γ 分别为资本、劳动、能源的产出弹性, η_t 为 t 时期碳排放对经济增长的影响系数, τ_t 、 φ_t 、 μ_t 分别为 t 时期固定资本、节能资本、减排资本在跨区域产业间的调整对经济增长、能源消耗、碳排放的影响系数, 其他字母代表含义请参见表 1。从式(1)可以看出, 经济增长路径中, 跨区域产业间经济关联系数的合理调整会增加 τ , 提高产业增加值, 实现地区生产总值的增长, 以经济增长的方式增加式(1)的值; 节能降耗路径中, 跨区域产业间能源关联系数的合理调整会减少 φ , 提高能源利用效率, 降低产业生产成本, 以能源节约的方式增加式(1)的值; 碳减排路径中, 跨区域产业间碳排放关联系数的合理调整会减少 μ , 降低碳排放总量, 改善碳排放对经济的负效应 η , 以碳减排的方式增加式(1)的值。从不同投资方式影响下的关联系数来看, 各区域产业要素配置比例的变化从本质上来说是分配结构的变化, 同时各要素产出弹性在一定时期内可视为不变, 因此, 以上三种路径通过直接或间接的方式增加了式(1)的索罗余值, 当式(1)大于 1 时即实现对全要素碳生产率的改进, 从而优化碳达峰进程。

三、不同空间关联下京津冀全要素碳生产率改进的碳达峰情景分析

为分析投资驱动下不同空间关联方式对全要素碳生产率改进的碳达峰情景, 发掘其改进潜力, 探寻最优改进方式, 本节将设置差异化的空间关联情景, 对比各关联方式下全要素碳生产率的动态变化趋势, 为研究最优碳达峰情景提供依据。

(一) 空间关联情景设置

根据投入产出理论, 资本从关联程度低的产业向关联程度高的产业或区域流动, 会对经济产生更大的正向作用^[27]。因此, 关联程度越高的产业, 资本要素的配置比例应当越高。设 i 区域 j 产业的关联系数为 CC_{ij} , 产业增加值为 IVA_{ij} , 则 i 区域 j 产业总投资占区域 i 投资的比重为 $CC_{ij} \times IVA_{ij} / \sum (CC_{ij} \times IVA_{ij})$ 。对于关联系数, 则可以细分为各区域产业的感应度系数和影响力系数, 以便有效识别出不同产业类型在整个产业链中所起的驱动或拉动作用。由于整个系统涵盖了经济、能源、碳排放三个方面, 因此不同的感应度和影响力系数分别反映了区域间经济、能源和环境的关联程度和影响方向, 从而形成了不同的情景, 相应的系数计算公式如下所示^[28]。

$$\delta_a = \sum_{i=1}^3 \rho_i b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \rho_i b_{ij} \quad (2)$$

$$\theta_a = \rho_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \rho_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} \quad (3)$$

$$\delta_e = \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \sigma_i b_{ij} \quad (4)$$

$$\theta_e = \sigma_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sigma_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} \quad (5)$$

$$\delta_c = \sum_{i=1}^3 \omega_i b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \omega_i b_{ij} \quad (6)$$

$$\theta_c = \omega_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} / \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \omega_i \sum_{j=1}^3 b_{ij} \quad (7)$$

其中, δ 和 θ 分别为感应度和影响力系数, 下标 a 、 e 、 c 分别指代经济、能源、碳排放, 参考既有文献测算方法^[29-30], b_{ij} 为基于《中国区域间投入产出表》价值流量表计算的完全系数矩阵, ρ 、 σ 、 ω 分别表示增加值率、能耗率、碳排放率。增加值率即附加值率, 是某一产业盈利能力和发展水平的综合体现; 能耗率即能耗强度, 为一次能源使用量与经济总产出的比值; 碳排放率即碳排放强度, 为碳排放总量与经济总产出的比值。基于此, 空间关联情景可设置为 7 种: 经济影响力情景(情景 1)、经济感应度情景(情景 2)、能耗影响力情景(情景 3)、能耗感应度情景(情景 4)、碳排放影响力情景(情景 5)、碳排放感应度情景(情景 6), 为了便于对比分析, 文中增设基准情景(情景 7), 即未来每个区域各产业仍延续当前的增长趋势。

