

黄河流域物流业全要素碳生产率测度及影响因素 ——基于能源禀赋差异视角

郝晓燕^{1,2}, 李玥蓉¹, 吴月¹

(1. 内蒙古工业大学经济管理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古能源战略研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 研究黄河流域能源禀赋差异下的物流业全要素碳生产率(简称碳生产率)对于明晰该区域降碳减排路径具有重要意义。基于能源禀赋度划分黄河流域为能源富集区及一般区, 利用超效率SBM模型与ML指数探究黄河流域碳生产率的静态效率值和动态效率指数并通过回归分析明确各影响因素对碳生产率的影响机理。结果表明:(1) 碳生产率呈现区域异质性, 能源富集区碳生产率较高且增长较快, 技术效率提升显著; 能源一般区整体增长但内部效率分化明显。(2) 效率动态特征, 能源富集区与能源一般区碳生产率的技术效率与技术进步呈现分化特征, 能源富集区技术效率领先能源一般区, 能源一般区中四川、宁夏的技术提升较为显著, 山东的技术进步动力不足。(3) 驱动机制呈现差异化, 能源价格仅在能源富集区呈正面影响, 而在能源一般区产生抑制; 能源禀赋度仅对能源一般区有正向作用, 不同影响因素在不同区域内产生差异性。

关键词: 物流业; 全要素碳生产率; 超效率SBM模型; 黄河流域

文章编号: 1000-6060(2026)04-0756-13(0756~0768)

作为涵盖交通运输、仓储与邮政的复合型基础战略产业^[1], 物流业碳排放呈高投入、高能耗、低产出特征, 过度能耗与碳排放给绿色低碳发展带来挑战^[2]。其从燃料燃烧到仓储间接能耗、再到跨境运输各环节, 均与能源消费结构、技术效率密切相关, 复杂的作用机制使其在全球气候治理中既是重要碳排放源, 也是碳中和关键突破口。如何平衡经济增长与低碳转型, 构建绿色高效的现代物流体系, 已成为学界与产业界共同关注的焦点议题^[3]。物流业作为连接生产与消费的纽带, 其碳排放受能源禀赋的间接影响较为复杂。根据《中国能源统计年鉴2022》数据显示, 2020年物流业的能源消费量为 4.13×10^8 tce, 占全国能源消费总量的比重约为8.3%。物流业会消耗化石燃料进而释放出大量的CO₂等温室气体。根据中国碳核算数据库(CEADs)提供的数

据显示, 从2002年的 2.31×10^8 t上升至2021年的 7.28×10^8 t^①, 碳排放整体呈上升趋势。在碳排放总量约束下, 碳生产率可以反映单位碳排放创造的经济价值, 为评估“十四五”节能减排政策成效提供核心指标。碳生产率不仅可以响应国家的“双碳”目标, 还可以细化到行业层面的降碳减排。目前, 学术界对于物流业碳排放的研究主要集中于对物流业碳排放量^[4]、碳排放效率^[5-6]、绿色全要素生产率^[7]等, 鲜有针对碳生产率的。且对于碳生产率的研究聚焦于其概念、测度方法和影响因素。对于概念界定, 起初碳生产率仅表示单要素碳生产率, 后来又衍生出全要素碳生产率。在测度方法上, Tone^[8]、Chung等^[9]、Fre等^[10]进行了探索, 此后众多学者将超效率SBM模型与ML指数结合来测度全要素生产率的静态效率值和动态效率指数。在有关碳生产率影响因

收稿日期: 2025-05-29; 修订日期: 2025-07-18

基金项目: 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); 内蒙古自然科学基金项目(2024LHMS07010); 教育厅总课题项目(ZLJD2501)资助

作者简介: 郝晓燕(1973-), 女, 教授, 主要从事能源经济评价等方面的研究。E-mail: nmghxy@imut.edu.cn

通讯作者: 吴月(2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事低碳物流等方面的研究。E-mail: 13191790935@163.com

① 最新数据尚未公布。

素的研究中,王凯等^[11]、吴传清等^[12]、Chen等^[13]、穆佳薇等^[14]、Wang等^[15]分别对旅游业、工业、交通运输业、农业、国家整体层面等进行了研究。能源禀赋与碳排放存在显著关联,诸多学者对此类问题进行了研究^[16-19],而碳排放作为碳生产率的关键构成要素,使能源禀赋与碳生产率之间也呈现出紧密联系。

综上所述,现有文献主要存在以下几点不足:其一,学术界对碳生产率的研究集中于国家整体层面或工业、旅游业,物流业作为碳排放的重要行业,对其碳生产率的研究较少;其二,有关碳生产率的文献主要涉及国家整体层面、长江经济带等区域,鲜有黄河流域,且对于黄河流域碳生产率的研究多集中于农业、制造业及黄河流域整体;再者,黄河流域沿线省域拥有丰富的煤、石油、天然气等资源,能源禀赋呈现梯度差异,且内蒙古、山西承担能源保供任务,关于这一特定区域的研究成果尚感缺乏;最后,考虑到能源禀赋差异可能会对技术进步等产生区域异质性作用机制影响物流业全要素碳生产率,所以文章基于此视角下展开。综上所述,文章基于能源禀赋差异视角,运用非期望产出超效率的SBM-ML模型对黄河流域9省区物流业全要素碳生产率(简称碳生产率)进行测度,并利用面板回归分析其影响因素,旨在促进黄河流域物流业的绿色低碳转型,为实现国家“双碳”目标提供决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区,流域面积 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2019年习近平在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话中提到“黄河流域又被称为‘能源流域’,煤炭、石油、天然气和有色金属资源丰富,煤炭储量占全国一半以上,是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地”。黄河流域拥有丰富的矿产资源,为我国能源供应和工业发展提供有力保障的同时,也具有高耗能、高污染、高排放等问题。2021年10月中共中央、国务院印发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,推动黄河流域向绿色生态、高质量方向发展。黄河流域中众多能源生产大省承担着向能源消费大省能源保供的任务,

在能源供应的过程中物流业的碳排放成为了当今亟待解决的现实问题,因此推动其低碳发展成为至关重要的任务。

1.2 数据来源与处理

能源禀赋度、碳生产率及其影响因素的数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和各省区统计年鉴,其中涉及的各种价值指标均通过价值指标平减。按照国家统计标准分类,物流业的数据主要集中在交通运输、仓储、邮政业,所以选取其作为物流业能源数据代替。在进行测算前将初始数据取对数,以降低异常值对数据的影响。

1.3 研究机理

文章根据能源禀赋度将黄河流域划分为能源富集区和能源一般区,继而测算碳生产率,在此基础上探究其影响因素,研究机理见图1。

能源禀赋差异对碳生产率的影响是多方面的,既体现在碳生产率测算体系中的能源消耗、资本、劳动力投入等方面,也体现在能源因素、经济因素等方面。因此,需要综合考虑这些因素,制定科学合理的政策措施,推动物流业向绿色、低碳方向发展。

