

区域产业结构升级与碳排放协调发展路径的动力学分析与策略研究

李堂军, 肖晓蕾

(山东科技大学 经济管理学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 选取山东省 2006—2022 年的面板数据, 利用超效率 SBM 模型, 测算碳排放效率值; 并基于系统动力学方法, 从经济、社会、环境、技术等方面, 以产业结构升级和碳排放效率协调发展为目标, 分析因果关系, 构建动态仿真模型, 情景模拟不同政策路径。研究发现, 2006—2022 年间山东省产业结构升级指数稳定上升, 碳排放效率在 2012 年前后先降后升; 公众关注度、成果转化率和技術吸收转化能力是促进山东省产业结构升级指数和碳排放效率协调发展的关键因素, 而市场需求是制约因素。针对山东省在碳排放上的实际情况, 较为合适的发展路径是增强社会意识、加速科技成果应用、强化企业技术创新能力, 以及控制市场需求以平衡经济发展和环境保护。

关键词: 产业结构升级; 碳排放效率; 系统动力学; 碳达峰; 碳中和

中图分类号: F061.5; N941.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-7699(2025)01-0092-12

一、引言

全球气候变化加剧, 碳排放问题已成为各国高质量发展过程中面临的重大挑战。2015 年 178 个国家的领导人在法国巴黎签署一项关于共同应对全球气候变化的协议——《巴黎协定》; 中国承诺将力争于 2030 年前实现碳达峰, 并争取于 2060 年前实现碳中和^[1]。如何通过优化产业结构提高产业附加值和能源利用效率, 降低单位 GDP 能耗和碳排放强度, 是实现碳达峰、碳中和目标的关键^[2]。

作为我国重要的工业基地和北方地区经济发展的战略支点, 山东省的产业结构以重化工业为主, 能源消耗和碳排放水平较高。根据 2023 年中经数据统计显示, 全省能源消费总量约为 4.82 亿吨标准煤, 占全国能源消费总量的 10%; 碳排放强度为 0.47 吨二氧化碳/万元 GDP, 高于 0.38 吨二氧化碳/万元 GDP 的全国平均水平。对于山东省而言, 产业结构升级是降低碳排放的重要途径, 也是提升经济竞争力的必然要求, 需要通过优化产业布局, 淘汰落后产能, 推动重化工业向高端化、绿色化、集约化方向转型, 培育壮大新兴产业, 形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局。但产业结构升级与碳排放效率协调发展是一个动态的、复杂的、非线性的系统问题, 受到多种因素的共同作用。这些因素之间的关系并不是简单的线性关系, 而是具有时间滞后、阈值效应、路径依赖等特征, 需要进行系统性的分析和预测。运用系统动力学方法, 可以揭示山东省产业结构升级和碳排放效率协调发展的内在逻辑和规律, 识别系统中的关键变量和参数, 评估不同政策干预的效果和影响, 帮助山东省优化产业结构布局, 提高能源利用效率, 推动工业用能电气化、数字化、智能化、绿色化, 培育发展绿色低碳产业, 加快实现碳达峰、碳中和目标。为此, 本文运用系统动力学方法, 建立一个包含产业结构、能源结构、碳排放效率等变量的动态模型, 分析不同的政策干预对山东省碳达峰、碳中和目标的影响, 以期对政府政策系统性优化提供理论参考。

收稿日期: 2024-01-04

作者简介: 李堂军(1965—), 男, 山东临朐人, 山东科技大学经济管理学院教授, 硕士生导师。

二、相关文献梳理与分析

产业结构升级是实现经济高质量发展和生态文明建设的重要途径,也是应对全球气候变化和实现碳达峰、碳中和目标的重要手段。^[3]产业结构升级与碳排放效率协调发展,既是产业绿色低碳转型的内在要求,也是履行责任和参与全球环境治理的外在压力。^[4]产业结构升级与碳排放效率之间的相互作用机制和路径是众多学者关注的研究课题。现有研究表明,产业结构升级可以通过以下途径影响碳排放效率:一是加快绿色技术创新;^[5]二是增加第三产业在国民经济中的比重;^[6]三是优化第二产业内部结构;^[7]四是深度参与全球价值链^[8];五是加强环境保护政策和法规,^[9,10]尤其是碳排放交易政策的优化与完善可以显著促进区域产业结构升级^[11]。还有学者从碳约束条件下的产业结构优化模型、^[12]碳税政策对产业结构升级的激励作用、^[13]碳达峰目标对产业结构调整^[14]的影响等方面进行了模拟研究。

针对不同国家、地区或行业的产业结构升级与碳排放效率之间的关系,有学者运用计量模型、指数分解法、生命周期分析法等方法进行了实证检验^[15]。江深哲等通过构建多部门一般均衡模型发现,通过改变各产业的生产成本推动了产业结构转型;^[16]刘志华等运用 PVAR 模型发现两者存在长期均衡关系和双向因果关系。^[17]LIU 等运用 LMDI 分解法分析产业结构升级对碳排放强度变化的贡献度;^[18]宁论辰等运用超效率 SBM 模型评估碳排放效率及影响因素^[19]。邵帅等基于 DEA 数据包络模型发现,经济结构调整和绿色技术进步对中国低碳转型发展具有显著的促进作用。^[20]

为推动产业结构升级与碳排放效率协调发展,学者们也提出了一系列的政策建议。如宏观层面,有学者主张采取加强顶层设计、^[21]建立市场机制、^[22]加大技术创新^[23]等措施,抢抓碳达峰碳中和重大战略机遇,深度调整产业结构、^[24]大力发展绿色低碳产业等,^[25]实施政策干预,推行碳税和碳交易,鼓励碳减排的投资和创新^[26]。微观层面,有学者主张优化企业布局、^[27]增强企业社会责任,^[28]以促进企业绿色低碳转型、完善企业碳排放核算和信息披露制度、激励企业参与碳市场交易和绿色供应链建设等^[29,30]。

