

产业绿色转型中能源回弹效应的 污染外部性贡献差异研究

马 青

(重庆师范大学 经济与管理学院,重庆 401331)

摘 要:中国产业绿色转型中是否会因能源需求扩张触发能源“回弹效应”,进而形成“效率提升—需求反弹”动态矛盾,成为制约“双碳”目标实现与区域协调发展的关键议题,但现有研究对这一问题背后的双向耦合机制缺乏深入剖析。本文综合运用PVAR模型、空间Durbin模型和系统GMM法,实证检验产业绿色转型对能源消耗的回弹效应以及污染溢出(外部性)贡献差异。研究结果表明:(1)产业绿色发展指数、能源消耗具备良好连续性与累积性,产业绿色转型与能源消耗存在动态互动关系,整样本不存在能源“回弹效应”;但黄河中游的综合能源回弹系数最高,北部沿海次之。(2)基于污染溢出的空间模型回归,产业绿色发展对本省能源消耗存在“回弹效应”,但倒逼周边地区能源消耗降低;产业绿色转型对本省与周边地区的辐射作用更强,有利于本省碳与废水减排;能源消耗增加导致本省碳排放与固体废物排放总量上升。(3)通过对效率约束模型回归,产业绿色转型、能源消耗对周边地区节能减排效率存在显著的“转移扩散效应”,尤其在节能减排效率排名30%~70%之间的省市表现最为明显。本研究对产业转型引起的“效率陷阱”进行理论和实证检验,论文结尾就能源系统与产业体系深度协同提出对策建议,对我国区域绿色转型政策设计及“双碳”目标实现具有重要的参考价值。

关键词:产业绿色转型;能源回弹效应;污染溢出;PVAR模型;环境规制

中图分类号:F269.23;F062.2

文献标识码:A

文章编号:1673-0429(2026)03-0108-12

DOI:10.19742/j.cnki.50-1164/C.260310

在全球低碳转型与我国“双碳”目标背景下,产业绿色转型作为破解资源环境约束的关键路径,与2025年中央经济工作会议中“协同推进降碳减污扩绿增长,加快经济社会发展全面绿色转型”的部署要求高度契合,也是“十五五”时期推动绿色转型发展的核心攻坚方向,但转型中可能面临着效率提升与需求反弹并存、本地减排与污染外溢交织的双向冲突^[1]。而能源作为产业绿色转型的重要因素,是我国经济发展不可或缺的核心资源。我国能源消费总量位居全球首位,2025年达61.7亿吨标准煤,同比增长3.5%,尤其在黄河中游、北部沿海等工业密集区域,因传统能源依赖度高、产业规模扩张效应显著,出现技术进步未必抑制能耗总量的“杰文斯悖论”^[2]。与此同时,河北、山东等省份碳排放外溢,周边地区因承接污染密集型产业转移,节能减排效率下降,凸显污染外部性贡献的区域异质性,与“十五五”规划建议中“探索产业转出地和承接地税收、用地和碳排放指标等利益分享机制”的政策导向形成鲜明对

收稿日期:2025-05-16

作者简介:马青,女,管理学博士,重庆师范大学经济与管理学院副教授,硕士生导师,主要研究方向:环境经济学,区域经济学。

基金项目:国家社会科学基金西部项目“‘环境贫困陷阱’下政府生态富民推进与再分配效应评估”(23XJY001);重庆市教委科技青年项目“新型城镇化与城乡生态环境协同治理的耦合机制路径研究”(KJQN202000529)。

照。这种能效提升、需求反弹与污染转移的多重矛盾,亟需对产业绿色转型与能源消耗的双向耦合作用及其环境效应展开研究。本文首次将污染外部性贡献差异纳入能源回弹效应分析框架,通过定量方法研究能源消耗与产业绿色转型双向耦合作用的具体形态,异质环境效应的表现形式,以及两者对节能减排效率的空间溢出的影响机制。可阶段性反映产业绿色转型能否有效支撑经济绿色发展和生态改善。尤其针对高回弹区域政策设计提供量化依据,对溢出效应显著地区可参考设计跨区域环境协同治理机制,部分区域可尝试借助数字化驱动产业流程再造、重构能源结构,加快产业绿色转型,既守护生态环境,又能为全国绿色经济转型打造示范样板,具备现实借鉴意义。

一、文献综述与理论分析

(一) 文献综述

产业绿色转型、能源回弹效应与污染外部性之间存在紧密动态耦合关联。其中,产业绿色转型通过产业结构优化与技术创新实现耗能少、排污低、效率高的绿色发展路径。部分学者论证了开展绿色经济的重要意义、不同行业绿色发展方向和路径及存在挑战^[3-8]。量化研究方面,李谷成基于农业层面实证分析农业绿色发展与生态环境关系^[9];较多学者陆续加入经济变量展开对工业绿色转型实证检验^[10-12]。上述学术成果具有重要理论参考价值,但已有研究多为单向论证,忽略要素互动的动态性以及跨区域带来的污染外溢性。

而关于能源回弹效应,杰文斯(Jevons)在1865年提出,能源效率提高伴随技术进步会促进经济增长进而能源需求增加,也会导致能源使用成本降低,从而导致能源消费增加^[13]。这一论断被称为“杰文斯悖论”。近年来,部分学者开始关注能源回弹效应带来污染排放影响。Li和Lin指出,为遏制能源回弹效应并减少碳排放,在提高能源效率的同时,有必要支持相应产业政策^[14]。王蕾和郑静宇则认为,中国正处于利用产业结构优化抑制能源回弹效应的攻坚阶段^[15]。

