

DOI: 10.20103/j.stxb.202312132721

吴乐英, 赵义义, 苗长虹, 杜锦. 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. 生态学报, 2024, 44(19): 8737-8750.

Wu L Y, Zhao Y Y, Miao C H, Du J. Spatial-temporal pattern and structural decomposition of trade-embodied carbon emissions in the Yellow River Basin based on multi-regional input-output analysis. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8737-8750.

# 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

吴乐英<sup>1,2,3</sup>, 赵义义<sup>1,2</sup>, 苗长虹<sup>1,2,\*</sup>, 杜锦<sup>2,3</sup>

1 河南大学应对气候变化与碳中和实验室, 郑州 450046

2 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心, 开封 475001

3 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 郑州 450044

**摘要:**厘清黄河流域贸易隐含碳排放时空格局及其驱动因素, 对于制定公平有效的减排方案, 实现区域合作减排的重要目标至关重要。利用多区域投入产出模型深入研究 2007—2017 年黄河流域 9 个省区贸易隐含碳排放的构成, 以及其在省级和行业层面的转移路径; 通过结构分解方法, 追踪黄河流域贸易隐含碳排放区域内外影响因素, 揭示其区域内外影响因素的异质性。结果表明: 黄河流域整体呈净贸易隐含碳转出区域, 主要由中间投入的贸易方式进入其他各省的生产需求时导致。该流域的生产供应和整体需求正向中西部和东北地区转移, 而对东南沿海省份的供应和需求正逐渐减少。区域外的最终需求和本地的碳排放强度是影响转出贸易隐含碳的主要因素, 区域内的最终需求和区域外的碳排放强度是影响转入贸易隐含碳的主要因素。此外, 生产结构和最终需求是影响黄河流域贸易隐含碳排放的关键因素, 前者对黄河流域贸易隐含碳排放起抑制作用, 后者则主要起驱动作用。

**关键词:** 黄河流域; 多区域投入产出模型; 贸易隐含碳排放; 结构分解

## Spatial-temporal pattern and structural decomposition of trade-embodied carbon emissions in the Yellow River Basin based on multi-regional input-output analysis

WU Leying<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yiyi<sup>1,2</sup>, MIAO Changhong<sup>1,2,\*</sup>, DU Jin<sup>2,3</sup>

1 Laboratory of Climate Change Mitigation and Carbon Neutrality, Henan University, Zhengzhou 450046, China

2 Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, Henan University, Kaifeng 475001, China

3 Henan Urban Planning and Design Research Institute Limited Company, Zhengzhou 450044, China

**Abstract:** It is crucial to elucidate the spatiotemporal pattern and driving factors of trade-related carbon emissions in the Yellow River Basin for formulating fair and effective emission reduction strategies and achieving the important goal of regional cooperation in emission reduction. This study utilizes a multi-regional input-output model to conduct an in-depth investigation into the composition of trade-related carbon emissions across nine provinces in the Yellow River Basin over a long period from 2007 to 2017, as well as the transfer pathways of these emissions at both provincial and industry levels. Through structural decomposition analysis, it tracks the influencing factors of trade-related carbon emissions within and outside the Yellow River Basin, revealing the heterogeneity of these factors. The results demonstrate that the overall carbon emissions in the Yellow River Basin at the production end exceed those at the consumption end, resulting in a net outflow of

**基金项目:** 国家自然科学基金 (41901239); 2024 年河南省重点研发与推广专项科技攻关 (242102321110); 河南省优秀青年科学基金项目 (222300420030); 2025 年度河南省高校人文社会科学研究一般项目 (2025-ZZJH-152)

收稿日期: 2023-12-13; 网络出版日期: 2024-07-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chhmiao@henu.edu.cn

# 限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

trade-related carbon emissions. This outflow is primarily driven by the trade of intermediate inputs meeting production demands in other provinces. The region's production supply and overall demand are shifting towards the central and western regions and the northeast, while decreasing towards southeastern coastal provinces and increasing towards the central and western regions and the northeast. Industries with a net outflow of trade-related carbon emissions are concentrated in mining and quarrying, petroleum and chemical industries, non-metallic mineral products, electricity, heat, gas, and water production and supply, as well as transportation, warehousing, and postal services. These emissions predominantly flow into energy-intensive and capital-intensive industries. Structural decomposition analysis reveals that external final demand and local carbon intensity are the main factors affecting the outflow of trade-related carbon emissions, while internal final demand and external carbon intensity are the main factors affecting the inflow of trade-related carbon emissions. Additionally, production structure and final demand are key factors influencing trade-related carbon emissions in the Yellow River Basin, with the former acting as a suppressor and the latter primarily driving emissions. Therefore, the Yellow River Basin should strengthen guidance on production structure, promote the transformation and upgrading towards clean and low-carbon industries, and gradually transition from terminal low-carbon technology upgrades to intermediate production technology upgrades to reduce implicit carbon emissions. The findings of this study provide a reliable data foundation for setting emission reduction targets in the Yellow River Basin, aiding policymakers in formulating measures to reduce and control trade-related carbon emissions. Furthermore, the estimation and decomposition methods employed in this study can be widely applied to future research on related emissions in different regions and sectors, contributing to the achievement of regional-scale carbon reduction and pollution reduction goals.