综上所述,国内外关于产业结构升级与碳排放效率协调发展的研究已经取得了一定的成果,但也存在一些不足。一方面,缺乏对产业结构升级与碳排放效率之间的非线性关系和阈值效应的深入研究,并未就两者间的复杂系统性和动态反馈形成充分认识。产业结构升级与碳排放效率之间不仅存在单向影响,还存在双向影响和多重影响。另一方面,与仅考虑二氧化碳排放量的方法相比,通过运用超效率 SBM 模型计算出山东省历年的碳排放效率值,将更能准确和科学地反映地区碳排放水平。鉴于此,本文的边际贡献在于,以山东省产业结构升级和碳排放效率之间的非线性关系为切入点,深入探讨两者之间的动态演变和长期影响,以期拓展现有研究的广度。

三、系统建模与仿真

(一)产业结构升级的边界分析

产业结构升级是指通过技术创新、产业转移、资源节约等方式,提高产业的附加值、竞争力和可持续性。为了分析产业结构升级的影响因素和动力机制,需要从多个维度进行综合考量。PEST 分析模型强调对一切影响行业和企业的外部因素作分析,虽然不同行业和企业根据自身特点和经营需要分析的具体内容会有差异,但一般都应对政治(Political)、经济(Economic)、社会(Social)和技术(Technological)这四大类影响企业的主要外部环境因素进行分析。以此为理论基础,结合山东省的实际情况和发展目标,本文主要从政策环境、社会诉求、市场压力、技术创新、人才培养、环境要求维度分析产业结构升级。

1. 政策环境维度。政府意愿、政府支持力度和全社会固定资产投资是影响产业结构升级和碳排放效率协调发展的重要因素。政府意愿和政府支持力度反映了政府在相关政策执行中的态度,全社会固定资产投资反映了全社会用于扩大生产能力、改善生产条件或增加物质财富的固定资产投资形式。

2. 社会诉求维度。该维度主要包括公众关注度、经济密度、社会责任感等因素。公众关注度反映了

公众对相关问题的关心和参与程度,经济密度反映了经济活动在空间上的分布特征。

3. 市场压力维度。该维度主要包括地区生产总值、城镇化水平、市场需求等因素。地区生产总值反映了经济的规模增长贡献,城镇化水平反映了人口的分布、流动和素质,市场需求反映了消费者对产品或服务的偏好和需求,是产业结构升级的外部驱动力之一。

4. 技术创新维度。技术创新受到专利授权量、技术创新投入、科研人员数量、技术吸收转化能力、成果转化率、研究成果等因素的影响,这些因素综合反映了一个国家或地区对科技创新的投入水平、研发效果等方面的情况。

5. 人才培养维度。人才培养受到高校经费投入、教师数量、高校数量、研究生人数等因素的影响,这些因素反映了一个国家或地区对高等教育的支持力度、投入产出效率等方面的情况。

6. 环境要求维度。环境要求维度受到单位地区生产总值能源消耗总量和全年用电总量等因素的影响,这些因素反映了一个国家或地区的经济发展水平和消费结构、能源利用效率和节约水平、能源供给等方面的情况。

(二)碳排放效率边界分析

1. 碳排放效率的原因分析

碳排放效率是指单位 GDP 的碳排放量,反映了经济发展与碳排放的关系。根据本文的研究对象和研究目标,将影响碳排放效率的因素归结于政府环境规制、产业结构升级、能源消费结构、技术进步、城镇化水平这五点。在政府环境规制层面,政府通过制定和实施各种环境法律法规,对企业 and 个人的碳排放行为进行约束和激励,一般用环境规制强度或环境规制成本等指标来衡量。在产业结构层面,一般来说,一、三产业的碳排放效率均低于第二产业,特别是显著低于重工业的碳排放效率。因此,产业结构升级有利于提高碳排放效率,且常用第二产业或重工业占比等指标来衡量碳排放效率。就能源消费结构而言,其指不同能源在能源消费中的比重,一般用非化石能源或煤炭占比等指标来衡量。技术进步则可以降低单位产出的能源消耗和碳排放,从而提高碳排放效率,一般用研发投入、专利申请、技术密集度等指标来衡量。城镇化水平指标的提高可以促进产业结构升级、能源消费结构优化、技术进步等,从而提高碳排放效率,一般用城镇化率等指标来衡量。

2. 碳排放效率的结果分析

提高碳排放效率有利于节约能源、降低污染、改善生态、促进可持续发展,但碳排放效率的提高也可能对经济增长产生一定的负面影响。基于本文的研究对象和研究目标,碳排放效率既可以作为一个结果,也可以成为一个原因,其受到产业结构、能源消费结构、技术进步、城镇化水平等因素的影响。同时,碳排放效率也会影响经济增长、环境质量、社会福利等。

(三)边界汇总分析

综上所述,对产业结构升级和碳排放效率边界进行分析,可以得到整个系统的边界,最终汇总得到的边界如表 1 所示。

表 1 产业结构升级和碳排放效率边界汇总

要素类别	边界要素名称
产业结构升级	高校经费投入
	教师数量
	高校数量
	研究生人数
	研究成果
	科研人员数量
	专利授权量
	成果转化率
	碳排放效率
协同影响要素	经济密度
	公众关注度
	政府意愿
	全社会固定资产投资
	市场需求
	技术创新投入
	政府支持力度
常住人口城镇化率	
从业人员	
技术吸收转化能力	

(四) 反馈回路

在确定产业结构升级和碳排放效率系统边界的基础上,按照系统动力学建模步骤,需要对系统内部的因果关系进行分析。由于系统边界内包含众多变量,为了构建清晰且具有代表性的因果关系图,依据变量的重要性和影响力进行了筛选。筛选标准主要基于以下几个方面:变量在系统中的核心地位,即对产业结构升级和碳排放效率具有直接影响的关键因素;变量之间的相互作用强度,优先选择那些在系统反馈机制中起到关键驱动作用的变量;最后,变量的可测量性和数据可得性,确保所选变量能够通过实际数据进行验证和模拟。

经过综合评估,选取了以下几个关键变量构建山东省产业结构升级和碳排放效率之间的因果关系图(如图1所示)。这些变量不仅涵盖了经济、社会、技术等主要方面,还反映了系统中最为重要的动态反馈机制。通过这些关键变量的因果关系分析,能够清晰地揭示山东省产业结构升级与碳排放效率协调发展的内在逻辑和主要驱动因素。

