

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.02.009

“双碳”背景下我国产业结构升级与碳排放关系研究

曹泽, 程毅

(安徽建筑大学 经济与管理学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 构建2006—2019年我国的30个省级面板计量模型, 探讨了产业结构升级与碳排放之间的关系。通过静态回归分析, 得知产业结构高级化与合理化能显著抑制碳排放, 表现为“倒U型”增长, 产业结构合理化目前处于曲线左侧, 呈现先促进后抑制的变化趋势, 其中产业结构高级化对碳排放的抑制作用存在区域异质性, 东部抑制、中西部促进; 产业结构合理化能促进碳排放, 但在东部地区作用不显著。空间溢出分析结果表明, 产业结构升级与碳排放存在显著的空间相关性, 且对碳排放具有正向溢出效应。因此, 应不断加强产业结构升级进程, 合理分配要素资源, 以促进“双碳”目标的实现。

关键词: “双碳”目标; 产业结构高级化; 产业结构合理化; 空间SDM模型

中图分类号: F124.5; X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)02-0056-09

引文格式: 曹泽, 程毅. “双碳”背景下我国产业结构升级与碳排放关系研究[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 56-64.

Research on the Relationship Between China's Industrial Structure Upgrading and Carbon Emissions Under the Background of “Double-Carbon” Objectives

CAO Ze, CHENG Yi

(School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: As many as 30 provincial panel econometric models have been constructed in China from 2006 to 2019, followed by an inquiry into the relationship between industrial structure upgrading and carbon emissions. Based on a static regression analysis, it is known that the upgrading and rationalization of the industrial structure significantly inhibit carbon emissions, which shows an “inverted U-shaped” growth. The rationalization of the industrial structure is currently on the left side of the curve, showing a change trend of initial promotion and a subsequent inhibition. Among these factors, the upgrading of the industrial structure is characterized with a regional heterogeneity in the inhibition of carbon emissions, which is curbed in the eastern regions and facilitated in the middle and western regions. The process of industrial structure rationalization helps to promote carbon emissions, but with no significant effect in the eastern regions. A spatial spillover analysis shows that there is a significant spatial correlation between industrial structure upgrading and carbon emissions, along with a positive spillover effect on carbon emissions. Therefore, we should constantly strengthen the process of upgrading the industrial structure and rationally allocate the resource elements to realize the “Double-Carbon” objectives.

Keywords: “Double-Carbon” objective; industrial structure upgrading; rationalization of industrial structure; spatial SDM model

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(16BRK026); 安徽省科研编制计划基金资助项目(2022AH050214)

作者简介: 曹泽(1969-), 男, 安徽颍上人, 安徽建筑大学教授, 博士, 主要研究方向为经济与产业管理,

E-mail: 717762099@qq.com

1 研究背景

近年来,我国经济由高速增长阶段转变为高质量发展阶段,如何协调好经济增长与环境保护间的关系是实现经济可持续发展的关键。粗放式的经济发展是导致环境日益恶化的原因之一,其中以CO₂为主的温室气体持续增加导致全球冰川融化、海平面上升以及各种自然灾害。为应对全球气候治理问题,中国在联合国代表大会上做出承诺,提出力争在2030年前实现碳达峰以及2060年前实现碳中和的“双碳”战略目标。在碳中和研讨暨“中国长期低碳发展战略与转型路径研究”成果发布会中,清华大学气候变化与可持续发展研究院提出:在2050年实现CO₂的净零排放,需全球温室气体在2020年基础上减排90%,非化石能源占一次能源消费比例应超过70%,非化石能源电力将约占总发电量的90%,基本形成以新能源和可再生能源为主体的近零碳排放能源体系,使能源系统二氧化碳实现负排放。一直以来,中国政府都在积极应对二氧化碳排放问题,实施各种环境保护政策,倒逼企业进行产业结构升级,实现绿色低碳循环发展理念。根据我国产业结构升级指数,发现在近20 a间,产业结构升级指数从1.34提高到3.20,基本实现了以二、三产业为主的发展模式。同时,我国二三产业占GDP的比例已经高达93%,但是产业结构区域发展不平衡等问题依然突出,成为制约我国经济发展与碳减排的瓶颈因素。在此背景下,探索中国的区域产业结构升级与“双碳”之间的逻辑关系,研究其内在影响机制,对于“双碳”目标的实现至关重要,同时对促进国民经济的高质量发展具有重要意义。

自“双碳”目标提出以来,有关碳减排的话题成为中国各界研究的热点,学术界从不同的角度对碳排放展开了研究。首先从碳排放本身来说,在时间维度上,碳排放呈现不断上升的趋势;其次在空间维度上,刘华军^[1]和王少剑^[2]等通过研究,发现碳排放呈现东高西低的变化趋势;最后在碳排放的影响因素方面,魏奇等^[3]发现环境规制的实施、王文举^[4]、丁斐^[5]等发现产业结构的升级,刘志华^[6]、张华^[7]等发现科技创新的提高,均有利于降低碳排放量。

产业结构升级是经济增长方式的转变与经济发展规模的接轨,同时也是企业在面临政府实施环境保护政策后所必须进行的转型升级。一般划分为两个方面:一是产业结构优化与资源要素合理分配,即合理化水平。产业结构合理化是经济进入新阶段的客观条件与产业进行结构调整的迫切需要,主要通过“结