(二) 系统动力学模型数据来源、参数设置及有效性检验

除了上文对不同关联系数的计算, 本文其他数据主要源于 2011—2021 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》《京津冀城市群统计年鉴》《中国区域间投入产出表》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及京津冀历年政府统计公报等。经济总量、能耗总量和碳排放总量等关键数据利用软件 Vensim_Dss_5.6a 运行可得。为简化数据模型, 深入研究区域间投资驱动下全要素碳生产率协同改进问题, 各区域产业类型主要分为三次产业。固定资本折旧率一般可设为 10.96%^[31], 而节能投资折旧率和减排投资折旧率则可设为 15%^[32]。由于京津冀煤炭、石油、天然气的消耗总量占一次能源 85% 左右, 因此碳排放计算主要基于此三类能源, 碳排放系数参考国家发改委能源研究所公布的推荐值, 煤炭、石油、天然气分别为 0.7476、0.5852、0.4435, 三项能源在各区域总消耗量中所占比例遵循历史平均变化趋势进行逐年调整。

系统动力学之所以能够处理复杂的系统问题, 除了利用因果回路图便于厘清变量间关系外, 更重要的是可以通过调用其专有软件的内嵌函数及外源自定义函数进行量化, 本文所用的主要方程式如表 2 所示。

在系统分析、预测和辅助决策时, 必须保证模型尽可能准确地反映实际系统, 因此, 模型有效性评估十分有必要, 而众多方法中, 历史误差检验最为直观和方便快捷。

对模型可视化数据进行相对误差检验, 结果见表 3。表 3 可以看出其平均误差均在 6% 以下, 有力证明了所建模型的有效性。

(三) 不同空间关联下京津冀全要素碳生产率的测算与碳达峰情景分析

本节通过对投资驱动不同关联方式下京津冀全要素碳生产率的对比分析, 估计其未来的改进空间以及碳达峰情景。基于 Oh^[33-34] 的相关研究, 全要素碳生产率改进指数 (MML) 可以被定义为:

$$TFCP^{(t,t+1)} = MML(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t, FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1}) \\ = \left[\frac{\vec{D}(FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1})}{\vec{D}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

其中, $\vec{D}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)$ 和 $\vec{D}(FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1})$ 分别为 t 时期、 $t+1$ 时期的共同前沿方向性距离函数, 而 FCS^t 、 LI^t 、 EC^t 、 IVA^t 、 CE^t 则分别为 t 时期的固定资本投入、劳动投入、能源投入、产业增加值以及碳排放量, 相应的数据基于系统动力学模型历年输出结果。由于以上方法对于决策单元的数量限制, 本文以京津冀 13 个城市作为基本研究对象, 同时将河北 11 个城市相关数据进行加总, 生成河北省以及京津冀整体共 15 个决策单元一起进行测算。本文利用 MATALB2015a, 测算出以京津冀为整体的不同空间关联情景下的全要素碳生产率, 结果见图 3。