**Key Words:** the Yellow River Basin; multi-regional input-output; trade-embodied carbon emissions; structural decomposition analysis

中国作为全球最大的二氧化碳排放国<sup>[1]</sup>,国内经济从高碳排放到低碳发展的转型压力巨大<sup>[2]</sup>。坚持系统观念,处理好整体与局部的关系,协同推进降碳,是实现经济社会全面绿色转型的重要途径。已有大量研究关注于中国不同区域尺度的减碳路径<sup>[3-5]</sup>。然而,随着国内省际贸易持续增长、国内价值链分工不断深化<sup>[6]</sup>,省区间的贸易导致商品的生产地与消费地剥离,产生大量贸易隐含碳排放。在中国持续推进国内产业链开放合作的背景下,厘清区域贸易隐含碳排放的时空格局及影响因素以实现“双碳”目标是当下亟待解决的问题。

贸易隐含碳排放的研究往往采用多区域投入产出(Multi-regional input-output, MRIO)模型。现有研究在国家层面,主要关注于国际贸易中的隐含碳排放,包括全球范围<sup>[7-8]</sup>、G7国家<sup>[9]</sup>、金砖国家<sup>[10]</sup>、两国之间(如中国和美国<sup>[11]</sup>、中国和日本<sup>[12-13]</sup>、中国和澳大利亚<sup>[14]</sup>)、行业的出口贸易<sup>[15]</sup>、次国家尺度的出口贸易<sup>[16-17]</sup>。研究证实,随着国际贸易的增加,发展中国家为发达国家的最终消费所承担的碳排放也随之增加。考虑到中国省区间经济发展与资源禀赋的差异,部分学者开始关注省际贸易隐含碳排放,如30省区贸易隐含碳的时空变化格局<sup>[18-19]</sup>、产业特征<sup>[20]</sup>及其影响因素<sup>[21]</sup>等,发现对于省区而言,采取区域协同减排的机制有助于促进贸易低碳化发展。此外,部分研究关注中国特定区域的贸易隐含碳排放,如长江经济带<sup>[22]</sup>、京津冀<sup>[23]</sup>、北京<sup>[24]</sup>、河南<sup>[25]</sup>、山西<sup>[26]</sup>等。以上研究为中国区域尺度的碳减排提供了丰富的研究基础及政策建议,但多采用最终需求驱动进行贸易隐含碳排放核算,相对忽视了中间投入的贸易所导致的隐含碳排放<sup>[27-28]</sup>,未能涵盖完整的经济生产活动。

基于多区域投入产出模型的结构分解法(Structural decomposition analysis, SDA)在分析资源环境影响因素方面应用广泛,如碳排放<sup>[29]</sup>、碳足迹<sup>[30]</sup>、碳排放强度<sup>[31]</sup>、贸易隐含碳排放<sup>[32]</sup>。整体而言贸易隐含碳排放的影响因素分为三类:碳排放强度、生产结构(里昂惕夫逆矩阵)和最终需求。在不同区域尺度中,最终需求(总量及结构)的扩大是推动贸易隐含碳排放快速增长的最重要因素;碳排放强度主要表现为抑制作用,并且是抵消最终需求带来的贸易隐含碳排放增长的主要因素<sup>[9,26,33-34]</sup>。生产结构在中国国际和省际贸易<sup>[34]</sup>、长江流域<sup>[35]</sup>、广东省<sup>[36]</sup>、黑龙江省<sup>[37]</sup>的隐含碳排放增长中起到了促进的作用;而在山西省贸易隐含碳排放的增

长中起到了抑制作用<sup>[26]</sup>。以上研究为减少贸易隐含碳排放提供了较好的研究方法,同时也提醒了我们在国内产业链开放合作的背景下,从区域经济发展现状出发厘清贸易隐含碳排放影响因素的重要性。目前有两种 SDA 分解法被运用于贸易隐含碳排放的影响因素研究中,加法 SDA 和乘法 SDA,其中加法 SDA 常被用于总量变化的分析而乘法 SDA 常用于强度的变化分析<sup>[38]</sup>。Xu 和 Dietzenbacher<sup>[28]</sup>采用加法 SDA 对国际贸易隐含碳排放的影响因素进行分解,Su 和 Ang<sup>[39]</sup>采用乘法 SDA 对贸易隐含碳排放强度的影响因素进行分解。本文的研究关注贸易隐含碳排放量变动的因素,因此采用加法 SDA。

黄河流域涵盖青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东,面积约 359 万 km<sup>2</sup>,占全国的 37.4%,经济总量占全国的 25%,生态环境较为脆弱,是我国绿色低碳发展的主战场和实现国内国际双循环的重要通道<sup>[40]</sup>。目前黄河流域产业结构主要以能源化工、原材料和传统农牧业为主,存在倚重倚能、低质低效的问题<sup>[41]</sup>,多年平均碳排放量为 23.61 亿 t,占全国碳排放总量的 33.11%<sup>[42]</sup>。如何通过区域协同合作实现碳减排目标,加快绿色低碳化转型对于黄河流域至关重要。当前黄河流域的碳排放相关研究主要集中在不同尺度能源消费碳排放的时空分布格局及影响因素<sup>[43-44]</sup>、土地利用碳排放的时空演变及影响因素<sup>[45]</sup>、碳排放效率<sup>[46-47]</sup>、碳足迹<sup>[48]</sup>、生态补偿<sup>[49]</sup>等方面,少量研究测算单年度的黄河流域贸易隐含碳排放<sup>[50]</sup>,分析行业隐含碳排放结构特点<sup>[51]</sup>。以上研究为黄河流域碳减排提供了重要的政策建议,但仍存在一些问题未解决:(1)以往研究从最终消费驱动的视角进行测算,未考虑到中间投入导致的贸易隐含碳排放;(2)以往研究未关注到黄河流域贸易隐含碳排放的驱动因素,一方面未考虑到不同区域影响因素的异质性,另一方面未考虑到生产结构的拆解,即本地结构、前向联系、后向联系和外地结构不同的影响。