构红利”、协调能力与关联水平促进全要素生产率,从而促进经济增长方式的转变,实现社会绿色发展。二是产业结构不断从低级向高级提高的过程,即高级化水平。产业结构高级化是我国经济水平由低到高转变的标志,主要通过改变原有要素配置方式,转变经济增长方式,实现社会绿色发展。国内关于产业结构升级的研究大致可以分为两个方面:其一是制造业结构升级。史丹等^[8]通过整理我国制造业行业数据,将产业结构分解为产出和要素两大核心结构,对该方面系统性优化的方向进行了深入研究。其二是服务业结构升级。钟晓君^[9]将服务业分为现代服务业和传统服务业两类,发现外商直接投资能有效增加现代服务业就业比例,促进服务业结构优化。裴长洪等^[10]将服务业升级与城市经济转型相关联,提出“服务型制造企业”是促进服务业结构优化与城市经济转型的重点。

关于产业结构升级与碳排放关系方面的研究,吕炜^[11]、匡远配^[12]等指出,实现产业结构的优化升级是加快经济发展以及实现“双碳”目标的重要抓手。全国层面:王文举等^[4]通过研究产业结构升级对碳减排的影响,发现产业结构升级显著促进了碳减排,其有效贡献度最高可达70%。吴振信等^[13]研究发现,在2000—2009年间,3次产业结构的调整是推动我国低碳经济发展的重要因素。区域层面:杨骞^[14]、Zheng J. L.等^[15]研究了不同地区的二氧化碳排放水平,反映出巨大差异,而各省之间的差异更加显著。作用路径方面:Zhang F.等^[16]以中国281个地级市为研究对象,研究产业结构和技术进步对碳排放强度的影响,结果发现技术变革在影响分析中起间接作用。孙丽文等^[17]基于我国省级面板数据的研究发现,技术创新是产业结构升级影响碳排放的路径。

通过梳理已有文献,发现学术界大多从产业结构升级的单一指标进行分析,鲜有学者将产业结构升级进一步划分为产业结构合理化与产业结构高级化,因此本文拟考虑产业结构升级的综合性与多维度性,通过收集中国的30个省市自治区(基于数据的可获得性,西藏及港澳台地区本文未予以研究)2006—2019年的面板数据,基于普通面板回归模型,研究产业结构升级对于碳排放的影响程度。同时,将省市自治区单位划分为东部、中部和西部地区,进一步探索中国区域产业结构升级对碳排放影响的区域异质性。最后在普通面板回归基础上,考虑空间因素,通过比较各自回归系数弹性,进一步分析产业结构升级对碳排放的空间溢出效应,以期实现区域之间碳排放的联动治理,通过产业结构升级来实现“双碳”

目标提供行动指南。

2 面板计量模型

2.1 指标选取和数据来源

2.1.1 被解释变量

造成碳排放的主要原因是化石燃料的使用,本文参考刘凯等^[18]的做法,利用天然气、煤油、焦炭、煤炭、汽油、柴油、原油以及燃料油共8种能源计算二氧化碳排放量(T_{CO_2}),用二氧化碳排放量与GDP的比值衡量碳排放(t_{pf})。二氧化碳排放量计算公式如下:

$$T_{CO_2} = \sum_{m=1}^8 C_m = \sum_{m=1}^8 E_m * S_{Cm} * F_{Cm}, \quad (1)$$

式中: C 为8大能源 CO_2 排放量; E 为8种能源的消耗量; S_C 为标准煤换算系数; F_C 为 CO_2 排放系数。

同时,将GDP折算到2006年为基期,以消除通货膨胀的客观因素影响。

2.1.2 核心解释变量

1) 产业结构升级。从现有研究来看,大部分学者是从单一指标角度测度产业结构升级,如第三产业占第二产业产值的比例等^[19],这些指标的选取仅局限于考虑产业结构升级内涵的某一方面,并未反映产业结构升级的综合性和多维性。因此,本文将产业结构升级划分为产业结构合理化与高级化两大维度。

2) 产业结构合理化(I_{sr})。本研究中采用泰尔指数^[20]的倒数作为衡量产业结构合理化指标,具体公式如下:

$$I_{sr} = 1 / \sum_{i=1}^3 \left(\frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left(\frac{Y_i}{L_i} / \frac{Y}{L} \right); \quad (2)$$

3) 产业结构高级化(I_{sa})。产业结构高级化^[21]公式如下:

$$I_{sa} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{Y_i}{Y} \times \frac{Y_i}{L_i} \right). \quad (3)$$

式(2)(3)中: Y 、 Y_i 、 L 、 L_i 分别为产业总增加值、3次产业增加值、总就业人数、3次产业就业人数。

2.1.3 控制变量

1) 经济发展水平(e_{co}),采用各地区的人均GDP衡量经济的发展水平。2) 对外直接投资额(f_{di}),采用各地区实际利用外资金额与地区生产总值之比为外商直接投资代理变量。3) 环境规制(e_r)。参考原毅军等^[22]的研究,分别计算出工业废气和废水治理设施运行费用与各自排放量的比值,以及工业固体废物综合利用率三大指标,再运用熵权法计算环境规制的综合指数。4) 城镇化率(u_{ii})。用城镇人

口与地区总人口的比值来衡量城镇化率^[23]。

2.1.4 数据来源

本文数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》等。在数据处理过程中,对于非比值指标进行对数化处理,以消除异方差影响,研究过程中对空缺数据利用平均增长率等进行填补。考虑数据的可获得性,本文最终以2006—2019年面板数据(剔除西藏及港澳台地区)。所有实证过程均采用Stata15.0完成。