表 2 系统动力学模型主要方程式

参数名称	方程式及数据来源
北京产业固定资本存量	$INTEG$ (北京产业(固定资本投资-固定资本折旧), L_1)
北京产业节能资本存量	$INTEG$ (北京产业(节能资本投资-节能资本折旧), M_1)
北京产业减排资本存量	$INTEG$ (北京产业(减排资本投资-减排资本折旧), N_1)
北京产业增加值	$X_1 * 北京产业(固定资本存量 \wedge Y_1 * 劳动力 \wedge Z_1)$
京津冀产业经济关联系数	由公式(2)和公式(3)计算而得
京津冀产业劳动力	表函数,参考 2011—2021 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》
京津冀产业固定资本投资	京津冀产业资本投入总量 * 京津冀产业固定资本投资比重
京津冀产业固定资本投资比重	IF THEN ELSE [Time<2020,表函数,京津冀产业经济关联系数 * 京津冀产业增加值 / Σ (京津冀产业经济关联系数 * 京津冀产业增加值)]
京津冀产业固定资本折旧	京津冀产业固定资本存量 * 0.1096
京津冀业资本投入总量	京津冀资本投入总量 * 京津冀产业资本投入比重
京津冀产业节能资本投资	京津冀产业资本投入总量 * 京津冀产业节能资本投资比重
京津冀产业节能资本折旧	京津冀产业节能资本存量 * 0.15
京津冀产业能源消耗量	京津冀产业增加值 * 京津冀产业能源消耗强度
京津冀产业能源消耗强度	表函数,参考 2011—2021 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》
京津冀产业能源关联系数	由公式(4)和公式(5)计算而得
京津冀产业减排资本投资	京津冀产业资本投入总量 * 京津冀产业减排资本投资比重
京津冀产业节能资本投资比重	IF THEN ELSE [Time<2020,表函数,京津冀产业能源关联系数 * 京津冀产业增加值 / Σ (京津冀产业经济关联系数 * 京津冀产业增加值)]
京津冀产业减排资本折旧	京津冀产业减排资本存量 * 0.15
京津冀产业碳排放强度	表函数,京津冀产业(煤炭消耗量 * 0.7476 + 石油消耗量 * 0.5852 + 天然气消耗量 * 0.4435) / GDP
京津冀产业碳排放量	京津冀产业增加值 * 京津冀产业碳排放强度
京津冀产业碳排放关联系数	由公式(6)和公式(7)计算而得
京津冀产业减排资本投资比重	IF THEN ELSE [Time<2020,表函数,京津冀产业碳排放关联系数 * 京津冀产业增加值 / Σ (京津冀产业碳排放关联系数 * 京津冀产业增加值)]
京津冀产业资本投入总量	表函数,参考 2011—2021 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》《中国环境统计年鉴》
京津冀生产总值	Σ 京津冀产业增加值
京津冀碳排放总量	Σ 京津冀产业碳排放量
京津冀能源消耗总量	Σ 京津冀产业能源消耗量
天津产业增加值	$X_2 * 天津产业(固定资本存量 \wedge Y_2 * 劳动力 \wedge Z_2)$
天津产业固定资本存量	$INTEG$ (天津产业(固定资本投资-固定资本折旧), L_2)
天津产业节能资本存量	$INTEG$ (天津产业(节能资本投资-节能资本折旧), M_2)
天津产业减排资本存量	$INTEG$ (天津产业(减排资本投资-减排资本折旧), N_2)
河北产业增加值	$X_3 * 河北产业(固定资本存量 \wedge Y_3 * 劳动力 \wedge Z_3)$
河北产业固定资本存量	$INTEG$ (河北产业(固定资本投资-固定资本折旧), L_3)
河北产业节能资本存量	$INTEG$ (河北产业(节能资本投资-节能资本折旧), M_3)
河北产业减排资本存量	$INTEG$ (河北产业(减排资本投资-减排资本折旧), N_3)

注: L_i 、 M_i 、 N_i 分别表示 i 区域不同类型的初始投资; X_i 、 Y_i 、 Z_i 分别表示 i 区域各要素的经济产出系数

表 3 京津冀可视化数据相对有效性检验

年份	GDP 总量(亿元)			能源消费总量(万吨标准煤)			二氧化碳排放量(万吨)		
	拟合值	真实值	相对误差	拟合值	真实值	相对误差	拟合值	真实值	相对误差
2010	44 031	45 293	2.86%	38 424	39 645	3.17%	27 281	27 751	1.69%
2011	52 677	54 755	3.94%	41 557	40 253	3.24%	29 089	28 177	3.24%
2012	58 182	59 195	1.74%	42 960	41 652	3.14%	29 642	28 323	4.66%
2013	63 892	65 647	2.74%	43 458	42 270	2.81%	29 551	28 320	4.35%
2014	67 962	69 571	2.36%	45 500	43 296	5.09%	30 485	29 008	5.08%
2015	71 179	73 548	3.32%	46 756	44 508	5.05%	31 326	29 375	6.64%
2016	76 605	79 624	3.928	47 533	45 000	5.63%	31 847	29 250	8.87%
2017	84 603	82 559	2.4%	47 451	45 904	3.37%	31 317	30 296	3.37%
2018	85 150	83 139	2.42%	49 029	46 425	5.61%	32 359	30 176	7.23%
2019	86 635	84 580	2.43%	49 927	47 356	5.43%	32 452	30 307	7.08%
2020	87 836	86 393	1.67%	50 446	47 866	5.39%	32 789	30 634	7.04%
平均误差		2.7%			4.4%			5.3%	