目前鲜有研究从产业绿色转型视角基于供需双侧失衡对污染排放溢出效应展开分析。更多针对能源消耗与产业转型,产业转型与污染排放两两关系进行讨论。部分学者在实证中关注了能源消耗与产业节能增产^[16-17]。而产业绿色转型与污染排放方面,张金英和陆春晓分析环境政策对工业绿色转型的影响,提出加强与市场需求衔接并提升政策协调性^[18]。综上,现有研究虽在产业转型与能源回弹效应的基础理论与测算方法上成果丰硕^[19-21],但在与污染外部性关联研究中仍存在研究空间。首先,关于产业绿色转型与能源消耗双向耦合理论机制有待系统梳理;其次,基于需求侧与供给侧双重视角可量化分析产业转型与能源消耗的动态关系;再次,考虑政府规制约束下产业、能源与环境的转移扩散效应;最后,可考虑环境污染外部性与区域节能减排效率异质性展开时空双重检验。鉴于此,本文创新性地从污染外部性视角切入,深入探究产业绿色转型中能源回弹效应的污染外部性贡献差异,拓展能源回弹效应领域的研究边界,并为区域绿色发展政策的精准制定提供理论支撑。

(二) 理论分析

产业快速发展与能源消耗粗放式“黑色增长”引致生态环境问题突出,盲目追求地方经济增长催生产业出清机制,即重污染产业驱逐清洁产业,带来“市场”局部失灵等问题。地方政府为了实现“经济与环境、速度与高质量”有机统一^[22],通过制定环境规制政策进行干预,产业绿色转型发展及能源消耗的污染溢出会产生不同方向波动^[23-24]。下面就产业绿色转型与能源消耗互动、回弹效应与污染外部性双向耦合等进行理论分析,以期借助产业绿色转型有效实现能耗“双控”。

一方面,产业绿色转型过程中可能会带来能源消耗依赖度较高企业进行投机选择,进而引发能源回弹效应和污染扩散效应^[25]。(1)基于需求侧视角,产业绿色转型通过技术进步提升能源利用效率,当企业能源效率提升时,边际生产成本下降,企业倾向于扩大生产规模以获取更大市场份额。这种微观层面的产量扩张行为,会通过规模效应转化为宏观层面的能源需求增长,最终促使能源消费总量不降反升(回弹效应),能耗增加导致废气等污染物排放也会相继增加^[26]。(2)基于供给侧视角,在地方政府制定环境规制等外部政策约束下,如提高污染物排放标准、征收碳税,高污染密集型企业生产成本显著上升^[27],倒逼重污染密集型企业就近转移到污染排放约束较宽松地区,间接不利于周边地区环境污染减排。这种微观企业的区位重置行为,在宏观层面表现为污染产业的空间扩散效应^[28]。另一方面,能源回弹效应与污染外部性之间存在复杂双向耦合机制,正向传导通过能源消费扩张、产业结构调整 and 消费模式转变等路径,使回弹效应加剧污染外部性;反向反馈则通过环境规制约束、公众环保意识驱动和技术创新协同等路径,对回弹效应产生调节作用。具体的理论机制框架如图1所示。

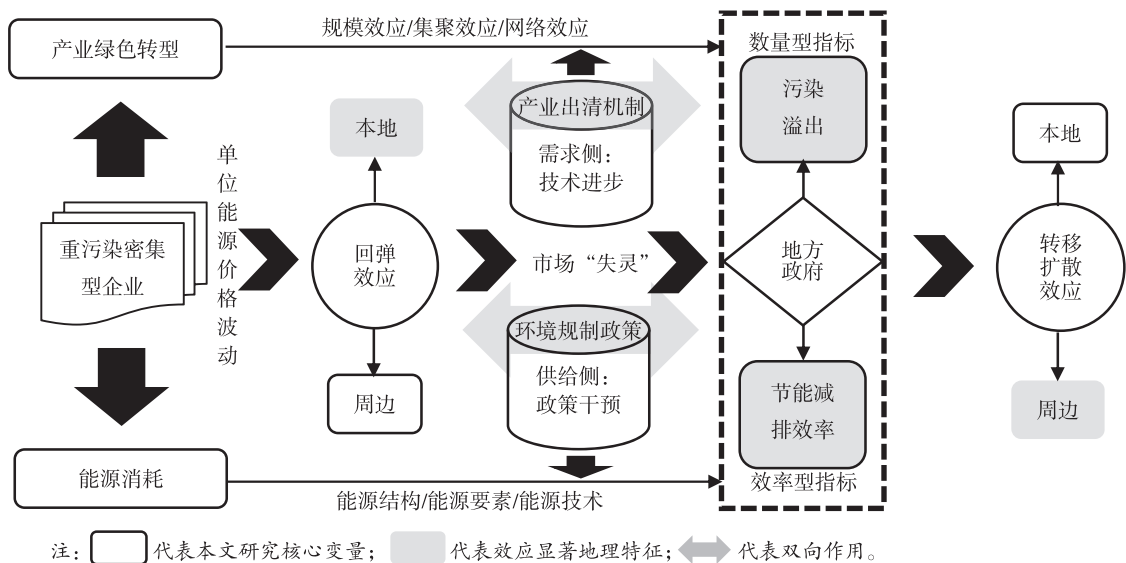


图1 理论框架图

二、指标介绍和模型设定

(一) 指标介绍

1. 被解释变量:产业绿色发展指数

产业绿色转型作为我国绿色经济的产业基础,在设定产业绿色发展指数时需兼顾绿色与发展两方面,笔者借鉴了 UNEP 的绿色经济评价指标,以及借鉴我国学者何剑和王欣爱构造的产业绿色发展综合指数^[29],通过全局因子分析法对产业绿色发展的三大维度(公平、效率和规模)细分的 11 个基础指标确定不同视角变量权重,并将基础指标构成综合评价函数。