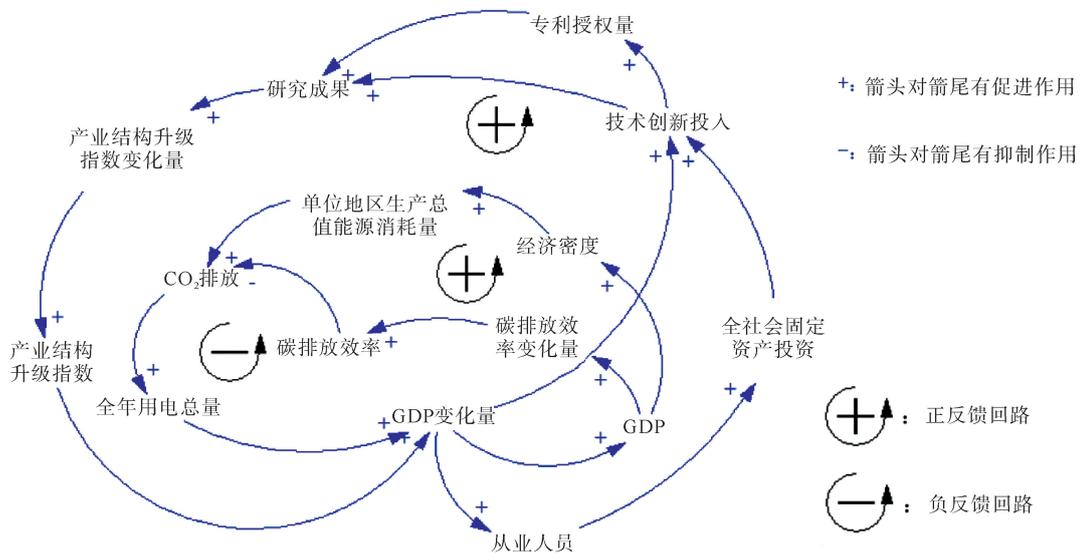


图1 山东省产业结构升级和碳排放效率因果关系图

(五) 产业结构升级和碳排放效率的系统动力学模型构建

1. 产业结构升级和碳排放效率系统变量分类

(1) 状态变量:也称为存量变量,是系统中起到累积作用的量,需要定义初始值。状态变量是系统状态或特征的度量,它们随时间的变化反映系统的动态行为。

地区生产总值(Gross Domestic Product, GDP):指在一定时期内一个地区生产活动的最终成果,本文主要指山东省报告期内的经济生产总值。

产业结构升级指数(Industrial Structure Upgrading Index, ISUI):本文构建产业结构升级指标方法如下:产业结构升级=第二产业附加值比重×第二产业附加值率+第三产业附加值比重×第三产业附加值率。该指标综合考虑了第二产业和第三产业的比重和质量,能够更准确地反映山东省产业结构升级的真实水平。其取值范围为0~100,数值越高,表示产业结构升级水平越高,数值越低,表示产业结构升级水平越低。测算公式如下:

$$ISUI = \left[\left(\frac{Y_2}{Y} \times \frac{Y_2}{Z_2} \right) + \left(\frac{Y_3}{Y} \times \frac{Y_3}{Z_3} \right) \right] \times 100\%, \quad (1)$$

其中, Y 为全省地区生产总值, Y_2 、 Z_2 分别表示第二产业增加值和总产值, Y_3 、 Z_3 分别表示第三产业增加

值和总产值。

碳排放效率(Carbon Emission Efficiency, CEE):采取非期望产出超效率 SBM 模型^[33]计算山东省报告期内的碳排放效率。在考虑非期望产出的超效率 SBM 模型中,假设对 n 个决策单元(DMU)的碳排放效率进行测度,每个 DMU 有 m 项投入变量, q 个期望产出, h 个非期望产出,构建包含非期望产出的超效率 SBM 模型

$$CEE = \min_{\lambda, s^-, s^+} \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{io}}}{1 - \frac{1}{q+h} (\sum_{r=1}^q \frac{s_r^+}{y_{ro}} + \sum_{k=1}^h \frac{s_k^-}{b_{ko}})}, \tag{2}$$

$$s. t. \begin{cases} x_{io} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^-, i = 1, 2, \dots, m; \\ y_{ro} \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{rj} + s_r^+, r = 1, 2, \dots, q; \\ b_{ko} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j b_{kj} - s_k^-, k = 1, 2, \dots, h; \\ \lambda_j \geq O(\forall j), s_i^- \geq O(\forall i), s_r^+ \geq O(\forall r), s_k^- \geq O(\forall k) \end{cases}, \tag{3}$$

其中, x_i 、 y_r 和 b_k 分别代表投入变量、期望产出和非期望产出, s_i^- 、 s_r^+ 和 s_k^- 分别为投入变量、期望产出和非期望产出的松弛变量, λ 为权重向量。

(2)速率变量:该变量是作用于状态变量的微分性质的量,它们决定了状态变量增加或减少的速度。

生产总值变化量(Change in Gross Domestic Product, CGDP):指一定时期内山东省经济活动中所生产出的全部最终产品和劳务的市场价值与上一时期相比的变化量。

产业结构升级指数变化量(Change in Industrial Structure Upgrading Index, CISUD):指一定时期内山东省产业结构升级指数与上一时期相比的变化量。

碳排放效率变化量(Change in Carbon Emission Efficiency, CCEE):指一定时期内山东省碳排放效率与上一时期相比的变化量。

(3)辅助变量:是决定系统结构和行为的重要参数,本文构建系统动力学模型所需的辅助变量见表 2。

2. 数据来源

在模型中,部分变量通过历年《山东省统计年鉴》、各地级市统计年鉴以及中国碳核算数据库等官方网站获取。由于个别年份的数据缺失,研究中采用插值法进行补充。对于模型中难以获取数值的变量,结合实际数据对这些变量进行了主观赋值。具体而言,有以下四个辅助变量:公众关注度,选取官方媒体对低碳问题的播报数量来衡量公众对此问题的