可以看出,未来京津冀全要素碳生产率(TFCP)将呈现稳中有升的趋势,其中,2020—2023年,情景2的TFCP最高,而2023—2028年则转变为情景6,之后又调整为情景1。因此,不同时段下,基于全要素碳生产率改进的最优情景差异化特征显著。总体来说,和基准情景7相比,优化情景下的全要素碳生产率预计年均提高超过7%,具有进一步改进的潜质。同时,系统动力学模型结果显示:优化情景下,京津冀碳能源消耗和碳排放分别于2029年、2028年达到52220万吨标准煤以及34506万吨的峰值,显然有利于提前实现碳达峰目标,有效助力碳中和,同时GDP年均增速也可以稳定保持在6%左右,各项指标如图4所示。

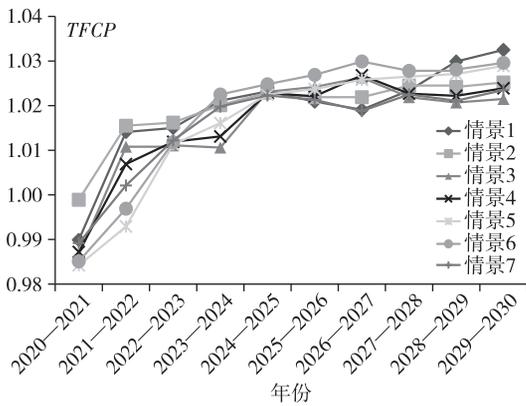


图 3 京津冀不同空间关联下全要素碳生产率

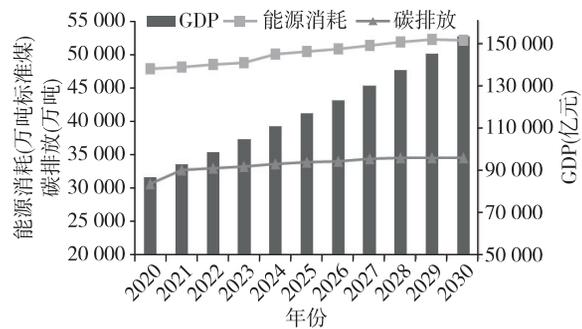


图 4 优化关联下京津冀经济产出、能源消耗以及碳达峰情景

四、优化关联下京津冀全要素碳生产率改进的碳达峰动力来源分解

对比投资驱动下不同空间关联的模拟结果,京津冀全要素碳生产率呈现出差异化特征,通过各类投资对区域关联方式的合理调整,原有的基准情景具备一定的改进潜力。然而,对于全要素碳生产率改进的碳达峰动力来源仍不甚清楚,这不利于探寻其具体改进方向和准确把握投资着力点,因此,本节将对全要素碳生产率做进一步分解,深入剖析以上问题。基于 Oh^[33-34]的研究,全要素碳生产率指数可以被分解为两部分,具体公式如下:

$$\begin{aligned}
TFCP^{(t,t+1)} &= MML(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t, FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1}) \\
&= \left[\frac{\overrightarrow{D}^{-G}(FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1})}{\overrightarrow{D}^{-G}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)} \right]^{1/2} \\
&= \left[\frac{\overrightarrow{D}^{-c}(FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1})}{\overrightarrow{D}^{-c}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)} \times \right. \\
&\quad \left. \frac{\overrightarrow{D}^{-j}(FCS^{t+1}, LI^{t+1}, EC^{t+1}, IVA^{t+1}, CE^{t+1})}{\overrightarrow{D}^{-j}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)} \right]^{1/2} \\
&= \left[\frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \frac{BPR^{t+1}}{BPR^t} \right]^{1/2} \\
&= EC^{(t,t+1)} \times BPC^{(t,t+1)}
\end{aligned} \tag{9}$$