因此,本文利用 MRIO 模型从中间投入和最终需求两方面深入分析 2007—2017 年长时间段黄河流域 9 省区贸易隐含碳排放的构成,及其在省级和行业层面的转移路径;并通过 SDA 模型追踪区域内外碳排放强度、生产结构、最终需求(总量及结构)对于黄河流域贸易隐含碳排放的影响,试图为黄河流域碳减排目标提供数据基础和政策建议。

## 1 方法与数据

### 1.1 贸易隐含碳排放定量测度模型

本研究基于中国省级多区域投入产出表,构建了一个体现多区域间经济贸易相互联系的碳排放转移测度模型<sup>[27-28]</sup>。从  $r$  省到  $s$  省的省际贸易隐含碳排放(Emissions embodied in provincial trade, EEPT)可描述为:

$$EEPT_{r-s} = \left[ \sum_{k=1}^N (v^{kr})' \right] f^s + (v^{rs})' \left[ \sum_{k=1}^N f^{sk} \right], s \neq r, s, k \in N \quad (1)$$

其中,第一项为最终需求引起的 EEPT,  $\sum_{k=1}^N v^{kr}$  为生产  $r$  省一单位的最终产品所产生的碳排放,  $f^s$  为  $s$  省消费  $r$  省的最终需求;第二项为中间产品投入引起的 EEPT,  $v^{rs}$  为生产一单位  $s$  ( $s \neq r$ ) 省的最终需求的生产需要从  $r$  省调入的中间投入所产生的碳排放量,  $\left[ \sum_{k=1}^N f^{sk} \right]$  为  $s$  ( $s \neq r$ ) 省生产的所有最终需求。

进一步,省区( $r$ )的转出贸易隐含碳排放(Emissions embodied in provincial outflow, EEPE <sub>$r$</sub> )和转入贸易隐含碳排放(Emissions embodied in provincial inflow, EEPI <sub>$r$</sub> )分别表示如下:

$$EEPE_r = \left[ \sum_{k=1}^N (v^{kr})' \right] \left( \sum_{r \neq s} f^s \right) + \sum_{r \neq s} \left[ (v^{rs})' \left( \sum_{k=1}^N f^{sk} \right) \right], s \neq r, s, k \in N \quad (2)$$

$$EEPI_r = \sum_{r \neq s} \left[ \sum_{k=1}^N (v^{ks})' \right] (f^r) + \left[ \sum_{r \neq s} (v^{sr})' \right] \left( \sum_{k=1}^N f^{sk} \right), s \neq r, s, k \in N \quad (3)$$

省区  $r$  的省际净贸易隐含碳转移( $E_{r-s}^{BEET}$ )可以表示为:

$$E_{r-s}^{BEET} = EEPE_r - EEPI_r \quad (4)$$

### 1.2 贸易隐含碳排放的 SDA

根据公式(2)和(3),EEPE 和 EEPI 由矩阵  $v$  和  $f$  决定,矩阵  $v$  取决于碳排放强度  $C$  和里昂惕夫逆矩阵  $L$

(本地中间产品的流动结构  $A_d$ 、部门的前向关联效应  $A_{fwd}$ 、部门的后向关联效应  $A_{bwd}$  以及除本地外其他产品部门的流动结构  $A_f$ ); 矩阵  $f$  取决于最终需求总额  $Q$  和最终需求结构  $S$ 。为了识别影响因素的区域异质性, 本文将各个因素区别为本地和区域外(除黄河流域外中国其他省区)两种, 例如  $C_y$  仅包括黄河流域的碳排放强度, 即  $(C_y)' = [0' \cdots 0'(C_y)' 0' \cdots 0']'$ ;  $C_{-y}$  表示区域外的碳排放强度, 即  $(C_{-y})' = [(C_1)' \cdots (C_{r-1})' 0'(C_{r+1})' \cdots (C_N)']'$ ; 生产结构投入矩阵的关系为  $A = A_d + A_{fwd} + A_{bwd} + A_f$ ; 最终需求总额为  $Q = Q_y + Q_{-y}$ ; 最终需求结构为  $S = S_y + S_{-y}$ 。EEPE 和 EEPI 与这些因素的关系可表示为:

$$EEPE_{r,t} = f_r^t [C_y, C_{-y}, A_d, A_{fwd}, A_{bwd}, A_f, Q_y, Q_{-y}, S_y, S_{-y}] \quad (5)$$

$$EEPI_{r,t} = g_r^t [C_y, C_{-y}, A_d, A_{fwd}, A_{bwd}, A_f, Q_y, Q_{-y}, S_y, S_{-y}] \quad (6)$$

