赵书园,陈 聪,郭晨雨,等.“一带一路”制造业隐含碳转移及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1125-1138.
Zhao S Y, Chen C, Guo C Y, et al. Analysis on the transfer and driving factors of embodied carbon dioxide emissions in manufacturing along the Belt and Road initiative [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1125-1138.

“一带一路”制造业隐含碳转移及驱动因素分析

赵书园[1],陈 聪[1*],郭晨雨[1],董 聪[2],周田峰[1] (1.北京科技大学经济管理学院,北京 100083；2.广东工业大学管理学院,广东 广州 510520)

摘要：本研究基于投入产出法,利用 Eora 数据库,在考虑制造业子部门异质性特征下,分析 2007~2017 年“一带一路”沿线国家制造业隐含碳转移,并结合结构分解分析法识别其隐含碳排放变化的关键驱动因素.研究探讨重点国家产业链上贸易效应对隐含碳排放的驱动作用.结果显示:“一带一路”制造业隐含碳排放在研究期间增长 25.19%,净排放下降 361.09Mt,碳排放转变为消费驱动型.“一带一路”制造业相关隐含碳排放由石油、化工和非金属矿产品(C7)、金属制品(C8)和电气与机械(C9)等中端制造业,向下游农业(C1)、食品饮料(C4)、C9、建筑业(C14)等行业流出增大;电、煤气和水(C13)等上游能源行业向 C4、C9 等制造业流出增大.因此“一带一路”制造业发展需重视跨国上下游行业协同减排.对于“一带一路”地区制造业整体而言,人均需求效应是促进排放最大的因素(4323.27Mt),排放强度效应对排放抑制效果最显著(3199.96Mt),且均对 C7 和 C9 行业影响最明显.不同重点国家的关键隐含碳排放驱动因素有所差异,但对所有重点国家来说,前向联系效应均起到促进作用,后向联系效应则相反,显示出在国际贸易中发展绿色供应链的必要性.研究旨在为“一带一路”制造业低碳转型提供政策建议,强调根据国情和行业特征的差异化减排措施.

关键词：一带一路；制造业；隐含碳排放；投入产出法；结构分解分析
中图分类号：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1125-14

Analysis on the transfer and driving factors of embodied carbon dioxide emissions in manufacturing along the Belt and Road initiative. ZHAO Shu-yuan[1], CHEN Cong[1*], GUO Chen-yu[1], DONG Cong[2], ZHOU Tian-feng[1] (1.School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China；2.School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1125~1138

Abstract：Based on the input-output method, this study utilized the Eora database to assess carbon emissions and interregional transfer patterns within the manufacturing industry and its sub-sectors across the Belt and Road Initiative (BRI) countries from 2007 to 2017. The structural decomposition analysis was employed to identify the key driving factors underlying changes in embodied carbon emissions, while the effects of five distinct trade-related mechanisms on the embodied carbon emissions within industrial chains of key BRI countries were explored in depth. The results indicate that embodied carbon dioxide emissions within the manufacturing industry along the BRI increased by 25.19% over the study period, while a net emission reduction of 361.09Mt was achieved, reflecting a transition towards a consumption-driven emissions structure. Embodied carbon dioxide emissions within the manufacturing sector have increasingly shifted from mid-end manufacturing industries, such as Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products(C7), Metal Products(C8), and Electrical and Machinery(C9) to downstream sectors, including Agriculture (C1), Food and Beverages (C4), C9, and Construction (C14). In addition, the embodied emission outflows from upstream energy industries, particularly Electricity, Gas and Water (C13), to manufacturing industries such as C4and C9has intensified. Therefore, the development of the manufacturing sector along the BRI needs to place greater emphasis on cross-border collaborative emission reduction across upstream and downstream industries. For the manufacturing industry as a whole in the BRI region, the per capita demand effect was the dominant factor of embodied carbon emissions, contributing an increase of 4323.27Mt, while the emission intensity effect exerted a substantial mitigation influence, reducing emissions by 3199.96Mt. Although the key drivers of embodied carbon emissions differ across major BRI countries, the forward linkage effect universally promotes emissions, while the backward linkage effect suppresses them. This contrast underscores the critical importance of developing green supply chains within international trade networks. Accordingly, this study proposes targeted policy recommendations for the low-carbon transition of the manufacturing industry along the BRI, highlighting the need for differentiated emission reduction strategies tailored to national and sectoral conditions.

收稿日期：2025-07-03
基金项目：国家自然科学基金杰青项目(52125902)
* 责任作者, 副教授, chencong@ustb.edu.cn

Key words：The Belt and Road Initiative (BRI)；manufacturing industry；embodied carbon emission (ECE)；input-output analysis；structural decomposition analysis (SDA)

2023 年,“一带一路”沿线地区制造业生产总值占全球制造业生产 47.14%[1],而同时排放 CO_2 5,735.55Mt,占全球制造业生产排放 53.93%[2],该区域碳排放强度高于世界平均水平.在全球化的背景下,制造业在各国之间形成垂直分工结构,由此产生的隐含碳排放通过全球供应链进行转移.此过程中,排放强度、生产结构、需求等因素都将产生影响,但仍需进一步定量分析以识别关键因素.

在全球应对气候变化的大背景下,众多学者利用多种方法研究了碳排放相关问题.一些研究使用计量模型分别研究了中国[3-4]和国际[5-6]碳排放的影响因素.还有一些研究运用系统动力学模型[7]和 Tapio 脱钩模型[8-9]衡量碳排放影响.然而,这些模型对于碳排放的分析往往忽略了在国际贸易当中的隐含碳排放及其转移问题,难以识别地区之间或行业之间的关联效应.而投入产出模型较全面的涵盖了研究范围内各地区与各部门间的相互关系,已经广泛用于碳核算[10-11].一些研究结合使用投入产出方法与分解分析法识别了碳排放驱动因素.指数分解分析(IDA)是一种常用的分解分析方法,其中对数平均迪氏指数法(LMDI)常被用以结合投入产出法使用来分析能源[12]或气体排放[13-14]的驱动因素.然而相较于 IDA,结构分解分析(SDA)方法可以保留更完整的投入产出数据,以便更细致地分析多地区、多部门之间的相互影响作用[15,16],因此许多研究采用了 SDA.部分研究以国家[17-19]和区域[20-21]等不同尺度为研究对象,基于 SDA 方法考虑了强度、生产技术、最终需求等效应[22-23]对气体排放驱动因素的影响.然而这些研究未能区分全球产业链中前后向关联等贸易效应对隐含碳排放所带来的影响.随着“一带一路”制造业国际贸易深入,跨境贸易所引起的碳排放跨国流动也逐渐增大.在贸易关联的视角下,制造业上下游影响密切,因此考虑贸易关联对碳排放的影响很有必要.已有研究基于 SDA 将里昂惕夫逆矩阵进行分解实现了对贸易关联影响的评估.这些研究多聚焦于单个国家或单个国家内部区域层面.如一些研究聚焦于中国国内碳排放研究[24-25],如京津冀地区[26]和黄河流域[27].还有研究对某个国家具体部门进行了分析,如印度可再生能源部门[28].以上研究缺少对国际层面贸易关联影响的评估,尤其是“一带一路”制造业重点国家产业链前后向贸易关联效应对隐含碳排放作用.

综上,尽管许多研究关注了“一带一路”碳排放,但聚焦于“一带一路”制造业细分部门隐含碳排放的研究较少,对“一带一路”沿线国家制造业产业链中贸易关联对碳排放的驱动因素研究不充分.本研究利用投入产出法分析沿线制造业及子部门碳排放与转移,结合结构分解识别其隐含碳排放变化的关键驱动因素,探究重点国家产业链上 5 种贸易效应对隐含碳排放的驱动作用,旨在辨识“一带一路”沿线制造业隐含碳排放的转移特征,并为其低碳转型发展提出合理的政策建议.

1 研究方法

1.1 “一带一路”制造业隐含碳排放测算

多区域投入产出(MRIO)分析方法能够将不同经济体链接在一起,分析各区域之间在经济、资源、环境等方面的关联.当存在 n 个国家或地区和 m 个产业部门时,投入产出分析模型用公式表达如下[29-30]:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{Z}+\boldsymbol{F} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{F} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{X}=\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{F}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{F} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{X}$ 表示总产出矩阵;$\boldsymbol{Z}$ 为中间流量矩阵;$\boldsymbol{F}=\left[\boldsymbol{F^1}\ \ \cdots\ \ \boldsymbol{F^n}\right]^{-1}$ 为最终需求矩阵,其中元素 $\boldsymbol{F^r}=\left[f_1^r\ \ \cdots\ \ f_m^r\right]^{-1}$ 表示 r 地区的最终需求,f_i^r 表示 r 地区具体到 i 部门的最终需求;$\boldsymbol{I}$ 为维度与 $\boldsymbol{A}$ 一致的单位矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为直接消耗系数矩阵;$\boldsymbol{L}=\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\right)^{-1}$ 表示里昂惕夫逆矩阵.