变量的描述性统计结果见表1。

表1 变量描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of variables

变 量	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值
碳排放($\ln t_{pf}$)	420	0.834 0	0.669 1	-1.151 9	2.626 9
产业结构高级化($\ln I_{sa}$)	420	0.081 0	0.386 5	-0.640 5	1.655 2
产业结构合理化(I_{sr})	420	0.239 6	0.152 6	0.017 5	0.852 5
经济发展水平($\ln e_{co}$)	420	1.285 0	0.613 4	-0.547 0	2.798 6
对外直接投资额($\ln f_{di}$)	420	5.211 5	1.686 1	-1.261 2	7.728 2
环境规制($\ln e_r$)	420	2.165 4	0.441 7	0.818 2	4.003 6
城镇化率(u_{ii})	420	0.546 2	0.136 1	0.275 0	0.896 0

2.2 面板模型构建

本文以30个省市自治区2006—2019年的面板数据,构建包含碳排放、产业结构高级化与合理化及二次项、控制变量的面板模型进行初步的基准回归分析,具体模型构建如下:

$$\ln t_{pf,i,t} = \alpha_1 \ln I_{sa,i,t} + \alpha_2 I_{sr,i,t} + \alpha_3 \ln I_{sa,i,t}^2 + \alpha_4 I_{sr,i,t}^2 + \alpha_5 \ln e_{co,i,t} + \alpha_6 \ln f_{di,i,t} + \alpha_7 \ln e_{r,i,t} + \alpha_8 u_{ii,i,t} + \varepsilon_{i,t}, \quad (4)$$

式中: α_j ($j=1, 2, \dots, 8$)为各变量的回归系数; i 为30个省市自治区; t 为2006—2019年的时间跨度; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项。

2.3 模型检验结果与分析

2.3.1 全国产业结构升级对碳排放的影响

全国产业结构升级对碳排放的影响结果见表2。本文首先建立静态面板回归,分析全国和各区域之间产业结构升级对碳排放的影响程度。表中(1)(2)分别表示在产业结构高级化视角下,产业结构高级化对碳排放的影响以及加入产业结构高级化平方项后的非线性回归处理结果。同理,(3)(4)分别表示在产业结构合理化视角下,产业结构合理化对碳排放的影响以及加入产业结构合理化平方项后的非线性回归处理结果。由表2可知:Hausman检验除了(4)未能拒绝原假设,选择随机效应,其他均拒绝原假设,选择固定效应。

分析表2中数据可以发现:1)在产业结构高级化视角下,产业结构高级化显著抑制了碳排放,通过了1%的显著性水平检验,产业结构高级化的力度每

提高1%,碳排放量将降低19.22%。当加入平方项后,回归系数为-0.3997,表明产业结构高级化与碳排放之间存在“倒U”型关系,表现为先增加后减小的变化趋势,且位于对称轴($x=-0.2106$)右侧,说明我国对于产业结构高级化的力度目前取得了有效进展。出现这一结果的可能原因是,在国家环境保护政策的实施下,各企业或产业之间根据自身的发展情况尽最大的努力进行产业结构升级,有效地抑制了污染物排放。2)在产业结构合理化视角下,产业结构合

理化显著促进了碳排放,通过了1%的显著性水平检验,即产业结构合理化每提高1%,碳排放量将增加51.54%,当加入平方项后,回归系数为-3.3087,表明产业结构合理化与碳排放之间存在“倒U”型关系。由此可以推测:我国的产业结构合理化水平目前还位于对称轴左侧,处于促进碳排放的一侧,造成该现象的原因,可能是各企业或产业之间在竞争各种资源要素时,并没有均衡分配,而是存在一种长期且不均衡的恶性竞争,这也是导致“挤出效应”的原因之一。

表2 全国产业结构升级对碳排放效应的影响

Table 2 Impact of national industrial structure upgrading on carbon emissions

变量	产业结构高级化		产业结构合理化	
	(1) 全国	(2) 全国	(3) 全国	(4) 全国
$\ln I_{sa}$	-0.1922***(-3.71)	-1.0539***(-15.75)		
I_{sr}			0.5154***(3.81)	5.3111***(10.48)
$\ln I_{sa}^2$		-0.3997***(-3.96)		
I_{sr}^2				-3.3087***(-5.32)
$\ln e_{co}$	-0.5331***(-11.93)		-0.5327***(-11.93)	
$\ln f_{di}$	-0.0432***(-2.85)		-0.0460***(-3.03)	
$\ln e_r$	0.0679***(2.65)		0.0432*(1.69)	
u_{ri}	-1.1482***(-2.97)		-1.1493***(-2.98)	
_cons	2.2400*** (12.88)	0.9817*** (48.99)	2.1691*** (12.06)	-0.1718(-1.55)
R^2	0.8178	0.4503	0.8182	0.4689
obs	420	420	420	420
模型选择	FE	FE	FE	RE
Hausman 值	86.92***	10.61***	58.78***	1.50
P 值	0.0000	0.0050	0.0000	0.4717