1.4 研究方法

1.4.1 能源禀赋度测度 能源禀赋度测度方法众多,根据文章的研究内容,参考姚顺波等^[20]、Su等^[21]的做法,鉴于黄河流域持续推进能源转型进程,但其能源消费结构仍以煤炭等传统能源为主,所以本研究选择一次能源原煤、原油、天然气生产量折算为标准煤之后占全国的比重衡量各省区的能源禀赋度。

1.4.2 SBM-ML模型

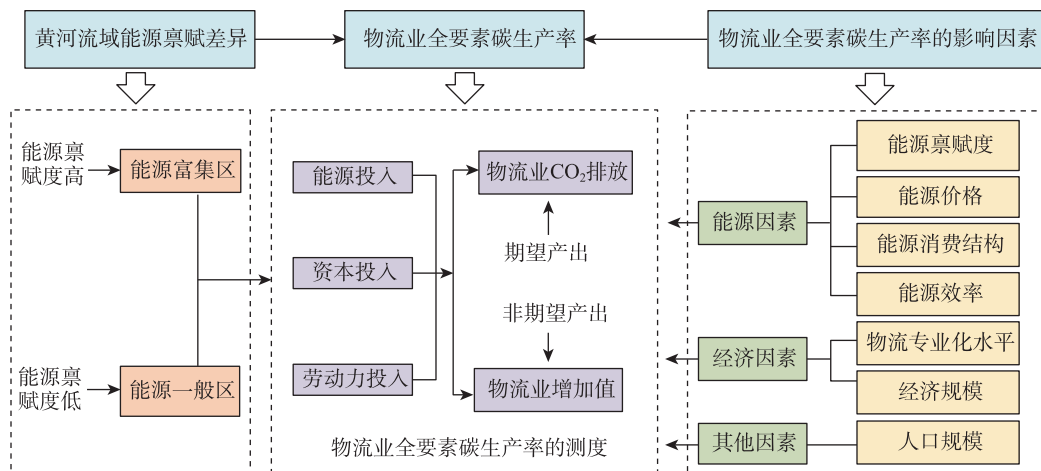
(1) IPCC碳排放系数法

碳排放是碳生产率的一个重要组成部分且计算相对复杂,因此单独对其进行测算。参考相关学者的做法^[6],文章采用碳排放系数法,选取黄河流域物流业占比最大的6种化石能源消费量计算碳排放量。为避免重复计算,未将电力纳入其中^[22]。由式(1)计算碳排放量^①。

$$C = \sum_{i=1}^6 C_i = \sum_{i=1}^n (E_i \times \delta_i \times \theta_i) \quad (1)$$

式中: C 为各类能源的碳排放量总和(10^7 t); C_i 为第 i 种能源的碳排放量(10^7 t); E_i 为第 i 种能源初始消耗量; δ_i 为第 i 种能源的折标准煤系数; θ_i 为第 i

① 最新数据尚未公布。



注:物流业全要素碳生产率测度见图2;物流业全要素碳生产率影响因素见表1。

图1 研究机理

Fig. 1 Research mechanism

种能源碳排放系数,计算方法如下:

$$\theta_i = \omega_i \times \varphi_i \times v_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中: ω_i 为第 i 种能源单位热值含碳量; φ_i 为第 i 种能源平均低位发热值; v_i 为第 i 种能源碳氧化率; 44/12 为 CO_2 与 C 分子量比值。借鉴相关学者的方法^[23], 计算碳排放系数。

(2) 非期望产出超效率SBM模型

Tone^[24]构建了非期望产出超效率SBM模型,弥补了SBM模型效率值只能保持在(0, 1]区间内及不包含非期望产出的不足,计算方法如下:

$$\rho = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right)} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{i0} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^x, \forall i \\ y_{k0} \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{kj} + s_k^y, \forall k \\ z_{l0} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j z_{lj} - s_l^z, \forall l \\ 1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right) > 0 \\ s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_l^z \geq 0; \lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, l \end{cases}$$

式中: ρ 为物流业全要素碳生产率; $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}$ 为投入

过剩的变化比例; $\frac{1}{s_1 + s_2} \sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}}$ 为期望产出短缺的变

化比例; $\frac{1}{s_1 + s_2} \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}}$ 为非期望产出过剩的变化比例; m 为投入要素的个数; s_1 为期望产出的个数; s_2 为非期望产出的个数; x_{i0} 为当前被评价单元的真实投入; y_{k0} 、 z_{l0} 为当前被评价单元的真实产出; x_{ij} 、 y_{kj} 、 z_{lj} 为其他决策单元 ($j \neq 0$) 在第 j 项投入上的实际观测值; s_i^x 为投入要素的松弛变量; s_k^y 为期望产出的松弛变量; s_l^z 为非期望产出的松弛变量; λ_j 为第 j 个参考决策单元分配的权重。

(3) ML指数

超效率SBM模型能够揭示某一时点上各省区碳生产率的相对高低,但无法直观展示这些地区碳生产率随时间推移的变化情况。Chung等^[9]提出的ML指数弥补了Malmquist指数无法计算一些非期望产出的不足。因此文章使用ML指数分析碳生产率的动态特征,方法如下:

$$\text{ML}_c^{t+1} = \text{MLEC}_c + \text{MLTC}_c \quad (4)$$

$$\text{ML}_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t, x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1}) = \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t, z^t)} \times \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

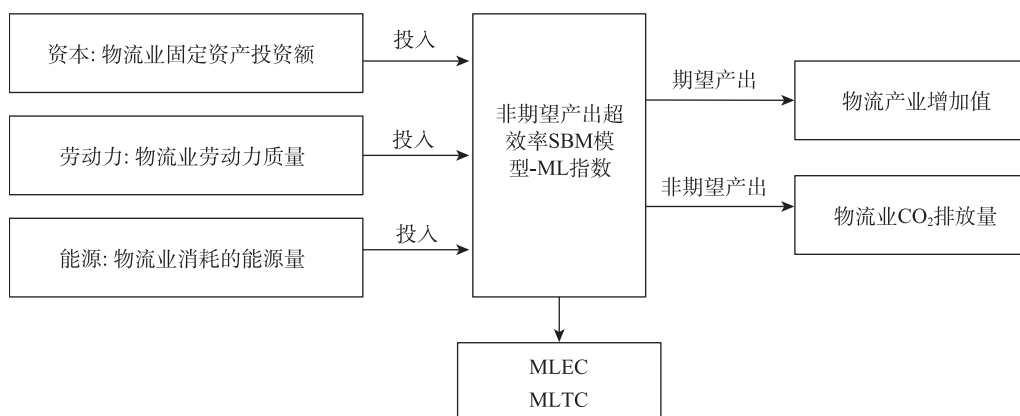
$$\text{MLEC}_c = \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t, z^t)} \quad (6)$$

$$\text{MLTC}_c = \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})} \times \frac{E_c^t(x^t, y^t, z^t)}{E_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: ML_c^{t+1} 为从时期 t 到 $t+1$ 的ML指数 (c 表示规

