文章编号：1003-1421(2026)03-0031-11
引用格式：郝晓燕，吴月，任慧. 黄河流域能源转型对物流业碳排放强度的影响分析[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：31-41.
HAO Xiaoyan，WU Yue，REN Hui. Influence of Energy Transition on Carbon Emission Intensity of Logistics Industry in the Yellow River Basin[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：31-41.

黄河流域能源转型对物流业碳排放强度的影响分析

郝晓燕[1]，吴　月[1]，任　慧[2]

(1.内蒙古工业大学 经济管理学院，内蒙古 呼和浩特　010051；2.内蒙古工业大学 统战部，内蒙古 呼和浩特　010051)

摘　要：在“双碳”目标背景下，选取2013—2022年黄河流域省级面板数据，在测度与分析能源转型与物流业碳排放强度特征的基础上，采用双向固定效应和中介效应模型，实证检验能源转型对物流业碳排放强度的影响及其作用机制。研究结果表明：黄河流域9省(区)的能源转型水平和物流业碳排放强度存在明显的时空差异。能源转型对物流业碳排放强度具有显著抑制作用，能源转型水平每提高1%，物流业碳排放强度降低2.230%，且该影响在黄河中上游地区，资源富集区更显著。能源转型依托产业结构升级能够显著降低物流业碳排放强度。基于研究结果建议因地制宜实施差异化发展策略，深化能源与物流融合，构建区域协同机制，强化产业与技术驱动，推动黄河流域能源转型与物流业低碳发展协同推进。

关键词：黄河流域；能源转型；物流业；碳排放强度；双向固定效应模型
中图分类号：U142；F259.2　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250923008

Influence of Energy Transition on Carbon Emission Intensity of Logistics Industry in the Yellow River Basin

HAO Xiaoyan[1]，WU Yue[1]，REN Hui[2]

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. United Front Department of Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: Under the “carbon peaking and carbon neutrality” goals, the provincial panel data of the Yellow River Basin from 2013 to 2022 was selected. Based on the measurement and analysis of the characteristics of energy transition and carbon emission intensity of the logistics industry, the two-way fixed effect and mediating effect models were used to empirically test the influence of energy transition on the carbon emission intensity of the logistics industry as well as its mechanism of action. According to the results, ①there are obvious spatial and temporal differences in the energy transition level and the carbon emission intensity of the logistics industry in the nine provinces or regions of the Yellow River Basin. ②Energy transition shows a significant inhibitory effect on the carbon emission intensity of the logistics industry. A 1% increase in the energy transition level leads to a 2.230% reduction in carbon emission intensity, and this effect is more pronounced in the

收稿日期：2025-09-23
通信作者：任慧(1973—)，女，内蒙古鄂尔多斯人，内蒙古工业大学统战部副研究员。
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS07010)；内蒙古自治区教育厅“加强我国北方重要生态安全屏障建设”研究专项课题(STAQZX202304)；内蒙古自治区铸牢中华民族共同体意识研究基地高等教育专项课题(内蒙古工业大学ZLJD2501)

middle-upper Yellow River Basin, with more significant resource-rich areas. ③Through industrial structure upgrading, energy transition can significantly reduce carbon emission intensity of the logistics industry. Based on the research results, it is suggested to implement differentiated development strategies according to local conditions, deepen the integration of energy and logistics, build a regional coordination mechanism, strengthen industry and technology-driven modes, and promote the coordinated development of energy transition and low-carbon development of logistics industry in the Yellow River Basin.

Keywords: Yellow River Basin; Energy Transition; Logistics Industry; Carbon Emission Intensity; Two-Way Fixed Effect Mode

0　引言

2020年9月22日，我国在第七十五届联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。黄河流域有着独特的地理位置和丰富的煤炭等矿产资源，在国家能源安全和生态安全方面有着不可替代的作用。随着化石能源的大量开采和使用，环境污染、生态破坏以及温室气体排放等问题日益凸显，严重威胁到黄河流域的可持续发展和人民群众的生活质量，黄河流域面临着从传统能源向新能源转型的巨大压力。与此同时，物流业作为支撑经济社会运行的基础性产业，其能源消耗与碳排放规模显著，约占全球温室气体排放的1/3。在我国经济持续发展与消费升级的背景下，物流需求日益增长，其碳减排成效直接关系到“双碳”目标的实现。因此，在黄河流域能源转型的框架下，系统探讨物流业低碳发展路径，具有重要的现实与战略意义。

在当前“双碳”目标引领的全球绿色发展浪潮下，能源转型与物流业碳排放强度的关联研究已成为重要课题。从既有文献看，学者在探讨物流业碳排放强度影响因素时，聚焦多因素分析，Liu等[1-4]通过不同模型和样本，证实能源强度、能源结构、物流产出等因素的显著作用；焦萍等[5-7]通过单因素研究则揭示了数字化、智能交通、物流技术创新对碳排放强度的影响，其中Liang等[7]发现物流技术创新与碳排放存在“U”形关系。能源转型对碳排放强度的影响研究在区域层面涵盖全国省域、特定省份及跨区域经济带；Wang等[8-11]通过实证研究，分别厘清了二者的空间溢出效应、区域实现路径及政策联动机制；行业维度则聚焦于交通运输[12]、电力[13]、建筑业[14]等领域，探讨了能源转型相关政策的实施效果与各行业碳减排责任的分配逻辑。现有研究仍存在明显不足：一是尚未构建能源转型影响物流业碳排放的系统分析框架；二是缺乏针对黄河流域这一能源富集与生态脆弱并存区域的研究；三是多数研究集中于传统高耗能行业或物流单一环节，缺乏对物流全链条碳排放的系统研究。

鉴于此，以黄河流域9省(区)(青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东)为研究区域，从时空视角分析黄河流域能源转型水平和物流业碳排放强度的空间演化特征，接着用双向固定效应模型分析黄河流域能源转型对物流业碳排放强度的影响，并通过中介效应模型研究产业结构升级和技术进步在能源转型对物流业碳排放强度的影响中的作用，以期为明确能源转型对物流业碳排放强度的影响、落实行业“双碳”目标提供有力的理论支撑和实践指导。