注:上标***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性检验,括号内为t检验值,下同。

控制变量中:本文以(1)为对象,对控制变量进行逐一分析。结果表明:1)经济的发展水平显著地抑制了碳排放,通过了1%的显著性水平检验,即经济发展水平每提高1%,碳排放量将降低53.31%,说明绿色理念提出以来,我国的低碳经济已经取得了良好成效;2)外商直接投资额显著抑制碳排放,通过了1%的显著性水平检验,即外商直接投资额每提高1%,碳排放量将降低4.32%,原因可能是国际直接投资(FDI)流入带来了先进的环境管理系统、生产技术和较高环境标准,因而FDI表现为碳减排效应;3)环境规制显著促进了碳排放,通过了1%的显著性水平检验,即环境规制每提高1%,碳排放量将增加6.79%,原因可能是政府通过实施环境保护政策引导企业绿色转型,倒逼企业治理污染成本增加,但企业还是追求利益至上,为了追求利润会扩大生产规模,对碳排放产生不利影响^[24];4)城镇化率显著抑制了碳排放,通过了1%的显著性水平检验,可能是因城镇化的快速推进带来了公共物品规模效应,同时集中供暖和垃圾集中处理,尤其是垃圾分类处理的普遍实施,大幅度减少了碳排放量^[25]。

2.3.2 分区域产业结构升级对碳排放的影响

前文主要是从全国角度对产业结构升级与碳排放的关系进行了研究,然而区域之间往往会根据各区域的发展水平表现出区域异质性,因此下文将对各区域之间进行计量分析。由于我国东中西三大地区的划分是政策上的划分,而不是行政上的划分。因此,将我国根据发达地区、次发达地区以及欠发达地区依次划分为东部、中部和西部三大区域。分区域得到的产业结构升级对碳排放效应的影响结果见表3。由表3可知,Hausman检验除了东部地区未能拒绝原假设,选择随机效应外,中部与西部地区均拒绝原假设,选择固定效应。

观察表3发现:1)在产业结构高级化视角下,仅东部地区显著地抑制了碳排放,通过了1%水平下的显著性检验,中部和西部地区促进了碳排放,通过了10%水平下的显著性检验,显著性水平低于东部地区。这可能是由于中部和西部地区没有东部地区发达,属于欠发达地区,可能还位于曲线左侧,表现为促进碳的排放,区域之间存在异质性。2)在产业结构合理化视角下,三大地区均促进了碳排放,

但是东部地区的促进作用不显著,中部和西部地区均通过了5%水平下的显著性检验,促进程度大于东部地区,其原因可能是企业或产业之间存在的“挤出效应”在三大地区的表现程度为中部和西部强于东部。3)控制变量中,经济发展水平和对外直接投资额均抑制了碳排放,其中西部地区的对外直接投资额抑制作用并不显著,这可能与西部地区的地理

位置以及交通便利度存在直接关系,导致作用不够显著;环境规制的实施在三大地区均促进了碳排放,但是在东部以及中部地区的促进作用不显著,而在西部地区却通过了1%水平下的显著性检验,显著促进了碳排放;城镇化率显著地促进了东部地区的碳排放,但是在中部和西部地区却显著地抑制了碳排放,表现出区域异质性。

表3 分区域产业结构升级对碳排放效应的影响

Table 3 Impact of subregional industrial structure upgrading on the carbon emission effect

变量	产业结构高级化			产业结构合理化		
	(1) 东部	(2) 中部	(3) 西部	(4) 东部	(5) 中部	(6) 西部
$\ln I_{sa}$	-0.555 8***(-7.01)	0.192 0*(1.86)	0.220 2*(1.77)			
I_{sr}				0.517 0(0.98)	0.789 8**(2.48)	0.369 3**(2.19)
$\ln e_{co}$	-0.569 9***(-9.18)	-0.426 8***(-5.61)	-0.134 9(-1.59)	-0.776 3***(-12.26)	-0.498 6***(-7.09)	-0.165 0**(-2.00)
$\ln f_{di}$	-0.140 3***(-5.66)	-0.062 7*(-1.80)	-0.000 2(-0.01)	-0.097 0***(-3.49)	-0.083 4**(-2.44)	-0.007 2(-0.35)
$\ln e_t$	0.060 3(1.53)	0.010 8(0.23)	0.137 4*** (3.56)	0.001 2(0.03)	0.003 6(0.08)	0.126 2*** (3.23)
u_{it}	1.054 0** (2.44)	-2.849 3** (-3.45)	-5.596 8*** (-6.95)	1.015 8** (2.00)	-1.267 9* (-1.83)	-4.463 1*** (-6.12)
_cons	1.655 6*** (5.85)	3.096 6*** (10.05)	3.299 6*** (11.68)	1.720 4*** (4.74)	2.280 5*** (8.03)	2.776 0*** (10.38)
R^2	0.871 0	0.903 4	0.823 1	0.829 1	0.906 2	0.825 1
obs	154	98	168	154	98	98
模型选择	RE	FE	FE	RE	FE	FE
Hausman 值	0.30	19.45***	138.96***	2.28	64.49***	117.42***
P 值	0.997 7	0.001 6	0.000 0	0.809 2	0.000 0	0.000 0