2. 解释变量:能源消耗和环境污染

三大污染物排放指标:CO₂、工业废水以及固体废物。由于废水与固体废物排放量的面板数据可以在 Wind 资讯搜集到,CO₂ 排放指标并无统一计算标准和现成数据,因此,笔者参考 Ren 等的基于 8 种化石燃料的碳排放计算方法^[30],公式如下:

$$c_CO_{2j} = qnet_j \times 10^{-9} \times c_per_j \times ratio_C_j \times 10^3 \times 3.667 \quad (1)$$

上式(1)中, c_CO_{2j} 为 CO_2 系数; $qnet_j$ 为低位发热量平均值; c_per_j 为单位热值含碳量; $ratio_C_j$ 为碳氧化率。

$$CO_{2i,t} = (\sum_{j=1}^8 c_CO_{2j}) \times Q_{i,j,t} \quad (2)$$

上式中, $CO_{2i,t}$ 为 t 年 i 省 CO_2 排放量; $Q_{i,j,t}$ 为某年某省的能源消耗量。

3. 控制变量:人均 gdp (国民生产总值(1978 年为 100)),反映整体经济水平; fdi 衡量人均外商直接投资水平,因国内环境门槛较低,成为吸引外来投资主要原因之一,外商投资与生态污染息息相关; sjr 为工业产值比,能源消耗与污染排放多与工业企业生产相关,从而由工业总产值与国民生产总值比值来表示。 $urban$ 是城镇化率反映城镇人口占比,城镇化推进常常会出现环境破坏污染增加,有必要分析两者的相关关系。

概括来说,笔者以能源消耗量、产业绿色转型、污染物排放为内生变量建立回归方程。本文选择变量主要来自 2014 至 2023 历年《中国经济与社会发展统计数据库》、Wind 资讯等,部分缺失数据为了确保稳定性选用 EM 算法补全。

(二) 模型设定

1. PVAR 模型的建立

考虑到模型构建缺失指标及各变量滞后性易带来模型估计内生性问题,本文尝试在模型里添加变量滞后一期,参考连玉君、骆永民采用 PVAR 模型选择面板向量自回归法^[31-32],将产业绿色指数、三大污染物与能源消耗作为内生指标,构建包含固定与时期效应的动态面板 VAR 模型:

$$Z_{i,t} = \beta Z_{i,t-1} + \delta_i + \eta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

上式(3)中, $Z_{i,t}$ 为 5 个指标向量:产业绿色转型、碳排放、固体废物排放、废水排放和能源消耗; δ_i 代表时间非观察效应,涵盖因时间推移带来的变化比如要素价格波动等; η_t 是各省非观察效应; $\varepsilon_{i,t}$ 是随机误差项; i 为截面(省); t 为时间(年)。

2. 探索性空间分析模型

考虑到空间模型比较复杂,为确保回归结果的稳健性,在设立空间计量模型时,还需检验产业绿色转型指标是否存在空间依赖性,笔者通过全局 Moran's I 值及对应统计检验对样本数据展开空间依赖性估计,关于 Moran's I 的构成如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

上式中, x_i 是属性值, w_{ij} 是空间权重矩阵中要素。如果 I 大于等于 0,认为存在正自相关,“高一高相邻、低—低相邻”;如果 I 小于等于 0,认为样本对象为负自相关,“高一低”值集聚;当 Moran's I 取值近似为 0,可认为样本为随机空间分布。

通过 Moran's I 论证指标空间依赖性后,为分析产业绿色转型的空间环境效应,建立如下的空间面板模型(SPDM)。

$$\begin{cases} Y_{it} = \alpha_i + \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} Y_{jt} + \beta X_{it} + \varphi \sum_{j=1}^N W_{ij} X_{jt} + U_i \\ U_i = \lambda W \mu_i + \varepsilon_i \end{cases} \quad (5)$$

上式中, i, j 为不同地区; t 为时间; W_{ij} 为空间权重; X_{it} 为自变量; Y_{it} 为各地产业绿色发展指数; β 是自变量估计系数; ρ 是因变量空间估计系数; φ 是自变量空间回归系数; λ 是空间误差估计系数。

三、实证分析

(一)PVAR 模型回归

1. 多重共线性检验

考虑文中涵盖指标较多,对样本展开相关检验是否存在多重共线性问题。首先通过计算指标间两两相关系数 r ,初步分析是否存在严重共线性问题,计算结果见表 1。

表 1 相关系数 r 矩阵

自相关检验						
	变量	产业绿色转型	碳排放	固体废物排放	废水排放	能源消耗
	产业绿色转型	1.000				
	碳排放	0.143	1.000			
	固体废物排放	0.349	0.274	1.000		
	废水排放	0.474	0.299	0.129	1.000	
	能源消耗	0.483	0.394	0.671	0.394	1.000
	变量	平均值	碳排放	固体废物排放	废水排放	能源消耗
	VIF	4.54	6.04	1.97	1.27	8.87
	1/VIF	0.220	0.166	0.506	0.789	0.113
单位根检验						
检验	原假设	产业绿色转型	碳排放(-1)	固体废物排放(-1)	废水排放(-1)	能源消耗(-1)
ips	H ₀ :所有面板都 存在单位根	-1.920**	-2.241***	-1.887**	-2.231***	-1.776*
		(0.019)	(0.000)	(0.027)	(0.000)	(0.083)
		gind	carbon	solid	water	energy(-1)
llc		-11.128***	-5.301***	-5.300***	-7.472***	-6.230***
		(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
	平稳性	平稳序列	平稳序列	平稳序列	平稳序列	平稳序列

