

Correlation study on CO₂ emissions of key industries in Shandong Province based on input-output subsystem model

Xiaojian Song Huili Liu

Binzhou Bureau of Statistics, Binzhou, Shandong, 255660, China

Abstract

This study selected the industrial system of Shandong Province as a sample, built an analysis framework based on the input-output subsystem model, and systematically revealed the carbon emission transmission mechanism and correlation characteristics of key industries. The empirical results show that the demand-driven carbon emissions of the highly correlated sectors are larger than the direct emission scale, and the system correlation is the most prominent. Specifically, the power and heat supply sector is at the core node of the supply chain, while the construction industry has a greater indirect emission promotion effect through the transmission effect of the industrial chain. According to the research conclusions, it is suggested to implement classified management and efficiency improvement strategies for key industries, build a carbon footprint tracking mechanism for the whole industrial chain, and improve the carbon emission accounting system and regulatory framework. The research results provide differentiated path selection and decision support for the implementation of the carbon peak carbon neutral strategy in Shandong Province from the perspective of industrial collaboration.

Keywords

CO₂ emission; Input-output system model; Energy saving and consumption reduction; Optimization strategy

基于投入-产出子系统模型的山东省关键产业 CO₂ 排放关联研究

宋晓健 刘会莉

滨州市统计局, 中国·山东 滨州 255660

摘要

本研究选取山东省产业体系为样本, 基于投入产出子系统模型构建分析框架, 系统揭示重点行业碳排放传导机制及关联特征。实证结果说明, 高关联性部门需求驱动型碳排放较大超越直接排放规模, 其中系统关联性最为突出, 具体而言电力与热力供应部门处于供应链核心节点, 建筑产业则通过产业链传导效应产生较大的间接排放促进作用。针对研究结论建议实施重点行业分类管控与效能提升策略, 构建全产业链碳足迹追踪机制, 同时健全碳排放核算体系与监管框架, 该研究成果从产业协同视角为山东省碳达峰碳中和战略实施提供了差异化的路径选择与决策支持。

关键词

CO₂排放; 投入-产出系统模型; 节能降耗; 优化策略

1 引言

“十四五”以来, 我国进入以降碳为重点战略方向的关键时期, 为实现绿色低碳高质量发展, 国家相继出台了《关于完整准确全面贯彻新发展理念 做好碳达峰碳中和工作的意见》(2021年9月22日)、《2030年前碳达峰行动方案》(国发〔2021〕23号)等重要文件。党的二十届三中全会进一步提出了“加快经济社会发展全面绿色转型”“健全绿色低碳发展机制, 发展绿色低碳产业, 建立能耗双控向碳排放

双控全面转型新机制, 积极稳妥推进碳达峰碳中和”目标。经济社会高质量发展的内在要求和“双碳”目标完成的时限性, 要求全国各地的碳减排需“快马加鞭”高质高效完成。

2 山东省碳排放情况

山东省是经济大省, 同时也是碳排放大省, 碳排放量多年处于全国首位。“十二五”至“十三五”期间, 山东省是全国省级行政单位 CO₂ 排放最多的省份之一, 与我国主要地区相比(见表一), 多年 CO₂ 排放量最大, 仅2013、2018和2020年 CO₂ 排放量低于河北。从山东省 CO₂ 排放总量来看, “十二五”至“十三五”期间 CO₂ 排放量总体呈上升趋势, 2020年排放量达到9.3亿吨。山东省的高 CO₂ 排放量与山东省的产业结构尤其是关键行业部门的生产活

【作者简介】宋晓健(1982-), 女, 中国山东滨州人, 硕士, 高级统计师, 从事经济、统计研究。

动特点密切相关。作为我国重要的工业基地和北方地区经济发展的战略支点，山东省聚力建设绿色低碳高质量发展先行区，向“绿”而行，推动经济社会全面绿色转型是必然要求。而发展过程中各行业部门并不是孤立存在，其生产过程是相互关联的。

本文以山东省各行业部门为研究对象，研究其关键行业部门 CO₂ 排放的关联情况。首先找到关键行业部门，其次计算与关键行业部门相关的 CO₂ 排放量并找到关键行业部门的关联来源，从而为山东省推进“双碳”目标进程，在行业部门层面制定合理政策提供参考。