1　理论分析

1.1　能源转型对物流业碳排放强度的直接作用路径

主要从经济发展、资源利用、基础设施3个维度，分析能源转型对物流业碳排放强度的直接影响：①经济发展方面，随着清洁能源的规模化开发，新能源设备运营优势凸显，物流企业加速能源结构调整，选择低碳运输方式与能源类型，创造了新的经济增长点[15-16]；②资源利用方面，能源转型通过降低物流业对传统能源的依赖，缓解资源压力，从根本上削减碳排放物质基础，减少单位物流活动的碳排放[17]；③物流基础设施方面，能源转型促使物流业使用更加清洁能源的基础设施，比如普及新能源运输装备，基础设施的升级不仅直接减少碳排放，同时加速了能源转型[18]。据此提出假设1：能源结构能够降低物流业碳排放强度。

1.2　能源转型对物流业碳排放强度的间接传导机制

依照环境库兹涅茨曲线理论，能源转型是推动

区域产业结构升级、跨越环境压力拐点的重要外力[19]。在能源转型进程中，产业结构优化升级加速推进，高耗能、高排放产业逐步向低能耗、高效率产业转移过渡，倒逼高耗能、高排放的第二产业转型升级，同时为低能耗、高附加值的第三产业现代服务业创造发展空间[20]。这从根本上改变了物流需求的结构与属性，推动物流供应链向协同化、集约化方向发展，进而减少碳排放强度[18，21-22]。据此提出假设2：能源转型通过促进产业结构升级降低物流业碳排放强度。

技术进步在减少碳排放方面扮演着举足轻重的角色，而能源转型以清洁化为主线、系统变革为支撑，正有力推动物流领域绿色技术的创新与落地。为物流领域绿色技术创新的涌现与应用提供了关键驱动力[23]。能源转型过程中，清洁能源的规模化应用为物流技术创新提供了新的能源资源基础，推动物流装备向电动化、氢能化迭代，而清洁能源的稳定供给也为智能物流系统提供了可靠的能源保障。因此，能源转型会通过技术进步效应推动物流业绿色技术创新，进而降低碳排放强度[8，24]。据此提出假设3：能源转型通过推动技术进步降低物流业碳排放强度。综上分析，能源转型对物流业碳排放强度的影响机理如图1所示。

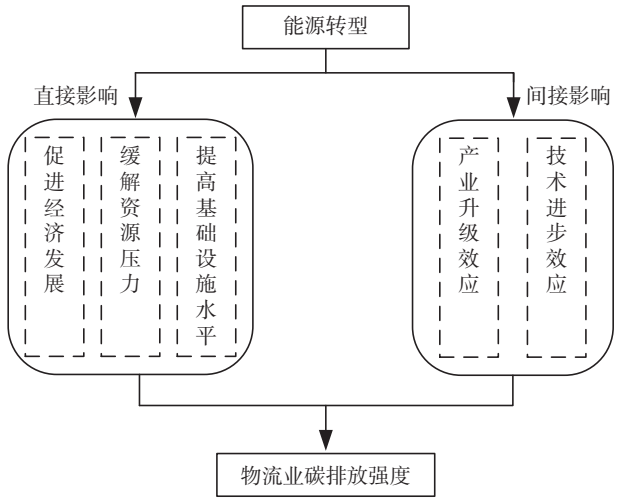


图1　能源转型对物流业碳排放强度的影响机理

Fig.1　Influence mechanism of energy transition on carbon emission intensity of logistics industry

2　研究设计

2.1　变量选取

2.1.1　被解释变量

被解释变量设定为物流业碳排放强度，该指标通过物流业碳排放量与物流业生产总值的比值来衡量，具体反映了物流业单位生产总值产生的二氧化碳排放量。借鉴相关研究[25-26]，以黄河流域9省(区)物流业消耗的原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气和电力8种能源为基础数据，将其转化为标准煤后，依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》所提到的碳排放系数法，对黄河流域9省(区)2013—2022年期间的物流业碳排放量进行测算。在此基础上，通过将各年份的碳排放总量除以相应的物流业生产总值，得出了黄河流域9省(区)物流业碳排放强度的具体数值，公式如下。

$$C_i=\frac{C^t}{G^t}=\frac{\sum C_i}{G^t}=\frac{\sum_i \alpha_i \eta_i E_i}{G^t} \tag{1}$$

式中：C^t为第t年的物流业碳排放量，万t；G^t为第t年的物流业生产总值，亿元；C_i代表第i种能源的碳排放量，万t；α_i为第i种能源的碳排放系数；η_i为第i种能源的折标准煤系数；E_i为第i种能源的实际消费量，万t/亿m^3/(亿kW·h)(不同类别能源对应不同单位)。

各类能源的碳排放系数如表1所示 。

2.1.2　解释变量

解释变量为能源转型，尽管能源转型涵盖能源供给侧改革、消费侧转型、制度创新等多个维度，但基于以下考量，主要立足于能源消费转型视角展开实证分析：首先，从研究对象的内在逻辑而言，物流业碳排放直接来源于其运营过程中的能源消费活动，消费侧的结构优化与效率提升是影响其碳排放强度的最直接路径；其次，在方法论层面，从消费侧测度能源转型能够精准地捕捉物流业能源消费结构的清洁化程度，避免供给侧指标可能存在的“生产与消费地域错配”问题。因此，参考魏巍

表1　各类能源的碳排放系数

Tab.1　Carbon emission coefficients of various energy sources

能源	原煤	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	电力
碳排放系数	0.714 3	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.714 3	1.33	0.122 9