模报酬不变); $MLEC_c$ 为效率变化指数; $MLTC_c$ 为技术进步指数; x^t 为 t 时期的投入向量; y^t 为 t 时期的期望产出向量; z^t 为 t 时期的非期望产出向量; $E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})$ 为以 t 时期的技术参照, $t+1$ 时期的投入产出组合聚合距离函数; $E_c^t(x^t, y^t, z^t)$ 为以 t 时期

的技术参照, t 时期的投入产出组合聚合距离函数; $E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})$ 为以 $t+1$ 时期的技术参照, $t+1$ 时期的投入产出组合聚合距离函数; $E_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t)$ 为以 $t+1$ 时期的技术参照, t 时期的投入产出组合聚合距离函数。



注: MLEC 为效率变化指数; MLTC 为技术进步指数。

图2 物流业全要素碳生产率指标体系

Fig. 2 Total factor carbon productivity indicator system of the logistics industry

本文章构建物流业全要素碳生产指标体系,各投入及产出要素见图2,各要素计算方式如下:参考裴恺程等^[25]的做法,以各省区各年度的固定资产投资额作为资本投入;劳动力投入指标大部分学者采用物流业从业人数表示,但是仅靠从业人数不能较好地反映实际情况,因此文章用物流业劳动力质量表示,用所在地区平均受教育年限与物流业从业人数的乘积代替;能源消耗用煤、石油、天然气等能源折算成标准煤消耗量后的数据表示;期望产出为物流产业增加值,为了消除价格因素的影响,文章用GDP缩减指数进行平减;非期望产出为物流业碳排放量,见式(1)。

1.4.3 影响因素识别 通过非期望产出的超效率SBM模型所测算出的各地区碳生产率有大于1的值,不适用受限的面板Tobit回归;LMDI分解法适用于单一指标的分解,对于碳生产率的分解无法细化。面板回归模型的适用范围较广、包容性强,可以控制不可观测的个体异质性,提高结果的准确性。因此,文章采用面板回归模型对碳生产率的影响因素进行分析,计算方法如下:

$$Y_i^* = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (8)$$

式中: Y_i^* 为潜变量; β_0 为常数项; β_j 为第 j 个影响因素变量的系数; x_{ij} 为自变量; ε_i 为随机误差项^[26]。

本文参考张兰怡等^[27]、梁毅等^[28]的相关研究,选取能源、经济及其他因素,具体分类及含义见表1,表中均为解释变量,被解释变量为碳生产率。

表1 物流业全要素碳生产率影响因素指标体系

Tab. 1 Indicator system of influencing factors of total factor carbon productivity in the logistics industry

一级指标	二级指标	指标解释
能源因素	能源禀赋度	煤、石油、天然气的产量折算为标准煤之后占全国的比重
	能源价格	燃料、动力类工业生产者购进价格指数代替 ^[29]
	能源消费结构	能源消费结构主要指物流业各种能源消费的比重,用能源结构系数表示
	能源效率	能源效率用物流业能源消耗量除以物流业增加值表示
经济因素	物流专业化水平	物流专业化水平用物流业增加值除以当年GDP水平表示
	经济规模	地区生产总值表示
其他	人口规模	人口规模指各省区的年末人口数

2 结果与分析

2.1 能源禀赋区划分

文章参考相关学者做法^[20],将能源禀赋度均值大于15%的区域定义为能源富集区,其余为能源一般区,测算结果见图3。

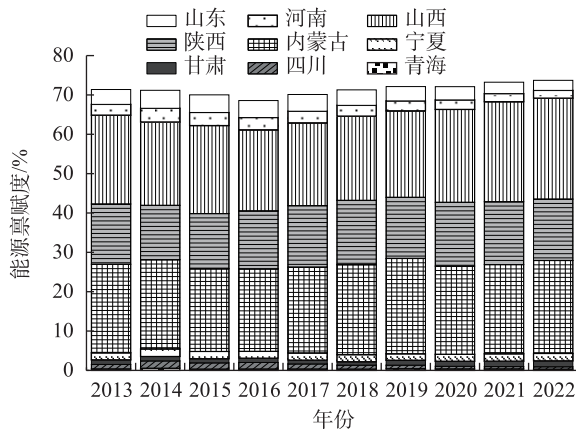


图3 2013—2022年黄河流域9省区能源禀赋度

Fig. 3 Energy endowment of 9 provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin from 2013 to 2022

黄河流域9省区的能源禀赋度均值之和为71.37%，占全国能源产量比重的一半以上，因此研究黄河流域能源禀赋差异下的碳生产率具有现实意义。除此之外，内蒙古、陕西、山西的能源禀赋度均值均大于15%，将其定义为能源富集区，其余省区定义为能源一般区。

2.2 碳生产率测度分析

2.2.1 物流业碳排放量 黄河流域物流业能源消费以化石燃料为主，因此降低物流业碳排放是实现“双碳”目标与保卫绿色黄河的关键任务，图4为黄河流域物流业碳排放量。

由图4可知，青海、四川及河南的物流业碳排放呈逐年上升趋势；山东碳排放呈现逐年下降态势。其余省区呈先增后降的波动特征，但降幅相对有限。

2.2.2 物流业静态效率值 文章借助 Matlab、利用非期望产出超效率SBM模型对2013—2022年黄河流域省域碳生产率的静态效率值以及动态效率ML指数进行测算，并将ML指数分解为MLEC 和MLTC。2013—2022年黄河流域9省区碳生产率测度结果见表2。将碳生产率小于0.4定义为低碳生产率，0.4~

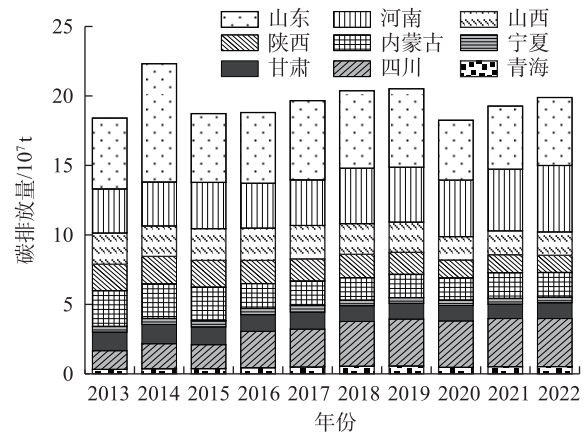


图4 2013—2022年黄河流域9省区物流业碳排放量

Fig. 4 Carbon emissions of the logistics industry in 9 provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin from 2013 to 2022

0.8为中碳生产率，大于0.8为高碳生产率^[30]。

由表2可知，山东、河南、内蒙古、山西的碳生产率均值大于0.8，且山东为1.028，排名最高，反映其物流大省的属性；陕西、宁夏、四川的均值介于0.4~0.8，属于中碳生产率地区；甘肃、青海的均值均小于0.4，属于较低碳生产率地区。综合来看，能源富集区三省的均值均大于0.7，其中内蒙古、山西分别达到0.941、0.822，仅次于山东、河南。