表一 “十二五”至“十三五”期间主要地区 CO₂ 排放量

	山东 (百万吨)	河北 (百万吨)	江苏 (百万吨)	浙江 (百万吨)	广东 (百万吨)	北京 (百万吨)	天津 (百万吨)	上海 (百万吨)	重庆 (百万吨)
2011年	786.97	718.47	593.25	347.26	489.32	92.63	151.55	199.15	152.03
2012年	872.91	751.78	656.74	380.76	513.44	98.00	160.33	195.93	171.65
2013年	794.21	823.11	706.62	382.43	506.56	94.07	159.65	207.63	149.12
2014年	819.06	791.43	708.24	378.78	513.87	93.26	158.11	194.22	162.90
2015年	854.46	788.41	721.65	378.84	515.08	92.76	154.35	195.32	164.20
2016年	863.43	807.56	743.04	374.57	530.32	89.98	148.95	194.71	156.58
2017年	835.82	792.33	757.88	384.56	556.86	86.77	143.99	196.15	160.55
2018年	901.65	912.20	764.05	388.83	567.51	89.69	154.34	190.64	160.60
2019年	937.12	914.21	800.80	381.41	569.12	89.18	158.47	192.91	156.25
2020年	930.64	939.36	773.97	386.97	566.57	76.78	161.87	179.90	152.86

数据来源：中国碳核算数据库 ceads.net。

3 模型构建与关键行业选取

3.1 确定关键行业选取方法

影响力系数和感应度系数是选择关键行业的经典方法。影响力系数衡量某行业影响其他行业的程度，感应度系数衡量某行业受其他行业影响的程度，两者能够揭示关键行业对区域内其他行业的拉动促进作用。鉴于其经典性，本研究选择该方法作为关键行业部门选取的方法。

3.2 构建投入-产出子系统模型

根据实际经济意义，本研究基于非竞争型进口假设和非竞争型国内省外流入假设展开，leontief 投入-产出模型可以表示为：

$$X = Z_d \bullet U + Y_d = L_d \bullet Y_d \quad (1)$$

其中， X 为 $n \times 1$ 的总产出列向量， n 为部门个数（假设经济系统中有 n 个部门），其对应元素 x_i 表示 i 部门的总产出； Z_d 代表省内中间产品矩阵，其对应元素 Z_{ij}^d 代表 j 部门来源于 i 部门的国内生产中间产品； Y_d 是 $n \times 1$ 的最终需求列向量，包括 Y_c^d 最终消费列向量、 Y_g^d 资本形成列向量、 Y_e^d 出口列向量和 Y_f^d 国内省外流出列向量，即 $Y_d = (Y_c^d + Y_g^d + Y_e^d + Y_f^d)$ ； L_d 代表省内 leontief 逆矩阵； U 是所有元素都等于 1 的求和列向量。

假设经济系统中有 n 个部门组成，部门 $1, 2, \dots, s$ 组成关键行业子系统，部门 $s+1, \dots, s+m$ 为非子系统部门。表二给出并解释了模型中使用的变量（为简化表达，下列变量皆是具备经济意义的变量，将 d 省略）。

表二 模型使用的变量

变量	释义
X^K	($s \times 1$) 的列向量， s 个关键行业的总产出列向量
X^R	($m \times 1$) 的列向量， m 个非关键行业的总产出列向量
Y^K	($s \times 1$) 的列向量， s 个关键行业的最终需求列向量
Y^R	($m \times 1$) 的列向量， m 个非关键行业的最终需求列向量
A_{KK}	($s \times s$) 的矩阵，关键行业自身内部的技术系数矩阵
A_{KR}	($s \times m$) 的矩阵，非关键行业对关键行业的技术系数矩阵
A_{RK}	($m \times s$) 的矩阵，关键行业对非关键行业的技术系数矩阵
A_{RR}	($m \times m$) 的矩阵，非关键行业自身内部的技术系数矩阵
B_{KK}	($s \times s$) 的矩阵，关键行业自身内部的完全需求系数矩阵
B_{KR}	($s \times m$) 的矩阵，非关键行业对关键行业的完全需求系数矩阵
B_{RK}	($m \times s$) 的矩阵，关键行业对非关键行业的完全需求系数矩阵
B_{RR}	($m \times m$) 的矩阵，非关键行业自身内部的完全需求系数矩阵