注:() 括号内为 P 值; $X(-1)$ 表示对应变量 X 的一阶差分。

首先,表 1 中绝大部分指标间相关系数 $r<0.5$,且各指标方差膨胀因子以及平均方差膨胀因子 4.54 均小于 10,可充分认为,文章中选取自变量间无严重多重共线性问题;最后,借助单位根 llc 与 ips 检验进行相同与不同单位根检验,表 1 中的各变量均为平稳序列。

2. 基于面板数据的 VAR 估计

笔者参考常规筛选标准,依据信息量最小数值,即 AIC(最小值:7.761)、BIC(最小值:11.427)、HQIC(最小值:9.292)标准选择出最优滞后期数为 1 阶。使用统计软件 stata 11.0 进行 500 次 Monte-Carlo 模拟计算,最终通过系统广义矩法得出相关系数,如表 2 所示。

观察表 2 中各变量均表现出显著动态关系,在产业绿色发展指数回归中,产业绿色转型分别受到碳排放、废水排放正向作用,固体废物排放与能源消耗负向作用;其中能源消耗对产业绿色转型回归系数显著,样本回归结果说明目前增加能源消耗阻碍了产业进行绿色转型。我国近十年来粗放式能源产业“黑色增长”本身对产业绿色转型带来阻力,不利于省份间合作与绿色发展^[33]。反之,产业绿色转型发展倒逼能源消耗量减少,控制能耗减少可进一步带来固体废物与废水减排;同时,产业绿色转型有利于固体废弃物减排,说明产业绿色转型是我国产业转型发展的正确方向^[34]。

表 2 PVAR 模型 GMM 估计系数

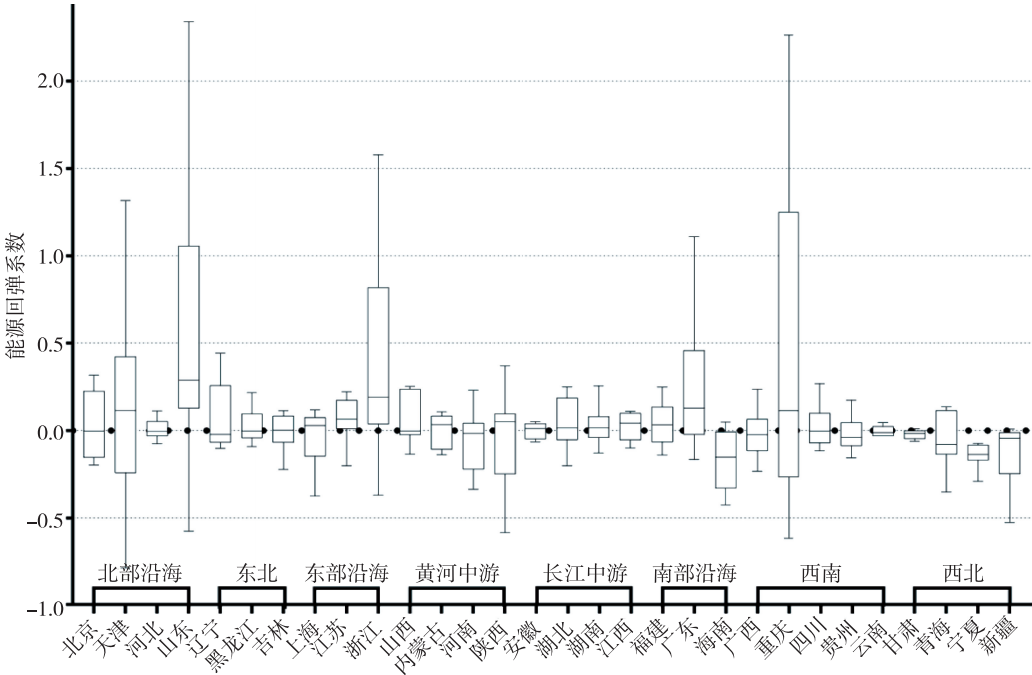
反应变量	统计量	冲击变量				
		h_产业绿色转型 滞后一期	h_碳排放 滞后一期	h_固体废物排放 滞后一期	h_废水排放 滞后一期	h_能源消耗 滞后一期
h_产业绿色转型	b_GMM	0.276***	0.074	-0.002	0.002	-0.039**
h_能源消耗	b_GMM	-0.005***	0.004	-0.001	0.004	0.730***
h_碳排放	b_GMM	0.048	1.043*	-0.001	0.002	0.126***
h_固体废物排放	b_GMM	-0.057***	-2.241	0.690*	0.065	1.278*
h_废水排放	b_GMM	5.669	-4.107	-0.015	0.709***	0.642*
h_产业绿色转型	se_GMM	0.283	0.150	0.004	0.002	0.042
h_能源消耗	se_GMM	0.460	0.590	0.016	0.004	0.673
h_碳排放	se_GMM	0.464	0.606	0.012	0.004	0.095
h_固体废物排放	se_GMM	6.236	11.050	0.378	0.040	4.990
h_废水排放	se_GMM	9.062	5.624	0.224	0.100	3.284