等[27]的研究，以地区清洁能源与能源消耗量占比来衡量能源转型水平，据此考察其对物流业碳排放强度的作用机制。假设本地生产的水电、风电、光伏发电等一次电力优先满足本省消费需求，剩余电量外输。若本省能源需求未被满足，则从区外调入能源。基于消费端视角，将电力净调入量统一纳入清洁能源范畴，由此构建计算公式如下。

$$E_i = \frac{Z_{it} + X_{it}}{E_{it}} \tag{2}$$

式中：E_t表示第t年的能源转型水平；E_{it}为i省份在t年的能源消费总量，万t；X_{it}为i省份在t年的本地一次电力生产量，亿kW·h；Z_{it}为i省份在t年从区外调入的电力，亿kW·h。

对于电力净调出的省份，如青海以水电调出为主，其净调入量以负值纳入计算，而山西、内蒙古等火电净调出省份，其清洁能源净调入量计为0。

基于此计算得到2013—2022年黄河流域各省区的能源转型水平数据。

2.1.3　中介变量

基于1.1和1.2，将产业结构与技术进步设为关键中介变量，实证剖析能源转型对物流业碳排放强度的间接作用路径。一方面，能源转型通过推动技术进步降低物流业碳排放强度，参考Zeng等[28]研究，运用超效率SBM-GML模型对绿色全要素生产率进行测度，并使用GML分解出的技术进步指数作为中介变量。另一方面，能源转型能够通过提升产业结构降低物流业碳排放强度，产业结构升级通过各省域第三产业增加值与第二产业增加值的比值进行衡量。

2.1.4　控制变量

参考文献[29-31]，进一步控制其他可能影响物流业碳排放强度的变量，从经济发展方面选取经济发展水平、城镇化率作为变量；资源利用方面选取能源结构作为变量；物流基础设施方面选取交通基础设施水平、固定资产投资水平以及政府干预程度作为变量。变量定义与说明如表2所示。描述性统计如表3所示。

2.2　模型构建

2.2.1　基准回归检验

在深入分析既有研究成果[10-11, 22]的基础上，聚焦能源转型对物流业碳排放影响这一核心议题，选择双向固定效应模型作为分析工具，构建如下模型。该模型不仅能够有效捕捉不同地区在能源转型进程中的异质性，还能控制时间趋势对碳排放强度的影响。

$$C_i = \beta_0 + \beta_1 E_{it} + \theta Control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中：i表示省份；t表示年份；C_{it}为省份i在t年的物流业碳排放强度，tCO_2/万元；E_{it}为i省份在t年的能源转型指数；$Control_{it}$为可能会影响物流业碳排放强度的一组控制变量；β_0为常数项；μ_i和λ_t分别为个体固定效应和时间固定效应；$\varepsilon_{i,t}$为随机干扰项。

表2　变量定义与说明

Tab.2　Definition and description of variables

变量类型	变量名称	变量说明
被解释变量	物流业碳排放强度C_i/(tCO_2/万元)	物流业碳排放量/物流业生产总值
解释变量	能源转型E_t/%	地区清洁能源/能源消耗量
中介变量	产业结构S_{ind}/%	第三产业产值/第二产业产值
	技术进步P_{tech}/%	物流业绿色全要素生产率中技术进步指数
控制变量	经济发展水平P_{gdp}/(万元/人)	人均GDP
	城镇化率R_{urb}/%	城镇人口/年末常住人口
	能源结构F_{ene}/%	物流业能源消耗量/能源消耗总量
	交通基础设施水平L_{inf}/(km/万km^2)	公路里程/行政区面积
	固定资产投资水平I_{fix}/%	固定资产投资/GDP
	政府干预程度I_{gov}/%	地方财政交通运输支出和环境保护支出/地方一般公共预算支出

表3　描述性统计

Tab.3　Descriptive Statistics

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
C_i	90	0.024	0.005	0.014	0.034
E_t	90	0.126	0.051	0.013	0.236
S_{ind}	90	1.142	0.229	0.689	1.758
P_{tech}	90	1.064	0.259	0.386	1.838
P_{gdp}	90	10.790	0.310	10.070	11.490
R_{urb}	90	0.567	0.065	0.405	0.686
F_{ene}	90	0.045	0.016	0.007	0.081
L_{inf}	90	11.630	0.911	9.501	12.780
I_{fix}	90	1.794	1.605	154.200	6.595
I_{gov}	90	0.100	0.030	0.043	0.216

2.2.2　中介检验

为探究能源转型对物流业碳排放强度的影响中可能存在的间接作用机制，依据理论分析[7, 32]，将产业结构(S_{ind})、技术进步(P_{tech})作为中介变量，构建如下模型。

$$M_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$C_i = \gamma_0 + \gamma_1 E_t + \gamma_2 Control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

M表示中介变量，包括产业结构和技术进步；公式(4)表示能源转型对中介变量的影响，公式(5)表示能源转型和中介变量对物流业碳排放强度的影响。若α_1，γ_1和γ_2均通过显著性检验，则表明存在中介效应。

2.3　数据来源

鉴于目前尚未有专门的“物流业”相关数据，参考国内外学者的研究，以交通运输、仓储和邮政业表示物流业。以2013—2022年黄河流域9省(区)为研究样本，研究数据来自2013—2022年《中国统计年鉴》《能源统计年鉴》《中国电力年鉴》以及各省(区)统计年鉴和统计公报，对部分缺失数据采用多重插值法进行处理。为了提高模型拟合的精确度和数据的可靠性，对部分数据采用对数转换处理。