基于环境扩展的投入产出法可以评估经济与环境之间的相互关系,因此“一带一路”制造业隐含碳排放的计算方法可表示如下[31]:

$$\boldsymbol{E}=\hat{\boldsymbol{e}}\boldsymbol{L}\hat{\boldsymbol{F}} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{E^{11}} & \cdots & \boldsymbol{E^{1n}}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{E^{n1}} & \cdots & \boldsymbol{E^{nn}}\end{bmatrix}$ 表示由最终需求引致的

隐含碳排放矩阵; $\boldsymbol{E^{rs}}=\begin{bmatrix} E_{11}^{rs} & \cdots & E_{1m}^{rs} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{m1}^{rs} & \cdots & E_{mm}^{rs} \end{bmatrix}$;元素 E_{ij}^{rs} 表示由于 s 国 j 部门总最终需求所引致的 r 地区 i 部门生产的隐含碳排放量; $\hat{\boldsymbol{e}}$ 为 $\boldsymbol{e}$ 的对角矩阵, $\boldsymbol{e}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{e^1} & \cdots & \boldsymbol{e^n}\end{bmatrix}^{-1}$ 表示直接碳排放强度矩阵,其中, $\boldsymbol{e^r}=\begin{bmatrix}e_1^r & \cdots & e_m^r\end{bmatrix}^{-1}$ 元素 $e_i^r=TC_i^r/x_i^r$ 为直接碳排放强度系数, TC_i^r 为 r 地区 i 部门碳排放量; $\hat{\boldsymbol{F}}$ 为 $\boldsymbol{F}$ 对角矩阵.

r 地区基于生产端的隐含碳排放(PBA)以及基于消费端的隐含碳排放(CBA)分别以公式(5)和公式(6)表示[32-33]:

$$\mathrm{PBA}^r=\sum_s^n E^{rs} \tag{5}$$

$$\mathrm{CBA}^r=\sum_s^n E^{sr} \tag{6}$$

定义净排放 NEX 为 r 地区基于生产端的隐含碳排放减去基于消费端的隐含碳排放,即公式(7):

$$\mathrm{NEX}^r=\mathrm{PBA}^r-\mathrm{CBA}^r \tag{7}$$

1.2　结构分解分析法

1.2.1　五因素结构分解分析法　结构分解分析常用于时间序列的比较,可以有效评估两组数据之间的差异并判断影响因素.因此,研究使用结构分解分析对比隐含碳排放与基准情景的变化并获得识别关键驱动因素,用公式表示如下[25,34]:

$$\Delta\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E_{t1}}-\boldsymbol{E_{t0}}=\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{e})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{L})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{F}) \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{e})$ 为排放强度效应,反映各国各部门由于碳排放强度改变所致来的碳排放效应,一定程度上反映了生产技术水平变化所带来的影响; $\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{L})$ 为生产结构效应,显示出中间产品投入变化情况所带来的影响; $\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{F})$ 为最终需求效应,反映由最终需求变动所导致的碳排放变化; f_i^r 还可以进一步分解为:

$$f_i^r=\frac{f_i^r}{F^r}\cdot\frac{F^r}{P^r}\cdot P^r=B_i^r\cdot Y^r\cdot P^r \tag{9}$$

式中: $F^r=\sum_m^m f_i^r$ 为 r 地区各部门最终需求之和; $B_i^r=f_i^r/F^r$ 反映 r 地区需求结构,所有地区各部门的需求结构构成需求结构矩阵 $\boldsymbol{B}$; $Y^r=F^r/P^r$ 反映地区人均最终需求,所有地区的人均最终需求构成人均最终需求矩阵 $\boldsymbol{Y}$; P^r 为 r 地区人口数量,反映 r 地区人口规模,所有地区的人口规模构成人口规模矩阵 $\boldsymbol{P}$;因此, $\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{F})$ 还可以进一步分解为需求结构效应、人均需求效应和人口规模效应:

$$\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{F})=\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{B})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{Y})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{P}) \tag{10}$$

对"一带一路"制造业碳排放变化驱动因素采用两极分解法分解用公式表示如下:

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{E}&=\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{e})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{L})+\\&\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{B})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{Y})+\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{P})=\\&\frac{1}{2}(\Delta\boldsymbol{e}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\Delta\boldsymbol{e}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{L}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{L}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{Y}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{Y}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{P}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{L}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{P})\end{aligned} \tag{11}$$

1.2.2　拆分生产结构的结构分解分析法　对于具体某一地区 c 可以通过拆解 $\boldsymbol{L}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 中的直接消耗系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 以识别区域之间更细致的产业链关联的驱动影响[26].

$$d\boldsymbol{L}=\boldsymbol{L_{t1}}-\boldsymbol{L_{t0}}=\boldsymbol{L_{t1}}\,\mathrm{d}\boldsymbol{A}\boldsymbol{L_{(t\text{-}1)}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A_{cc}^*}+\boldsymbol{A_{rr}^*}+\boldsymbol{A_{cr}^*}+\boldsymbol{A_{rc}^*}+\boldsymbol{A_{rs}^*}(\mathrm{c}\neq\mathrm{r}\neq\mathrm{s}) \tag{13}$$

式中: $\boldsymbol{A_{cc}^*}$ 为地区 c 内部自产自销的中间产品使用结构; $\boldsymbol{A_{rr}^*}$ 为除地区 c 以外其他所有地区内部自产自销的中间产品使用结构; $\boldsymbol{A_{cr}^*}$ 为除地区 c 以外其他所有地区对地区 c 的中间产品使用结构,反映了地区 c 的前向产业联系情况; $\boldsymbol{A_{rc}^*}$ 为地区 c 对其他所有地区的中间产品使用结构,反应了地区 c 的后向产业联系情况; $\boldsymbol{A_{rs}^*}$ 为地区 c 以外其他地区之间的中间产品生产使用结构.因此,地区 c 隐含碳排放的生产结构效应将解构为公式(14):

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}(\Delta\boldsymbol{L})&=\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{cc}^*}\right)+\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{rr}^*}\right)+\\&\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{cr}^*}\right)+\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{rc}^*}\right)+\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{rs}^*}\right)=\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{A_{cc}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{A_{cc}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{A_{rr}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{A_{rr}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{A_{cr}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{A_{cr}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{A_{rc}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{A_{rc}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})+\\&\frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{0}}\Delta\boldsymbol{A_{rs}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{1}}+\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{1}}\Delta\boldsymbol{A_{rs}^*}\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{0}}\boldsymbol{P}^{\boldsymbol{0}})\end{aligned} \tag{14}$$

式中: $\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{cc}^*}\right)$ 表示本国内部贸易效应; $\boldsymbol{E}\left(\Delta\boldsymbol{A_{rr}^*}\right)$ 表

示他国内部贸易效应; $\boldsymbol{E}\left(\Delta \boldsymbol{A}_{cr}^{*}\right)$ 为前向联系效应; $\boldsymbol{E}\left(\Delta \boldsymbol{A}_{rc}^{*}\right)$ 为后向联系效应; $\boldsymbol{E}\left(\Delta \boldsymbol{A}_{rs}^{*}\right)$ 是他国国际贸易效应.根据 2.1 与 2.2 节中的计算结果,选取中国、印度和俄罗斯 3 个重点国家分别作为地区 c 深入分析.

1.3 社会网络分析

利用社会网络分一步研究隐含碳排放矩阵有助于识别隐含碳转移中的关键国家与行业,探究碳转移地理集聚特征[35-36].研究采用 Gephi 0.10.1 进行碳转移社会网络参数计算.

1.4 数据来源

表 1 Eora 数据库部门目录

Table 1 The sectors in the Eora database

编码	部门	编码	部门
C1	农业	C14	建筑
C2	渔业	C15	保养和修理
C3	采矿及采石业	C16	批发贸易
C4	食品饮料	C17	零售贸易
C5	纺织品及成衣	C18	酒店和餐馆
C6	木材和纸张	C19	运输
C7	石油、化工和非金属矿产品	C20	邮电
C8	金属制品	C21	金融中介和商业活动
C9	电气与机械	C22	公共管理
C10	运输设备	C23	教育、卫生和其他服务
C11	其他制造业	C24	私人家庭
C12	回收	C25	其他
C13	电、煤气和水	C26	再出口和再进口

Eora 数据库[37-39]包括世界多区域投入产出表以及相匹配的环境账户,涵盖 189 个国家或地区,区分 26 个产业部门(表 1),其中包括 8 个制造业部门(即 C4~C11).另外,Eora 数据库能够覆盖大多数“一带一路”沿线地区,因此选择该数据库作为投入产出数据来源.需要明确的是,本研究分析所基于的 Eora 数据库在截至研究进行时(2025 年 8 月)可公开获得的最新年份为 2017 年.因此,本研究的研究时期为 2007~2017 年,共分为两个阶段,阶段一为 2007~2012 年,阶段二为 2012~2017 年,分析结果主要反映 2007~2017 年这一特定时间段内碳排放的驱动特征.参考已有文献[40-41],研究选取“一带一路”倡议最初提出时 65 个国家作为研究范围.另外,由于 Eora 数据库中未包括东帝汶和巴勒斯坦两国,因此本研究关注 63 个“一带一路”沿线国家和地区(表 2).研究的重点部门为制造业,并采用 Eora 数据库环境账户中的 CO_2 数据作为碳排放数据来源.各国历年人口数量来源为世界银行数据库[1].