为分析碳生产率的变化趋势，根据测算值构建三维动态 Kernel 核密度图，观察其在样本观测期内的分布动态演进趋势(图5)。

黄河流域整体的碳生产率有以下显著特点：第一，峰值随时间的推移逐渐向右移动，表明碳生产率总体呈上升趋势；第二，在2017年之前碳生产率的密度值较低，说明在此时间段内波动较小；第三，2017年出现了一个小峰值，表明这1 a有小幅度的集中趋势；第四，在2020年出现双峰，说明该年的碳生产率出现两极化发展趋势。能源一般区的核密度曲线具有右拖尾特征，说明碳生产率差距较大，有个别城市远超其他城市；而能源富集则不存在，说明碳生产率较均衡。综上所述，黄河流域碳生产率的水平在不断提高，各省区之间的差距在不断缩小。除此之外，绘制了碳生产率空间演变规律(图6)。

由图6可知，在2013—2022年山东一直属于高碳生产率地区，青海一直属于低碳生产率地区，结合能源禀赋度结果，青海的能源禀赋度排名最末为

表 2 2013—2022 年黄河流域 9 省区物流业全要素碳生产率

Tab. 2 Total factor carbon productivity of the logistics industry in 9 provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin from 2013 to 2022

年份	能源富集区			能源一般区					
	山西	内蒙古	陕西	青海	四川	甘肃	宁夏	河南	山东
2013	0.487	0.615	0.596	0.297	1.028	0.481	1.086	0.800	0.839
2014	0.510	0.708	0.597	0.308	0.481	0.343	1.083	1.152	1.034
2015	0.584	0.718	0.611	0.336	1.004	0.441	0.822	1.048	1.053
2016	0.555	0.783	0.676	0.283	0.445	0.295	0.699	1.067	1.075
2017	1.376	1.003	0.685	0.241	0.420	0.405	0.605	1.071	1.128
2018	1.107	1.108	0.568	0.236	0.380	0.401	0.550	1.070	0.861
2019	1.053	1.091	0.600	0.250	0.388	0.401	0.627	1.082	1.040
2020	1.006	1.087	1.048	0.249	0.355	0.365	0.662	1.003	1.031
2021	0.826	1.141	1.005	0.234	0.304	0.346	0.575	0.770	1.103
2022	0.717	1.161	1.044	0.237	0.301	0.392	0.551	0.783	1.110
均值	0.822	0.941	0.743	0.267	0.511	0.387	0.726	0.985	1.028

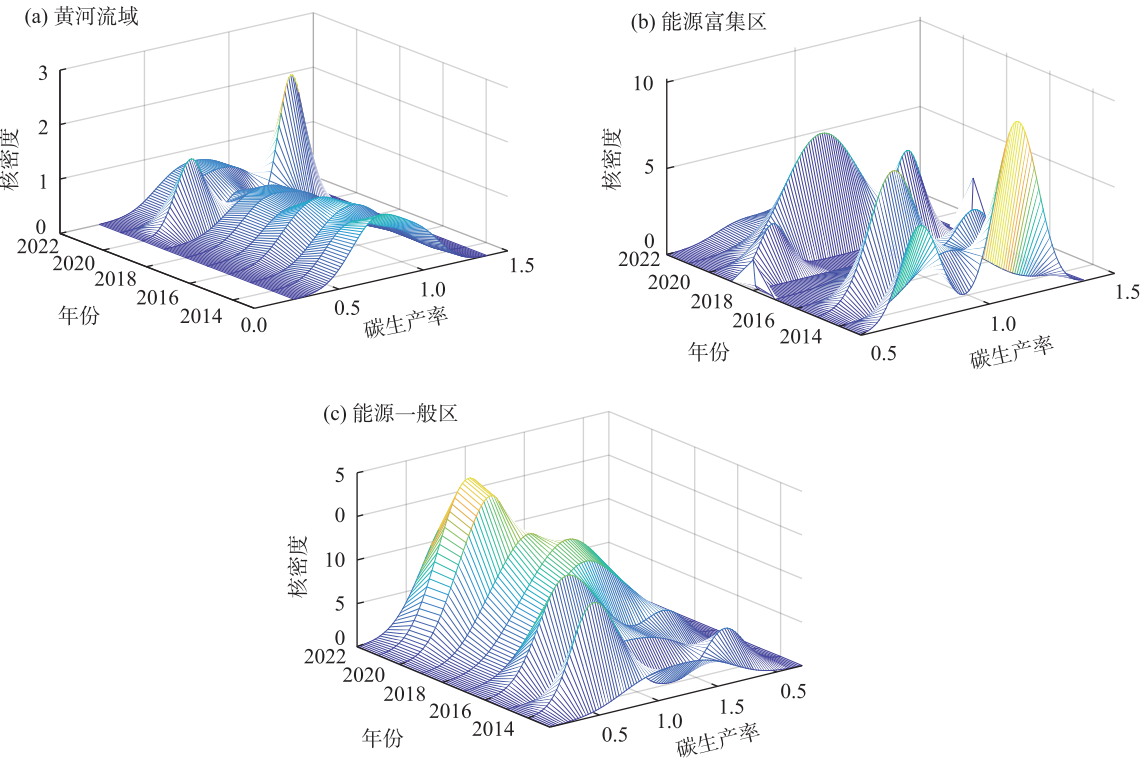


图 5 2013—2022 年物流业全要素碳生产率核密度曲线

Fig. 5 Kernel density curve for total factor carbon productivity of the logistics industry from 2013 to 2022

0.37%,碳生产率较低的原因是其物流业仍以传统运输为主,缺乏智能调度和绿色技术应用;山东的能源禀赋度为3.78%,但其物流业能源消耗均值在9省区中排名第一,说明山东省在增加物流业能源消耗的同时也注重能源利用效率,通过智能、集约化