3　实证分析

3.1　能源转型与物流业碳排放强度时空演变特征

3.1.1　时序演变特征

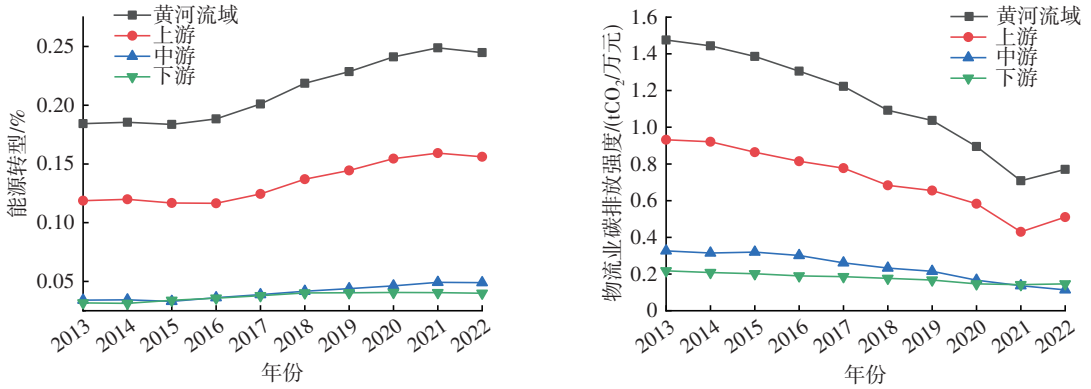
依托公式(1)—(2)，对2013—2022年间黄河流域全域及上、中、下游区域的能源转型程度与物流业碳排放强度进行了定量评估。2013—2022年黄河流域不同地区能源转型水平和物流业碳排放强度趋势如图2所示。黄河流域的能源转型水平在2013—2022年间稳步上升。从区域来看，黄河流域上游地区展现出较高的能源转型速度，这与黄河流域上游地区独特的资源禀赋和能源结构有关。相比之下，中游地区能源转型速度稍逊于上游地区，但仍保持稳步上升的态势，这与中游地区更多依赖煤炭等传统能源的现状有关，下游地区的能源转型水平虽然也在提升，但受限于产业结构复杂，能源结构相对优化等因素，制约了能源转型的速度与深度。

黄河流域物流业碳排放强度虽在2021—2022年略显上升，但整体呈下降趋势。上游地区物流业碳排放强度趋势和黄河流域整体趋势相似，处于较高水平且下降趋势明显。上游地区物流产业发展初期，传统高耗能运输方式占比较大，随着能源结构的不断调整，碳排放强度明显下降。而中下游地区初始碳排放强度较低，后期也维持在较低水平，中下游地区物流业相对发达，交通基础设施完善，显示出较好的低碳发展成效。

3.1.2　空间分布特征

为进一步揭示2013—2022年黄河流域各省(区)能源转型与物流业碳排放强度的时空分异特征，分别绘制了二者的空间分布热力图。2013—2022年黄河流域能源转型水平空间分布热力图如图3所示。2013—2022年黄河流域物流业碳排放强度空间分布热力图如图4所示。

从能源转型水平来看，黄河流域整体呈现“西高东低”的空间格局，且该差异在研究期内趋于强化。具体而言，内蒙古、宁夏、甘肃能源转型水平持续处于较高水平，而河南、山东的能源转型水平相对较低，值得注意的是，四川的能源转型水平实现了显著提升，从初期中等水平逐步跃升至全区较高层级，显示出积极的转型态势。



a　能源转型水平趋势图
a　Trend diagram of energy transformation level

b　物流业碳排放强度趋势图
b　Trend chart of carbon emission intensity of logistics industry

图2　2013—2022年黄河流域不同地区能源转型水平和物流业碳排放强度趋势

Fig.2　Trends of energy transition level and carbon emission intensity of logistics industry in different regions of the Yellow River Basin from 2013 to 2022

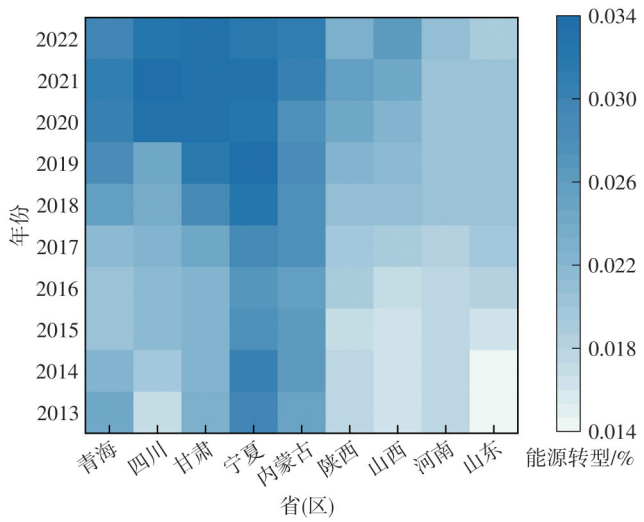


图3　2013—2022年黄河流域能源转型水平空间分布热力图

Fig.3　Spatial distribution heat map of energy transition level in the Yellow River Basin from 2013 to 2022

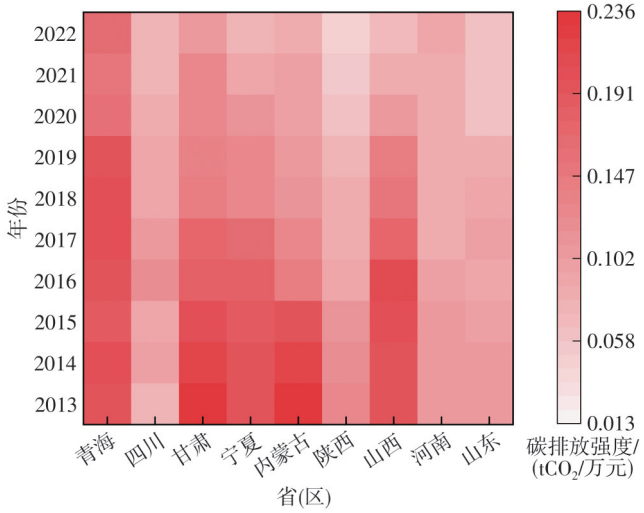


图4　2013—2022年黄河流域物流业碳排放强度空间分布热力图

Fig.4　Spatial distribution heat map of carbon emission intensity of logistics industry in the Yellow River Basin from 2013 to 2022