表 2 研究范围

Table 2 The scope of the research

国家/地区	简称	国家/地区	简称	国家/地区	简称
阿富汗	AFG	伊朗	IRN	卡塔尔	QAT
阿尔巴尼亚	ALB	伊拉克	IRQ	摩尔多瓦	MDA
亚美尼亚	ARM	以色列	ISR	罗马尼亚	ROU
阿塞拜疆	AZE	约旦	JOR	俄罗斯	RUS
巴林	BHR	哈萨克斯坦	KAZ	沙特阿拉伯	SAU
孟加拉国	BGD	科威特	KWT	塞尔维亚	SRB
白俄罗斯	BLR	吉尔吉斯斯坦	KGZ	新加坡	SGP
不丹	BTN	老挝	LAO	斯洛伐克	SVK
波黑	BIH	拉脱维亚	LVA	斯洛文尼亚	SVN
文莱	BRN	黎巴嫩	LBN	斯里兰卡	LKA
保加利亚	BGR	立陶宛	LTU	叙利亚	SYR
柬埔寨	KHM	马来西亚	MYS	塔吉克斯坦	TJK
中国	CHN	马尔代夫	MDV	泰国	THA
克罗地亚	HRV	蒙古	MNG	北马其顿	MKD
捷克共和国	CZE	黑山共和国	MNE	土耳其	TUR
埃及	EGY	缅甸	MMR	土库曼斯坦	TKM
爱沙尼亚	EST	尼泊尔	NPL	乌克兰	UKR
格鲁吉亚	GEO	阿曼	OMN	阿联酋	ARE
匈牙利	HUN	巴基斯坦	PAK	乌兹别克斯坦	UZB
印度	IND	菲律宾	PHL	越南	VNM
印尼	IDN	波兰	POL	也门	YEM

2 结果与讨论

2.1 “一带一路”制造业隐含碳排放整体情况

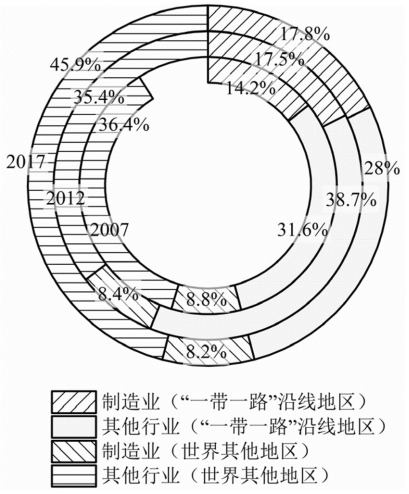


图 1 2007~2017 年“一带一路”隐含碳排放整体情况

Fig.1 Overall embodied carbon emissions along the BRI, 2007~2017

由图 1 可见,2007~2017 年,“一带一路”沿线地区

隐含碳排放总量持续上升,占全球排放总量的比值提高 7.30%,结果与 Lu 等[21]研究结果相近,2007~2012 年的增幅更为显著,这主要是由于该时期内“一带一路”沿线地区经济快速发展.具体到“一带一路”制造业,其隐含碳排放在研究期间内增长 25.19%,从 2007 年的 5337.24Mt 大幅提高至 2012 年的 6544.44Mt.在 2012~2017 年增长幅度较小,至 2017 年达到 6681.60Mt.“一带一路”制造业隐含碳排放在世界制造业排放占比持续提高,由 2007 年的 61.91% 上升至 2012 年的 67.41%,后继续上升至 2017 年的 68.37%.

2.2　“一带一路”制造业隐含碳转移情况

2.2.1　国家层面　由图 2 可见,“一带一路”沿线地区制造业净排放由正值转变为负值,如 2007 年为 228.87Mt,表现为出口的隐含碳大于进口隐含碳;2017 年净排放为−132.22Mt,表现为进口隐含碳大于出口隐含碳.净排放的变化表现出区域内制造业碳排放从主要由生产驱动型逐渐转向主要由消费驱动型.碳排放格局的转变源于“一带一路”沿线涵盖众多发展中国家,多数“一带一路”国家(如中国、印度)在生产技术等要素上处于相对劣势,在无差别劳动力的工资上具有一定优势,因而长期处于全球价值链的中低端环节,通过承接发达国家(如美国)外包生产并出口大量低端制造业产品,形成了显著的碳转移,引发了严重的“碳泄露”问题.然而,随着发展中国家技术水平逐渐提高,发展中国家与发达国家之间碳排放强度的差距逐步缩小[11],“一带一路”沿线区域对外碳转移的状况正在逐步改善.在此过程中,中国制造业的转型尤为关键.2012~2017 年间中国净进口碳增加了 290.46Mt,同时制造业生产平均碳强度减小,其出口隐含碳排放强度由大于进口转变为小于进口.

整个研究期内表现为碳消费者特征的国家包括印度、土耳其、新加坡、阿联酋等 40 个国家.印度等发展中国家因为制造业生产水平较低的原因导致食品饮料行业(C4)和电气与机械行业(C9)等行业大量进口产品从而表现为碳净流入.新加坡[42-43]和土耳其等国制造业水平较高,在制造业生产中需要大量依赖进口机械设备等中间产品以维持工业运转,表现为在 C9 等行业碳净流入.同时,由于地理位置优越,新加坡与土耳其也是“一带一路”乃至全球贸易的重要枢纽,在此过程中也伴随着大量碳转移.

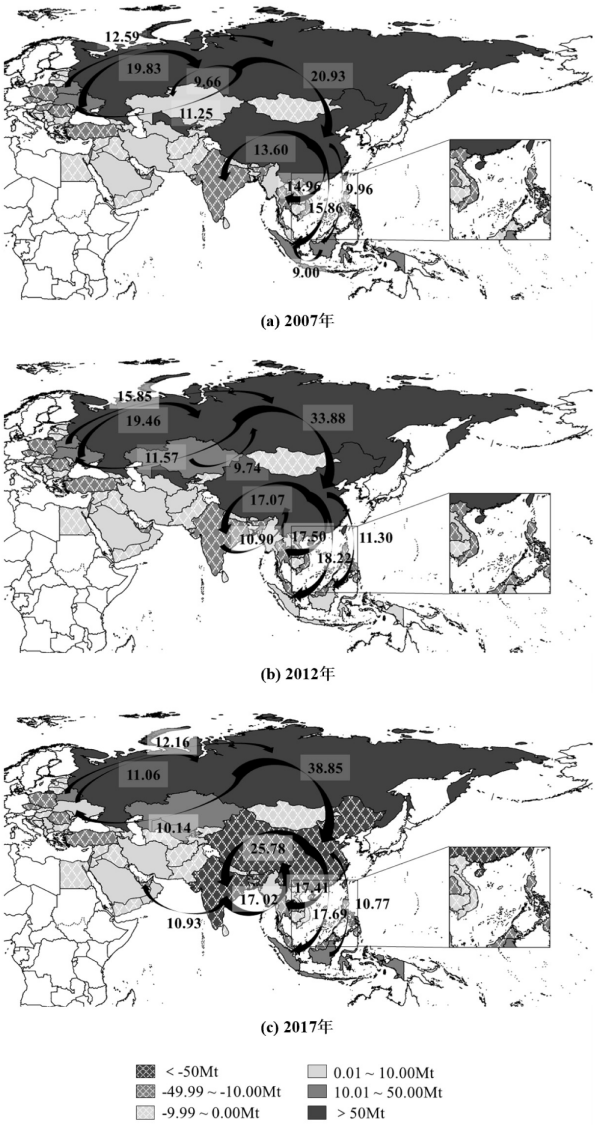


图 2　2007~2017 年国家层面“一带一路”地区制造业隐含碳转移前 10 大路径

Fig.2　Top 10 national-level pathways of embodied carbon transfers in the manufacturing sector along the BRI, 2007~2017

审图号:GS(2016)1665 号

整个研究期内表现为碳生产者的国家包括俄罗斯、哈萨克斯坦、印度尼西亚等 13 个国家.俄罗斯作为一个资源禀赋优越的国家,出口大量制造业初级产品的同时伴随隐含碳流出,如石油、化工和非金属矿产品(C7)碳净排放量均在 300Mt 以上.哈萨克斯坦矿产资源丰富,是国际上重要的矿产经济国家,其金属制品(C8)行业的隐含碳净出口量也十分显著,在 2012 年和 2017 年均达到 25Mt 以上.而印度尼西亚在 C7 和木材和纸张行业(C6)碳流出明显.研

究时期内,中国净排放变化明显,由 2007 年净流出 232.90Mt、2012 年净流出 237.96Mt,转变为 2017 年净流入 52.49Mt,这是由于中国制造业产业升级使出口产品的碳排放强度大幅降低.但在 C6, C7 和 C8 行业中仍为碳净流出,这和中国大量出口这些行业的产品有关.