其中  $f_r^t$  和  $g_r^t$  分别为驱动  $t$  期  $r$  省的 EEPE 和 EEPI 演变的关系模型。

本文采用极值结构分解法<sup>[52]</sup>对影响因素进行分解, EEPE<sub>*r*</sub> 在第  $t$  年和第  $t-1$  年变化量 ( $\Delta EEPE_{r,(t-1,t)}$ ) 为  $f_{polar1}^r$  和  $f_{polar2}^r$  取几何平均值。其中  $f_{polar1}^r$  通过首先改变第 1 个变量, 然后改变第 2 个变量, 再改变第 3 个变量, 以此类推得到; 反之得到  $f_{polar2}^r$ 。EEPI<sub>*r*</sub> 的分解类似, 具体分解过程如下:

$$\Delta EEPE_{r,(t-1,t)} = \frac{\Delta EEPE_{r,t}}{\Delta EEPE_{r,t-1}} = \sqrt{f_{polar1}^r \times f_{polar2}^r} \quad (7)$$

$$\Delta EEPI_{r,(t-1,t)} = \frac{\Delta EEPI_{r,t}}{\Delta EEPI_{r,t-1}} = \sqrt{g_{polar1}^r \times g_{polar2}^r} \quad (8)$$

### 1.3 数据来源与处理

本文使用的数据为 2007—2017 年中国省级多区域间投入产出表<sup>[53-55]</sup>。碳排放数据来源于 CEADs 数据库 (<https://www.ceads.net.cn/>)<sup>[56-57]</sup>。为确保投入产出表和碳排放数据的一致性, 并尽可能保留原有部门分类, 借鉴 Xu 等<sup>[58]</sup>的方法将投入产出表中的部门分类合并为 18 个部门(表 1), 并核算部门的碳排放量。为消除通货膨胀因素的影响, 将数据统一为 2007 年可比价格。

## 2 研究结果与讨论

### 2.1 黄河流域贸易隐含碳排放构成及时空变化格局

整体来看, 2007—2017 年黄河流域生产端与消费端的碳排放量均呈上升趋势, 但上升速度在 2012 年后大幅放缓(图 1), 这与张华明等<sup>[59]</sup>以及 Sun 等<sup>[60]</sup>的研究结论相一致。具体而言, 其中 2007—2012 年为快速增长阶段, 生产端碳排放量从 1782.5Mt 增加到 2826.1Mt, 年均增长率为 25.9%; 消费端碳排放量从 1459.4Mt 上升到 2296.0Mt, 年均增长率为 25.4%。而 2012—2017 年增速放缓, 生产端碳排放量从 2826.1Mt 上升到 3017.0Mt, 年均增长率为 3.3%; 消费端碳排放量从 2296.0Mt 上升到 2545.4Mt, 年均增长率为 5.3%。这表明中国自 2011 年 9 月实施的一系列碳排放调控措施产生了显著的成效, 碳排放总量年均增幅总体呈收敛态势, 但是尚处于未达峰状态。

对比生产端和消费端碳排放量, 黄河流域生产端碳排放量整体高于消费端碳排放量, 可见黄河流域为贸易隐含碳排放净转出地区, 其部分碳排放是由其他省份的消费所引起。2007—2017 年甘肃、宁夏、内蒙古和山西生产端碳排放量远大于消费端碳排放量, 这四个地区本地最终需求和中间投入导致的碳排放量占生产端碳排放的比例为 50.11%、55.71%、68.13%、54.09%(五年平均值), 由此可见, 这四个地区近一半的碳排放量是由区域外的消费导致。

2007—2017 年间, 黄河流域 9 个省区始终表现为净贸易隐含碳转出状态(图 2), 即黄河流域为生产其他省份的产品需求而产生的贸易隐含碳排放量大于黄河流域对其他省份产品需求产生的贸易隐含碳排放量, 这与钟章奇<sup>[61]</sup>和张永姣等<sup>[49]</sup>研究的结果相近。除了经济较为发达的下游省份山东和河南外, 部分中上游省份如内蒙古、山西、甘肃和宁夏的净贸易隐含碳转出量随着经济的发展逐渐增加。这是因为自 2000 年以来, 我国实施了一系列西部大开发战略, 旨在促进西部地区经济的快速发展。然而, 黄河流域上游省份如内蒙古、山

表 1 行业部门对照表

Table 1 Industry Sector Comparison Table

序号 No.	合并后的部门 Merged section	30 部门 30 Section	42 部门 42 Section
1	农林牧渔业	农林牧渔业	农林牧渔产品和服务
2	采选业	煤炭开采和洗选业;石油和天然气开采业;金属矿采选业;非金属矿和其他矿采选业	煤炭采选产品;石油和天然气开采产品;金属矿采选产品;非金属矿和其他矿采选产品
3	食品和烟草业	食品制造及烟草加工业	食品和烟草
4	纺织业	纺织业;纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	纺织品;纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品
5	木材家具印刷文教	木材加工及家具制造业;造纸印刷及文教体育用品制造业	木材加工品和家具;造纸印刷和文教体育用品
6	石油及化学工业	石油加工、炼焦及核燃料加工业;化学工业	石油、炼焦产品和核燃料加工品;化学产品
7	非金属矿物制品业	非金属矿物制品业	非金属矿物制品
8	金属冶炼和压延加工	金属冶炼及压延加工业	金属冶炼和压延加工品
9	金属制品	金属制品	金属制品
10	机械工业	通用、专用设备制造业	通用设备;专用设备
11	交通运输设备	交通运输设备制造业	交通运输设备
12	电气及电子设备	电气机械及器材制造业;通信设备、计算机及其他电子设备制造业	电气机械和器材;通信设备、计算机和其他电子设备制造业
13	其他制造产品	仪器仪表及文化办公机械制造业;其他制造业	仪器仪表;其他制造产品;废品废料;金属制品、机械和设备修理服务
14	电力、热力燃气及水的生产和供应	电力、热力的生产和供应业;燃气及水的生产和供应业	电力、热力的生产和供应;燃气生产和供应;水的生产和供应
15	建筑业	建筑业	建筑业
16	运输仓储邮政	交通运输及仓储业	交通运输、仓储和邮政
17	批发零售住宿餐饮	批发零售业;住宿餐饮业	批发和零售;住宿和餐饮
18	其他服务业	租赁和商业服务业;研究与试验发展业;其他服务业	信息传输、软件和信息技术服务;金融;房地产;租赁和商务服务;科学研究和技术服务;水利、环境和公共设施管理;居民服务、修理和其他服务;教育;卫生和社会工作;文化、体育和娱乐;公共管理、社会保障和社会组织