3 空间计量模型

3.1 空间计量模型构建

在空间计量分析中,一般用空间滞后模型(spatial lagged model, SLM)和空间误差模型(spatial error model, SEM)描述空间的相关性,通过拉格朗日检验(lagrange mutiplicator, LM)和拉格朗日乘子检验(robust lagrange mutiplicator, R-LM)的统计量显著性程度来进行模型选择。相比于 SLM 模型和 SEM 模型,空间杜宾模型(spatial dubin model, SDM)的优点在于同时考虑被解释变量与解释变量的空间相关性,因此,本文在 LM 检验基础上,选择 SDM,通过最大似然比检验(likelihood ratio, LR)或沃尔德检验(wald test)统计量检验 SDM 是否有必要退化为 SLM 或 SEM。SDM 的表达式如下:

$$\ln t_{pfi,t} = \alpha + \rho W \ln t_{pfi,t} + \beta_1 \ln I_{sai,t} + \beta_2 \ln I_{sai,t}^2 + \beta_3 I_{sri,t} + \beta_4 I_{sri,t}^2 + \beta_5 Z_{i,t} + \theta_1 W \ln I_{sai,t} + \theta_2 W \ln I_{sai,t}^2 + \theta_3 W I_{sri,t} + \theta_4 W I_{sri,t}^2 + \theta_5 W Z_{i,t} + \varepsilon_{i,t}, \quad (5)$$

式中: ρ 为被解释变量空间滞后项; β 为解释变量与控制变量系数; θ 为解释变量与控制变量空间滞后项系数; Z 为一系列控制变量; W 为空间权重矩阵。

3.2 空间权重矩阵构建

空间权重矩阵起衡量空间各变量间关联程度的

作用,其包括空间 0-1 权重矩阵、地理距离权重矩阵、经济距离权重矩阵以及空间嵌套权重矩阵,由于篇幅的限制,本文采取最常规的空间 0-1 权重矩阵,构建如下:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{区域 } i \text{ 与区域 } j \text{ 相邻;} \\ 0, & \text{区域 } i \text{ 与区域 } j \text{ 不相邻。} \end{cases}$$

即当两区域相邻时,则区域间存在空间相关性,系数为 1;反之,系数为 0。

3.3 空间自相关模型检验

数据的空间相关性是使用空间计量模型进行实证研究的前提。因此,在模型估计前,需先对数据的空间相关性进行探究。本文用全局莫兰指数检验产业结构高级化、产业结构合理化以及碳排放在空间上的相关性(结果见表 4),具体的计算公式如下:

$$I_{\text{Moran's}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为空间权重矩阵系数; n 为研究区域单元总数; x_i 、 x_j 分别为第 i 和第 j 空间的具体属性值,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i。$$

$I_{\text{Moran's}}$ 指数是衡量空间自相关检验最常用的方法,其值域为 $[-1, 1]$ 。如果 $I_{\text{Moran's}} > 0$,表示被检测变量在

空间上具有相关性, 即发展良好的地区将带动周边地区的发展, 且该数值越接近 1, 这种空间相关性越强; 如果 $I_{Moran's} < 0$, 则表明地区发展在空间上存在异质性, 即存在负相关, 其数值越接近 -1, 这种异质性越强; 如果 $I_{Moran's} = 0$, 则表明各区域之间不存在空间效应。

表 4 碳排放、产业结构升级莫兰指数

Table 4 Moran index of carbon emission and industrial structure upgrading

年份	I_{pf}	I_{sa}	I_{sr}	年份	I_{pf}	I_{sa}	I_{sr}
2006	0.36***	-0.014	0.326***	2016	0.329***	0.083*	0.512***
2008	0.34***	0	0.37***	2017	0.362***	0.089*	0.488***
2010	0.353***	0.047	0.416***	2018	0.377***	0.083*	0.476***
2012	0.34***	0.072*	0.478***	2019	0.412***	0.086*	0.451***
2014	0.352***	0.079*	0.467***				

由表 4 可知, 碳排放与产业结构合理化在空间上存在显著的自相关性, 且通过了 1% 水平下的显著性检验。产业结构高级化存在差异性, 截至 2008 年以前, 空间存在负相关, 表现为异质性, 其后产业结构高级

化表现为空间正相关性, 通过 10% 水平下的显著性检验。综上, 产业结构升级与碳排放均存在空间相关性, 可进行后续的空间效应分析。

3.4 空间计量模型选择

进行空间分析前, 需通过检验选取最适合空间计量模型。如表 5 所示, LM 检验及 R-LM 检验分析中, LM 检验均拒绝原假设, 而 R-LM 检验既存在均拒绝原假设, 也存在一个接受原假设另一个拒绝原假设, 初步判定为空间杜宾模型。LR 和 Wald 检验均拒绝原假设, 表明 SDM 模型不会退化。Hausman 检验均拒绝原假设, 选择固定效应模型。固定效应模型分为时间固定、个体固定及双固定, 通过对比分析, 最终选择时间固定效应下的空间杜宾模型。