转型,构建了多式联运网络等显著提升了单位能耗的经济产出,从而提高碳生产率。

2.2.3 物流业动态效率指数 基于碳生产率测度模型,利用ML指数分析碳生产率的动态变化。黄河流域能源富集区和能源一般区的ML指数对比情

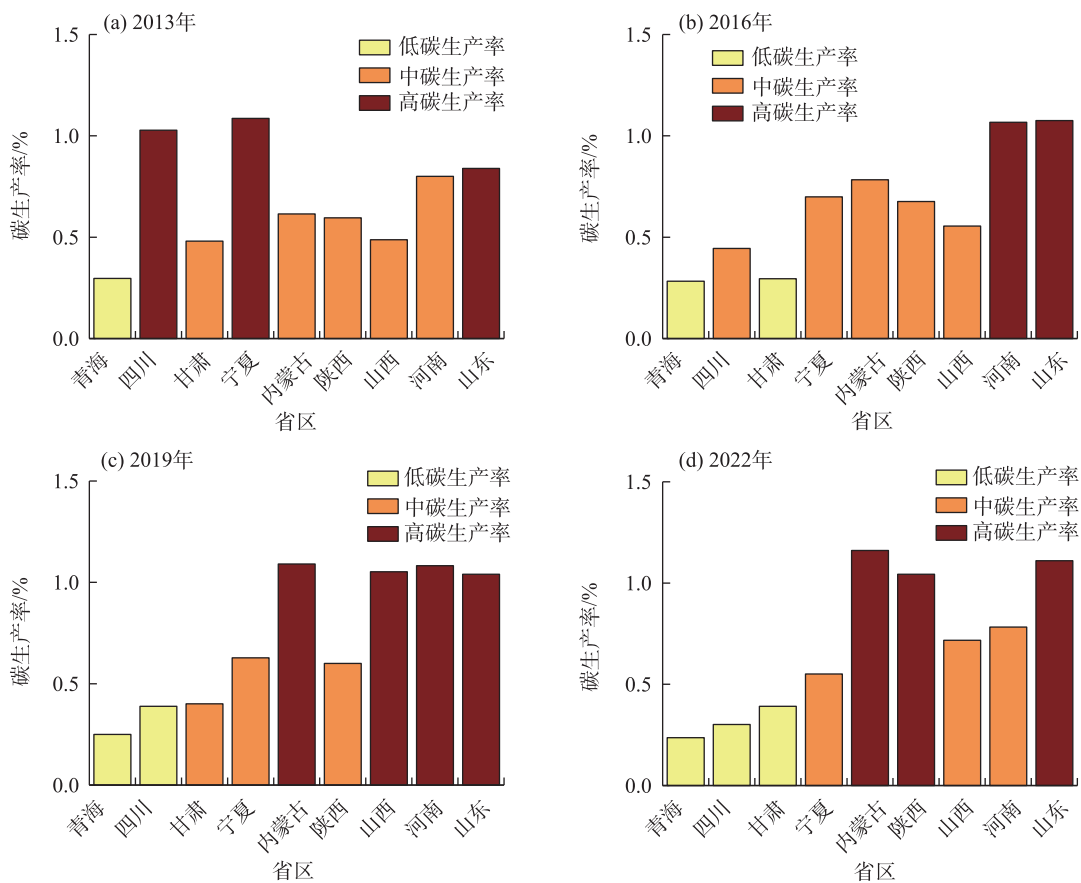


图6 2013—2022年黄河流域9省区物流业全要素碳生产率变化

Fig. 6 Change of total factor carbon productivity of the logistics industry in 9 provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin from 2013 to 2022

况,见表3。

由表3可知,各省区ML指数在大多数年份中大于1,总体来看,能源富集区和能源一般区的ML指数均值全部大于1,表明黄河流域碳生产率水平整

体得到提升。能源富集区3个省区的ML指数均值在9省区中排名前3,陕西省以年均23.4%的速度增长,其次是山西和内蒙古年均增速分别为15.5%、14.0%,提升较为明显;能源一般区的提升较为缓

表3 2013—2022年黄河流域9省区物流业全要素碳生产率ML指数

Tab. 3 ML index of total factor carbon productivity of the logistics industry in 9 provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin from 2013 to 2022

年份	能源富集区			能源一般区					
	山西	内蒙古	陕西	青海	四川	甘肃	宁夏	河南	山东
2013—2014	1.063	1.103	1.050	1.037	1.063	0.698	0.978	1.444	0.996
2014—2015	1.090	1.076	0.988	1.136	2.097	1.293	0.929	0.928	1.009
2015—2016	1.041	1.293	1.238	0.899	0.669	0.716	1.060	1.097	1.076
2016—2017	2.472	1.342	1.272	0.957	1.035	1.491	0.957	1.019	1.092
2017—2018	0.930	1.295	1.009	1.161	1.119	1.189	1.107	1.154	0.998
2018—2019	0.847	0.986	1.140	1.106	1.081	1.055	1.184	1.063	1.247
2019—2020	0.974	1.006	1.742	0.947	0.887	0.871	1.059	0.904	0.981
2020—2021	1.057	1.157	1.361	1.201	1.110	1.227	1.053	1.077	1.277
2021—2022	0.920	1.001	1.304	1.076	1.057	1.201	1.019	1.201	1.053
均值	1.155	1.140	1.234	1.058	1.124	1.082	1.039	1.098	1.081

慢,增速最慢的宁夏和青海分别为3.9%、5.8%。

2.2.4 物流业动态效率指数分解 将ML指数分解为MLEC以及MLTC,分别从时间和空间维度展示2013—2022年2类区域技术效率及技术进步变化情况(表4~5)。

表4 2013—2022年分区域物流业全要素碳生产率
MLEC、MLTC

Tab. 4 MLEC and MLTC of total factor carbon productivity of the logistics industry in different regions from 2013 to 2022

年份	能源富集区		能源一般区	
	MLEC	MLTC	MLEC	MLTC
2013—2014	1.067	1.007	0.981	1.174
2014—2015	1.061	0.993	1.192	1.048
2015—2016	1.049	1.133	0.807	1.171
2016—2017	1.591	1.100	1.015	1.078
2017—2018	0.913	1.181	0.924	1.218
2018—2019	0.997	0.991	1.074	1.046
2019—2020	1.232	1.009	0.966	0.974
2020—2021	0.943	1.270	0.908	1.280
2021—2022	0.975	1.100	1.020	1.080
均值	1.092	1.087	0.987	1.119

注:MLEC为效率变化指数;MLTC为技术进步指数。下同。

从时间维度来看,能源富集区的MLEC整体呈下降趋势,在一些年份出现显著下降,如2017—2018年较2016—2017年下降了0.687、2020—2021年较2019—2020年下降了0.289;MLTC整体呈上升趋势,波动幅度较MLEC小。能源一般区的MLEC整体呈上升趋势,整体波动幅度较小,其中波动幅度最大的年份为2015—2016年,该年较上一年下降了0.385;MLTC整体呈下降趋势。

从空间维度来看,山西的MLEC最高,说明该省碳生产率的技术效率进步显著,推动ML指数上升。宁夏的MLEC最低,表明该省技术效率进步缓慢,处于流域内较低水平。所有省区的MLTC均大

于1,表明各省区技术均处于进步状态,其中四川、陕西、宁夏的MLTC指数大于1.1,表明其技术进步提升较为显著。

2.3 影响因素分析

利用Stata 17.0首先对数据进行多重共线性检验,方差膨胀因子均小于10,表明各变量之间不存在严重的多重共线性;其次通过F检验、BP检验及Hausman检验确定选择随机效应模型,在此基础上对面板数据分别进行整体、分组回归,探究影响2类区域碳生产率的关键影响因素,为制定提升碳生产率的差异化对策提供依据。由于文章是在能源禀赋差异的视角下展开的,因此对能源因素进行进一步分组回归,见表6。

(1) 黄河流域整体回归分析

黄河流域整体能源效率呈显著正相关,提升能源效率促进碳生产率增长。能源禀赋度和人口规模在5%的水平上显著为正,由于黄河流域拥有丰富的能源资源,为物流业提供充足的能源供应,物流业可以更加高效地运作,减少因能源短缺而导致的运营中断和效率下降;同时人口规模庞大,导致物流需求增加,物流业必须提高运输、仓储、包装等环节的效率以满足需求,从而推动物流业的发展和进步。