表 2 黄河流域中蒙、晋、甘、宁四省区域内的国内贸易流动(2007—2017年)/亿元

Table 2 Domestic trade flows within and beyond the region of the four provinces of Mongolia, Shaanxi, Gansu and Ningxia in the Yellow River Basin (2007—2017)

年份 Year	最终消费和服务贸易 Final consumption and trade in services		中间投入和服务贸易 Intermediate input and trade in services			
	蒙, 晋, 甘, 宁	其他省	蒙, 晋, 甘, 宁	其他省		
2007	蒙, 晋, 甘, 宁	1.2	29.8	蒙, 晋, 甘, 宁	3.1	90.3
	其他省	66.7	614.7	其他省	54.9	691.2
2010	蒙, 晋, 甘, 宁	2.9	45.2	蒙, 晋, 甘, 宁	5.8	160.5
	其他省	209.0	1002.3	其他省	80.6	1017.1
2012	蒙, 晋, 甘, 宁	7.0	82.8	蒙, 晋, 甘, 宁	7.7	237.9
	其他省	263.9	1275.4	其他省	139.2	1395.1
2015	蒙, 晋, 甘, 宁	8.1	109.5	蒙, 晋, 甘, 宁	8.4	236.8
	其他省	253.8	1627.9	其他省	177.2	1851.4
2017	蒙, 晋, 甘, 宁	0.1	1.0	蒙, 晋, 甘, 宁	7.6	183.1
	其他省	2.1	17.0	其他省	159.5	1780.3

其他省为中国除黄河流域这四省之外的省份

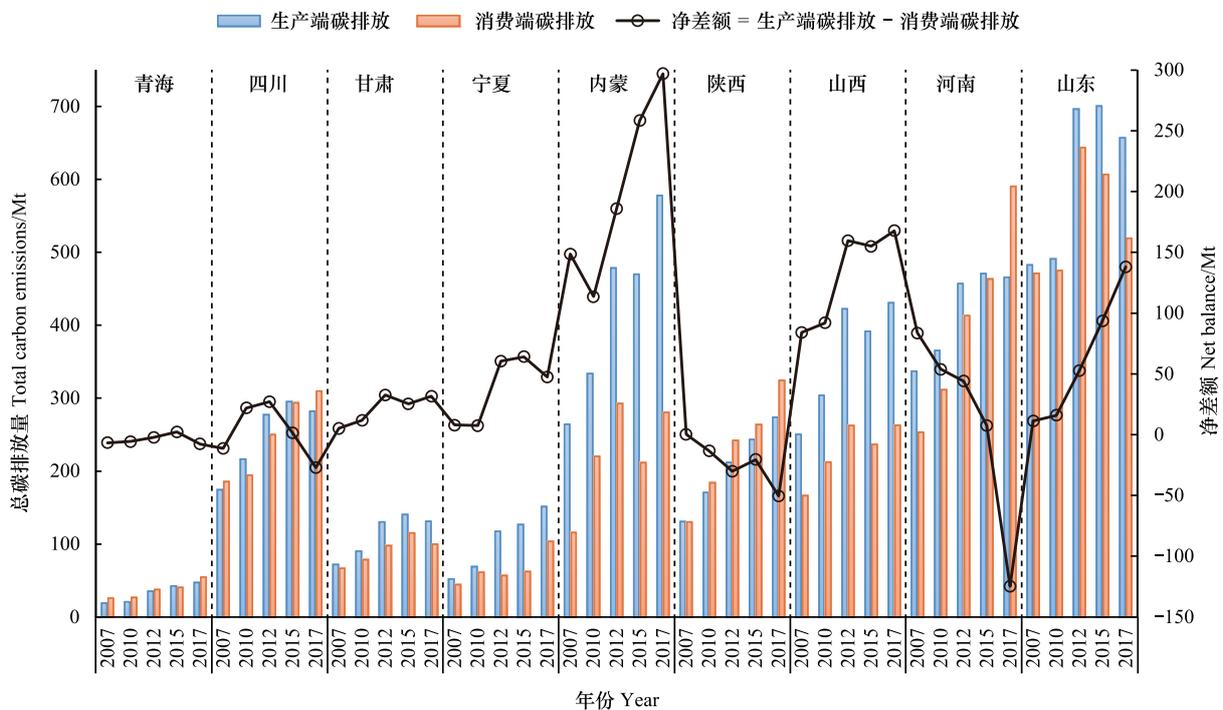


图1 2007—2017年黄河流域生产端与消费端碳排放量、净差额的变化趋势/Mt

Fig.1 Trends in total carbon emissions and net difference between production side and consumption side in the Yellow River Basin, 2007—2017