从物流业碳排放强度的角度来看，各省(区)间表现出明显的空间异质性。内蒙古、甘肃、山西、陕西碳排放强度呈持续下降趋势，尤其是甘肃与内蒙古降幅较为突出，体现出能效提升与运输结构优化的成效。相比之下，山东、河南与青海的碳排放强度在研究期内出现一定波动或上升，反映其物流增长与减排进程仍面临压力。从整体趋势来看，黄河流域物流业碳排放强度仍以下行为主，表明区域物流低碳转型已取得初步成效。

3.2　基准回归结果分析

基于双重面板固定效应模型，分析能源转型对物流业碳排放强度的影响，基准回归结果如表4所示。

表4　基准回归结果

Tab.4　Benchmark regression results

自变量	被解释变量：C_i			
	(1)	(2)	(3)	(4)
E_t	−7.344***	−2.055***	−2.091***	−2.230***
	(0.916)	(0.595)	(0.564)	(0.602)
P_{gdp}		−0.212***	−0.063***	−0.118***
		(0.022)	(0.017)	(0.025)
R_{urb}		0.957***	−0.136	−0.128
		(0.102)	(0.093)	(0.186)
F_{ene}		1.753***	1.933***	1.995***
		(0.250)	(0.126)	(0.134)
L_{inf}		−0.018***	−0.034**	−0.050**
		(0.005)	(0.015)	(0.019)
I_{fix}		−0.000**	0.000**	0.000*
		(0.000)	(0.000)	(0.000)
I_{gov}		0.147	−0.265***	−0.296***
		(0.130)	(0.072)	(0.075)
Constant	0.299***	2.052***	1.252***	2.017***
	(0.022)	(0.193)	(0.185)	(0.358)
id	YES	NO	YES	YES
year	NO	NO	NO	YES
N	90	90	90	90
R^2	0.446	0.823	0.947	0.956

注：括号内为标准误，***，**，*分别表示在1%，5%，10%的水平下显著，下同。

由表4可知，无论是否加入控制变量及是否控制固定效应，能源转型的回归系数均显著为负。从表4第(4)列双向固定效应模型得知，能源转型水平每提高1%，物流业碳排放强度则降低2.230%，假设1得到验证。同时，R^2值由0.446上升到0.956，这充分说明了加入控制变量后，模型的拟合优度得到了显著提升。

进一步分析第(4)列的回归结果，经济发展水平、交通基础设施水平和政府干预程度都能显著降低物流业碳排放强度。其中，经济增长通过推动技术进步与产业升级助力减排；完善的路网能优化运输效率并减少能耗；而政府通过财政激励与法规约束有效促进了绿色转型。相反，能源结构向高碳能源倾斜以及固定资产投资偏向传统高碳设备，则会

显著提高碳排放强度。此外，城镇化率的影响在本研究中并未呈现统计显著性。

3.3　稳健性检验

为保证基准回归分析的稳健性和可靠性，进行了以下4方面的稳健性检验。稳健性检验结果如表5所示。

表5　稳健性检验结果

Tab.5　Robustness test results

自变量	(1)	(2)		(3)	(4)
	C_p	第一阶段	第二阶段	C_i	C_i
E_t	739.318**		−2.064**	−2.230***	−1.902**
	(341.973)		(0.924)	(0.602)	(0.875)
$L.E_t$		0.661***			
		(0.102)			
控制变量/常数项	YES	YES	YES	YES	YES
id	YES	YES	YES	YES	YES
year	YES	YES	YES	YES	YES
N	90	81	81	90	81
R^2	0.662	0.891	0.957	0.956	0.953

（1）替换被解释变量。借鉴经济绿色转型的相关研究[33]，构建物流业碳生产率(C_p)作为新的被解释变量，表示为物流业生产总值/物流业碳排放量，衡量了单位碳排放的经济产出效率。检验结果如表5第(1)列所示，核心解释变量能源转型(E_t)的系数在1%的水平上显著为正。这表明，能源转型不仅降低了碳排放强度，同时也显著提升了物流业的碳生产效率，从另一个角度有力地印证了基准回归结论的可靠性。

（2）工具变量法。基准回归中的结论可能会因反向因果、遗漏变量等问题而导致内生性，使得估计结果出现偏误。参考王岚[34]、杨皖苏等[35]的做法，采用核心解释变量能源转型水平的滞后一期作为工具变量，并运用两阶段最小二乘法进行估计。检验结果如表5第(2)列所示，第一阶段中工具变量系数显著为正，且通过相关检验，不存在弱工具变量问题。第二阶段中，能源转型系数为−2.064且在5%水平显著，说明在控制内生性后，能源转型仍显著降低物流业碳排放强度，结论与基准回归一致，结果稳健。

（3）缩尾处理。为排除极端值对估计结果的干扰，对样本数据进行1%的缩尾处理，不仅可以消除极值的影响，与剔除异常值的方法相比，缩尾处理能保留数据的样本量，由表5第(3)列可知，能源转型系数仍在1%水平上显著为负，说明核心变量关系不受异常值影响。

（4）改变年份区间。考虑到2019年疫情暴发可能会对经济发展、能源市场和物流业产生影响，导致这一时期的数据具有较大的异常波动和不确定性，将样本数据限定在2013—2019年，结果如表5第(4)列所示，能源转型系数依然在5%水平上显著为负，表明疫情冲击并未改变能源转型对碳排放强度的基本作用机制。

4项检验从不同维度共同表明，能源转型对物流业碳排放强度的抑制作用具有良好稳健性。

3.4　异质性检验

3.4.1　区域异质性

为深入剖析黄河流域能源转型影响的区域异质性，鉴于黄河流域不同地区能源转型水平差异明显，遵循黄河水利委员会的划分标准，并参考相关学者的研究，将黄河流域划分为上、中、下游，来考察能源转型对物流业碳排放强度影响的区域异质性。区域异质性回归结果如表6所示。