表 2 辅助变量汇总表

变量名称	简称
公众关注度(Public attention)	PA
政府意愿(Government will)	GW
全社会固定资产投资(Fixed assets investment in the whole society)	FAIWS
经济密度(Economic density)	ED
单位地区生产总值能源消耗总量(Energy consumption/GDP)	EC/GDP
常住人口城镇化率(Permanent population urbanization rate)	PPUR
高校经费投入(University funding)	UF
教师数量(Number of teachers)	NT
高校数量(Number of universities)	NU
研究生人数(Number of graduate students)	NGS
研究成果(Research results)	RR
CO ₂ 排放(Carbon emission)	CE
从业人员(Workforce)	WF
全年用电总量(Annual electricity consumption)	AEC
技术创新投入(Technological innovation investment)	TII
专利授权量(Patent grants)	PG
科研人员数量(Number of researchers)	NR
市场需求(Market demand)	MD
政府支持力度(Government support)	GS
成果转化效率(Result conversion rate)	RCR
技术吸收转化能力(Technology absorption capacity)	TAC

关注程度;政府意愿,选取科学技术支出占全省财政预算支出的比例,作为反映政府对科技研发的支持意愿程度的指标;政府支持力度,使用科技创新发展基金来显示政府对技术创新的直接资助水平;技术吸收转化能力,选取重要科技成果项数及发明专利授权量来共同评估企业的技术吸收和转化能力。

3. 产业结构升级和碳排放效率系统流图构建

使用系统动力学软件 VENSIM 进行模拟仿真,具体见图 2。模型运行范围为 2006—2022 年,仿真步长为 1 年。其中,2006—2010 年是模型运行与实际情况的检验年限,进行模型调试和相关变量参数的确定;2011—2022 年是系统政策仿真的预测年限,模拟预测未来的产业结构升级指数以及碳排放效率。在建立系统动力学仿真模型的过程中,需要为模型中的状态变量、速率变量和辅助变量赋予初始值或方程式。根据 2006 年的统计数据为状态变量赋予初始值,根据已有研究、资料统计、取平均值等方法为参数变量赋值,根据计量回归、经验公式等方法确定辅助变量间的方程式。

模型的重要变量及参数方程如下:

(1) $GDP = INTEG(GDP \text{ 变化量}, GDP \text{ 初始量})$;

(2) $GDP \text{ 变化量} = \text{产业结构升级指数} \times 213\,480 + \text{全年用电总量} \times (-9.707\,52) + \text{全社会固定资产投资} \times 1.417\,17 + \text{市场需求} \times (-250\,37.8) + \text{碳排放效率} \times (1.122\,83) + 141\,493$;

(3) $\text{产业结构升级指数} = INTEG(\text{产业结构升级指数变化量}, \text{产业结构升级指数初始值})$;

(4) $\text{产业结构升级指数变化量} = \text{研究成果} \times (-5.162\,079) + 0.027\,585$;

(5) $\text{碳排放效率} = INTEG(\text{碳排放效率变化量}, \text{碳排放效率初始值})$;

(6) $\text{碳排放效率变化量} = \text{技术吸收转化能力} \times GDP - 0.007\,185$;

(7) $\text{研究成果} = \text{专利授权量} \times (-0.013\,368) + \text{公众关注度} \times 25.249\,7 + \text{成果转化效率} \times (-249.291) + \text{研发支出} \times 0.000\,222 + 1\,592.94$;

(8) $\text{单位地区生产总值能源消耗总量} = \text{经济密度} \times 0.233\,192 + 0.006\,798$;

(9) $CO_2 \text{ 排放} = \text{单位地区生产总值能源消耗总量} \times 2\,935.86 + \text{碳排放效率} \times (-2\,839.85) + 1\,923.08$ 。

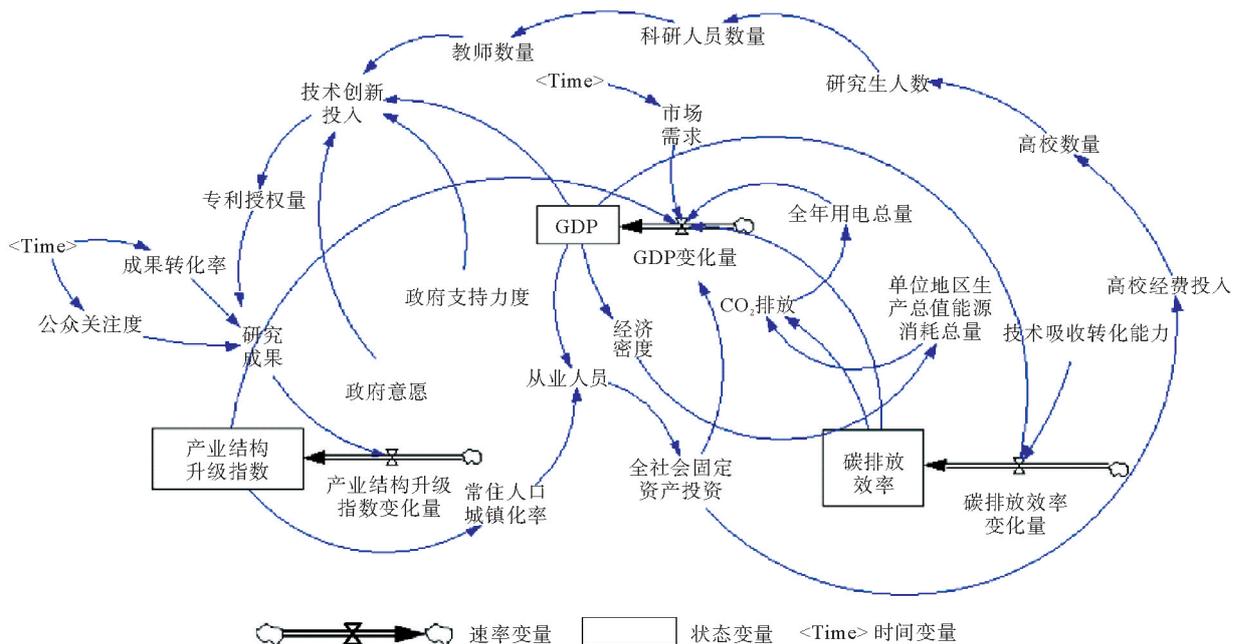


图 2 山东省产业结构升级和碳排放效率系统流图

4. 模型有效性检验

在进行系统仿真预测之前,要检验模型的准确性和有效性。本文采用了历史性检验的方法,选取了

对系统影响较大的状态变量和主要的辅助变量进行检验,将这些变量的仿真值与 2006—2010 年的真实值进行对比。如表 3 所示,所选取变量的仿真值与真实值拟合的误差均小于 5%,符合复杂系统模型仿真的误差要求,因此认为模型具有可信度和有效性,可以进行政策模拟。