西、甘肃和宁夏的净贸易隐含碳转移量与经济发展之间存在显著不平衡。尽管这些地区最终消费品和中间投入品的服务贸易拉动较小,占全部贸易额的0.37%(表2),但其净贸易隐含碳排放量却很大,占黄河流域的88.07%,并且呈现快速增长的趋势。这表明,在中间产品投入和最终需求服务贸易的驱动下,这些省份经济增长并不明显,反而导致了更大的碳排放。

从整体来看,2007—2017年间,由中间投入引起的贸易隐含碳成为黄河流域净贸易隐含碳的最大贡献者,其占比逐渐攀升,从87.3%上升至116.8%(图2)。黄河流域的产品以中间投入的贸易方式进入其他各省的生产需求中,随着贸易规模的扩大,其碳排放量也逐渐增加。这也表明考虑中间投入品的贸易隐含碳排放相关研究中的重要性。在产品以中间投入方式供给区域外各省时,大部分是为了满足其他各省的资本形成(包括固定资本和存货增加),其占比从2007—2017年间达到总净贸易隐含碳的52.9%—80.3%。这反映了区域外的资本形成需求对黄河流域产品以中间投入方式供给其生产活动具有重要依赖性。2007—2017年间,黄河流域的净贸易隐含碳排放主要由两大因素引起:区域外的资本形成和城镇居民消费,流向京津冀及东部沿海省份的资本形成和城镇居民消费贸易隐含碳排放占总排放量的59.5%(平均值)。随着京津冀及东部沿海省份城市化进程的迅速推进和生活方式的变化,为了满足基础设施建设的需求,如轨道交通、高速铁路和建筑等,不可避免地需要使用大量高能耗、高碳原材料<sup>[62]</sup>,导致黄河流域向京津冀及东部沿海省份流出大量净贸易隐含碳。

2007年黄河流域主要EEPE省份包括内蒙、河南和山东;主要EEPI省份包括河南、山东和陕西。2012年主要EEPE省份变为内蒙、河南和山西;主要EEPI省份位居前三位的是河南、内蒙和陕西。2017年主要EEPE省份又调整为内蒙、河南和山东;主要EEPI省份包括河南、陕西和山东。由此可见,黄河流域中内蒙、河南和山东在这一时期内扮演了关键角色,是由于这些省份煤炭资源丰富,经济对自然资源的依赖程度高,以能源密集型产业为主,但高耗能产品大部分在黄河流域以外的其他省份消费,这再一次表明黄河流域大部分省份通过省际贸易为其他省份承担了碳排放。