根据(1)式, 可得以下矩阵化等式:

$$\begin{pmatrix} A_{RR} & A_{RK} \\ A_{KR} & A_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{RR} & B_{RK} \\ B_{KR} & B_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y^R \\ Y^K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y^R \\ Y^K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^R \\ X^K \end{pmatrix} \quad (2)$$

将最终需求矩阵分解, 有以下等式:

$$\begin{pmatrix} A_{RR} & A_{RK} \\ A_{KR} & A_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{RR} & B_{RK} \\ B_{KR} & B_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y^R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y^R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{RR} & A_{RK} \\ A_{KR} & A_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{RR} & B_{RK} \\ B_{KR} & B_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ Y^K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ Y^K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^R \\ X^K \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3)式中, 左边第一部分表示为满足非关键行业的最终需求所需要的总产出, 第二部分表示为满足关键行业的最终需求所需要的总产出。本文关注第二部分, 令 $Y^R = 0$, 则(3)式可表示为:

$$\begin{pmatrix} A_{RR} & A_{RK} \\ A_{KR} & A_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{RR} & B_{RK} \\ B_{KR} & B_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ Y^K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ Y^K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_K^R \\ X_K^K \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, X_K^R 表示为满足关键行业最终需求所需的非关键行业的产出量; X_K^K 表示为满足关键行业最终需求所需的关键行业的产出量。

根据(4)式, 得以下等式:

$$A_{RR}B_{RK}Y^K + A_{RK}B_{KK}Y^K = X_K^R \quad (5)$$

$$A_{KK}B_{KK}Y^K + A_{KR}B_{RK}Y^K + Y^K = X_K^K \quad (6)$$

令 C^K 、 C^R 为 CO_2 排放强度列向量, 分别表示关键行业子系统部门、非子系统部门单位经济产出 CO_2 排放量的列向量。根据 CO_2 排放强度、(5)-(6)式, 可将关键行业子系统各部门总 CO_2 排放分解, 具体如下:

$$DLC = C^K Y^K \quad (7)$$

式中, DLC 表示需求效应, 关键行业子系统最终需求所直接导致的 CO_2 排放; '表示矩阵的转置。若将 Y^K 对角化, 可得到子系统分部门需求效应情况。

$$INC = C^K A_{KK} B_{KK} Y^K \quad (8)$$

式中, INC 为内部效应, 指关键行业子系统各部门为满足本部门最终需求而消耗子系统内部各部门产品, 生产这部分产品所导致的 CO_2 排放。若将 C^K 与 Y^K 皆对角化, 可得到区分使用本部门中间产品和使用子系统内部其他部门中间产品的内部效应情况。

$$FBC = C^K A_{KR} B_{RK} Y^K \quad (9)$$

式中, FBC 表示反馈效应, 指由子系统提供给非子系统用作生产以满足子系统最终需求的产品的生产所导致的 CO_2 排放。若将 Y^K 对角化, 可得到子系统分部门反馈效应情况。

$$SOC = C^R (A_{RR} B_{RK} + A_{RK} B_{KK}) Y^K \quad (10)$$

式中, SOC 表示溢出效应, 指为满足关键行业子系统最终需求, 非子系统部门提供给子系统部门用作中间投入的产品的生产所导致的 CO_2 排放。若将 Y^K 对角化, 可得到子系统分部门溢出效应引致的 CO_2 排放情况。