表 3 主要变量历史性检验

变量	比较值	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
产业结构升级指数	真实值	2.191 122	2.210 274	2.223 943	2.238 230	2.257 214
	模拟值	2.191 120	2.207 500	2.223 760	2.239 760	2.255 380
	误差(%)	-0.000 91	-0.130 01	-0.008 22	0.068 03	-0.081 01
碳排放效率	真实值	0.510 740	0.488 389	0.522 244	0.479 867	0.478 346
	模拟值	0.510 741	0.507 735	0.505 098	0.503 045	0.501 844
	误差(%)	0.000 06	3.960 00	-3.280 00	4.830 00	4.910 00
GDP/亿元	真实值	22 345.23	23 752.32	28 898.08	31 047.89	35 903.89
	模拟值	22 345.20	24 323.00	28 440.70	31 998.20	36 972.60
	误差(%)	-0.000 13	2.400 00	-1.580 00	3.060 00	2.980 00

四、路径模拟与选择

(一) 基准路径结果分析

对山东省产业结构升级指数和碳排放效率在 2006—2022 年的结果进行仿真和分析,以观察山东省在该时段的经济、环境发展轨迹。仿真结果如图 3 所示。

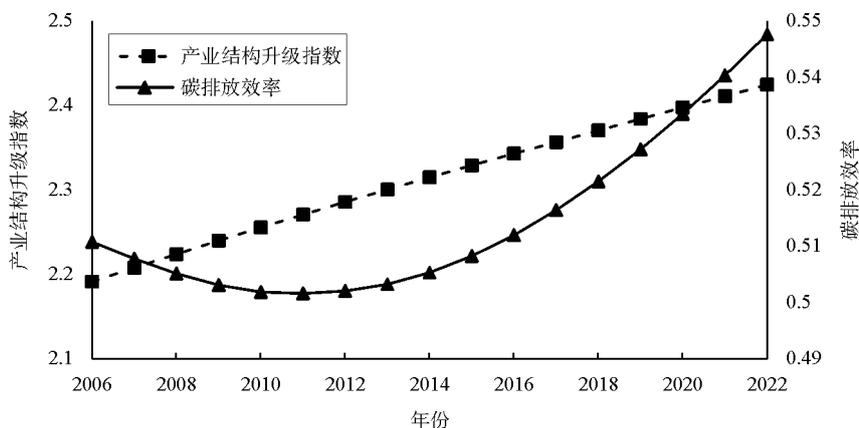


图 3 基准路径下产业结构升级和碳排放效率发展态势

从图 3 可知,在基准路径下,山东省的产业结构升级指数和碳排放效率都呈现了稳定的上升趋势,但是增速缓慢。说明山东省在这段时间内,虽然实现了一定程度的产业结构优化和能源结构调整,但是还没有形成明显的转型效应,仍然面临着产业结构低端化、能源消耗高强度、环境污染严重等问题。因此,本文认为山东省在发展过程中需要解决以下几个问题:一是,如何平衡产业结构升级和碳排放控制之间的关系,实现绿色发展和低碳转型;二是,如何突破碳排放效率提高的瓶颈,加快推进清洁能源和节能减排技术的发展和运用;三是,如何实现产业结构优化调整,借鉴和引进先进的经验和模式,提升山东省的竞争力和影响力。

(二) 产业结构升级指数和碳排放效率协调发展路径设计

参考已有研究,选择政府支持力度、政府意愿、技术吸收转化能力、公众关注度、成果转化率和市场需

求这六个变量,^[34]分别从政府、企业和社会三个层面,反映绿色低碳发展的主要参与者和利益相关者的态度、行为和能力;从政策、技术、社会三个方面,反映绿色低碳发展的主要内容和路径;从资源、能力、行为三个维度,反映绿色低碳发展的主要条件和结果。这六个变量的变化是根据不同的仿真模拟路径设定的,目的是分析不同的政策组合和策略选择对产业结构升级和碳排放效率的影响。路径1~4是单一变量的变化,分析单一因素对产业结构升级和碳排放效率的影响;路径5~6是多个变量的变化,分析多个因素之间的协同或抵消效应。根据这些路径对应的可变系数,在基准路径系数设计基础上,改变不同参数的取值来代表不同类型的路径。路径改变的参数值设置如表4所示。

表4 路径改变的参数设置

路径	政府支持力度	政府意愿	技术吸收转化能力	公众关注度	成果转化率	市场需求
1	+30%					
2			+40%			
3				+60%		
4						+60%
5	+30%	+60%			+60%	
6			+40%	+60%	+60%	

1. 路径1:政府支持力度增加,其他变量不变。

图4为路径1的关系图。从图4可知,政府支持力度增加对产业结构升级和碳排放效率都有正面影响。与基准路径相比,每年的产业结构升级指数都有所提高。原因在于,一方面,政府支持可以引导投资、优化资源、遏制高耗能高排放项目、加快传统产业绿色转型、发展战略性新兴产业;另一方面,政府支持可以增加对高排放行业的管控和惩罚,对低碳技术创新和推广提供资金和政策支持,对碳市场和碳交易进行规范和引导。

2. 路径2:技术吸收转化能力增加,其他变量不变。

图5为路径2的关系图。由图5可知,与基准路径相比,该路径下碳排放效率在2011—2022年间呈现持续上升的趋势,且上升幅度逐年扩大。技术吸收转化能力的提升使产业结构升级指数提高7.29%,这是由于技术吸收转化能力的提升可以提高产品质量和竞争力,降低生产成本和碳排放,协同和融合产业链与价值链。技术吸收转化能力的提升同样促进碳排放效率提高了14.94%,充分体现了技术进步对节能减排的作用。