表6　区域异质性回归结果

Tab.6　Regional heterogeneity regression results

自变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	黄河流域	上游	中游	下游
E_t	−2.230***	−2.711***	−5.661**	1.188
	(0.602)	(0.574)	(1.311)	(2.651)
控制变量	YES	YES	YES	YES
常数项	YES	YES	YES	YES
id	YES	YES	YES	YES
year	YES	YES	YES	YES
N	90	50	20	20
R^2	0.977	0.992	0.999	0.997

异质性分析结果表明，黄河上游和中游地区的能源转型对物流业碳排放强度分别在1%和5%的水平上显著，而黄河下游地区的能源转型对物流业碳排放强度影响并不显著。究其原因，黄河上游如内蒙古、宁夏地区风能、太阳能等清洁能源丰富，大量的风能、光伏等项目得以开发，能够有效代替传统化石能源。中游陕西、山西作为煤炭主产区，因承担全国煤炭保供任务，能源结构调整进度受限，使得能源转型对物流业碳排放强度的抑制作用弱于上游。相比之下，黄河下游山东、河南地区矿

产资源匮乏且高度依赖外部能源，导致能源转型的推进速度较为缓慢。

3.4.2　资源异质性

考虑到资源禀赋与能源转型的关联性，基于黄河流域9省(区)资源禀赋差异，将其划分为资源富集区与资源非富集区，资源异质性回归结果如表7所示。划分依据为各省(区)化石能源(煤炭、石油、天然气)及新能源(风能、水能)产量占流域总产量的比重，将青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西划分为资源富集区，这些省份不仅在传统能源时代是国家的“能源基地”，在新能源时代也因其优越的清洁资源禀赋和巨大的能源产业基础，占据能源转型的先发优势。相比之下，将山东、河南、四川划分为资源非富集区，作为经济与人口大省能源自给率低、对外依存度高，其资源禀赋在转型初期难以形成核心竞争力。

表7　资源异质性回归结果

Tab.7　Resource heterogeneity regression results

自变量	(1)	(2)	(3)
	黄河流域	资源富集区	资源非富集区
E_t	−2.230***	−2.811***	−0.970**
	(0.602)	(0.861)	(0.409)
控制变量	YES	YES	YES
常数项	YES	YES	YES
id	YES	YES	YES
year	YES	YES	YES
N	90	60	30
R^2	0.977	0.983	0.977

结果表明，能源转型对资源富集区与非富集区的物流业碳排放强度均产生显著负向作用，从系数上看，资源富集区的抑制效应强度明显高于非富集区。这是因为资源富集区依赖高碳能源的程度更深，使用清洁能源后带来的碳减排效果更好。

3.5　中介效应检验

为探究能源转型影响物流业碳排放强度的作用路径，根据公式(3)—(4)对产业结构和技术进步进行中介效应模型检验，中介效应分析结果如表8所示。根据产业结构效应模型可知，能源转型对产业结构的影响在10%的显著性水平上为正，表明能源转型能够提升产业结构。产业结构对物流业碳排放强度的影响显著为负，且能源转型的系数与基准回归结果相比有所减小，说明产业结构能够抑制物流业碳排放强度的增加，产业结构在能源转型对物流业碳排放强度的影响中起到了中介作用。因此，假设2得到验证。

表8　中介效应分析结果

Tab.8　Mediating effect analysis results

自变量	产业结构		技术进步	
	S_{ind}	C_i	P_{tech}	C_i
E_t	8.967*	−1.890**	34.154***	−2.673***
	(1.0943)	(−2.917)	(2.904)	(−4.284)
S_{ind}		−0.038***		
		(−5.582)		
P_{tech}				0.013**
				(2.094)
cons	12.876***	2.505***	−2.654	2.053***
	(7.797)	(10.0501)	(−0.380)	(5.8780)
Control	YES	YES	YES	YES
id	YES	YES	YES	YES
year	YES	YES	YES	YES
N	90	90	90	90
R^2	0.868	0.960	0.308	0.959

根据技术进步效应模型可知，能源转型对技术进步的影响在1%的显著性水平上为正，表明能源转型能够促进技术进步。但技术进步对物流业碳排放强度影响为正，表明技术进步未起到中介作用，可见，假设3未得到验证。原因可能在于技术进步集中在传统技术优化或扩张物流需求驱动技术创新，其次，在物流业中，新能源技术与效率提升(如单位运输成本下降)可能并未转化为能源节约，反而因物流服务总成本的降低，刺激了总服务量的扩张，从而抵消了因效率提升带来的碳减排效益。因此，技术进步导致碳排放强度上升，形成负向中介作用。

4　结论

基于2013—2022年黄河流域9省(区)的数据样本，从时空视角分别对黄河流域能源转型和物流业碳排放强度进行分析，并借助双向固定效应和中介效应模型，探究了能源转型对物流业碳排放强度的影响机制，主要结论如下。

(1) 黄河流域各省(区)的能源转型水平和物流业碳排放强度存在明显的时空差异。这从实证层面印证了区域协调发展理论与资源禀赋差异的现实重要性，意味着“一刀切”的政策难以奏效。因此，应考虑各地区的资源禀赋与产业基础，精准施策精

细调控，缩小省域发展差距，制定分区协同治理方案，加大黄河上游地区新能源重大项目布局与落地，加快新能源外送通道建设；加快中游地区煤炭清洁高效利用，降低煤炭耗能碳排放；下游地区进一步提高清洁能源在能源消费中的比例，减少对煤炭、石油等高碳能源的依赖。

（2）能源转型对降低物流业碳排放强度具有显著作用。具体而言，能源转型水平每提高1%，物流业碳排放强度则降低2.230%，且该结论通过一系列稳健性检验。这一结果不仅从计量层面验证了能源转型对物流业碳减排的核心作用，也为“能源—环境”协同治理提供了实证依据。因此，需协同推进能源结构转型与物流运营模式创新。一方面在物流园区、货运枢纽等场所广泛安装太阳能板，利用太阳能为照明、设备供电，另一方面，推动物流业数智化转型，利用大数据、人工智能等技术优化运输路径和仓储管理，减少空驶率，减少能源浪费。