综上, 关键行业子系统最终需求引致的总 CO_2 排放 T

可由以下等式表示:

$$T = DLC + INC + FBC + SOC \quad (11)$$

需要指出的是, 关键行业子系统最终需求引致的 CO_2 排放并不等于关键行业子系统实际的 CO_2 排放, 这源于溢出效应的高估与子系统为满足非子系统的最终需求进行生产而产生的 CO_2 排放的低估。此外, 本文为得到子系统为满足非子系统的最终需求而提供产品所产生的 CO_2 排放, 设 $Y^K = 0$, 根据式(10)的对偶, 可得到诱导效应:

$$IDC = C^K (A_{KK} B_{KR} + A_{KR} B_{RR}) Y^R \quad (12)$$

若将 Y^R 对角化, 则可得到非子系统分部门诱导效应情况。

3.3 数据处理与关键行业部门识别选取

本文采用国家统计局发布的山东2017年投入产出表, 利用沈利生等人的方法将竞争型的进口和国内省外流入转化为非竞争型的进口和国内省外流入。同时利用CEADS发布的省级能源清单核算了17种能源消费, 并利用“数据处理方案2”对省级能源表中的部门进行合并。

4 子系统视角下关键行业部门 CO_2 排放现状与关联分析

4.1 关键行业部门的 CO_2 排放现状

使用投入-产出子系统模型对选出的关键行业部门进行计算, 得到我省关键行业部门直接 CO_2 排放与需求引致的 CO_2 排放情况。本文将直接 CO_2 排放具体定义为关键行业部门为满足包括自身在内的各行业部门的最终需求进行生产活动时所消耗能源带来的二氧化碳排放, 是关键行业部门的全部二氧化碳排放。将需求引致的 CO_2 排放具体定义为各行业部门为满足关键行业部门的最终需求进行生产活动, 进而引起的 CO_2 排放。后者包含了关键行业部门和非关键行业部门的部分 CO_2 排放。

本文对关键行业部门需求引致 CO_2 排放进行进一步的关联分解, 得到不同关联关系的排放情况。最终需求引致 CO_2 排放可分为四个部分, 即需求效应(DLC)、内部效应(INC)、溢出效应(SOC)和反馈效应(FBC)。溢出效应是各关键行业部门需求引致 CO_2 排放的最大排放源, 这可归因于关键行业部门对外部其他行业部门的强依赖性, 较多需要其他部门为其提供中间投入。内部效应是除S5外其他关键行业部门的第二排放源, 是S5的第三排放源, 占S5总排放的比例为21%, 这显示出了各关键行业部门对自身及其他关键行业部门的紧密关联性。需求效应是S5的第二排放源, 占比达到31%, 其他关键行业部门该部分的占比不足3%, 这源于S5的高能耗, 进而具有较高的碳排放强度, 而其他关键行业部门的碳排放强度相对较低。反馈效应在各关键行业部门的 CO_2 排放量中微不足道, 占比不足1%。

4.2 关键行业部门的 CO_2 排放关联分析

如前文所述, 内部效应与溢出效应是关键行业部门的

关键排放源,排放作用显著,而反馈效应的排放量微乎其微,因此在本节CO₂排放关联分析中将内部效应与溢出效应作为关联重点进行分析。

4.2.1 关键行业部门的CO₂排放内部关联

从关键行业部门内部关联结果角度(图三所示),S5是关键行业部门整体联系最为紧密的行业部门,内部效应CO₂排放量达到4689.04万吨,占子系统内部效应排放总量的74.2%,这是因为S5相对于其他关键行业部门是相对上游的行业部门,得到了来自各关键行业部门的稳定需求支持。从关键行业部门内部关联源头角度,部分关键行业部门除了S5具有紧密的关联关系外,还与自身具有较为紧密的关联关系。例如S1食品和烟草、S4化学产品、S9交通运输设备等行业部门,与自身联系程度都超过了25%,说明相关关键行业部门在生产过程中更为依靠自身发展。

4.2.2 关键行业部门的CO₂排放外部关联

从溢出结果角度(图四所示),S24电力、热力的生产和供应是关键行业部门最大的溢出结果部门,受关键行业部门的引致作用,S24的CO₂排放量为17041.79万吨,占关键行业部门溢出效应总量的78.40%。从溢出源头角度,每个关键行业部门的溢出关联程度最大的行业部门均为S24,关联程度均在70%以上。这可以归因于S24提供的电力和热力是各关键行业部门进行生产运行的基础,为各关键行业部门提供电热支持,进而也为各关键行业部门承担了大量CO₂排放转移。此外,S1食品和烟草与S4化学产品的溢出效应在所有关键行业部门中较为突出,这说明S1与S4相比于其他关键行业部门更加依赖于非关键行业部门尤其是S24电力热力供应。