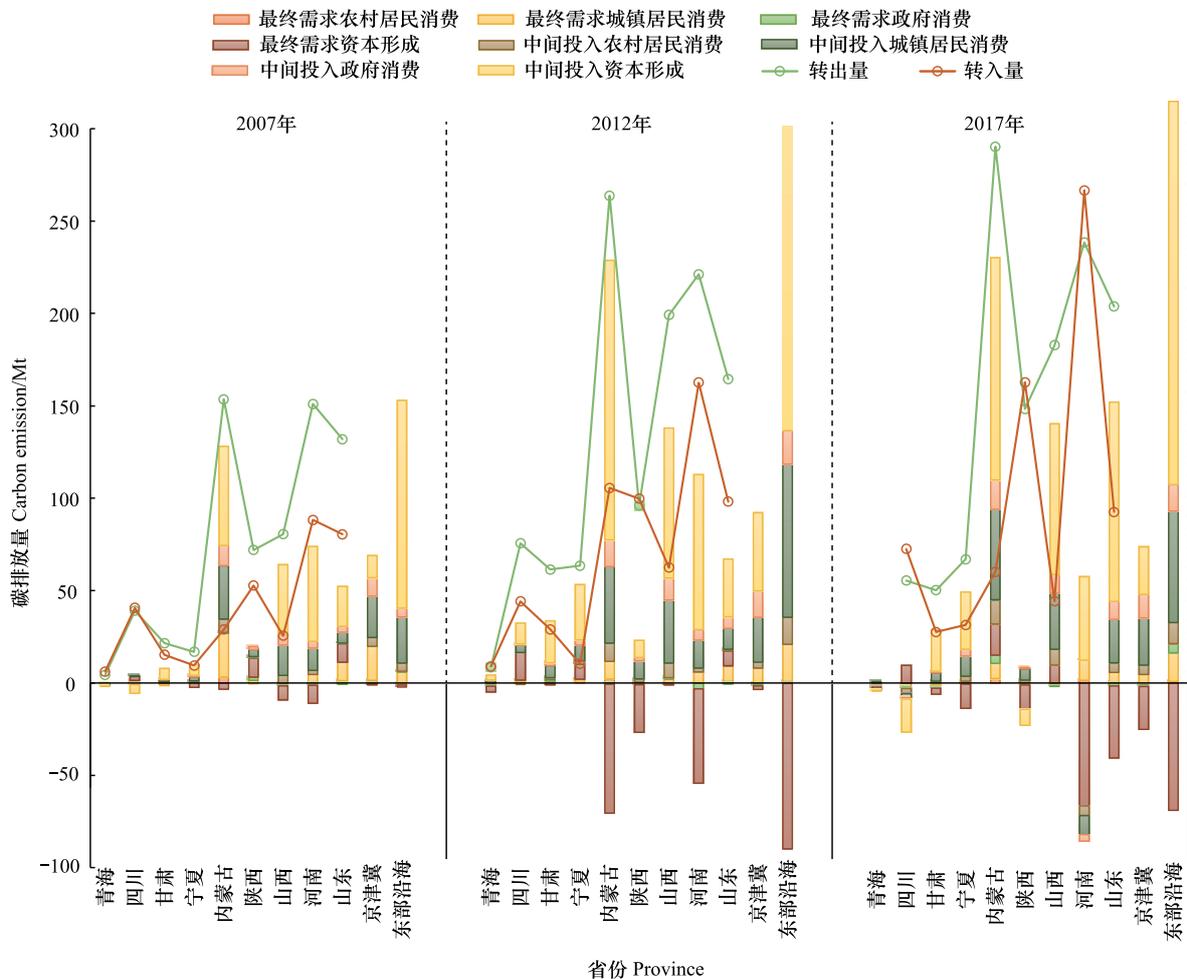


图2 2007—2017年黄河流域9省区贸易隐含碳构成情况

Fig.2 Implicit carbon composition of trade in nine provinces and districts in the Yellow River Basin, 2007—2017

贸易隐含碳排放由最终需求和中间投入导致;最终消费包括农村居民消费、城镇居民消费和政府消费,资本形成包括固定资本和存货增加;净转移量=转出量-转入量,因此净转移量>0为净转出,净转移量<0为净转入

为了进一步明确黄河流域区域内外产业贸易导致的碳转移情况,利用 ArcGIS 绘制了黄河流域区域内外贸易隐含碳流动示意图(图3)。2007—2010年间,黄河流域 EEPE 主要流向东部沿海省份;2012—2017年间,流向东部沿海省份的 EEPE 相对开始减少,向中西部地区的一些省份,如新疆、云南、重庆、湖北和安徽等省的 EEPE 开始增加。2007—2010年间,黄河流域 EEPI 主要来源于河北、江苏、辽宁和广东等周边沿海省份;2012—2017年间,转入地明显向中西部和东北地区转移。这一现象产生的原因可以归结如下:首先,伴随着第四次产业转移和振兴东北政策<sup>[37]</sup>,部分产业(譬如重工业)从东部沿海地区向具备良好产业承接能力的中西部地区转移,这增加了黄河流域省区向中西部地区的转移趋势。其次,作为发达经济体的东部沿海省份,省内产业结构优化调整较早,一批“高污染、高排放”企业进行了改革,使得经济增长与污染排放脱钩<sup>[63]</sup>。同时,东部沿海省份的总体技术水平较高,在国内分工中处于有利地位。根据“污染天堂假说”<sup>[64]</sup>,这些省份将部分“污染物”转移到相对落后的中西部地区和东北地区,导致黄河流域的贸易隐含碳排放向东部沿海发达省份转移减少,而更多流向中西部和东北地区。

## 2.2 黄河流域各行业净贸易隐含碳转移情况

2007—2017年间,净贸易隐含碳转出行业集中在采选业、石油及化学工业、非金属矿物制品、电力热力燃气及水的生产和供应业以及运输仓储邮政这5个行业(表3)。在这些转出行业中,电力热力燃气及水的生产