从国家层面碳转移来看,2007~2017 年在前 10 大转移路径中所隐含的碳转移量增加了 24.80%,增速与“一带一路”地区制造业碳排放增长相近(25.19%),反映了该区域内制造业碳排放增长引发隐含碳跨国转移加强.“一带一路”制造业碳转移受地理区位影响显著,前 10 大路径大多连接两个地理位置相邻或相近的国家,如俄罗斯→中国、中国→印度等.整个研究期内始终保持在前 10 大转移路径当中有 7 条,分别为俄罗斯→中国、乌克兰→俄罗斯、中国→新加坡、中国→泰国、白俄罗斯→俄罗斯、俄罗斯→乌克兰.其中,俄罗斯→中国、中国→新加坡以及中国→泰国这 3 条路径,始终分列第一、二和四位,在 2017 年分别达到 38.85, 25.78, 17.41Mt,这反映中俄、中国与东南亚地区的制造业具有较大的降碳潜力.部分路径的碳转移量呈下降趋势,例如乌克兰→俄罗斯转移的碳排放量在 2012~2017 年显著下降,由 19.46Mt 下降至 11.06Mt,这与两国贸易关系的改变有关.而部分路径碳转移量上升明显,印度→中国的转移量显著上升,在整个研究期间内上升 270.43%,主要源于印度对中国出口制造业产品的大幅增长.综上,中国、俄罗斯和印度在“一带一路”制造业碳转移中频繁出现在排名靠前的路径当中,表明这 3 个国家是研究中不可忽视的部分.

2.2.2 部门层面 如表 3 所示,从出口相关路径上来看,2007~2017 年,“一带一路”制造业前 20 大路径隐含碳转移量增长 39.12%,2007~2012 年期间的增幅大于 2012~2017 年的增幅.RUS7→CHN14(建筑)始终排名第一位,CHN9→THA9 和 CHN9→SGP9 紧随其后.研究期内 RUS7→CHN9, CHN7→IND14, KAZ8→CHN14, RUS8→CHN14, RUS7→CHN1(农业)等路径碳转移量显著上升,在 2017 年分别位于第 4~8 名,反映出“一带一路”地区在该时期内经济发展对金属及石油化工、非金属产品的依赖程度高.

表 3 2007~2017 年部门层面“一带一路”地区制造业出口贸易隐含碳转移前 20 大路径

Table 3 Top 20sector−level pathways of embodied carbon transfers in manufacturing export trade along the BRI, 2007~2017

序号	2007 年			2012 年			2017 年		
	出口端	进口端	碳转移量(Mt)	出口端	进口端	碳转移量(Mt)	出口端	进口端	碳转移量(Mt)
1	RUS7	CHN14	4.88	RUS7	CHN14	8.57	RUS7	CHN14	9.57
2	CHN9	THA9	4.52	CHN9	THA9	5.22	CHN9	SGP9	4.41
3	CHN9	SGP9	3.72	CHN9	SGP9	4.39	CHN9	THA9	4.24
4	IDN9	SGP9	2.73	RUS7	CHN9	3.47	RUS7	CHN9	3.60
5	MYS9	SGP9	2.64	KAZ8	CHN14	2.80	CHN7	IND14	3.42
6	RUS7	CHN9	2.15	RUS7	KAZ14	2.39	KAZ8	CHN14	3.30
7	UKR8	RUS9	2.11	RUS8	CHN14	2.34	RUS8	CHN14	3.28
8	RUS7	UKR14	1.86	CHN7	IND14	2.28	RUS7	CHN1	2.75
9	MYS9	CHN9	1.80	RUS7	CHN1	2.25	IDN9	SGP9	2.48
10	CHN7	IND14	1.73	MYS9	SGP9	2.10	RUS7	KAZ14	2.41
11	UKR8	RUS14	1.68	MYS9	CHN9	2.08	MYS9	CHN9	2.39
12	UKR7	RUS14	1.55	RUS7	CHN23	2.06	IND7	CHN14	2.32
13	RUS8	CHN14	1.48	IDN9	SGP9	2.00	RUS7	CHN23	2.00
14	CHN7	THA9	1.47	UKR8	RUS9	1.97	MYS9	SGP9	2.00
15	CHN8	THA9	1.34	UKR7	RUS14	1.76	RUS7	IND1	1.93
16	RUS7	CHN1	1.34	KAZ8	IRN14	1.76	RUS7	CHN4	1.79
17	CHN7	SGP9	1.34	CHN7	THA9	1.62	RUS8	CHN9	1.78
18	CHN8	SGP9	1.25	UKR8	RUS14	1.58	IND8	CHN14	1.62
19	RUS7	CHN23	1.24	RUS7	CHN4	1.55	KAZ8	CHN9	1.61
20	UKR9	RUS9	1.19	IND7	CHN14	1.54	THA9	CHN9	1.57

注:标签由地区简称与行业代码两部分组成,如CHN7表示中国石油、化工和非金属矿产品行业,下表同.

如表 4 所示,从进口相关路径来看,2012 年和 2017 年“一带一路”制造业前 20 大进口路径中隐

含碳转移量基本持平,相较于2007年提高17.70%左右,增长 9.12%,相较于出口相关路径变化幅度较小.有 13 条路径均位于排名前 20 内,其中 CHN13(电,燃气和水)→SGP9 和 CHN13→THA9 持续位于前两位.10年内,CHN13→IND9, MYS13→CHN9, CHN13→IND4 排名上升显著,说明这一时期“一带一路”地区制造业发展过程中增加了对上游行业电力、燃气、水等资源的消耗.

结合进出口路径来看,“一带一路”制造业在研究时期内,碳由 C7, C8, C9 等位于产业链的中游生产部门,向 C1, C4, C9, C14 等产业链下游行业流出增大;C13 等上游能源行业向 C4, C9 等中下游制造业流出增大.所以“一带一路”制造业在发展过程中应当注意跨国上下游产业链的协同减排,尤其注意从俄罗斯和中国等国的石油、化工和非金属产品和电、煤气和水部门到各国低、中端制造业的碳流动过程中的减排.同时,也要重视中端制造业产品作为自身中间产品投入和使用过程中的减排.

表 4　2007~2017 年部门层面“一带一路”地区制造业进口贸易隐含碳转移前 20 大路径

Table 4　Top 20sector-level pathways of embodied carbon transfers in manufacturing import trade along the BRI, 2007~2017

序号	2007 年			2012 年			2017 年		
	出口端	进口端	碳转移量(Mt)	出口端	进口端	碳转移量(Mt)	出口端	进口端	碳转移量(Mt)
1	CHN13	THA9	5.60	CHN13	THA9	6.24	CHN13	SGP9	5.85
2	CHN13	SGP9	5.10	CHN13	SGP9	5.83	CHN13	THA9	5.09
3	CHN9	THA9	4.52	CHN9	THA9	5.22	CHN9	SGP9	4.41
4	CHN9	SGP9	3.72	CHN9	SGP9	4.39	CHN13	IND9	4.35
5	IDN9	SGP9	2.73	RUS13	CHN9	4.16	RUS13	CHN9	4.29
6	MYS9	SGP9	2.64	RUS7	CHN9	3.47	CHN9	THA9	4.24
7	RUS13	CHN9	2.57	IND13	CHN9	2.96	IND13	CHN9	4.01
8	BLR13	RUS9	2.43	CHN13	IND9	2.88	RUS7	CHN9	3.60
9	CHN13	MYS9	2.35	UKR3	RUS9	2.59	MYS13	CHN9	2.63
10	CHN13	IND9	2.23	CHN13	MYS9	2.51	CHN13	IND4	2.50
11	RUS7	CHN9	2.15	BLR13	RUS9	2.50	IDN9	SGP9	2.48
12	UKR8	RUS9	2.11	MYS9	SGP9	2.10	MYS9	CHN9	2.39
13	UKR3	RUS9	2.03	MYS9	CHN9	2.08	MYS13	SGP9	2.11
14	UKR3	POL7	1.91	UKR3	POL7	2.07	MYS9	SGP9	2.00
15	MYS9	CHN9	1.80	MYS13	CHN9	2.06	CHN13	IND7	1.87
16	BLR13	RUS4	1.77	IDN9	SGP9	2.00	IND13	ARE9	1.85
17	RUS13	SVK7	1.52	UKR8	RUS9	1.97	RUS7	CHN4	1.79
18	MYS13	SGP9	1.48	MYS13	SGP9	1.94	RUS8	CHN9	1.78
19	CHN7	THA9	1.47	BLR17	RUS4	1.83	CHN13	MYS9	1.71
20	CHN8	THA9	1.34	BLR13	RUS4	1.76	KAZ8	CHN9	1.61

为了增强“一带一路”制造业碳转移地理分布分析的直观性,更有效地识别关键枢纽国家与行业,研究采用社会网络分法构建了 2007 年、2012 年和 2017 年“一带一路”制造业碳转移社会网络.由于每个网络中边的数量较大(1352248 条),因此保留每个网络中碳转移量大于平均值的边以反映整体网络情况,所获得的网络具体参数如表5所示.图3展示了每个网络中碳转移量最大的前 200 条边.从网络整体来看,“一带一路”制造业相关碳转移程度更加聚集.网络平均入度、平均出度和平均度在 2007~ 2012 年呈下降趋势,而2012~2017 年增加,显示出在区域内更密集的碳转移.同时,模块数量由2007年和2012年的24和25个下降至2017年的17个,同样说明在区域内的碳转移联系更加紧密.如图 3 所示,在最大的前 200 条碳转移路径中,中、印、俄三国所涉及到的节点数量最多,是在减排过程中应当重点关注的国家.其中,CHN9, RUS7, CHN7, CHN5, RUS4, RUS9 和 CHN13 始终是前 10 大中介中心性节点.这一方面说明中国和俄罗斯石油化工、非金属产品和电气机械产品在“一带一路”制造业碳转移的重要枢纽地位,另一方面也表现出中国纺织品和俄罗斯食品饮料此类轻工业制品的中介作用.另外值得注意的是, CHN13 虽并非制造业,但作为制造业重要的上游部门,中国电、煤气和水部门也是“一带一路”制造业中减排的关键一环.