其中, $\overrightarrow{D}^{-c}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)$ 和 $\overrightarrow{D}^{-j}(FCS^t, LI^t, EC^t, IVA^t, CE^t)$ 分别为同期技术集下的方向性距离函数和跨期技术集下的方向性距离函数。 EC 表示效率变动,其经济含义是,比较不同时期决策单元相对于生产前沿面的距离,即不同时期的实际产出水平与各自最优产出水平的距离之比。如果 $EC > 1$,则效率改进,意味着投入产出水平更接近于当期最佳生产前,表现出追赶效应。 BPC 代表技术变动,其经济含义是,比较不同时期生产前沿面的移动距离,即相同投入在不同时期的最优产出水平之比。如果 $BPC > 1$,则技术进步,意味着当期生产前沿在期望产出增加且非期望产出减少的方向上向跨期生产前沿移动。若 EC 和 BPC 的乘数效应使得 $MML > 1$,则全要素碳生产率得到有效改进,优化碳达峰路径。

图 5 为优化关联下京津冀全要素碳生产率以及分解结果,可以看出,为实现碳达峰,2020—2023 年,投资驱动下的效率改进对全要素碳生产率的贡献最大,如何促进区域间要素合理流动,提高配置效率成为京津冀全要素碳生产率提高的关键;2023—2030 年,投资驱动下的技术进步是京津冀全要素碳生产率提升的主要驱动力,应重点突出科技创新领域的引领和溢出效应,进而提高京津冀的整体技术水平,实现产业价值链的攀升,保证区域的综合发展。实证结果证明,投资驱动全要素碳生产率协同改进的碳达峰情景主要依赖于效率改进和技术进步,且在不同时段会有所差异,应根据具体情况进行实时性的灵活调整。

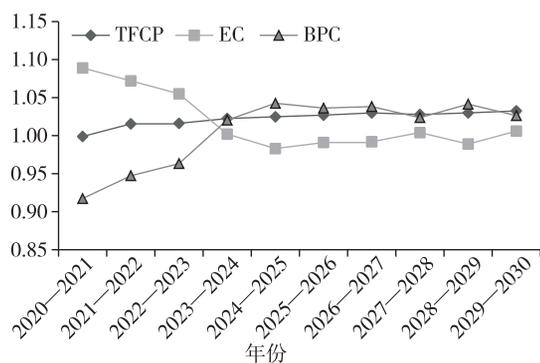


图 5 优化关联下京津冀全要素碳生产率及分解

五、结论与政策建议

(一) 研究结论

为研究投资驱动下跨区域协同效应的碳达峰情景,本文对不同关联方式下的系统动力学机理进行解析,并通过模拟仿真,估计 2020—2030 年间京津冀全要素碳生产率的提升潜力,识别优化关联方式下不同时段全要素碳生产率改进的碳达峰动力来源,得出:空间关联方式的改变对京津冀全要素碳生产率协同效应的发挥产生显著影响,其内在驱动力可分解为技术进步和效率改进,成为推动碳达峰的根本驱动力。进一步结论分析如下:

(1) 投资驱动京津冀全要素碳生产率协同改进的显著变量在不同时段需灵活性切换。具体表现为,2020—2023 年,京津冀应按产业间的经济影响力大小配置资源,即以固定资产投资充分发挥各区

域产业优势互补的引领作用,实现后疫情时代经济的高质量复苏;2023—2028年,则应根据产业间的碳排放影响力大小进行资源调配,即以减排投资严控高碳排放行业,贯彻落实区域碳减排理念;2028—2030年,以产业间的经济感应度大小引导资源合理流动,即通过固定资本投资的合理配置促使京津冀大部分行业生产率沿产业链同步提高。

(2)京津冀全要素碳生产率协同改进的动力来源需阶段性调整。具体表现为,2020—2023年,京津冀各类投资应以效率改进为先,逐步摒弃资源低效的发展模式,从减少资源浪费入手,压缩碳排放的冗余空间;2023—2030年,京津冀各类投资则应以技术进步为主导,确立技术创新的发展基调,促进先进技术的空间溢出,刺激全行业生态化转型,充分发挥低碳创新的“羊群效应”。