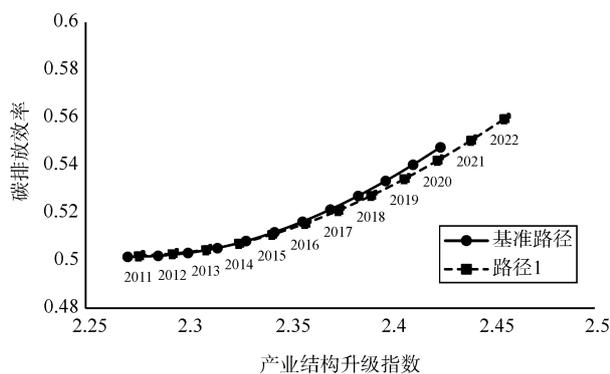


图4 路径1关系图

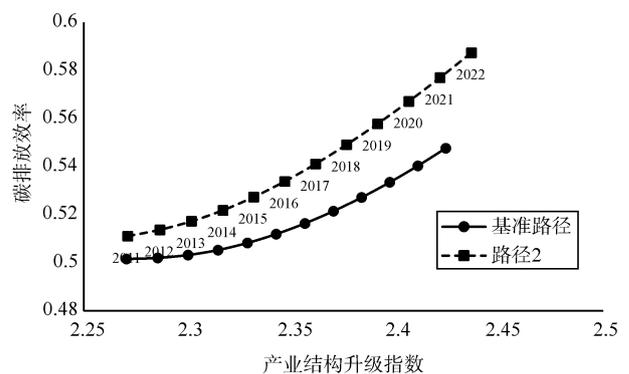


图5 路径2关系图

3. 路径 3:公众关注度增加,其他变量不变。

图 6 为路径 3 的关系图。由图 6 可知,公众关注度的提高可以促进产业结构向高附加值、高水平、高层次发展,使产业结构升级指数提高 7.43%;同时,公众关注度的提高也可以降低能源消耗和碳排放强度,使碳排放效率提高 10.1%。原因在于,公众关注度的提高可以增加市场对绿色低碳产品和服务的需求,形成绿色低碳发展的良性循环,同时,提高社会对绿色低碳发展相关问题和挑战的认识,促进公众在生产和消费方面采取绿色低碳方式,减少能源消耗和碳排放。

4. 路径 4:市场需求增加,其他变量不变。

图 7 为路径 4 的关系图。由图 7 可知,路径 4 中产业结构升级指数增加了 8.3%,说明增加市场需求可以提高产业附加值、技术水平和效益,同时扩大经济规模和效率。然而,市场需求的增加对碳排放效率产生了负面影响。可见,市场需求的增加对产业结构升级指数和碳排放效率有双重影响。这表明要实现经济、社会和环境的协调发展,需要在保持市场需求增长的同时,加强节能减排和绿色低碳转型,提高能源利用效率和非化石能源消费比重,优化产业结构和布局。

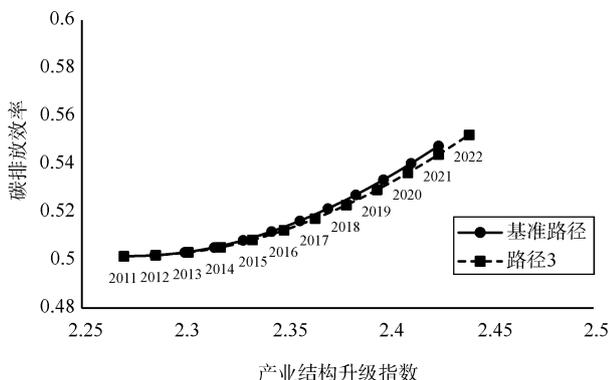


图 6 路径 3 关系图

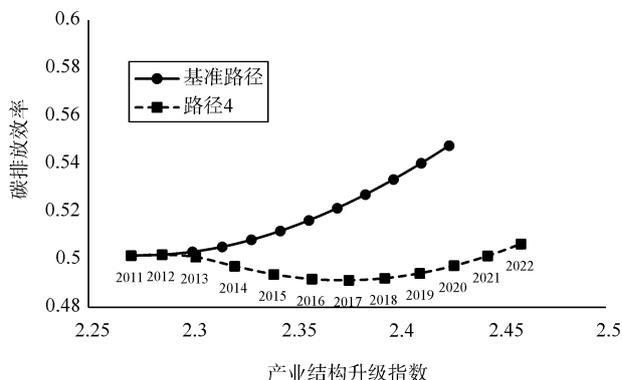


图 7 路径 4 关系图

5. 路径 5:政府支持力度、政府意愿和成果转化率同时增加,其他变量不变。

图 8 为路径 5 的关系图。由图 8 可知,政府支持力度、政府意愿和成果转化率的共同提高促进了产业结构升级和碳排放效率的改善。其中,政府支持力度可以通过财政、税收、金融等政策激励产业发展;政府意愿可通过制定和执行相关法规和标准,创造有利于产业创新和转型的环境;成果转化率的提高可加强科技创新体系建设、推动绿色技术成果转化应用,推动传统产业绿色转型和战略性新兴产业发展。从图 8 可以看出,路径 5 中碳排放效率在 2011—2022 年期间呈现出不同的增长趋势,说明模型存在滞后效应或非线性关系。

6. 路径 6:公众关注度和成果转化率、技术吸收转化能力同时增加,其他变量不变。

图 9 为路径 6 的关系图。由图 9 可知,路径 6 中产业结构升级指数增长了 8.17%。公众关注度可以通过增强科技创新的社会认同感和支持力度,促进高新技术产业的发展和转型。提高成果转化率可以降低科技创新的成本和风险,提升科技创新效益、促进企业与市场对接。技术吸收转化能力通过弥补企业研发短板,推动产业结构向高质量、高水平方向转型。路径 6 中碳排放效率增长了 16.5%,说明公众关注度的提高可以通过降低社会对碳排放的容忍度,形成市场需求导向的减排动力。成果转化率和技术吸收转化能力的提高可以通过降低低碳技术的供给成本,形成技术创新导向的减排动力。这些变化还可以带来正向的外部效应,例如改善环境质量、增加就业机会、促进经济增长等,形成良性循环。

(三) 路径分析总结

概言之,在所有路径中路径 6 可使山东省的产业结构升级指数和碳排放效率达到最优,它不仅提高了两者的水平,还增强了两者的协调性。路径 6 提升了公众关注度、成果转化率、技术吸收转化能力三个