表 5 “一带一路”制造业碳转移社会网络参数

Table 5 Social network parameters of embodied carbon transfers in manufacturing sector along the BRI

年份	节点	边	平均入度	平均出度	平均度	模块数量	模块化系数
2007	1308	25270	19.32	19.32	38.64	24	0.58
2012	1338	23978	17.92	17.92	35.84	25	0.551
2017	1300	27254	20.97	20.97	41.93	17	0.516

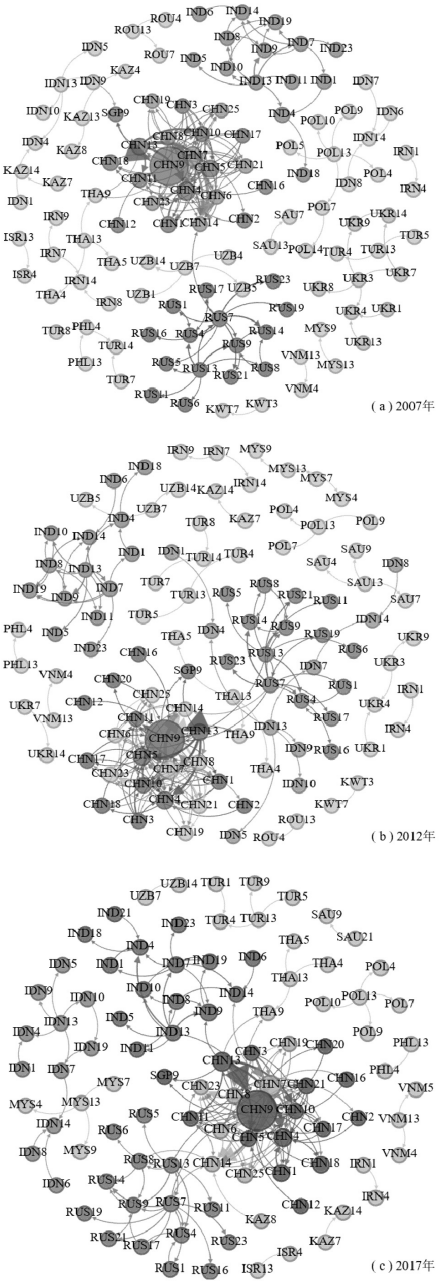


图 3 “一带一路”制造业碳转移社会网络

Fig.3 Social networks of embodied carbon transfers in manufacturing sector along the BRI

圆形的大小反映了其中介中心性;圆形的灰度代表其所属模块,前 x 大模块以不同灰度表示,其余模块用相同灰度(即最低灰度)表示;箭头的粗细程度代表碳转移量

2.3 “一带一路”制造业隐含碳排放驱动因素

2.3.1 “一带一路”整体制造业隐含碳排放驱动因素 利用结构分解分析法,将“一带一路”地区制造业隐含碳排放变化分解为排放强度效应、生产结构效应、需求结构效应、人均需求效应和人口规模效应 5 个因素,结果如图 4 所示.在 2007~2017 年期间,“一带一路”制造业隐含碳排放持续增长 1344.36Mt,且 2007~2012 年的增速(22.62%)远大于 2012~2017 年的增速(2.10%),其中排放强度和生产结构效应显著抑制碳排放,需求结构效应对碳排放起到微弱抑制作用,人均需求和人口规模效应显著促进碳排放.

2007~2017年内,排放强度效应的降碳效果最明显,对各行业均起到了减排作用,共抑制排放 3199.96Mt.从行业来看,C7 和 C9 行业的排放强度效应最显著,共占排放强度效应减排总量的 59.38%.因此,降低 C7 和 C9 行业单位产能碳排放量是减排的重点途径.

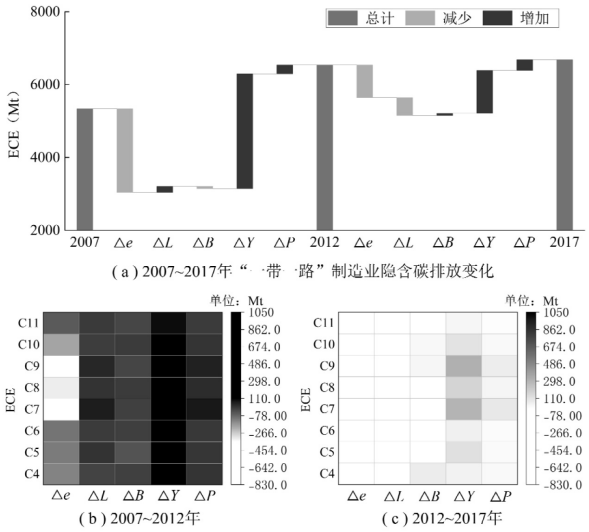


图 4 2007~2017 年“一带一路”地区制造业隐含碳排放变化驱动因素

Fig.4 Driving factors of changes in embodied carbon emissions from the manufacturing sector along the BRI, 2007~2017

2007~2012 年内,除 C4 外,生产结构效应呈现增排作用,贡献率为 14.16%;而在 2012~2017 年内呈现显著的减排效果,共抑制排放 489.78Mt,仅次于排放强度效应.这主要由于在 2012~2017 年期间,中国大力推进了制造业的转型升级.从部门来看,C7,C8, C9

和 C10(运输设备)行业受生产结构影响最为明显,说明中国等“一带一路”沿线国家的中高端制造业的转型发展有效促进产业结构调整.

需求结构效应与生产结构效应相反,在 2007~2012 年实现减排 63.80Mt,在 2012~2017 年使碳排放增加 62.89Mt,排放增加主要源于 C4, C9 和 C10.因此,在食品饮料、电气机械和运输设备等部门可以从需求端着手减排.对个人而言,个人可以增加对当地应季食品的消费,优选环保家电和绿色出行方式;对企业而言,应考虑选择低碳供应商、提高物流效率,另外还可以通过对低碳产品的生产厂家和消费使用者提供优惠,从而改善需求结构效应对碳排放的影响.

人均需求效应和人口规模效应均显示出促进作用.其中,人均需求效应在 2007~2012 年和 2012~2017 年期间,对碳排放增长贡献率分别达到 260.64%和 858.00%,共促进排放增长 4323.27Mt.人口规模效应紧随其后,其贡献率在两个研究阶段内分别达到 20.80%和 211.26%,共促进排放 540.83Mt.这是由经济发展和人口扩张所导致.因此,在最终需求当中推广低碳产品的产品消费.从行业来看,最显著的行业仍为 C7 和 C9,显示出石油、化工、非金属以及电气和机械产品在制造业生产中的基础作用.

2.3.2　基于贸易效应的重点国家制造业隐含碳排放驱动因素　如表 6 所示,中国、印度和俄罗斯不仅是“一带一路”地区碳排放前三大国家,且三国在区域内排放占比显著,在生产与消费端排放均达到 74%以上.此外,三国均在“一带一路”制造业碳转移社会网络中起到关键枢纽作用.同时,三国在“一带一路”制造业产业链中承担的角色存在显著差异,中国和印度碳净排放量为正,显示出明显的碳消费者特征,而俄罗斯则因大量出口石油化工产品显示出碳生产者和供给者特征.因此,研究选取这三个国家为重点和代表地区,探究“一带一路”产业链视角下重点国家的贸易关联对“一带一路”制造业行业隐含碳的驱动因素.具体来说,为了深入探究产业链视角下,贸易因素对于碳排放的驱动机制,本研究将生产结构效应进一步分析分解为五个因素,包括本国内部贸易效应、他国内部贸易效应、前向联系效应、后向联系效应和他国国际贸易效应,最终扩展为 9 个因素,结果如图 5 所示.中国和印度两国制造业碳排放在研究时期内持续上升,俄罗斯则在 2012 年达到峰值.在此期间内,人均需求效应、后向关联效应和人口规模效应显著促进了中国碳排放,尤其在 C7, C8, C9 行业,这主要源于在经济发展和人口增长过程中下游行业发展对中端制造业的大量需求.而排放强度效应、国内贸易效应和前向联系效应是中国前 3 大减排因素.促进和抑制印度排放增长的关键因素与中国基本相同,其中起到抑制作用的前三大因素依次是国内贸易效应、后向联系效应和排放强度效应.中、印两国在 2012~2017 年的碳排放增速均放缓.在整个研究期间内,排放强度效应和前向联系效应是俄罗斯制造业减排的关键因素,同时后向联系效应、人均需求效应、国内贸易效应显著促进了排放.中国和印度制造业碳排放增速放缓以及俄罗斯制造业碳排放达峰,展现了各国减排的成果,也说明处于不同减排情况下的国家需要细分差异化碳减排措施.

表 6　“一带一路”沿线碳排放重点国家情况对比

Table 6　Comparison of key carbon-emitting countries along the BRI

制造业	中国 (Mt)	印度 (Mt)	俄罗斯 (Mt)	三国合计在沿线地区的占比(%)
生产端碳排放	3952.47	607.39	599.96	77.22
消费端碳排放	4004.96	688.75	387.53	74.57
净排放量	−52.49	−81.36	212.43	

不同国家内部贸易效应作用有差异.中国本国内部贸易效应在 2007~2012 年对排放起到促进作用,而在 2012~2017 年减排效果明显(824.19Mt),且成为第一大减排因素,反映出中国自产自销绿色产品的能力提高.印度两阶段内部贸易均呈现减排作用,这与其碳排放强度的减弱有关.俄罗斯内部贸易效应在 2007~2012 年起到减排作用,在 2012~2017 年结果却相反,尤其是 C7 行业,需要注意国内贸易中生产和使用石油、化工、非金属产品的清洁水平.