综上所述,京津冀全要素碳生产率有进一步协同改进的空间,亟待投资驱动合理的空间关联方式来引导劳动、资本、技术等生产要素在区域间的最佳配置与有效供给,以充分发挥空间溢出效应。和基准情景相比,优化关联下的京津冀全要素碳生产率有年均超过7%的改进潜力,这将使其能源消耗总量和碳排放总量分别于2029年、2028年达到52220万吨标准煤、34506万吨的峰值。保证年均GDP增速稳定在6%左右,有助于提前实现“双碳”目标,迎合我国现阶段高质量发展要求。

(二) 对策建议

(1)从点到面的区域产业投资驱动方式将优化跨区域空间关联,突出不同时期各区域产业的最佳定位,推动京津冀全要素碳生产率协同改进,形成更为合理的碳达峰路径。2023年之前,京津冀应以固定投资方式充分发挥各区域优势产业的示范效应,为后疫情时代的经济高质量增长注入强劲活力。其中,北京应围绕文化与科技,重点打造短视频社交、电影艺术、人工智能、大数据分析等产业,锚定“四个中心”的核心引导作用;天津应聚焦航空航天、装备制造、电子信息、生物医药等先进制造业,打通科技研发与成果转化,带动周边产业向高端价值链攀升;河北应通过食品加工、金属冶炼、石油化工、电力供应等传统资源产业的生态化转型,塑造完善的产业链供应体系。2023—2028年,京津冀应通过减排投资着重治理石油化工、金属冶炼、电力供应等行业的高碳排放行为,通过总量控制与碳交易市场等手段,充分发挥北京高新技术服务中心的作用,提高整个区域的碳减排技术水平,同时又要避免在疏解首都功能过程中,造成河北不合时宜的高碳产业承接。2028年以后,通过多年的发展沉淀,京津冀应借助固定投资将发展重心转移到全行业,借助曹妃甸、滨海-中关村等产业园区,沿产业链充分发挥溢出效应,以“一盘棋”思维打造优势互补、互利共赢的产业协同发展格局。

(2)为优化碳达峰路径,投资驱动京津冀全要素碳生产率协同改进应当遵循效率优先、技术主导的发展模式。2023年之前,京津冀尤其在河北地区,效率低下仍是常态,因此,投资核心在于效率改进,应着重依托于各区域关键产业在资源配置、管理运营等方面的效率优势,完善京津对河北的配套服务,使得效率优化态势向整个产业链扩散,从而带动周边产业的快速崛起。而2023年以后,京津冀投资则应侧重利用技术进步来提高产业竞争力,首先鼓励高碳排放行业的减排技术创新与应用,实行差别化管理和渐进式退出,避免其成为高质量发展的瓶颈产业,然后注重提高区域产业生产、节能、减排等各个环节的整体技术水平,实现真正的低碳经济创新。就各区域而言,应充分释放北京的科技创新活力,大力推动津冀地区传统产业转型升级和新兴产业培育,促进产业链与创新链的深度融合。总而言之,合理的投资方式既可以提升劳动力、资本等传统有形要素的利用效率,也有利于提升知识、技术等无形要素的传播效率。具体来说,河北可以通过北京和天津的人才、资金、技术、知识等高级稀缺要素吸引高技术产业的集约发展,摒弃落后产业粗放的增长模式;而北京和天津则可以充分利用河北丰富的生态资源和充裕的劳动力来降低生产成本,助推区域协同发展。

综上所述,从经济增长和碳减排的空间格局视角,以投资驱动区域间产业关联的方式实现全要素碳生产率协同改进,有利于跨区域产业合作,增强空间溢出效应对产业生产率的提升作用,从追求单区域效率向整体效率转变,从改善区域发展水平不平衡向改善区域发展效率不平衡转变,进而在本质上优化京津冀跨区域协同碳达峰路径。

[参 考 文 献]