(2) 能源富集区回归分析

能源富集区能源禀赋度因素不显著,可能由于物流业属于劳动密集型产业且逐步向技术密集型产业转变,碳生产率主要依赖于劳动力质量及资本投入,对于传统能源的依赖度较低,可以在一定程度上打破资源诅咒。能源价格因素在10%的水平下正向显著,能源价格上升时,物流业为了降低成本选择更节能、高效的运输方式和设备,降低能源消耗。能源效率因素在5%的水平下正向显著,说明能源效率的提升可能促使物流业向更加低碳、环保的方向发展,通过优化运输方式、提高仓储效率等提升碳生产率。

表5 2013—2022年黄河流域9省区物流业全要素碳生产率MLEC、MLTC均值

Tab. 5 Average value of MLEC and MLTC for total factor carbon productivity of logistics industry in 9 provinces and autonomous regions of Yellow River Basin from 2013 to 2022

指数	能源富集区				能源一般区				
	山西	内蒙古	陕西	青海	四川	甘肃	宁夏	河南	山东
MLEC	1.114	1.077	1.086	0.979	0.959	1.002	0.934	1.010	1.040
MLTC	1.053	1.058	1.151	1.084	1.279	1.079	1.122	1.098	1.052

表6 物流业全要素碳生产率面板回归结果

Tab. 6 Panel regression results of total factor carbon productivity of the logistics industry

解释变量	黄河流域整体	能源富集区		能源一般区	
	初始回归	初始回归	进一步回归	初始回归	进一步回归
能源禀赋度	0.22** (0.014)	0.39 (0.266)	0.50 (0.110)	0.54*** (0.000)	0.48*** (0.000)
能源价格	0.02 (0.944)	0.75 (0.235)	0.74* (0.088)	-0.65* (0.071)	-0.44 (0.134)
能源消费结构	-0.33 (0.383)	0.29 (0.687)	0.05 (0.903)	-1.65** (0.006)	-0.33 (0.551)
能源效率	0.66*** (0.000)	0.65 (0.286)	0.11** (0.031)	0.52** (0.004)	0.02 (0.721)
物流专业化水平	-0.56*** (0.000)	-0.59 (0.330)	-	-0.45** (0.010)	-
经济规模	-0.76*** (0.000)	-0.72 (0.497)	-	-0.09 (0.590)	-
人口规模	0.83** (0.002)	-0.16 (0.765)	-	-0.04 (0.780)	-
常数	-0.86 (0.633)	3.36 (0.597)	-2.84 (0.212)	4.88** (0.001)	3.58** (0.007)
总体 R^2	0.4781	0.4510	0.4119	0.8413	0.8063
样本观测数	86	29		57	
组数	9	3		6	

注: R^2 为决定系数;括号内数值为标准误;*、**、***分别表示回归系数在0.1、0.05、0.01水平上显著。

(3) 能源一般区回归分析

能源一般区能源禀赋度在1%的水平下正向显著,则是由于该区域的能源禀赋未能达到充裕的程度,倒逼物流领域寻求技术创新以突破能源约束。物流企业为了降低成本,会采取节能设备等更加高效的能源利用方式,同时倾向于采用可再生能源缓解能源短缺问题,推动技术创新和产业升级。能源价格因素在10%的水平下负向显著,物流企业通过提高服务价格弥补能源价格增加导致的成本上升,使得物流需求减少,经济产出降低,影响碳生产率。能源效率在5%的水平下正向显著,由于能源资源有限且价格较高,物流企业面临较大的能源成本压力时选择提高能源效率以降低物流能耗和成本。

3 讨论

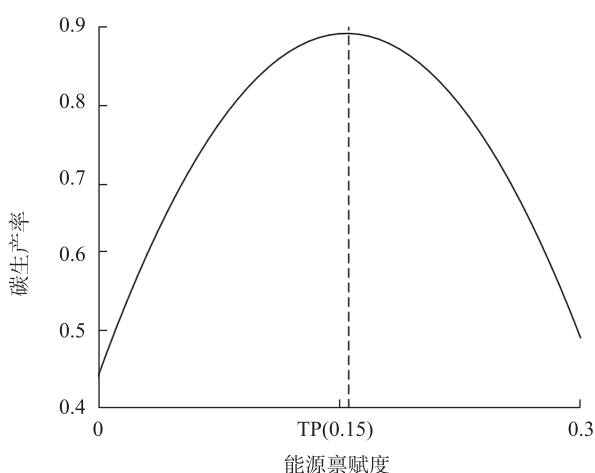
3.1 区域异质性的双重作用机制

传统的资源诅咒认为,丰裕的自然资源本身对经济增长通常具有积极影响,但自然资源丰裕的地区往往更倾向于优先发展资源型产业,从而更易于

步入资源依赖型经济发展的道路^[31]。本文则修正了该理论在物流业的适用性,发现能源富集区依托资源优势通过规模经济与技术效率提升促进碳生产率增长,未出现预期抑制效应,能源产业与物流业深度融合形成产业链,规模效应降低了单位成本,技术进步提升了能源效率,在一定程度上印证倒“U”曲线的存在(图7)。能源一般区则印证了稀缺性驱动创新理论的科学性,物流企业在面临转嫁成本的困境时会主动寻求创新,最终使得其创新补偿效应强于资源依赖效应。

3.2 政策调节的差异化需求

现有黄河流域相关研究多聚焦于能源产业本身,如能源利用效率^[32-34]、能源清洁利用^[35]、全要素碳生产率^[36-37]等,对物流业与能源要素的相互关系关注不足,文章创新之处在于将物流业与能源禀赋差异联系起来,并聚焦于能源禀赋差异地区——黄河流域。本文创新地揭示了黄河流域物流业对能源价格的高敏感度特征,基于面板回归的弹性分析显示,能源价格在富集区的正向调节效应是一般区



注:图中虚线代表能源禀赋度的阈值点(TP=0.15)。

图7 能源禀赋度与碳生产率的倒“U”关系曲线

Fig. 7 Inverted “U” curve of energy endowment and carbon productivity

的1.5倍,意味着价格机制在不同发展阶段具有非对称传导特征。能源富集区企业因规模优势更能消化价格波动,而一般区企业则面临成本转嫁困境。这为差异化碳定价政策提供了实证依据,在能源富集区可实施阶梯型碳税以强化价格信号,而在一般区需配套能效补贴以缓解转型压力。

4 结论及建议

4.1 结论

(1) 区域异质性:能源富集区碳生产率高且增长快,技术效率提升显著但内蒙古、山西技术进步滞后;能源一般区整体增长但内部效率分化,青海、四川及宁夏技术进步呈下降趋势,填补区域差异研究空白。