3.5 SDM 模型估计结果分析

由于篇幅限制, 表 5 仅分析了 30 个省市自治区的产业结构高级化与产业结构合理化对碳排放产生的空间溢出效应。

表 5 空间面板模型回归结果及效应分解

Table 5 Spatial panel model regression results and the effect decomposition

检验 / 变量	产业结构高级化对碳排放				产业结构合理化对碳排放			
	无平方项回归		有平方项回归		无平方项回归		有平方项回归	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect
$\ln I_{sa}$	-0.532 9***(-6.3)	-0.820 0***(-2.91)	-0.301 1***(-2.78)	-1.442 2***(-3.54)				
$\ln I_{sa}^2$			-0.243 8***(-2.89)	-0.545 6*(-1.89)				
I_{sr}					1.374 0***(6.57)	1.648 7***(2.96)	3.406 4***(5.76)	2.823 8*(1.81)
I_{sr}^2							-2.726 3***(-3.8)	-2.695 1(-1.37)
SDM 回归	$\ln e_{co}$	0.195 1(1.5)	1.041 3**(2.32)		0.169 9(1.45)	2.185 0***(5.54)		
	$\ln f_{di}$	-0.173 4***(-11.29)	-0.270 2***(-5.81)		-0.092 2***(-5.66)	-0.179 8***(-4.05)		
	$\ln e_r$	0.211 8***(3.43)	0.099 5(0.45)		0.190 4***(3.06)	0.026 5(0.13)		
	u_{ii}	-0.047 4(-0.09)	-0.514 1(-0.28)		-1.568 6***(-3.96)	-3.695 5*(-2.51)		
	调整 R^2	0.600 3		0.616 3	0.651 7		0.689 0	
	观测数	420		420	420		420	
LM 检验	LMLAG	330.734***		331.327***	343.900***		322.214***	
	LMERR	456.463***		457.517***	507.843***		481.423***	
	R_LMLAG	1.898		1.812	2.207		2.281	
	R_LMERR	127.626***		128.002***	166.150***		161.491***	
退化检验	Wald_spa_lag	87.72***		103.01***	81.59***		82.58***	
	LR_spa_lag	34.08***		51.29***	64.77***		72.69**	
豪斯曼检验	Wald_spa_err	129.47***		115.34***	120.38***		121.64**	
	LR_spa_err	43.76***		54.04***	63.00***		64.85***	
模型选择	F 值	20.98**		32.17***	25.68***		50.90***	
	P 值	0.033 6		0.002 3	0.007 2		0.000 0	
	FE	FE		FE	FE		FE	

表 5 所示结果显示: 1) 在产业结构高级化视角下, 产业结构高级化显著抑制了本地区的碳排放, 通过了 1% 水平下的显著性检验。相比于表 3 的静态回归结果, 当加入空间视角后, 抑制程度得到更大提升, 同时产业结构高级化也显著抑制了周边地区的碳排放, 本地区产业结构升级每提高 1%, 邻近地区的碳排放

将降低 82%, 存在“倒 U 型”变化趋势。2) 在产业结构合理化视角下, 产业结构合理化显著促进了本地区碳排放, 通过了 1% 的显著性水平检验, 且对周边地区表现为显著促进效应, 即本地区产业结构合理化每提高 1 个点, 对周边地区碳排放量造成 1.648 7 个点的正弹性。同时, 在产业结构合理化与碳排放之间

存在“倒U型”增长，与静态回归分析中结论类似，即呈现出先增后减的变化趋势。

3.6 稳健性检验

上述研究是在空间0-1权重矩阵下进行的分析，为了验证研究的可靠程度，用地理距离权重矩阵替换空间0-1权重矩阵，为了节省篇幅，稳健性检验没有将控制变量纳入模型中，主要对产业结构高级化与产业结构合理化对碳排放进行估计， d 为两省份省会间的经纬距离，公式如下：

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/d, & i \neq j; \\ 0, & i = j. \end{cases}$$

得到的空间计量模型的稳健性检验结果见表6。

由表中稳健性检验结果数据可知，各指标的显著性和系数符号并未发生实质性变化，与原有估计结果基本一致，只在数值上略有差异。这说明改变空间权重矩阵并未影响产业结构升级与碳排放之间的关系，结果仍具有稳健性。

表6 空间计量模型稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results of the spatial econometric model

检验 / 变量	产业结构高级化对碳排放				产业结构合理化对碳排放			
	无平方项回归		有平方项回归		无平方项回归		有平方项回归	
	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect
$\ln I_{sa}$	-0.1203**(-2.29)	-1.1796***(-12.71)	-0.1562***(-3.06)	-1.3768***(-11.37)				
$\ln sa^2$			-0.1965***(-2.81)	0.5456*(-1.89)				
SDM					1.9621*** (10.60)	1.0513*** (3.52)	3.7808*** (7.41)	2.4888*** (3.11)
回归							-2.8107*** (-4.05)	-3.1219** (-2.51)
控制变量	YES		NO		YES		NO	
调整 R^2	0.6661		0.6919		0.4572		0.4558	
观测数	420		420		420		420	
LMLAG	279.197***		276.113***		222.140***		200.549***	
LM	LMERR	322.124***		316.284***		283.333***		262.174***
检验	R_LMLAG	4.720**		3.867**		1.445		5.871**
	R_LMERR	47.647***		44.037***		62.637***		67.496***
退化	Wald_spa_lag	68.01***		76.34***		44.68***		45.72***
检验	LR_spa_lag	69.01***		86.50***		25.34***		25.69***
	Wald_spa_err	80.10***		95.87***		23.92***		24.23***
	LR_spa_err	72.60***		84.03***		48.92***		50.13***
豪斯曼	F值	5.88		7.23		7.34*		9.82*
检验	模型选择	RE		RE		FE		FE

4 研究结论及建议

通过研究我国30个省市自治区2006—2019年产业结构升级与碳排放的面板数据，将产业结构升级划分为产业结构高级化与合理化两个维度，分别研究其与碳排放的关系，结果表明：

1) 产业结构升级与碳排放在空间上具显著相关性，地理因素和空间溢出效应对双方有重要影响。

2) 基准回归中发现，产业结构高级化显著抑制碳排放，二次项系数为负，呈现“倒U型”变化趋势；产业结构合理化显著促进了碳排放，二次项系数为负，表现为先增后减的变化趋势。这是由于资源要素的不均衡竞争，导致产业结构合理化目前还处于促进碳排放一侧。