- [1] YOKOBORI Y K A K. Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1997.
- [2] HE J K, DENG J, SU M S. CO₂ Emission from China's Energy Sector and Strategy for Its Control[J]. Energy, 2010, 35(11): 4494-4498.
- [3] FAN M T, SHAO S, YANG L L. Combining Global Malmquist-Luenberger Index and Generalized Method of Moments to Investigate Industrial Total Factor CO₂ Emission Performance: A Case of Shanghai (China) [J]. Energy Policy, 2015, 79: 189-201.
- [4] 孙立成, 程发新, 李群. 区域碳排放空间转移特征及其经济溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 17-23.
- [5] ZHANG Y, ZHENG H M, YANG Z F, et al. Urban Energy Flow Processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) Urban Agglomeration: Combining Multi-regional Input-output Tables with Ecological Network Analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 243-256.
- [6] 汪明月, 刘宇, 李梦明, 等. 区域碳减排能力协同度评价模型构建与应用[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(2): 470-483.
- [7] 赫永达, 文红孙, 传旺. “十四五”期间我国碳排放总量及其结构预测——基于混频数据 ADL-MIDAS 模型[J]. 经济问题, 2021(4): 31-40.
- [8] 刘志华, 徐军委, 张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的 PVAR 分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 508-520.
- [9] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究, 2022, 57(1): 56-71.
- [10] 张宁. 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据[J]. 经济研究, 2022, 57(2): 158-171.
- [11] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. 中国工业经济, 2017(3): 44-62.
- [12] 孙博文, 张友国. 中国绿色创新指数的分布动态演进与区域差异[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(1): 51-70.
- [13] 丁冠群, 王铮, 孙翊. 基于多行业 DSGE 模型的中国碳减排政策效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(1): 19-29.
- [14] 晏清, 贺超飞, 郭焕修. 基于区域一体化的长三角城市碳达峰实证研究[J]. 世界经济与政治论坛, 2022(3): 150-172.
- [15] 张宁. 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据[J]. 经济研究, 2022, 57(2): 158-171.
- [16] 王兆峰, 汪倩. 长江经济带新型城镇化对旅游业碳排放的门槛效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 13-22.
- [17] 刘华军, 刘传明, 陈明华. 中国工业 CO₂ 排放的行业间传导网络及协同减排[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 90-99.
- [18] 蒋和胜, 孙明茜. 碳排放权交易、产业结构与地区减排[J]. 现代经济探讨, 2021(11): 65-73.
- [19] CHENG Z H, LI L S, LIU J, et al. Total-factor Carbon Emission Efficiency of China's Provincial Industrial Sector and Its Dynamic Evolution [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 330-339.
- [20] LONG R Y, SHAO T X, CHEN H. Spatial Econometric Analysis of China's Province-level Industrial Carbon Productivity and Its Influencing Factors [J]. Applied Energy, 2016, 166: 210-219.
- [21] 李涛, 傅强. 中国省际碳排放效率研究[J]. 统计研究, 2011, 28(7): 62-70.
- [22] 周五七, 聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, 29(9): 58-70, 161.
- [23] 李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 等. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J]. 经济地理, 2015, 35(11): 21-28.
- [24] 林晓, 徐伟, 杨凡, 等. 东北老工业基地绿色经济效率的时空演变及影响机制——以辽宁省为例[J]. 经济地理, 2017, 37(5): 125-132.
- [25] 袁礼, 欧阳晓. 发展中大国提升全要素生产率的关键[J]. 中国工业经济, 2018(6): 43-61.
- [26] SOLOW R M. Technical Change and the Aggregate Production Function [J]. The Review of Economics and Statistics, 1957, 39(3): 312.
- [27] 沃西里·里昂惕夫. 投入产出经济学 [M]. 北京: 商务印书馆, 2009.
- [28] 肖皓, 朱俏. 影响力系数与感应度系数的评价与改进——考虑增加值和节能减排效果[J]. 管理评论, 2015, 27(3): 57-66.
- [29] 刘伟, 蔡志洲. 技术进步、结构变动与改善国民经济中间消耗[J]. 经济研究, 2008, 43(4): 4-14, 40.
- [30] 张伟, 王韶华. 区域产业投资的直接效应、溢出效应和反馈效应[J]. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(2): 58-75.
- [31] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952—2006 年 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17-31.
- [32] 吴延兵. R&D 存量、知识函数与生产效率[J]. 经济学(季刊), 2006, 5(3): 1129-1156.
- [33] OH D H, LEE J D. A Metafrontier Approach for Measuring Malmquist Productivity Index [J]. Empirical Economics, 2010, 38(1): 47-64.
- [34] OH D H. A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index [J]. Journal of Productivity Analysis, 2010, 34(3): 183-197.

(责任编辑 余 敏)