(2) 驱动机制差异化:揭示能源价格仅在能源富集区呈正面影响,而在能源一般区产生抑制;能源禀赋度仅对能源一般区有正向作用,不同区域核心驱动因素具有异质性特征。

(3) 效率动态特征:经过ML指数分解,揭示2类区域物流业技术效率与技术进步的分化规律,能源富集区技术效率展现显著领先优势;而在能源一般区内部,四川与宁夏的技术进步水平处于领跑地位,山东省则表现出技术进步动力不足的特征,区域内技术发展差异显著。

4.2 建议

(1) 基于能源富集区碳生产率较高但技术进步分化的特征,在技术创新层面,应重点强化技术效率优势的持续性,针对内蒙古、山西技术进步缓慢的问题,可建立跨区域技术协作平台,推广自动化立体仓库加自动导引运输车机器人,进一步提高技术效率,努力突破核心技术“卡脖子”问题;在能源利用层面,结合能源价格对碳生产率的正面影响,继续深化能源价格机制改革,通过市场机制引导物流业更加合理地使用能源,降低能耗成本,提升技术装备绿色化水平,针对区域大宗商品运输需求大的特点,在矿区、工业园区等重点区域布局新能源中重型货车专用换电站^①,降低物流能耗,提高能源利用率。

(2) 针对能源一般区技术进步分化、能源消费结构制约发展的问题,对于青海、四川、宁夏等技术进步指数较低的地区,应加大科技研发精准投入,引进先进技术和管理经验,在偏远地区试点无人机配送,搭建物流大数据平台,减少空驶率,不断推动技术进步;在能源与结构优化层面,针对能源价格、消费结构的负面影响,加快清洁能源替代的实施进度,在河南、山东等物流枢纽城市试点氢能重卡运输,在甘肃、青海等风光资源丰富地区推广光伏电站,逐步降低化石能源消费占比。

参考文献(References)

- [1] Kang X, Chen L, Wang Y, et al. Analysis on the spatial correlation network and driving factors of carbon emissions in China's logistics industry[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 366: 121916, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121916.
- [2] 刘帅. 数字物流促进物流业碳排放效率提升的机制与效应[J]. 中国流通经济, 2024, 38(6): 54-65. [Liu Shuai. The mechanism and impact of digital logistics in enhancing the efficiency of carbon emissions in the logistics industry[J]. China Business and Market, 2024, 38(6): 54-65.]
- [3] Sporkmann J, Liu Y, Spinler S. Corrigendum to “carbon emissions from European land transportation: A comprehensive analysis”[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 126: 103992, doi: 10.1016/j.trd.2023.103992.
- [4] 陈猛, 谈晓勇. 西部陆海新通道物流业碳排放特征及驱动因素研究[J]. 铁路运输与经济, 2024, 46(12): 100-107. [Chen Meng, Tan Xiaoyong. Carbon emission characteristics and driving factors

① 交通运输部 国家发展改革委关于印发《交通物流降本提质增效行动计划》的通知。

of logistics industry in new international land-sea trade corridor[J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(12): 100–107.]

- [5] Dong Q Y, Zhou J P, Du Q Y. Analysis of the spatial correlation pattern of logistics carbon emission efficiency and its influencing factors: The case of China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2024, 31(7): 11178–11191.
- [6] 王兆峰, 黄冬春. 长江经济带与黄河流域交通碳排放效率的比较及其影响因素[J/OL]. *经济地理*. [2025–11–11]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1126.K.20230831.1703.002>. [Wang Zhaofeng, Huang Dongchun. Comparison of transportation carbon emission efficiency and its influencing factors between Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin[J/OL]. *Economic Geography*. [2025–11–11]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1126.K.20230831.1703.002>.]
- [7] Liu F, Xu H. Heterogeneity of green TFP in China's logistics industry under environmental constraints[J]. *Complexity*, 2020, 2020: 8842560, doi: 10.1155/2020/8842560.
- [8] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498–509.
- [9] Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3): 229–240.
- [10] Färe R, Grosskopf S, Pasurka C A. Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth[J]. *Journal of Regional Science*, 2001, 41(3): 381–409.
- [11] 王凯, 马月琴, 甘畅, 等. 中国旅游业全要素碳生产率动态演进及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2388–2398. [Wang Kai, Ma Yueqin, Gan Chang, et al. Dynamic evolution and influencing factors of total factor carbon productivity in China's tourism industry[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(10): 2388–2398.]
- [12] 吴传清, 邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究[J]. *中国软科学*, 2023(11): 189–200. [Wu Chuanqing, Deng Mingliang. Impact of digital economy development on industrial carbon productivity in China[J]. *China Soft Science*, 2023(11): 189–200.]
- [13] Chen J D, Xu C, Song M L, et al. Regional disparities and influencing factors for carbon productivity change in China's transportation industry[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2019, 14(8): 579–590.
- [14] 穆佳薇, 乔保荣, 余国新. 新疆塔里木河流域县域农业低碳生产率时空格局及影响效应研究[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(6): 968–981. [Mu Jiawei, Qiao Baorong, Yu Guoxin. Spatial and temporal patterns of agricultural low-carbon productivity and its influence effects in the counties of Tarim River Basin, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(6): 968–981.]
- [15] Wang X Z, Wang S, Zhang X X. Heterogeneity and influence factors of carbon productivity: Evidence from Chinese manufacturing enterprises[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 404(10): 136938, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136938.
- [16] 于向宇, 李跃, 陈会英, 等. “资源诅咒”视角下环境规制、能源禀赋对区域碳排放的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(5): 52–60. [Yu Xiangyu, Li Yue, Chen Huiying, et al. Study on the impact of environmental regulation and energy endowment on regional carbon emissions from the perspective of resource curse[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(5): 52–60.]
- [17] 黄鲜华, 边娜, 石欣. 能源禀赋与产业技术进步对碳排放强度的影响效应研究——来自长江经济带的实证[J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(19): 59–64. [Huang Xianhua, Bian Na, Shi Xin. The effect of energy endowments and industrial technological advances on carbon intensity: An empirical analysis based on the Yangtze River Economic Belt[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2018, 35(19): 59–64.]
- [18] 张翠菊, 张宗益, 覃明锋. 能源禀赋、技术进步与碳排放强度——基于空间计量模型的研究[J]. *系统工程*, 2016, 34(11): 47–53. [Zhang Cuiju, Zhang Zongyi, Qin Mingfeng. Research on energy resources, technology advance and carbon emission intensity: Based on spatial panel econometric model[J]. *Systems Engineering*, 2016, 34(11): 47–53.]
- [19] 丁忠毅, 江蓉. 碳达峰碳中和进程中西部边疆地区的空间优势与战略匹配[J]. *云南师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 54(3): 34–45. [Ding Zhongyi, Jiang Rong. Spatial advantages and strategic alignment of the frontier region of west China in the process of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2022, 54(3): 34–45.]
- [20] 姚顺波, 韩久保. 基于资源丰裕和资源依赖不同视角下的“资源诅咒”问题再检验——以陕西省10个地市面板数据为例[J]. *经济经纬*, 2017, 34(5): 14–19. [Yao Shunbo, Han Jiubao. Re-examination of the “resource curse” from different perspectives of resource abundance and resource dependence: A case study based on panel data of 10 cities in Shaanxi Province[J]. *Economic Survey*, 2017, 34(5): 14–19.]
- [21] Su X, Tan J L. Regional energy transition path and the role of government support and resource endowment in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 174: 113150, doi: 10.1016/j.rser.2023.113150.
- [22] 申萌, 李凯杰, 曲如晓. 技术进步、经济增长与二氧化碳排放: 理论和经验研究[J]. *世界经济*, 2012, 35(7): 83–100. [Shen Meng, Li Kaijie, Qu Ruxiao. Technological progress, economic growth and carbon dioxide emissions: A theoretical and empirical study[J]. *The Journal of World Economy*, 2012, 35(7): 83–100.]
- [23] Ding H P, Wang Y, Sheng W J, et al. Measurement and evaluation of carbon emission efficiency in logistics industry: Taking Anhui Province as an example[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2024, 33(6): 6097–6108.
- [24] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*,

2002, 143(1): 32–41.