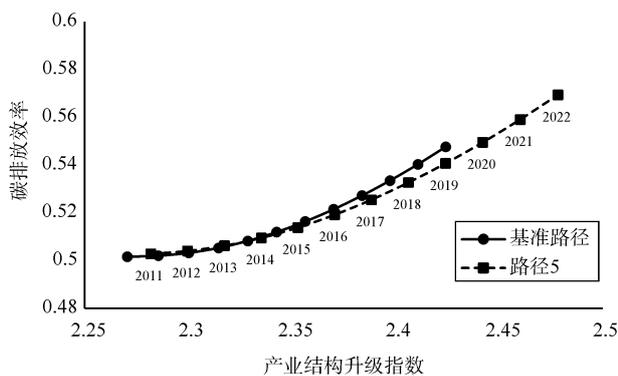


图8 路径5关系图

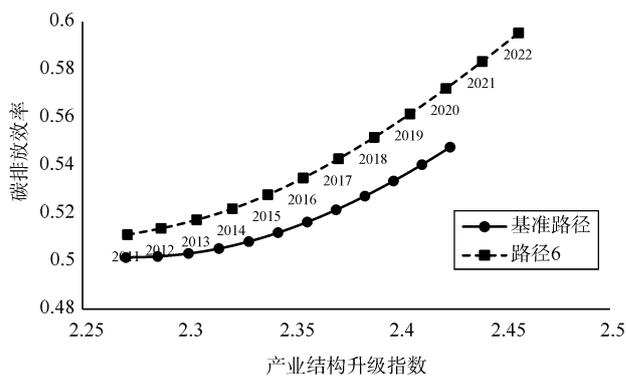


图9 路径6关系图

参数,能够有效地激发社会、政府、企业等各方的积极性和创造性,构建一个好的创新生态系统,推动产业结构升级和碳排放效率提高。路径4则是在所有路径中使山东省的产业结构升级指数和碳排放效率受到最大负面影响的一种,它不仅降低了碳排放效率,还加剧了两者的矛盾性。路径4的特点是增加了市场需求,这表明只关注短期的经济利益和市场竞争,而忽视长期的环境成本和社会责任,会导致经济发展和环境保护之间出现冲突,从而削弱了产业结构升级和碳排放效率,违背可持续发展战略要求。

五、研究结论与建议

(一) 研究结论

1. 山东省产业结构升级指数和碳排放效率在2006—2022年间总体呈现稳定上升的趋势,说明山东省的产业结构在不断优化,从低附加值的传统产业向高附加值的现代产业转变;山东省的碳排放强度在不断降低,从高碳排放的能源消耗向低碳排放的能源利用转变。

2. 山东省产业结构升级指数和碳排放效率之间存在一定的负相关性,即产业结构升级的速度快于碳排放效率的提高速度。这意味着山东省的产业结构升级可能带来了一定的碳排放压力,碳排放效率的增长速度逐年减缓,说明山东省需要加大研发投入、提高创新效率,突破降碳减排上的“卡脖子”问题。

3. 政府支持力度、政府意愿、技术吸收转化能力、公众关注度、成果转化率和市场需求,是影响山东省产业结构升级与碳排放效率协调发展的六个重要因素。公众关注度和成果转化、技术吸收转化能力同时增加对碳排放效率和产业结构升级指数的提升作用最强,政府支持力度、政府意愿和成果转化同时增加对碳排放效率和产业结构升级指数的提升作用次之,增加技术吸收转化能力对碳排放效率和产业结构升级指数的提升作用再次之,提升政府支持力度、增加公众关注度对碳排放效率和产业结构升级指数的提升作用相对较弱,提升市场需求却会使山东省的产业结构升级指数和碳排放效率都出现消极变化。

(二) 政策启示

1. 政府应发挥引领和推动作用,加大对产业转型升级和节能减排的支持力度,制定和执行更加科学、合理、可行的措施。建立健全低碳产业投资评估机制,对低碳产业投资项目进行可行性评估。同时加强对低碳产业的监测评估,建立绩效考核机制。重点支持清洁能源装备、新能源汽车、氢能及储能、节能环保等绿色低碳产业发展,打造山东半岛工业互联网示范区,推动大数据、人工智能、第五代移动通信(5G)等新兴技术与绿色低碳产业深度融合。

2. 公众应发挥监督和参与作用,提高对产业转型升级和节能减排的认同与支持,形成良好的社会氛围和共识。加强对绿色低碳发展的科普宣传,加强对绿色低碳发展的教育培训。推广碳标签制度,建立碳标签数据库,为公众提供产品的碳排放信息,引导公众进行低碳消费选择。提高对绿色低碳发展相关政策和措施的支持度和配合度,通过社会监督、沟通反馈、志愿服务等方式参与到绿色低碳发展的实

践中。

3. 技术应发挥支撑和创新作用,提高山东省产业结构升级和碳排放效率协调发展的能力和效率,形成技术创新动力。通过加强科研投入、培养人才队伍、促进国际合作等方式引进和消化先进技术,提高产品质量和竞争力。特别是要加强对重点行业的技术改造和升级,如钢铁、石化、化工、有色、建材、纺织、造纸、皮革等行业的节能降碳行动,淘汰落后产能,化解过剩产能,促进产业绿色低碳升级。

4. 市场需求应发挥约束和平衡作用,协调经济发展和环境保护之间的关系,形成市场需求导向的动力。扩大内需,提高居民收入水平和消费能力,增加对绿色低碳产品和服务的有效需求,引导消费者形成绿色消费理念和行为。开拓外需,利用山东省的地理优势和港口资源,加强与沿海省份和国际市场的合作交流,提升山东省的国际竞争力和影响力,培育一批有重要影响力的战略性新兴产业集群。

参考文献:

- [1] 王育宝,陆扬,王玮华. 经济高质量发展与生态环境保护协调耦合研究新进展[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2019,19(5):84-94.
- [2] 周迪,王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. 自然资源学报, 2019,34(11):2305-2316.
- [3] ANG B W, LIU F L, CHEW E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis[J]. Energy policy, 2003(14):1561-1566.
- [4] 田泽,景晓栋,肖钦文. 长江经济带碳排放-产业结构-区域创新耦合度及时空演化[J]. 华东经济管理, 2020,34(2):10-17.
- [5] 程丹亚,曾刚. 长三角区域绿色技术创新对工业二氧化碳排放影响的空间效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023(6):1152-1164.
- [6] 王钊,王良虎. R&D投入、产业结构升级与碳排放关系研究[J]. 工业技术经济, 2019,38(5):62-70.
- [7] 原娜,席强敏,李国平. 产业关联水平对碳排放演化的影响机理及效应研究——基于欧盟27国投入产出数据的实证分析[J]. 自然资源学报, 2017(5):841-853.
- [8] 易海峰,刘宏. 全球价值链嵌入、产业结构升级与城市碳排放效率——来自中国地级城市层面的经验证据[J]. 技术经济与管理研究, 2023(6):106-111.
- [9] 王晋立. 绿色发展战略、技术选择与低碳经济转型——基于新结构经济学视角[J]. 首都经济贸易大学学报, 2023(3):3-17.
- [10] 张杰,郭倩茹. 金融集聚能否提升绿色技术创新水平? ——基于环境规制与产业结构调整的门槛视角[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2023,25(5):69-80.
- [11] 陈海龙,周融,雷汉云. 激励与惩罚:碳排放权交易试点对产业结构的影响[J]. 云南财经大学学报, 2023(6):18-34.
- [12] ZHAO R, MIN N, GENG Y, et al. Allocation of carbon emissions among industries/sectors: An emissions intensity reduction constrained approach[J]. Journal of cleaner production, 2017(4):3083-3094.
- [13] 韩仁月,李润雨. 碳中和目标下日本促进能源转型的财税政策[J]. 现代日本经济, 2022(2):20-35.
- [14] 洪竞科,李沅潮,蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型[J]. 资源科学, 2021(4):639-651.
- [15] 杨浩昌,钟时权,李廉水. 绿色技术创新与碳排放效率:影响机制及回弹效应[J]. 科技进步与对策, 2023(8):99-107.
- [16] 江深哲,杜浩锋,徐铭桂. “双碳”目标下能源与产业双重结构转型[J]. 数量经济技术经济研究, 2024,41(2):109-130.
- [17] 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(2):508-520.
- [18] LIU L C, FAN Y, WU G, et al. Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO₂ emissions from final fuel use: An empirical analysis[J]. Energy policy, 2007(11):5892-5900.
- [19] 宁论辰,郑雯,曾良恩. 2007—2016年中国省域碳排放效率评价及影响因素分析——基于超效率SBM-Tobit模型的两阶段分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021(1):181-188.
- [20] 邵帅,范美婷,杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角

- 的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69+4-10.
- [21] 陈晓, 李美玲, 张壮壮. 环境规制、政府补助与绿色技术创新——基于中介效应模型的实证研究[J]. 工业技术经济, 2019(9): 18-25.
- [22] 刘波. 碳市场机制与主体功能区战略协调发展研究——基于主体功能区建立县域碳汇管理与交易机制[J]. 宏观经济管理, 2016(7): 33-37.
- [23] WANG K, WEI Y M, ZHANG X. A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is the better way to deal with undesirable outputs?[J]. Energy policy, 2010, 46: 574-584.
- [24] 郭士伊, 刘文强, 赵卫东. 调整产业结构降低碳排放强度的国际比较及经验启示[J]. 中国工程科学, 2021(6): 22-32.
- [25] ZHANG Y J, LIU Z, ZHANG H, et al. The impact of economic growth, industrial structure and urbanization on carbon emission intensity in China[J]. Natural hazards, 2014(2): 579-595.
- [26] 吕靖烨, 贺文慧. 晋陕蒙宁地区碳减排系统动力学模型设计与预测研究[J]. 生态经济, 2023, 39(1): 57-65.
- [27] 王娟. 基于动线型 SLP 聚类算法的企业发展平面布局最优化模型[J]. 统计与决策, 2013(10): 179-182.
- [28] 于少东. 国有企业参与新型城镇化建设的问题与对策研究[J]. 中国社会科学院研究生院学报, 2015(1): 70-74.
- [29] WANG Z H, ZHANG B, LIU T F. Empirical analysis on the factors influencing national and regional carbon intensity in China[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 55: 34-42.
- [30] 周衍平, 王倩, 陈会英. 绿色信贷政策对重污染企业绿色创新的影响效应研究[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2023, 25(6): 66-77.
- [31] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009: 26.
- [32] 李堂军, 宋婷婷. 基于系统动力学的农村社区突发公共卫生事件演化机理与策略研究[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2021(1): 67-75.
- [33] ANDERSEN P, PETERSEN N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management science, 1993(10): 1261-1264.
- [34] 朱美峰, 韩泽宇. 中国产业结构升级、全要素能源效率与碳排放(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(3): 445-453.

Dynamic Analysis and Strategy Research on the Coordinated Development Pathway of Regional Industrial Structure Upgrading and Carbon Emission Reduction

LI Tangjun, XIAO Xiaolei

(College of Economics and Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Using panel data spanning from 2006 to 2022 in Shandong Province, this study calculates the carbon emission efficiency value with the aid of the super-efficiency SBM model. Meanwhile, based on the system dynamics method, the paper analyzes the causal relationship between industrial structure upgrading and carbon emission efficiency, considering various aspects such as economy, society, environment, technology, etc.. To this end, a dynamic simulation model is constructed to simulate different policy pathways under various scenarios. The findings reveal that (1) During the period of 2006—2022, Shandong Province experienced a steady rise in its industrial structure upgrading index, while carbon emission efficiency initially decreased and then rose around 2012; (2) Key factors, including public attention, result conversion rate and technology absorption and conversion capacity, propel the coordinated development of industrial structure upgrading and carbon emission efficiency in Shandong Province, while market demand emerges as a constraining factor. The more suitable development pathway for Shandong Province is to foster social awareness, accelerate the application of scientific and technological results as well as strengthen the technological innovation capability of enterprises so as to manage market demand effectively and balance economic growth and environmental protection.

Key words: industrial structure upgrading; carbon emission efficiency; system dynamics; carbon peaking; carbon neutrality

(责任编辑:魏 霄)