前向联系效应对三国的碳排放作用均从促进(2007~2012 年)转为抑制(2012~2017 年),其中 C7, C8, C9 行业变化明显.2007~2012 年,前向联系效应在中、印、俄三国所有制造行业均增加碳排放,其中 C7, C8 和 C9 行业合计占比分别达 83.12%、74.52%和 93.93%.然而,在 2012~2017 年情况则相反,前向联系效应抑制了各部门排放,其中 C7, C8 和 C9 行业合

计占比分别达 77.19%、75.22%和 93.77%.前向联系效应转变为抑制排放的作用说明三国在生产并向产业链下游国家和部门提供这些行业产品时的碳排放减少.这一方面是因为部分生产部门低碳生产技术提高,碳排放强度下降,中、俄两国 2017 年中端制造业碳排放强度平均比 2012 年分别低 18.63%和 5.22%.另一方面,是由于印度和俄罗斯中端制造业产品出口量减少,显示出中、印、俄三国在制造业全球供应链中作为生产和供应商角色所起到的显著减排贡献.

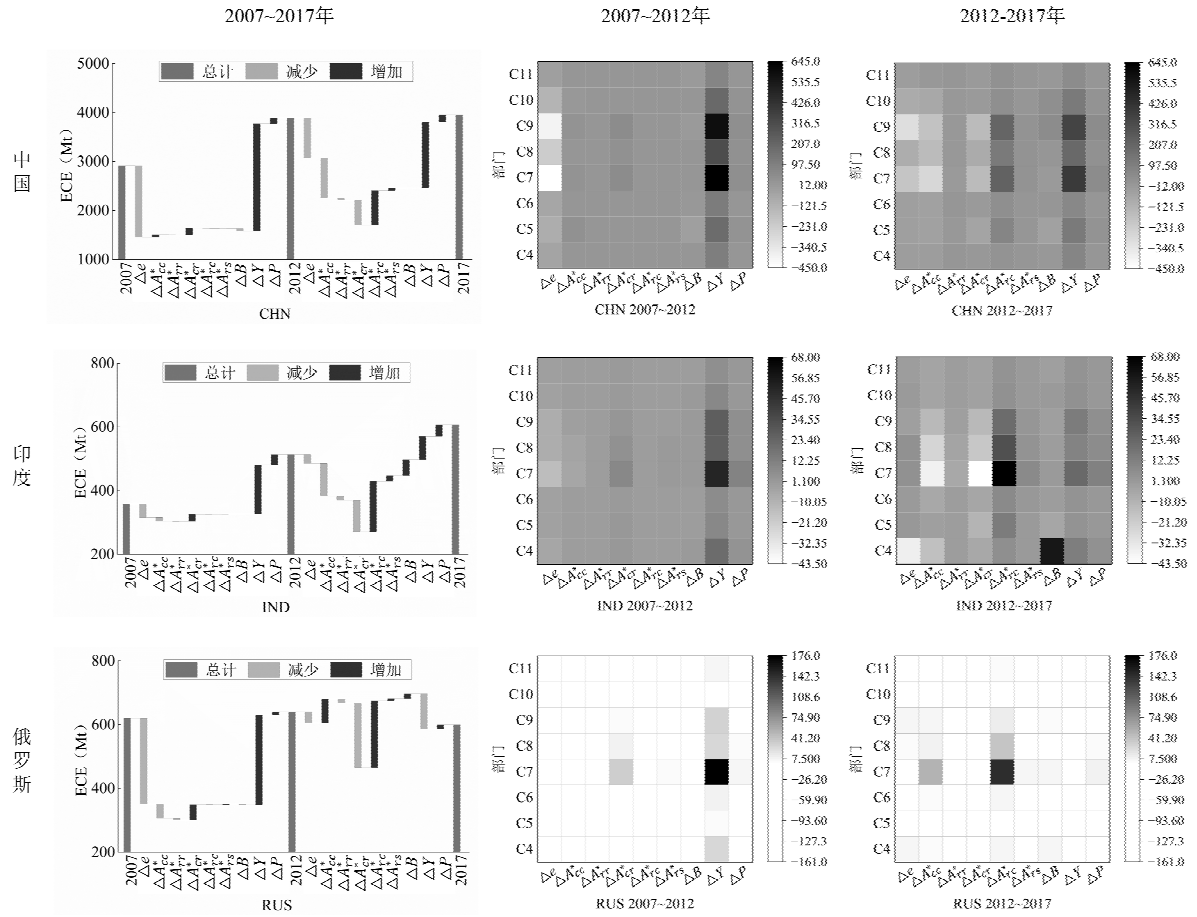


图 5 2007~2017 年“一带一路”沿线重点国家制造业隐含碳排放变化驱动因素

Fig.5 Driving factors of changes in manufacturing embodied carbon emissions in key BRI countries, 2007~2017

后向联系效应与前向联系效应相反,在 2012~2017 年对三国促进碳排放的作用明显.中国后向联系效应起到促进排放的作用,C7, C8 和 C9 行业尤为显著,其在 2012~2017 年增排贡献率达 77.82%.具体为中国从印度、印尼、马来西亚、新加坡、泰国和土耳其进口这三个行业产品所隐含碳排放的后向效应较大,占三个行业的 15.78%.主要是由于中国从这些国家大量进口中端能源密集型制造业产品.而且,其中印度、印尼和土耳其中端制造业低碳水平远低于中国,其 2017 年生产碳排放强度较中国平均分别高 33.44%、34.78%和 32.14%.因此对中国来说选择进口更环保的中间产品对降碳来讲尤为重要.印度后向联系效应呈现促进作用,尤其在 2012~2017 年中 C7, C8 和 C9 行业贡献率达 77.30%,主要来源为中国、阿联酋、新加坡、泰国、沙特阿拉伯、土耳其,占印度 C7, C8 和 C9 进口隐含碳的 27.46%.俄罗斯后向联系效应在 2007~2012 年减排效果微弱(−0.256Mt),但在 2012~2017 年增排作用显著,主要为 C7 行业(68.91%)和 C8 行业(19.41%).这主要来源为中国、乌克兰、印度、哈萨克斯坦、土耳其和波兰,共占 C7 和 C8 行业的 41.54%.后向联系效应对碳排放的促进作用再次强调了在国际贸易中发展绿色供应链的必要性.他国内部贸易和他国国际贸易效应对中、印、俄三国碳排放变化影响均较小,说明各

国内部贸易和前后向关联对隐含碳排放影响作用更重要.

2.4　稳健性检验与交互效应

为检验分解结果的稳健性并探究各驱动因素间的交互作用,参考前人研究[44],以 2012~2017 年数据为例,研究引入了在三因素模型中保留交互项的结构分解法,如公式(15)所示.由图 6 可见,该方法不仅提供了各独立效应的稳健性检验,还能分离出各因素之间的交互贡献.

$$\begin{aligned}\Delta E &= E(\Delta e)+E(\Delta L)+E(\Delta F)+E(\Delta eL)+\\ &\quad E(\Delta eF)+E(\Delta LF)+E(\Delta eLF)\\ &= \Delta eL^0F^0+e^0\Delta LF^0+e^0L^0\Delta F+\Delta e\Delta LF^0+\\ &\quad \Delta eL^0\Delta F+e^0\Delta L\Delta F+\Delta e\Delta L\Delta F\end{aligned} \tag{15}$$

保留交互项的分解结果表明,本研究的主要结论具有高度的稳健性.对比表 7 中两种分解方式的结果可以发现,各驱动因素的符号(即驱动方向)和相对贡献排序均保持一致.例如,无论是在两极分解法还是稳健性检验中,排放强度效应都是“一带一路”所有国家和中国的制造业最主要的减排因素,同时生产结构效应和需求规模效应仍分别是导致印度与俄罗斯碳排放减少最显著的因素.这有力地表明,本研究的核心结论不受模型设定变化的显著影响,具有高度的稳健性.

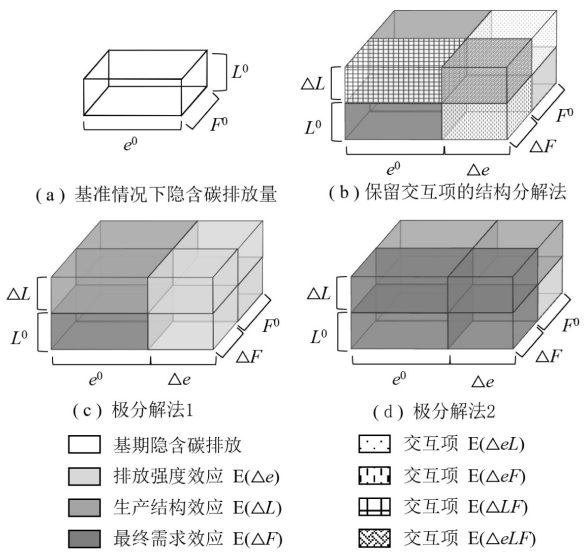


图 6　三因素模型中不同分解方式

Fig.6　Different decomposition methods in the three-factor model

两种极分解法的平均值即为两极分解法的结果

交互项效应的结果表明了驱动因素间存在的协同或抵消关系.例如,中国与印度的交互项 $E(\Delta eL)$ 与 $E(\Delta LF)$ 影响为正,二者的共同效应导致了隐含碳排放增加,抵消了排放强度效应与生产结构效应各自单独的减排作用.“一带一路”所有国家、中国和印度的交互项 $E(\Delta eF)$ 影响均为负,说明在 2012~2017 年排放强度效应和需求规模效应对该地区存在协同减排作用,即这些经济体在需求规模扩张的同时也降低了排放强度,从而有效地抑制了隐含碳排放的增速.交互项效应分析有助于理解各驱动因素之间的相互作用.