- [25] 裴恺程, 穆怀申. 环境规制对物流业绿色发展的影响研究——来自京津冀地区的实证检验[J]. 工业技术经济, 2021, 40(5): 107–114. [Pei Kaicheng, Mu Huaizhong. Impact of environmental regulation on green development of logistics industry: Empirical test based on Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2021, 40(5): 107–114.]
- [26] Agan B. Sustainable development through green transition in EU countries: New evidence from panel quantile regression[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121545, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121545.
- [27] 张兰怡, 徐艺诺, 翁大维, 等. 经济高质量发展背景下中国省域物流业碳排放时空分异[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5086–5096. [Zhang Lanyi, Xu Yinu, Weng Dawei, et al. Spatiotemporal differentiation of carbon emissions from logistics industry at provincial scale in China under the background of high-quality economic development[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5086–5096.]
- [28] 梁毅, 徐超飞, 高子涵. “一带一路”倡议下中国沿线区域物流业碳排放时空演变及驱动因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(3): 798–810. [Liang Yi, Xu Chaofei, Gao Zihan. Spatial and temporal evolution and driving factors of carbon emissions in regional logistics industry in China under the Belt and Road Initiative[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(3): 798–810.]
- [29] 李跃, 方冉, 韩浩亮, 等. 煤炭资源区域异质性视角下新能源发展的产业转型升级效应研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(8): 34–42. [Li Yue, Fang Ran, Han Haoliang, et al. Research on the industrial transformation and upgrading effect of new energy development from the perspective of regional heterogeneity of coal resources[J]. China Coal, 2024, 50(8): 34–42.]
- [30] 喻小宝, 于永智. 基于SBM-ML-Tobit模型的中国工业碳生产率影响因素研究[J]. 生态经济, 2024, 40(8): 13–19. [Yu Xiaobao, Yu Yongzhi. Research of factors influencing industrial carbon productivity in China based on the SBM-ML-Tobit model[J]. Ecological Economy, 2024, 40(8): 13–19.]
- [31] 邵帅, 杨莉莉. 自然资源丰裕、资源产业依赖与中国区域经济增长[J]. 管理世界, 2010(9): 26–44. [Shao Shuai, Yang Lili. The abundance of natural resources, the dependence on the resources industry, and China's regional economic growth[J]. Management World, 2010(9): 26–44.]
- [32] 薛建春, 丁志斌, 曹凌辰. 黄河流域能源利用效率空间关联网络及其形成机制[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(4): 1398–1408. [Xue Jianchun, Ding Zhibin, Cao Lingchen. Spatial correlation network of energy efficiency in the Yellow River Basin and its formation mechanism[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(4): 1398–1408.]
- [33] 赵艳敏, 王迪. 数字经济发展对全要素能源效率的影响机制研究——以黄河流域73个地级市为例[J]. 软科学, 2024, 38(8): 37–44, 59. [Zhao Yanmin, Wang Di. Influence mechanism of digital economy development on total factor energy efficiency: Taking 73 prefecture-level cities in the Yellow River Basin as examples [J]. Soft Science, 2024, 38(8): 37–44, 59.]
- [34] 李慧, 姚西龙. 水足迹视角下黄河流域可再生能源制氢节水潜力研究[J]. 干旱区地理, 2025, 48(8): 1353–1362. [Li Hui, Yao Xilong. Water-saving potential of hydrogen production from renewable energy in Yellow River Basin from the perspective of water footprint[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(8): 1353–1362.]
- [35] 韩冬日, 刁燕霞, 王心娟. 黄河流域减污降碳协同治理效率空间网络关联特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2025, 46(6): 3592–3603. [Han Dongri, Diao Yanxia, Wang Xinjuan. Analysis of carbon total factor productivity, economic growth and low-carbon development in the Yellow River Basin[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3592–3603.]
- [36] 祝福云, 师宇星. 碳全要素生产率、经济增长与低碳发展分析——基于黄河流域58个地级市的证据[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(1): 52–59. [Zhu Fuyun, Shi Yuxing. Analysis of carbon total factor productivity, economic growth and low-carbon development in the Yellow River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(1): 52–59.]
- [37] 宋城镇, 刘庆芳, 马伟, 等. 技术创新对黄河流域地区和长江经济带碳生产率影响路径比较——基于数字金融的中介效应[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 450–461. [Song Chengzhen, Liu Qingfang, Ma Wei, et al. Comparison of the impact paths of technological innovation on carbon productivity in the Yellow River Basin and the Yangtze River Economic Belt: Mediation effect based on digital finance[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 450–461.]

Measurement of total factor carbon productivity of the logistics industry in the Yellow River Basin and its influencing factors: A perspective based on energy endowment differences

HAO Xiaoyan^{1,2}, LI Yuerong¹, WU Yue¹

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Energy Strategic Research Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: The study on the total factor carbon productivity of the logistics industry in the Yellow River Basin, based on differences in energy endowment, is crucial for understanding the regional strategies for carbon reduction. The Yellow River Basin is categorized into energy-rich and energy-general areas, based on the level of energy endowment. This study examines the static and dynamic efficiency indices of carbon productivity using the super-efficient SBM model and the Modified Luenberger index. In addition, it clarifies how different factors influence carbon productivity through regression analysis. The results indicate that (1) Carbon productivity varies across regions. Energy-rich areas experience greater and faster increases in carbon productivity, driven by significant improvements in technical efficiency. In contrast, energy-general areas also show overall growth but display distinctly different internal efficiency. (2) Regarding efficiency dynamics, the technical efficiency and technological progress of carbon productivity vary between energy-rich and energy-poor areas. The technical efficiency of energy-rich regions surpasses that of the energy-general area. Within the energy-general area, technological enhancement is more prominent in Sichuan and Ningxia, while that in Shandong is inadequate. (3) The driving mechanisms vary between regions. Energy prices positively influence the energy-rich region but not in the energy-general region. Conversely, energy endowment only benefits the energy-general region. This indicates that the influence of different factors varies considerably among regions.

Keywords: logistics industry; total factor carbon productivity; super-efficiency SBM model; Yellow River Basin