注:h_X 是变量 X 的 helmert 转换 L_X 是变量 X 滞后一期。b_GMM 是系数,se_GMM 是标准差。

3. 能量回弹系数及相关指标统计分析

(1) 各省能源回弹系数

为了了解各省能源回弹系数的平均水平,本文使用能源消费对工业绿色转型的弹性作为衡量能源回弹效应的指标。即: $Ey/Ex=(\Delta y/y)/(\Delta x/x)=f'(x)\times x/y$ 。其中,y 代表能耗;x 代表行业的绿色转型。具体结果如图 2 所示。



注:考虑内生性问题和数据可获得性,进行滞后期计算且部分省份能量回弹系数异常值已剔除。

图 2 各省能源回弹系数

从图 2 中发现,区域间能源回弹效应存在显著异质性,黄河中游的能源回弹系数最高;北部沿海的能源回弹系数次之;东部沿海以清洁产业为主体,能源回弹效应最低。上述结果显示,高回弹区域作为主要的工业发展城市,对能源依赖度较高,需强化能源价格形成机制改革,遏制转型期能源消费非理性增长;低回弹地区应发挥示范效应,构建绿色产业协同网络^[35]。

(二) 空间杜宾模型回归

1. Moran's I 指数检验及空间模型估计

在选择空间面板模型前,首先,基于邻接距离矩阵计算 Moran's I 数值,通过检验莫兰指数均在 10%显著水平下呈正值,可认为样本数据中产业绿色发展指数具有空间正相关性。为了更清晰研究产业绿色转型、能源消耗带来的环境污染溢出效应,笔者通过偏微分方程将空间效应进行分解,深入了解环境污染排放量分别受能源消耗与产业绿色转型的空间作用水平即直接与间接效应。

表 3 空间 Durbin 模型回归

变量		碳排放	固体废物排放	废水排放
	产业绿色转型	-0.371**(0.225)	-2.089(2.586)	38.858*** (9.546)
	能源消耗	0.572*** (0.091)	1.039*(0.564)	-1.548(2.702)
W×产业绿色转型		0.476*(0.250)	3.685 (3.474)	-20.319*(9.024)
W×能源消耗		-0.127** (0.065)	-0.354(0.281)	3.680(3.821)
LogL		-61.699	-806.886	-1132.175
R ²		0.676	0.574	0.761
空间双固定效应分解				
Y/X		直接效应	间接效应	总效应
碳排放	产业绿色转型	-0.543**(0.215)	0.448*(0.233)	-0.095(0.077)
	能源消耗	0.437*** (0.090)	-0.081*(0.063)	0.356*** (0.111)
固废排放	产业绿色转型	-3.068(2.462)	3.620(3.389)	0.552*(1.470)
	能源消耗	1.044*(0.573)	-0.231(0.383)	0.813(0.650)
废水排放	产业绿色转型	41.443*** (9.277)	-18.304*(11.185)	23.139*** (4.757)
	能源消耗	-1.494 (2.745)	3.649(3.681)	2.155 (2.966)

表 3 通过双时空固定回归估计能源消耗、产业绿色转型对环境污染溢出的直接效应、间接效应与总效应水平。(1)在碳排放中,产业绿色转型显著带来本省碳减排为 54.3%,但邻省碳排放系数不显著;能源消耗表现正好与产业绿色转型相反。(2)在固体废物排放中,能源消耗在 10%显著水平下带来本省固体废物排放增加且远超对邻省固体废物外溢效应,可见控制能源消耗是降低固体废物排放总量的关键。(3)在废水排放中,产业绿色转型显著带来本省废水排放增加,但对邻省辐射效应为负。综上,针对碳排放本地强减排与区域弱溢出特征。

(三) 稳健性回归

“十三五”规划纲要将“节能减排”作为我国发展转型重要方向,标志着我国不仅要控制污染物排放总量还需提高节能减排效率。因此,笔者借鉴王艳和苏怡采用超效率 DEA 数据包络分析测算各省节能

减排综合效率值代替原来被解释变量环境污染物排放量相关指标。同时,为了了解不同节能效率水平阶段的异质影响,划分了三个子样本。

表 4 基于节能减排效率的空间 Durbin 模型回归

变量	全样本(0~100%)	子样本(前 30%)	子样本(前 70%)	子样本(后 30%)
产业绿色转型	-0.028 (0.122)	0.047*(0.152)	-0.104(0.145)	0.039(0.033)
能源消耗	0.006*(0.016)	-0.033(0.068)	0.027*(0.066)	0.009(0.015)
W×产业绿色转型	-0.236**(0.250)	0.469*(0.349)	0.297(0.333)	0.057(0.076)
W×能源消耗	-0.043*(0.025)	-0.034*(0.153)	-0.073*(0.147)	-0.014*(0.033)
LogL	-156.661	-148.289	-134.992	326.170
R ²	0.538	0.588	0.626	0.787