2.5　建议

基于“一带一路”地区制造业隐含碳转移特征和驱动因素,绿色低碳发展建议如下:

(1)注重全球产业链上下游协同减排.一方面,可以加强国际低碳合作交流,尤其在地理区域邻近、产业关联紧密的国家之间.如俄罗斯是 C7 行业生产大国,且向中国大量出口产品并伴随大量碳转移,则中国和俄罗斯可以开展石油、化工和非金属等产品的开采、生产和运输的低碳技术交流.另一方面,部门之间也应当注意跨国上下游行业的协同减排,尤其是中端制造业需要考虑对上游能源产品的使用效率,并提高本身生产技术以减少对下游农业、食品、电气、机械和建筑等行业的碳转移.

(2)基于国家角色与行业特征实施差异化减排策略.对中国、印度等制造业生产与消费大国,应重点降低进口中间产品隐含碳排放,通过在 C7, C8, C9 等重点行业建立绿色供应链标准与碳足迹核算体系,引导低碳采购.对俄罗斯、哈萨克斯坦等因资源出口而成为生产型碳排放地区的国家,应提升初级产品生产绿色化水平,发展高附加值精深加工产业,减少出口生产排放强度高的原料.对新加坡、土耳其等贸易枢纽国,可以发展绿色通关便利措施,打造区域绿色贸易与合作平台.

(3)提高清洁生产能力,降低碳排放强度.根据结果,制造业碳排放强度的减碳效果最为显著,因此降低单位产能碳排放量是减排的重点途径,尤其是在 C7 和 C9 行业.三个重点国家可以通过重点提高 C7, C8 和 C9 部门的生产技术来实现减少碳流出.

(4)加强需求管理,降低人均需求排放.人均需求效应的增长对碳排放的促进作用难以忽视,除倡导

消费者的绿色消费和使用意识之外,可以通过加大对环保制造产品的消费补贴,以及鼓励绿色金融为绿色生产提供融资等方式以降低人均消费所带来的碳排放.

表 7 两种分解方式下 2007~2017 年“一带一路”地区制造业隐含碳排放变化驱动因素对比

Table 7 Comparison of the driving factors of embodied carbon emissions changes in the manufacturing industry of BRI from 2007 to 2017 under two decomposition methods

地区	分解方式	$E(\Delta e)$ (Mt)	$E(\Delta L)$ (Mt)	$E(\Delta F)$ (Mt)	$E(\Delta eL)$ (Mt)	$E(\Delta eF)$ (Mt)	$E(\Delta LF)$ (Mt)	$E(\Delta eLF)$ (Mt)
“一带一路”所有国家	两极分解法	−891.22	−500.78	1525.85				
	保留交互项的分解法	−709.46	−222.28	1948.76	−37.35	−414.31	−37.35	88.15
中国	两极分解法	−814.08	−615.40	1491.53				
	保留交互项的分解法	−719.04	−475.41	1813.68	87.12	−345.33	87.12	68.13
印度	两极分解法	−26.47	−39.25	160.40				
	保留交互项的分解法	−13.82	−26.31	189.53	3.55	−32.28	3.55	3.44
俄罗斯	两极分解法	−34.31	75.79	−81.63				
	保留交互项的分解法	−34.19	92.47	−70.54	−5.71	3.40	−5.71	2.07

(5)改善生产结构,优化贸易结构.注重生产结构改善对降低碳排放的有效作用,尤其是俄罗斯、白俄罗斯、越南和阿联酋等国.各国可侧重关注生产结构的不同部分,如中国、印度和俄罗斯需更多考虑后向关联带来的排放影响,在贸易中可以适当增加进口清洁生产水平更高的国家的产品,而俄罗斯除后向关联外还要关注本国贸易结构的碳排放作用,加强本国自身绿色产品的供应能力.

(6)发挥中国在全球绿色供应链中的重要作用.作为“一带一路”最大的制造业生产和贸易国家,中国应化挑战为机遇.一方面,应充分把握国内贸易效应已显现的巨大减排成效(2012~2017 年抑制排放824.19Mt),将国内环保标准与“双碳”目标通过绿色供应链管理传递给上下游企业,打造区域内绿色制造业样板.另一方面,应主动将绿色标准、碳核算体系、碳市场机制等“中国方案”融入“一带一路”合作项目,推动重点行业减排合作与技术标准互联互通.这不仅能有效控制后向联系效应带来的碳排放增加风险,更能有效发挥区域内绿色贸易优势.

2.6 研究局限与展望

本研究存在一些局限性,具体如下:一方面,受限于数据可获取性,研究的分析结果主要反映2007~2017年这一特定时间段内碳排放的驱动特征,未能涵盖 2018 年及之后的最新变化.未来待更新数据发布,可在此基础上进行延续性的研究.另外,还可同时查找并采用可覆盖“一带一路”地区且部门区分更细致的数据来源.

另一方面,本研究量化了各驱动因素在“一带一路”制造业隐含碳变化中的历史贡献份额,但由于 SDA 本质上是一种比较静态分析方法,难以识别变量间的内生性关系.因此,在未来的研究中,将结合计量经济学模型对已识别出的关键驱动因素进行深入的因果检验,从而更好地为政策制定提供依据.

3 结论

3.1 “一带一路”沿线地区制造业碳排放格局发生显著变化.“一带一路”沿线地区制造业净排放总量由正转负,表明碳排放驱动由生产端逐渐转向消费端.前 10 大国家层面转移路径隐含的碳转移量增加了 24.80%,中国、印度和俄罗斯是排放关键国.从部门碳转移进出口路径看,“一带一路”制造业相关隐含碳排放由中端制造业(如 C7, C8, C9),向下游 C1, C4, C9, C14 等行业流出增大;C13 等上游能源行业向 C4, C9 等制造业流出增大.因此“一带一路”制造业发展需重视跨国上下游行业协同减排,以应对碳排放跨国流动问题.

3.2 对于“一带一路”地区整体来说,排放强度效应对各行业均起到了减排作用,且是抑制排放效果最明显的因素,达到−824.19Mt,尤其是在C7和C9行业,两行业减排占比达 59.38%.人均需求效应和人口规模效应在整个研究期间内均显示出对各行业促进碳排放增加的作用,且前者是促进碳排放最明显的因素(4323.27Mt),主要来源行业仍为 C7 和 C9.

3.3 排放强度效应、生产结构效应和需求结构效应

对“一带一路”地区整体碳排放起到抑制作用.其中排放强度效应对各行业均起到了减排作用,且是抑制排放效果最明显的因素,达到−824.19Mt,尤其是在 C7 和 C9 行业,两行业减排占比达排放强度效应减排的 59.38%.生产结构效应在 2007~2012 年起增排作用,而在 2012~2017 年呈现显著减排效果(489.77Mt),仅次于排放强度效应.需求结构效应在两阶段表现则与生产结构效应相反.

3.4　人均需求效应和人口规模效应显著促进了“一带一路”地区整体碳排放.这两种效应在整个研究期间均显示出对各行业促进碳排放增加的作用,且前者是促进碳排放最明显的因素(4323.27Mt),主要来源行业仍为 C7 和 C9.

3.5　不同重点国家的关键驱动因素有所差异.在研究期间内,对中国制造业起到减排效果的前三大因素依次是排放强度效应、国内贸易效应和前向联系效应,而人均需求效应、后向关联效应和人口规模效应显著促进了碳排放,尤其在 C7, C8, C9 行业.对印度来说,国内贸易效应、前向联系效应和排放强度效应明显抑制排放,促进排放的关键因素与中国相同.排放强度效应和前向联系效应是俄罗斯制造业减排的关键因素,同时后向联系效应、人均需求效应、国内贸易效应显著促进了排放,尤其是 C7 行业.

参考文献：

[1] 世界银行.世界银行数据库 [EB/OL]. (2025−3−24). https://data.worldbank.org.cn/indicator/NV.IND.MANF.CD.

[2] Xu R, Tong D, Xiao Q., et al. MEIC−global−CO_2: A new global CO_2 emission inventory with highly−resolved source category and sub−country information. Science China Earth Sciences [J], 2024,67:450−465.

[3] 万　珍,陈华脉,周建设.“双碳”目标下长江经济带碳排放时空演变特征及驱动因素分析 [J]. 能源研究与管理, 2025,17(1):81−90.
Wan Z, Chen H, Zhou J. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt under the “Dual carbon” goals [J]. Energy Research and Management, 2025,17(1):81−90.