（3）进一步揭示了能源转型对物流业碳排放强度影响的区域差异性和资源异质性。必须打破能源与物流系统间的管理壁垒，构建跨区域、跨产业的协同治理网络，发挥黄河流域上游地区青海、内蒙古风电、光伏资源，中游地区山西建设跨省绿电输送网络，实现清洁能源从资源富集区向能源需求旺盛区高效调配，并借助此契机，打造专门用于运输风电、光伏设备的物流运输专线，配备新能源运输车辆，降低物流运输过程中的碳排放。

（4）中介效应分析表明，能源转型能够通过产业结构升级间接降低物流业碳排放强度。这一发现表明，从优化产业布局与推动产业升级入手，能在系统层面显著降低物流活动的碳排放强度。在产业升级方面，建议省级政府将“单位物流碳排放强度”纳入产业准入与绩效评估体系，严格限制高碳耗、低附加值产业的物流需求，激励高附加值、低物流碳耗的服务业与先进制造业发展，从源头上优化物流需求结构。

研究对黄河流域能源转型与物流业碳排放强度的关系进行了初步探索，未来可在以下方面深化研究：①现有分析多基于省级宏观数据，未来需补充市级或企业层面的微观证据，以揭示行为与决策的具体机制；②在因果识别上，虽已采用工具变量等方法，但内生性处理仍可加强，后续可借助更外生的政策冲击或工具变量进一步提升估计的稳健性。

参考文献：

[1] LIU J G，LI S J，JI Q. Regional Differences and Driving Factors Analysis of Carbon Emission Intensity from Transport Sector in China[J]. Energy，2021，224：120178.

[2] KIM S. Decomposition Analysis of Greenhouse Gas Emissions in Korea’s Transportation Sector[J]. Sustainability，2019，11(7)：1986-1998.

[3] 曹俊文，周　丽. 长三角地区物流业碳排放时空分布及其影响因素研究[J]. 统计与决策，2021，37(10)：79-83.

[4] 胡小飞，王秀慧，吴　爽. 长江经济带物流业碳排放测算及其驱动要素研究[J]. 生态经济，2019，35(7)：49-55.
HU Xiaofei，WANG Xiuhui，WU Shuang. Research on Carbon Emission and the Driving Factors of Logistics Industry in Yangtze River Economic Belt[J]. Ecological Economy，2019，35(7)：49-55.

[5] 焦　萍，张　帅. 数字化对交通运输碳排放强度的影响：基于省际面板数据的实证考察[J]. 华东经济管理，2023，37(1)：15-23.
JIAO Ping，ZHANG Shuai. The Impact of Digitalization on Transportation Carbon Emission Intensity：Empirical Investigation Based on Inter-Provincial Panel Data[J]. East China Economic Management，2023，37(1)：15-23.

[6] LING S，JIN S R，WANG Q，et al. Can Smart Transportation Reduce Carbon Emission Intensity？ An Empirical Study from Macro and Micro Perspectives in China[J]. Journal of Management Science and Engineering，2024，9(4)：490-509.

[7] LIANG H Y，LIN S J，WANG J. Impact of Technological Innovation on Carbon Emissions in China’s Logistics Industry：Based on the Rebound Effect[J]. Journal of Cleaner Production，2022，377：134371.

[8] WANG Y Q，LEI T. Influencing Mechanisms of Renewable Energy Development on Carbon Emission Intensity in China[J]. Journal of Environmental Management，2024，372：123402.

[9] 吴明宇，郭雪松. 区域能源转型与碳达峰：“配额约束-补贴激励” 政策组合效应研究[J]. 经济问题探索，2024(9)：142-154.
WU Mingyu，GUO Xuesong. Regional Energy Transition and Carbon Peak：A Study on the Policy Combination Effect of “Quota Constraint-Subsidy Incentive”[J]. Inquiry Into

Economic Issues，2024(9)：142-154.

[10] 邢文婷，刘明珠，李利娟. 长江经济带能源绿色低碳转型与减污降碳协同效应时空演进及地区差异[J]. 环境科学，2025，46(7)：4198-4210.
XING Wenting，LIU Mingzhu，LI Lijuan. Spatial-Temporal Evolution and Regional Differences of Synergistic Effect of Green and Low-Carbon Energy Transformation and Pollution Reduction and Carbon Reduction in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Science，2025，46(7)：4198-4210.

[11] 陈　亮，张　楠，王一帆，等. 京津冀地区碳排放强度变化驱动因素及归因分析[J]. 中国环境科学，2023，43(8)：4382-4394.
CHEN Liang，ZHANG Nan，WANG Yifan，et al. Driving Factors and Attribution Analysis of Carbon Emission Intensity Change in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science，2023，43(8)：4382-4394.

[12] ZAHARI T N，MCLELLAN B C. Sustainability of Indonesia's Transportation Sector Energy and Resources Demand under the Low Carbon Transition Strategies[J]. Energy，2024，311：133385.

[13] ZHAO G P，YU B Y，AN R Y，et al. Energy System Transformations and Carbon Emission Mitigation for China to Achieve Global 2 ℃ Climate Target[J]. Journal of Environmental Management，2021，292：112721.

[14] ZHANG J H，LIU Y S，SAQIB N，et al. An Empirical Study on the Impact of Energy Poverty on Carbon Intensity of the Construction Industry：Moderating Role of Technological Innovation[J]. Frontiers in Environmental Science，2022(10)：929939.

[15] LIU B，CHANG H D，LI Y，et al. Analysis of Influencing Factors of Industrial Green and Low-Carbon Transformation under the Background of "Double Carbon"：Evidence from Sichuan Province，China[J]. Frontiers in Environmental Science，2023(11)：1257855.