空间双固定效应分解

被解释变量/解释变量		直接效应	间接效应	总效应
全样本 (0~100%)	产业绿色转型	-0.034(0.118)	-0.235**(0.236)	-0.269(0.177)
	能源消耗	0.005*(0.016)	-0.044*(0.025)	-0.039(0.028)
子样本 (前 30%)	产业绿色转型	0.031*(0.150)	0.428*(0.309)	0.460**(0.321)
	能源消耗	-0.034(0.070)	0.025*(0.136)	-0.008(0.137)
子样本 (前 70%)	产业绿色转型	0.036(0.033)	0.046(0.064)	0.082 (0.065)
	能源消耗	0.010*(0.015)	-0.015*(0.028)	-0.005(0.028)
子样本 (后 30%)	产业绿色转型	-0.113(0.143)	0.297(0.308)	0.185(0.326)
	能源消耗	-0.027(0.066)	-0.058*(0.136)	-0.085(0.140)

注:()内为标准误;*、**、***依次是 10%、5%、1%显著性统计。

观察表 4 发现,(1)在节能减排效率全样本模型中产业绿色转型对邻省节能减排效率显著为负,说明产业绿色转型提高环境污染门槛约束,间接不利于周边环境污染防治(转移效应);而本省能源消耗对自身节能减排效率为正,对邻省节能减排效率为负,总效应为负不利于节能减排效率提高,可能是清洁能源技术推广对使用传统能源的企业带来了成本与技术冲击^[36],倒逼部分企业为了降低经营风险就近扩散转移到对能源消耗要求较低区域(扩散转移效应)。(2)观察节能减排效率回归结果发现,产业绿色转型对节能减排存在非线性关系,排名前 30%省份样本回归中对本地及周边总效应均显著为正即促进本地及周边节能减排效率提升,反之,前 70%省份样本回归产业绿色转型对节能减排效率提升不突出,还需重点关注处在 30%~70%区间的省份,如陕西、甘肃、山东、云南、河北等地的产业绿色转型。

四、进一步讨论:基于供给侧减排政策干预的论证

基于供给侧视角,原毅军等也表示我国产业调整主要参考地方政府产业政策引领^[37]。地方政府“有形之手”即环境规制政策外在约束对本地及周边是产生环境污染“减排效应”抑或“绿色悖论”还有待进一步论证。关于地方政府环境规制:本文参考郭显光的完善熵值法,较全面地衡量各地环境规制综合水平^[38],如表 5 所示。

表 5 空间 Durbin 模型回归

变量		碳排放	固体废物排放	废水排放
政策 干预	环境规制	-2.724 ^{**} (8.252)	-0.817 ^{***} (0.344)	-1.821 [*] (1.008)
	W×环境规制	-4.368 [*] (7.529)	-2.561 ^{***} (0.978)	-9.328 ^{***} (2.717)
本地 效应	产业绿色转型	-0.557 ^{***} (0.291)	-2.917(3.248)	0.492 ^{***} (9.416)
	能源消耗	0.297 ^{***} (0.045)	-0.292(0.498)	-4.952 ^{***} (1.438)
	环境规制×产业绿色转型	9.518 ^{**} (4.131)	-0.484(0.463)	-0.394(1.337)
	环境规制×能源消耗	2.440 ^{***} (0.549)	0.301 ^{***} (6.117)	0.107(0.179)
	W×产业绿色转型	0.845(0.789)	0.264 ^{***} (8.799)	0.212(0.261)
周边 溢出 效应	W×能源消耗	-0.345 ^{***} (0.124)	0.565 ^{**} (1.304)	-3.707(3.917)
	W×环境规制×产业绿色转型	-5.410(0.114)	5.736 ^{***} (1.290)	-0.825(3.700)
	W×环境规制×能源消耗	0.790(1.395)	3.382 [*] (0.162)	0.733 [*] (0.456)
LogL		50.601	-697.827	-1 028.287
R ²		0.395	0.292	0.721
总效应				
变量		碳排放	固体废物排放	废水排放
直接 效应 +	环境规制	-10.806 [*] (7.405)	-3.050 ^{***} (0.696)	-8.607 ^{***} (1.973)
	能源消耗	-0.034(0.109)	0.167 ^{**} (1.057)	-6.706 ^{**} (2.846)
	产业绿色转型	-0.168(0.751)	-0.188 ^{**} (7.442)	0.552 ^{***} (0.206)
间接 效应	环境规制×产业绿色转型	4.097 [*] (1.107)	4.173 ^{***} (1.110)	-0.927(3.061)
	环境规制×能源消耗	2.946 ^{**} (1.323)	3.269 ^{**} (0.127)	0.635 [*] (0.355)

注：() 内为标准误；*、**、***依次是 10%、5%、1%显著性统计。

表 5 中,环境规制均显著促进本地及周边地区三大污染物减排,总效应也均在 10%显著水平下显著为负发挥污染“减排效应”。在交叉项中,满足 10%显著水平条件的系数均呈正值。这说明,环境规制越严,越能扩大能源消耗、产业绿色转型对三大污染物排放的影响。综合来看,环境规制对产业绿色转型的本省碳/废水排放与邻省固体废物排放发挥了“创新补偿效应”、对能源消耗的本省及周边地区整体碳/废水排放发挥了“倒逼效应”,但对能源消耗的周边地区固体废物排放呈现“绿色悖论”影响。

五、结论与对策

本文通过能源消耗需求视角实证检验产业绿色转型是否引起能源“回弹效应”?考虑到两者均具有较强的环境污染外部性特征,进一步通过 PVAR 与空间 Durbin 模型论证产业绿色转型与能源消耗对污染排放溢出的贡献差异。并结合中国国情政策干预,添加了基于供给侧视角的地方政府环境规制政