3) 区域之间异质性明显，在产业结构高级化视角下，仅东部地区显著抑制了碳排放，中部和西部地区却促进了碳排放，显著性水平低于东部地区；在产

业结构合理化视角下，三大地区均促进碳排放，但东部地区的促进作用不显著，中、西部地区均通过了5%水平下的显著性检验，促进程度大于东部地区。

4) 空间视角下，产业结构高级化除了抑制本地地区的碳排放，也显著抑制了周边地区的碳排放，对周边地区有正向溢出效应，产业结构合理化显著促进周边地区碳排放，存在正向溢出效应。二次项中，均表现为“倒U型”增长。

基于以上结论提出以下建议：

1) 我国应持续推进产业结构合理化进程，加强产业与产业之间的协调治理能力与关联水平，推动各资源要素之间的动态平衡，合理分配要素资源，提高资源利用率，使各产业间均衡发展，寻找产业结构合理化与碳排放协同发展道路，积极过渡好产业结构合理化由促进向抑制的“倒U型”转变。

2) 加强东部、中部以及西部地区产业结构高级化与合理化进程，各区域之间应根据自身的优势进

行互补,促进企业或产业之间达到共同可持续发展,低端产业通过转型升级由低级向高级转变,同时促进劳动密集型向技术密集型转变,为解决资源错配问题提供对策,促进各区域之间的良性循环发展。

3) 政府应根据各地区的发展水平因地制宜实施环境规制政策,深化主要污染物排放总量控制和环境影响评价制度,加强环境综合整治,强化环境风险管理。从空间层面,政府应积极推进生态环境空间管制,完善分区考核评价制度,各企业或产业之间应严格遵守各地环境保护政策,实施区域联合治理。

4) 加强各区域之间的碳交易试点,不能仅局限于本区域内部。同时,各区域之间应当不断建立以碳交易推进碳减排区域协同路径,平衡各区域企业或产业间的供需关系,形成一个活跃的市场交易状态,以达到降低碳排放的效果。

参考文献:

- [1] 刘华军,邵明吉,吉元梦.中国碳排放的空间格局及分布动态演进:基于县域碳排放数据的实证研究[J].地理科学,2021,41(11):1917-1924.
LIU Huajun, SHAO Mingji, JI Yuanmeng. The Spatial Pattern and Distribution Dynamic Evolution of Carbon Emissions in China: Empirical Study Based on County Carbon Emission Data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11): 1917-1924.
- [2] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J].地理学报,2021,76(12):3103-3118.
WANG Shaojian, XIE Zihan, WANG Zehong. The Spatiotemporal Pattern Evolution and Influencing Factors of CO₂ Emissions at the County Level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [3] 魏琦,潘雨,李林静.碳配额与补贴政策下企业减排和社会福利的比较研究[J].南方金融,2021(2):25-37.
WEI Qi, PAN Yu, LI Linjing. A Comparative Study of Corporate Emission Reduction and Social Welfare Under Carbon Quota and Carbon Subsidy Policies[J]. South China Finance, 2021(2): 25-37.
- [4] 王文举,向其凤.中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J].中国工业经济,2014(1):44-56
WANG Wenju, XIANG Qifeng. Adjustment of Industrial Structure and the Potential Assessment of Energy Saving and Carbon Reduction[J]. China Industrial Economics, 2014(1): 44-56.
- [5] 丁斐,庄贵阳,刘东.环境规制、工业集聚与城市碳排放强度:基于全国282个地级市面板数据的实证分析[J].中国地质大学学报(社会科学版),2020,20(3):90-104.
DING Fei, ZHUANG Guiyang, LIU Dong. Environmental Regulation, Industrial Agglomeration and Urban Carbon Emission Intensity: Empirical Analysis Based on Panel Data of 282 Prefecture-Level Cities in China[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2020, 20(3): 90-104.
- [6] 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.
LIU Zhihua, XU Junwei, ZHANG Caihong. Technological Innovation, Industrial Structure Upgrading and Carbon Emissions Efficiency: an Analysis Based on PVAR Model of Panel Data at Provincial Level[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2): 508-520.
- [7] 张华,丰超.创新低碳之城:创新型城市建设的碳排放绩效评估[J].南方经济,2021(3):36-53.
ZHANG Hua, FENG Chao. Innovative and Low-Carbon City: The Impact of Innovative City Construction on Carbon Emission Performance[J]. South China Journal of Economics, 2021(3): 36-53.
- [8] 史丹,张成.中国制造业产业结构的系统性优化:从产出结构优化和要素结构配套视角的分析[J].经济研究,2017,52(10):158-172.
SHI Dan, ZHANG Cheng. Toward the Systemic Optimization of China's Manufacturing Industry Structure: Based on Output Structure Optimization and Element Structure Matching Perspectives[J]. Economic Research Journal, 2017, 52(10): 158-172.
- [9] 钟晓君.服务业外商直接投资与服务业结构升级:作用机理与实证研究[J].暨南学报(哲学社会科学版),2015,37(8):155-164.
ZHONG Xiaojun. Service Foreign Direct Investment and Structure Upgrade of Service Industry: Mechanism and Empirical Study[J]. Jinan Journal (Philosophy & Social Science Edition), 2015, 37(8): 155-164.
- [10] 裴长洪,李程骅.论我国城市经济转型与服务业结构升级的方向[J].南京社会科学,2010(1):15-21.
PEI Changhong, LI Chenghua. On China Urban Economic Transition and Structure of Service Industry[J]. Social Sciences in Nanjing, 2010(1): 15-21.
- [11] 吕炜,王娟.高速增长背景下的产业结构升级迟滞研究:经验证据与体制解析[J].财经问题研究,2012(6):3-10.
LÜ Wei, WANG Juan. Research on the Delay of Industrial Structure Upgrade Under the Background of High Growth: Empirical Evidence and Institutional Analysis[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2012(6): 3-10.
- [12] 匡远配,唐文婷.中国产业结构优化度的时序演变和区域差异分析[J].经济学家,2015(9):40-47.