[16] XU H Q，CAO Z X，HAN D Q，et al. Towards Sustainable Development：Can Industrial Intelligence Promote Carbon Emission Reduction[J]. Sustainability，2025，17(1)：370-388.

[17] WANG F，SUN X Y，REINER D M，et al. Changing Trends of the Elasticity of China's Carbon Emission Intensity to Industry Structure and Energy Efficiency[J]. Energy Economics，2020(86)：104679.

[18] XIE R，FANG J Y，LIU C J. The Effects of Transportation Infrastructure on Urban Carbon Emissions[J]. Applied Energy，2017(196)：199-207.

[19] 李双美. 清洁能源转型下铜全产业链的碳排放驱动机理和脱碳路径研究[D]. 长沙：中南大学，2024.

[20] 冯　彦，祝凌云，张大红. 中国产业结构调整对碳强度影响的空间计量研究[J]. 软科学，2017，31(7)：11-15.
FENG Yan，ZHU Lingyun，ZHANG Dahong. Spatial and Econometric Analysis of Effect of Industrial Structure Adjustment on Carbon Intensity in China[J]. Soft Science，2017，31(7)：11-15.

[21] CHENG G P，SHI Y J，ZHOU H. Analysis of the Effects of Green Technology Innovation and Industrial Structure Upgrading on Carbon Emission Intensity[J]. International Review of Economics & Finance，2025(102)：104163.

[22] CHANG H，DING Q Y，ZHAO W Z，et al. The Digital Economy，Industrial Structure Upgrading，and Carbon Emission Intensity：Empirical Evidence from China's Provinces[J]. Energy Strategy Reviews，2023，50：101218.

[23] 闫豪玮，穆月英. 粮食生产技术进步对碳排放强度的影响及作用机制[J]. 科技导报，2024，42(7)：66-75.
YAN Haowei，MU Yueying. On the Impact of Technological Progress in Grain Production on Carbon Emission Intensity and Its Action Mechanism[J]. Science & Technology Review，2024，42(7)：66-75.

[24] ZHOU Y C，SONG M L，XU W T，et al. Empowering Carbon Neutrality：Impact of the Technology Factor Market on China's Carbon Emission Intensity[J]. Journal of Environmental Management，2025(391)：126568.

[25] 梁　晶，盛慧敏，吕　靖. 环渤海地区物流产业集聚对物流碳排放影响的实证研究[J]. 生态经济，2020，36(9)：38-43.
LIANG Jing，SHENG Huimin，LYU Jing. Empirical Study on the Logistics Industry Agglomeration to the Carbon Emission of Logistics in the Bohai Rim Region[J]. Ecological Economy，2020，36(9)：38-43.

[26] 张志坚，兰凯露. 碳排放强度对长江经济带物流业高质量发展的影响研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：69-78.
ZHANG Zhijian，LAN Kailu. Effect of Carbon Emission Intensity on High-Quality Development of Logistics Industry in Yangtze River Economic Belt[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：69-78.

[27] 魏　巍，王赞信，李　冰. 能源转型影响中国经济增长潜

力的模拟研究：基于“弱可持续性”视角[J]. 中国环境管理，2020，12(2)：76-83.
WEI Wei，WANG Zanxin，LI Bing. The Effects of Energy Transition on Economic Growth Potential in China：A Perspective of Weak Sustainability[J]. Environmental Conformity Assessment，2020，12(2)：76-83.

[28] ZENG S H，GU Y X，SU B，et al. Energy Consumption Transition and Green Total Factor Productivity in Chinese Prefecture-Level Cities[J]. Energy Economics，2025，142：108156.

[29] 王富忠. 物流业碳强度的影响因素研究：基于能源价格和货物周转量的分析[J]. 价格理论与实践，2018(11)：131-134.
WANG Fuzhong. Study on Influencing Factors of Carbon Intensity in Logistics Industry：Analysis Based on Energy Price and Goods Turnover[J]. Price ：Theory & Practice，2018(11)：131-134.

[30] 李峻瑶. 技术进步对物流业碳排放强度的影响研究：基于产业结构的中介效应分析[J]. 全国流通经济，2024(9)：160-163.
LI Junyao. Research on the Impact of Technological Progress on Carbon Emission Intensity of Logistics Industry：Based on the Analysis of the Intermediary Effect of Industrial Structure[J]. China Circulation Economy，2024(9)：160-163.

[31] 肖　红，李鑫汝，许荟珍，等. 成渝城市群物流业集聚对物流业碳排放的时空异质性影响研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：53-60，81.
XIAO Hong，LI Xinru，XU Huizhen，et al. Spatial-Temporal Heterogeneity Impact of Logistics Industry Agglomeration on Carbon Emissions from Logistics Industry in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：53-60，81.

[32] LIN B Q，TENG Y Q. Decoupling of Economic and Carbon Emission Linkages：Evidence from Manufacturing Industry Chains[J]. Journal of Environmental Management，2022(322)：116081.

[33] 曾海鹰，刘金龙. 我国产业数字化对提高碳生产率作用的影响研究：基于产业结构优化与环境规制效应的考量[J]. 价格理论与实践，2024(3)：107-111，222.
ZENG Haiying，LIU Jinlong. Research on the Impact of Industrial Digitalization on Improving Carbon Productivity in China：Consideration of Industrial Structure Optimization and Environmental Regulation Effects[J]. Price ：Theory & Practice，2024(3)：107-111，222.

[34] 王　岚. 全球价值链嵌入与贸易利益：基于中国的实证分析[J]. 财经研究，2019，45(7)：71-83.
WANG Lan. Embedding in Global Value Chains and Gain from Trade：An Empirical Study on China[J]. Financial Research，2019，45(7)：71-83.

[35] 杨皖苏，叶明丹. ESG信息披露会缓解企业融资约束吗?：基于数字普惠金融的调节效应[J]. 财会通讯，2023(18)：42-47.

(责任编辑　金　晶)