[4] Xiao Z, Du L, Wang Z. The Belt, the Road, and the carbon emissions in China [J]. China Economic Review, 2023,78:101928.

[5] Zhang D, Mohsin M, Rashee A K, et al. Public spending and green economic growth in BRI region: Mediating role of green finance [J]. Energy Policy, 2021,153:112256.

[6] Liu M, Ma H. Untangling the effects of the Belt and Road Initiative on carbon dioxide emissions [J]. Journal of Environmental Management, 2023,325:116628.

[7] Zhao S, Qu X, Zhao X. The carbon emissions of prefabricated building in urban renewal: Assessment and emission reduction path [J]. Energy and Buildings, 2025,115830.

[8] Fang Y, Zhao L. Exploring the decoupling effect and driving mechanism of carbon emissions at macroscale: An empirical study from Wuhan metropolitan area [J]. Urban Climate, 2025,61:102434.

[9] 庞　军,梁宇超,孙可可,等.中国经济增长与煤炭消费脱钩及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1144−1157.
Pang J, Liang Y, Sun K, et al. Decoupling effects and driving factors between provincial economic growth and coal consumption in China. [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1144−1157.

[10] Meng J, Mi Z, Guan D, et al. The rise of South–South trade and its effect on global CO_2 emissions [J]. Nature Communications, 2018,9:1871.

[11] Meng J, Huo J, Zhang Z, et al. The narrowing gap in developed and developing country emission intensities reduces global trade’s carbon leakage [J]. Nature Communications, 2023,14:3775.

[12] 邵　帅,崔兴华.能源供给侧与消费侧碳排放的责任核算与驱动因素——基于“收入者责任”视角的考察 [J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2024,32(1):81−100.
Shao S, Cui X. Responsibility accounting and driving factors for carbon emissions on energy−supply and energy−consumption sides: an examination from the perspective of “income responsibility” [J]. Journal of SJTU (Philosophy and Social Sciences), 2024,32(1):81−100.

[13] Li C, Liu B. Air pollution embodied in China’s trade with the BR countries: Transfer pattern and environmental implication [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,247:119126.

[14] Yang X, Su B. Impacts of international export on global and regional carbon intensity [J]. Applied Energy, 2019,253:113552.

[15] 姜钰卿,唐　旭,任凯鹏,等.基于双层嵌套 SDA 的中国减污降碳驱动因素研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2022,42(12):3294−3304.
Jiang Y, Tang X, Ren K, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double layer nested SDA [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2022,42(12):3294−3304.

[16] 杨顺顺.中国产业部门碳排放增长的结构性动因——基于 SDA 与 LMDI 耦合分解法 [J]. 资源科学, 2024,46(5):881−894.
Yang S. Structural drivers of carbon emission growth in China’s industrial sectors: A decomposition method by coupling SDA and LMDI [J]. Resources science, 2024,46(5):881−894.

[17] Wang J, Yang S, Dong K, Nepal R. Assessing embodied carbon emission and its drivers in China's ICT sector: Multi−regional input−output and structural decomposition analysis [J]. Energy Policy, 2024,186:114008.

[18] 李　静,方　虹.基于消费和收益视角的中国温室气体排放核算及驱动因素比较研究 [J]. 生态经济, 2023,39(7):13−21.
Li J, Fang H. A comparative study on greenhouse gas emissions accounting and driving factors in China from the perspective of consumption and income perspectives [J]. Ecological Economy, 2023,39(7):13−21.

[19] 陆轩慧,金轩怡,房德琳.省际贸易含大气污染物转移特征及驱动力分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):1148−1161.
Lu X, Jin X, Fang D. Analysis of implicit air pollutant transfer and drivers of interprovincial trade in China [J]. China Environmental

Science, 2025,45(2):1148-1161.

[20] Pan X, Wang Y, Shen Z, et al. Technological progress on embodied carbon emissions in G7countries' exports: A structural decomposition analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,372:133800.

[21] Lu Q, Fang K, Heijungs R, et al. Imbalance and drivers of carbon emissions embodied in trade along the Belt and Road Initiative [J]. Applied Energy, 2020,280:115934.

[22] 王火根,汪钰婷,肖丽香.基于 IO-SDA 法的 2020～2060 年中国行业 CO_2 排放预测与分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1743-1755.
Wang H, Wang Y, Xiao L. Forecast and analysis of China's industrial carbon dioxide emissions from 2020to 2060based on the IO-SDA method. [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1743-1755.

[23] Xia C, Zheng H, Meng J, et al. Outsourced carbon mitigation efforts of Chinese cities from 2012 to 2017 [J]. Nature Cities, 2024,1(7):480-488.

[24] 彭水军,张文城,孙传旺.中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究 [J]. 经济研究, 2015,50(1):168-182.
Peng S, Zhang W, Sun C. China's production-based and consumption-based carbon emissions and their determinants [J]. Economic Research Journal, 2015,50(1):168-182.

[25] Yuan Q, Wang Q, Zhang M. Tracing changes in manufacturing-related carbon emissions: A structural decomposition analysis from the perspective of China [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2024,71:568-581.

[26] 李思佳,杨 谨,方 丹,等.基于产业链视角的京津冀区域碳排放影响因素研究 [J]. 生态学报, 2023,43(9):3473-3487.
Li S, Yang J, Fang D, et al. The influencing factors of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from the perspective of industrial chain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3473-3487.

[27] 吴乐英,赵义义,苗长虹,等.基于多区域投入产出的黄河流域贸易隐含碳排放时空格局及结构分解 [J]. 生态学报, 2024,44(19):8737-8750.
Wu L, Zhao Y, Miao C, et al. Spatial-temporal pattern and structural decomposition of trade-embodied carbon emissions in the Yellow River Basin based on multi-regional input-output analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8737-8750.

[28] Wang Q, Liu Y. India's renewable energy: New insights from multi-regional input output and structural decomposition analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,283:124230.

[29] Liang J, Wang S, Liao Y, et al. Carbon emissions embodied in investment: Assessing emissions reduction responsibility through multi-regional input-output analysis [J]. Applied Energy, 2024,358:122558.

[30] 王菲菲,张鸿宇,王 媛.中国省域在全球贸易中碳转移及碳失衡:基于多层嵌套 MRIO 模型 [J]. 环境科学, 2025,46(11):4749-4756.
Wang F, Zhang H, Wang Y. Revealing carbon imbalances among Chinese provinces in global trade through a nested MRIO model [J]. Environmental Science, 2025,46(11):4749-4756.

[31] Guo C, Chen C, Dong C, et al. Carbon footprints and decarbonization potential in the global renewable power sector [J]. Sustainable Production and Consumption, 2025,58:100-122.

[32] Xu W, Xie Y, Xia D, et al. A multi-sectoral decomposition and decoupling analysis of carbon emissions in Guangdong province, China [J]. J. Environ. Manage, 2021,298:113485.

[33] Mi Z, Zheng J, Meng J, et al. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective [J]. Applied Energy, 2019,235:509-518.

[34] 凌再莉,乔立达,王润雨,等.全球农业贸易中隐含碳排放转移及其影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5894-5906.
Ling Z, Qiao D, Wang R, et al. CO_2 emission transfer embodied in global agricultural trade and impact factors [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5894-5906.

[35] Fang G, Huang M, Zhang W, et al. Exploring global embodied carbon emissions transfer network—An analysis based on national responsibility [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024,202.

[36] Cui S, Xu P, Wang Y, et al. Influencing mechanisms and decoupling effects of embodied carbon emissions: An analysis based on China's industrial sector [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023,41:320-33.

[37] Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, et al. Mapping the structure of the world economy [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(15):8374–8381.

[38] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. Building Eora: a global multi-regional input-output database at high country and sector resolution [J]. Economic Systems Research, 2013,25:1,20-49.

[39] Eora26 [EB/OL]. [2025-3-24]. https://worldmrio.com/eora26/.

[40] Gao C, Zhu M, Sun M, et al. Uncovering the trade-induced air pollution inequality among Belt and Road Initiative (BRI) countries [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,411,137283.

[41] Kang A, Tian X, Xiong Y, et al. Global value chains for the Belt and Road countries: Two-thirds of CO_2 emissions while one-third of the value added [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025,218:108233.

[42] 庄 芮,郭雪凡,祝坤福.RCEP 框架下新加坡的不同价值链活动及其发展研究 [J]. 南洋问题研究, 2022,(1):89-105.
Zhuang R, Guo X, Zhu K, A study of different value chain activities and development in Singapore within the RCEP framework [J]. Southeast Asian Affairs, 2022,(1):89-105.

[43] 梁双陆,郭 甜.中国与环印度洋地区制造业贸易网络结构特征分析 [J]. 国际商务(对外经济贸易大学学报), 2021,(5):17-30.
Liang S, Guo T. The Analysis on the structural characteristics of manufacturing trade network between China and the Indian Ocean Rim [J]. International Business, 2021,(5):17-30.

[44] 陈锡康,杨翠红,等.投入产出技术 [M]. 北京:科学出版社, 2011:365-370.
Chen X, Yang C, et al. Input-output technique [M]. Beijing: Science Press, 2011:365-370.

作者简介：赵书园(2001-),女,河南商丘人,北京科技大学硕士研究生,研究方向为环境经济与政策.发表论文 3 篇.iszhaosy@foxmail.com.