- KUANG Yuanpei, TANG Wenting. Analysis on the Time-Serial Evolution and Regional Difference of the Optimization of China's Industrial Structure[J]. *Economist*, 2015(9): 40-47.
- [13] 吴振信, 谢晓晶, 王书平. 经济增长、产业结构对碳排放的影响分析: 基于中国的省际面板数据 [J]. *中国管理科学*, 2012, 20(3): 161-166.
- WU Zhenxin, XIE Xiaojing, WANG Shuping. The Influence of Economic Development and Industrial Structure to Carbon Emission Based on China's Provincial Panel Data[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2012, 20(3): 161-166.
- [14] 杨 骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素: 基于 1995—2009 年省际面板数据的研究 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2012, 29(5): 36-49, 148.
- YANG Qian, LIU Huajun. Regional Difference Decomposition and Influence Factors of China's Carbon Dioxide Emissions[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, 29(5): 36-49, 148.
- [15] ZHENG J L, MI Z F, COFFMAN D, et al. Regional Development and Carbon Emissions in China[J]. *Energy Economics*, 2019, 81: 25-36.
- [16] ZHANG F, DENG X Z, PHILLIPS F, et al. Impacts of Industrial Structure and Technical Progress on Carbon Emission Intensity: Evidence from 281 Cities in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 154: 119949.
- [17] 孙丽文, 李翼凡, 任相伟. 产业结构升级、技术创新与碳排放: 一个有调节的中介模型 [J]. *技术经济*, 2020, 39(6): 1-9.
- SUN Liwen, LI Yifan, REN Xiangwei. Upgrading Industrial Structure, Technological Innovation and Carbon Emission: a Moderated Mediation Model[J]. *Journal of Technology Economics*, 2020, 39(6): 1-9.
- [18] 刘 凯, 吴 怡, 陶雅萌, 等. 中国省域生态文明建设对碳排放强度的影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(7): 50-56.
- LIU Kai, WU Yi, TAO Yameng, et al. The Influence of Ecological Civilization Construction to Carbon Emission Intensity in China's Provinces[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(7): 50-56.
- [19] 张翠菊, 张宗益. 中国省域产业结构升级影响因素的空间计量分析 [J]. *统计研究*, 2015, 32(10): 32-37.
- ZHANG Cuiju, ZHANG Zongyi. Analysis on Influence Factors of China's Provincial Industrial Structure Upgrading from a Spatial Econometrics Perspective[J]. *Statistical Research*, 2015, 32(10): 32-37.
- [20] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响 [J]. *经济研究*, 2011, 46(5): 4-16, 31.
- GAN Chunhui, ZHENG Ruogu, YU Dianfan. An Empirical Study on the Effects of Industrial Structure on Economic Growth and Fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4-16, 31.
- [21] 白雪洁, 周晓辉. 产业结构升级的经济增长空间溢出: 软环境还是硬设施 [J]. *山西财经大学学报*, 2021, 43(9): 44-56.
- BAI Xuejie, ZHOU Xiaohui. Spatial Spillover of Economic Growth in the Upgrading of Industrial Structure: Soft Environment or Hard Facilities[J]. *Journal of Shanxi University of Finance and Economics*, 2021, 43(9): 44-56.
- [22] 原毅军, 陈 喆. 环境规制、绿色技术创新与中国制造业转型升级 [J]. *科学学研究*, 2019, 37(10): 1902-1911.
- YUAN Yijun, CHEN Zhe. Environmental Regulation, Green Technology Innovation and the Transformation and Upgrading of China's Manufacturing Industry[J]. *Studies in Science of Science*, 2019, 37(10): 1902-1911.
- [23] 钱海章, 陶云清, 曹松威, 等. 中国数字金融发展与经济增长的理论与实证 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2020, 37(6): 26-46.
- QIAN Haizhang, TAO Yunqing, CAO Songwei, et al. Theoretical and Empirical Analysis on the Development of Digital Finance and Economic Growth in China[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, 37(6): 26-46.
- [24] 张 华, 魏晓平. 绿色悖论抑或倒逼减排: 环境规制对碳排放影响的双重效应 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(9): 21-29.
- ZHANG Hua, WEI Xiaoping. Green Paradox or Forced Emission-Reduction: Dual Effect of Environmental Regulation on Carbon Emissions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(9): 21-29.
- [25] 刘健强, 马晓钰. 人口老龄化、产业结构升级与碳排放: 基于 STIRPAT 模型的空间计量分析 [J]. *金融与经济*, 2021(7): 54-62.
- LIU Jianqiang, MA Xiaoyu. Population Aging, Industrial Structure Upgrading and Carbon Emissions: Spatial Measurement Analysis Based on STIRPAT Model[J]. *Finance and Economy*, 2021(7): 54-62.

(责任编辑: 廖友媛)