5 主要结论与政策建议

5.1 主要结论

①关键行业部门需求引致的CO₂排放高于其直接CO₂排放。在关键行业部门(除S5金属冶炼和压延加工外)需求引致的CO₂排放关联效应中,溢出效应最为显著,内部效应次之。这说明相比于自身内部行业部门,关键行业部门的生产活动更依赖于外部地区的行业部门。S5主要受其碳排放强度较高影响,溢出效应最为显著,需求效应次之。

②在内部关联关系中,S5是与各关键行业部门关联度最高的行业部门,其内部效应占子系统内部效应排放总量的74.2%,主要因为S5相对于其他关键行业部门是相对上游的行业部门,各关键行业部门对其均有一定需求。

③在外部关联关系中,S24电力、热力的生产和供应是关键行业部门最为重要的溢出结果部门,显示出电力热力对各关键行业部门发展的基础性作用;S27建筑部门是诱导关键行业部门产生诱导排放最为重要的部门,主要诱导了S5的排放,表明建筑部门对金属冶炼和压延加工品具有较强需求。

5.2 政策建议

5.2.1 突出重点行业,科学高效减排

由分析可知,11个关键行业部门S1-S11在山东省经济产业系统中具有重要的主导地位,在制定碳减排政策时,需将更多的注意力放在以上关键行业部门上,从而实现科学高效率减排。同时,要重视关键行业部门对自身及外部行业部门的关联效应,各关键行业部门为满足自身需求而引致的CO₂排放超过其直接CO₂排放。在进行减碳时,应借鉴国内外先进低碳生产技术,一方面要加大对清洁技术的研发支持,发展并利用脱碳技术、二氧化碳封存以及二氧化碳资源化利用等技术减少二氧化碳排放,另一方面要同时提高对各行业部门产品的利用效率,进而形成有利于低碳发展的关联结构。

5.2.2 追溯排放根源,各行业部门协同减排

在进行关键行业部门碳减排时,要对单一部门CO₂排放追根溯源,挖掘与该部门具有紧密关联关系的相关行业,形成行业部门间的协同减排。如提高各关键行业部门与S5金属冶炼和压延加工、S24电力热力生产和供应、S27建筑部门的生产关联过程中的绿色能源、科创研发投入,提升金属冶炼压延工艺,利用余热回收、余热发电技术提高能源利用效率,加大S24、S27低碳用材力度,降低煤炭、钢筋、水泥等高碳原料的使用,形成生产高效、排放低碳的绿色产业链条。

5.2.3 完善制度设计,以精准统计助力减排

党的二十届三中全会指出,要建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制,构建碳排放统计核算体系,积极稳妥推进碳达峰碳中和,这是对统计工作提出的新要求、新任务。一要强化能源统计基础,提高基础数据质量。全面落实中办发〔2023〕46号和鲁发改环资〔2024〕377号文件要求,围绕“强化市级能源统计基础,加强能源统计能力建设”,不断提升工作保障水平,为碳排放统计核算工作有序开展提供坚强组织保障。二要认真落实国务院《2024—2025年节能降碳行动方案》“加强能源消费和碳排放统计核算,提高数据准确性和时效性”要求,有计划地开展常态化能源统计数据核查,更新企业“一企一档”资料库,切实摸清重点企业能源消费基础情况。三要强化方法制度研究,提高碳排放统计核算工作水平。积极探索开展季度能耗核算改革,增强常规能源统计调查与季度、年度碳排放统计核算工作的统一性。

参考文献

- [1] 金妍宏.促进山东省碳减排的绿色税收政策研究[D].哈尔滨商业大学,2024.
- [2] 徐大丰.碳生产率、产业关联与低碳经济结构调整——基于我国投入产出表的实证分析[J].软科学,2011,25(3):42-46.
- [3] 赵同录主编,第二部分2017年地区投入产出表山东2017年投入产出表(按当年生产者价格计算),赵同录主编,中国地区投入产出表,中国统计出版社,2017,178-189,年鉴.