策变量,进一步尝试论证产业与能源在环境规制政策约束下是否存在跨省“污染转移扩散效应”。本文主要结论如下:第一,从双向耦合关系来看,整体样本不存在能源“回弹效应”,但区域异质性显著,黄河中游、北部沿海等传统工业密集区因能源依赖度高、产业规模扩张效应突出,呈现较强回弹效应,而东部沿海清洁产业集聚区则通过技术进步有效抑制了能耗增长。第二,基于空间溢出效应研究,本地产业绿色转型可能因能源效率提升引致本地需求反弹,但能通过技术扩散与产业转移倒逼周边地区降低能耗,形成“本地回弹与周边减排”的空间再分配格局,尤其在节能减排效率中排名 30%~70% 的省份,验证了产业转型中“效率陷阱”的存在。第三,严格的本地环境政策通过“创新补偿效应”强化产业绿色转型的减排效果,却可能因污染密集型产业跨区域转移引发周边地区的“绿色悖论”,若缺乏区域协调政策,易导致污染跨区域转嫁,凸显了政策设计需兼顾本地激励与区域协调的重要性。

为了推动能源系统与产业转型深度协同,助力“双碳”目标落地,结合研究结论提出以下针对性建议:第一,实施差异化的产业能源政策,对高回弹效应的黄河中游、北部沿海地区,应强化能源价格市场化改革,针对钢铁、煤炭、化工等高耗能产业占比超过 40% 的黄河中游省份(如山西、陕西),建立碳税分档机制,回弹系数大于 0.5 的企业碳税提升 20%;对低回弹的东部沿海地区,重点强化技术扩散与模式复制,按集群内企业绿色技术交易额给予平台运营补贴^[39],设立专项基金支持东部节能技术企业在中西部建立示范项目,推动智能制造等技术向传统工业转移。第二,建立跨区域环境治理协同机制,通过建立经济圈试点环境成本追溯制度与黄河流域污染转移预警模型,尤其关注 30%~70% 省市的减排潜力,通过政策引导促进其承接绿色技术转移,并规定高耗能产业转移需配套节能技术输出,避免“污染转移”替代“绿色转型”。第三,依托环境规制政策的“倒逼效应”,为平衡本地减排与周边区域协调,黄河流域可建立多省区环境规制政策协同联盟,引导企业加大污染无害化处理技术研发,推动重污染产业向低碳工艺转型^[40];同时,可尝试建立全国统一产业绿色转型动态监测平台,实时披露企业能源消耗、污染排放数据,对接受转移产业的省市征收污染转移补偿,用于当地环境治理与绿色技术研发,最终实现经济高质量发展与生态环境改善的帕累托改进。

[参 考 文 献]

- [1] 刘平阔,桂俊卿. 中国区域碳中和的技术溢出与能源回弹:机理、实证及启示[J]. 自然资源学报,2023(12):3003-3023.
- [2] 王林辉,王辉,董直庆. 经济增长和环境质量相容性政策条件——环境技术进步方向视角下的政策偏向效应检验[J]. 管理世界,2020(3):39-60.
- [3] 马林. 内蒙古绿色产业体系构建的基本思路[J]. 中国人口·资源与环境,2004(6):33-37.
- [4] 陈诗一. 中国的绿色工业革命:基于环境全要素生产率视角的解释(1980—2008)[J]. 经济研究,2010(11):21-34,58.
- [5] 孙博文. 加快发展方式绿色转型:内在逻辑、任务要求与政策取向[J]. 改革,2023(10):60-73.
- [6] 仇焕广,黄青. 农业绿色转型与高质量协调发展的理论逻辑与实践[J]. 农业经济问题,2025(2):15-23.
- [7] 中国社会科学院工业经济研究所课题组,李平. 中国工业绿色转型研究[J]. 中国工业经济,2011(4):5-14.
- [8] 赵奥,武春友. 中国经济绿色转型态势系统评价——基于熵-OWA 算子与灰关联改进 TOPSIS[J]. 技术经济,2018(7):99-106.
- [9] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命:1978—2008 年[J]. 经济学(季刊),2014(2):537-558.
- [10] 景维民,张璐. 环境管制、对外开放与中国工业的绿色技术进步[J]. 经济研究,2014(9):34-47.
- [11] 马丽. 基于产业环境耦合类型的沿海地区产业绿色转型路径研究[J]. 地理研究,2018(8):1587-1598.
- [12] 向云波,王圣云,邓楚雄. 长江经济带化工产业绿色发展效率的空间分异及驱动因素[J]. 经济地理,2021(4):108-117.

- [13] 周吉光,张举钢,杨红瑞,等. 中国、OECD 国家及全球能源消费领域的杰文斯悖论观察[J]. 河北地质大学学报, 2018(2):43-50.
- [14] Li K,Lin B Q. How to promote energy efficiency through technological progress in China? [J]. Energy,2018;812-821.
- [15] 王蕾,郑静宇. 越位影响下产业结构优化对能源回弹效应的作用研究[J]. 科技管理研究,2024(20):222-230.
- [16] 吴磊,曹峰毓. 论世界能源体系的双重变革与中国的能源转型[J]. 太平洋学报,2019(3):37-49.
- [17] 傅春杨,于也雯,龚六堂. 以能源节约集约利用促进高质量发展——基于生产网络模型的重点节能增产行业选择[J]. 管理世界,2025(2):21-46.
- [18] 张金英,陆春晓. 环境政策对工业绿色转型的影响——综合效益、空间效应、差异化影响及政策优化路径[J]. 经济问题,2024(10):85-94.
- [19] 黄恒君,王醒龙. 农业能源碳排放回弹效应:时空演变及影响机制——基于农业技术进步视角[J]. 统计学报,2024(3):24-35.
- [20] Deng Y T, Zou Y Q, Guang F T. Unveiling the energy efficiency paradox: Industrial automation and energy rebound in China[J]. Energy, 2025: 136482.
- [21] Lu M, Wang K. The direct energy rebound effects for manufacturing and service sectors in China: Evidence from firm-level estimations[J]. Journal of Cleaner Production, 2024: 143617.
- [22] 官永彬,谢正蕾. 高质量发展下中国区域环境效率的实证测度、时空特征及影响因素研究[J]. 重庆师范大学学报(社会科学版),2022(1):5-18.
- [23] 马文斌,申传顺,柴泽阳,等. 农业数字化对碳减排的作用机制与影响效应[J]. 长沙大学学报,2025(4):45-56.
- [24] 陈楚. 产业绿色发展:政府行为、企业意愿与民间资本选择[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2019(2):57-68,107.
- [25] Shi X Q, Wang X, Chen P. A network-based approach for analyzing industrial green transformation: A case study of Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021: 128281.
- [26] 朱春红,马涛. 区域绿色产业发展效果评价研究[J]. 经济与管理研究,2011(3):64-70.
- [27] 尹礼汇,吴传清. 环境规制与长江经济带污染密集型产业生态效率[J]. 中国软科学,2021(8):181-192.
- [28] 李斌,彭星,欧阳铭珂. 环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变——基于 36 个工业行业数据的实证研究[J]. 中国工业经济,2013(4):56-68.
- [29] 何剑,王欣爱. 中国产业绿色发展的时空特征分析[J]. 科技管理研究,2016(21):240-246.
- [30] Ren S G, Yuan B L, Ma X, et al. International trade, FDI (foreign direct investment) and embodied CO₂ emissions: A case study of Chinas industrial sectors[J]. China Economic Review, 2014: 123-134.
- [31] 连玉君,程建. 投资—现金流敏感性:融资约束还是代理成本? [J]. 财经研究,2007(2):37-46.
- [32] 骆永民,刘艳华. 金融集聚、人力资本与房价——基于 PanelVAR 模型[J]. 财贸研究,2011(4):93-101.
- [33] 汪克亮,孟祥瑞,杨宝臣,等. 基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究[J]. 资源科学,2015(7):1491-1501.
- [34] 李忠. 大力发展绿色经济 加快转变经济发展方式[J]. 宏观经济管理,2011(9):55-56.
- [35] 张江雪,蔡宁,毛建素,等. 自主创新、技术引进与中国工业绿色增长——基于行业异质性的实证研究[J]. 科学学研究,2015(2):185-194,271.
- [36] 彭星,李斌. 贸易开放、FDI 与中国工业绿色转型——基于动态面板门限模型的实证研究[J]. 国际贸易问题,2015(1):166-176.
- [37] 原毅军,谢荣辉. 环境规制的产业结构调整效应研究——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国工业经济, 2014(8):57-69.
- [38] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践,1998(12):99-103.
- [39] 左金隆,王平. 绿色信贷对中国经济高质量发展的影响研究——兼论能源消费视角下的中介效应[J]. 重庆师范大

A Study on the Differences in Pollution Externalities from Energy Rebound Effects during Industrial Green Transformation

Ma Qing

(School of Economics and Management, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Whether the expansion of energy demand during China's industrial green transition triggers an energy "rebound effect," thereby creating a dynamic contradiction of "efficiency improvement—demand rebound," has become a critical issue constraining the achievement of the "dual carbon" goals and regional coordinated development. Existing research lacks in-depth analysis of the underlying bidirectional coupling relationship. This study comprehensively employs PVAR model, spatial Durbin model, and system GMM method to empirically examine the rebound effect of industrial green transformation on energy consumption and differences in pollution spillover (externality) contributions. The research findings indicate: (1) The industrial green development index and energy consumption exhibit strong continuity and cumulateness, with dynamic interaction between industrial green transformation and energy use. No overall "energy rebound effect" exists across the entire sample; however, the middle reaches of the Yellow River region show the highest comprehensive energy rebound coefficient, followed by the northern coastal areas. (2) Based on spatial regression models incorporating pollution spillover effects, industrial green development exhibits an "energy rebound effect" within the province but exerts pressure that reduces energy consumption in neighboring regions. Industrial green transformation demonstrates stronger radiating impacts on both the local and surrounding areas, facilitating carbon and wastewater reduction in the province. Increased energy consumption leads to higher total carbon emissions and solid waste output within the province. (3) Regression analysis using an efficiency-constrained model reveals a significant "transfer and diffusion effect" of industrial green transformation and energy consumption on energy conservation and emission reduction efficiency in neighboring regions, particularly evident among provinces and cities ranked between 30% and 70% in terms of energy efficiency. This study provides theoretical and empirical validation regarding the "efficiency trap" triggered by industrial transformation. At the conclusion, policy recommendations are proposed for deep integration between energy systems and industrial structures, offering valuable insights for regional green transition policies and achieving China's "dual carbon" goals.

Keywords: industrial green transformation; energy rebound effect; pollution spillover; PVAR model; environmental regulation

[责任编辑:邹柳馨]