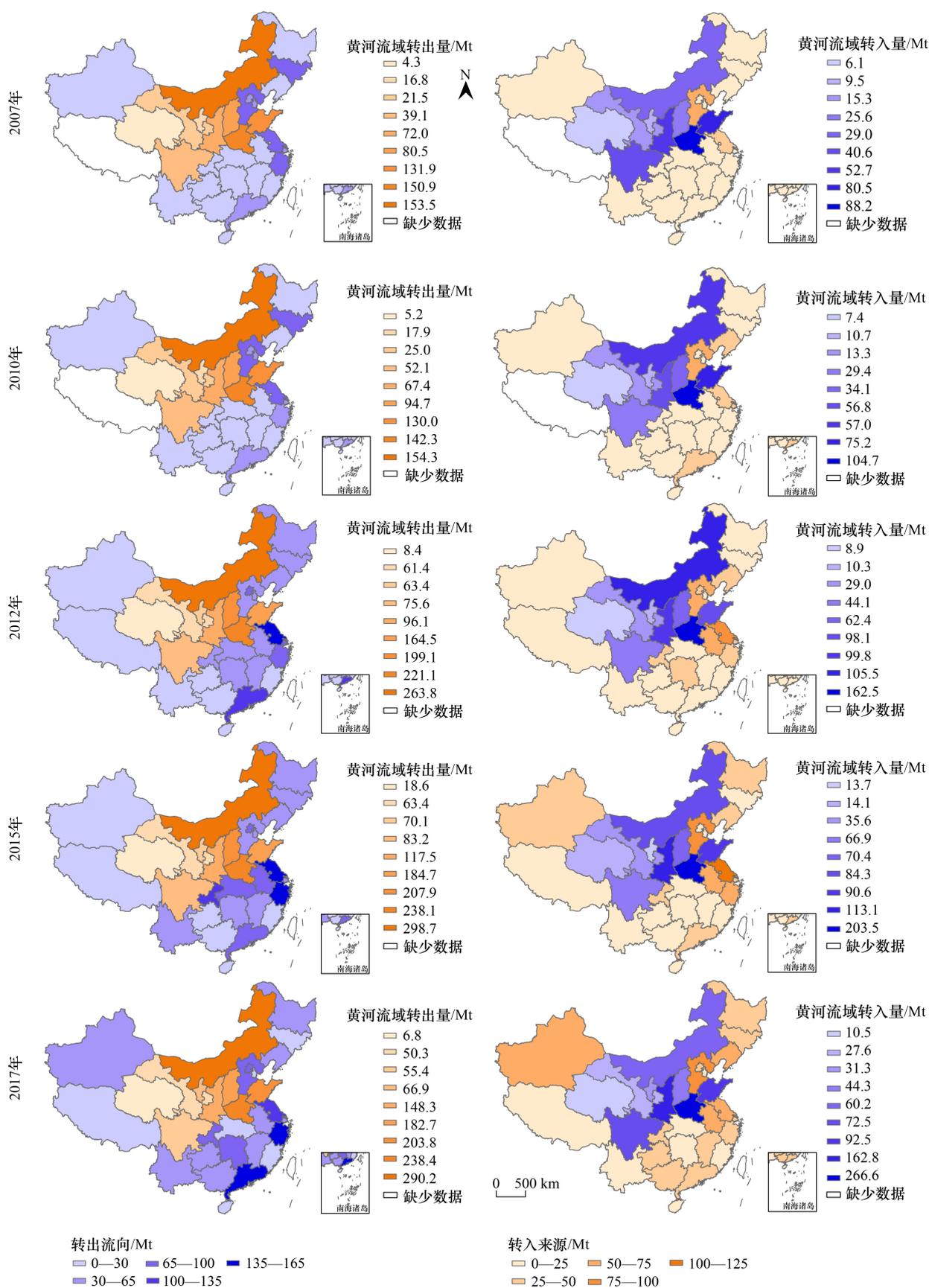


图3 2007—2017年黄河流域贸易隐含碳时空格局变化

Fig.3 Patterns of spatial and temporal changes in implied carbon in trade in the Yellow River Basin, 2007—2017

和供应业占据了较大的比例,五年平均值高达 70.95%。这一现象与黄河流域悠久的电力产业发展密不可分,黄河流域分布有 7 个亿吨级大型煤炭基地,6 个千万千瓦级大型煤电基地,上游水电基地和中游水电基地,多个光伏发电领跑基地,9 个大型现代风电基地和配套送出工程。净贸易隐含碳转入行业集中在其余 13 个行业中。虽然净贸易隐含碳转入的行业个数多于净贸易隐含碳转出的行业,但由于净贸易隐含碳转出行业的转移量远大于净贸易隐含碳转入量,因此黄河流域整体成为净贸易隐含碳转出地区。净贸易隐含碳转出量主要集中在与化石能源密切相关的能源密集型产业以及部分资本密集型产业。从产业供应链的视角有几个方面的原因,一是区域外对黄河流域这些行业的需求比黄河流域对区域外这些行业的需求量大;二是技术水平等因素导致贸易隐含碳排放强度方面的地区差异;三是其他省份对黄河流域的能源密集型产业和一些资本密集型产业的产品生产有着巨大需求。

表 3 黄河流域各行业净贸易隐含碳转移量/Mt

Table 3 Implied carbon transfer from net trade by sector in the Yellow River Basin

序号 No.	部门 Sector	2007	2010	2012	2015	2017
1	农林牧渔业	0.9	0.5	-1.2	1.8	-1.0
2	采选业	26.6	28.2	38.5	50.0	48.9
3	食品和烟草业	-0.3	-0.1	-1.8	-0.8	-2.0
4	纺织业	-0.3	-0.4	0.0	0.1	-0.1
5	木材家具印刷文教	0.3	-0.1	-0.8	-1.0	-1.4
6	石油及化学工业	17.3	25.6	48.7	38.0	24.4
7	非金属矿物制品	22.2	24.0	46.2	47.6	29.0
8	金属冶炼和压延加工品	31.9	21.5	18.4	35.4	-14.5
9	金属制品	0.0	-0.2	-0.5	0.0	-0.3
10	机械	1.1	0.5	-1.8	-2.6	-1.6
11	交通运输设备	-0.8	-1.5	-2.2	0.0	-1.4
12	电气及电子设备	0.1	-0.1	0.3	0.2	-0.1
13	其他制造产品	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1
14	电力、热力燃气及水的生产和供应	212.6	188.7	369.1	413.6	391.4
15	建筑	0.2	0.4	0.1	0.3	-1.1
16	运输仓储邮政	8.2	7.2	11.6	2.0	9.7
17	批发零售住宿餐饮	3.4	5.9	8.1	3.1	-1.7
18	其他服务业	-0.3	0.5	0.2	2.7	-3.7

> 0 为净转出, < 0 为净转入

### 2.3 黄河流域贸易隐含碳排放驱动因素分析

表 4—5 每一列显示了十个影响因素引起的总变化百分比,最后一列为 EEPE (EEPI) 的总变化百分比。总变化与十个影响因素变化之间的定量关系为:  $\Delta EEPE+1 = (\Delta C_y+1) \times (\Delta C_{-y}+1) \times (\Delta A_d+1) \times \dots \times (\Delta S_{-y}+1)$ 。以青海省为例,仅自身碳排放强度 ( $\Delta C_y$ ) 发生变化,其他所有因素保持不变,那么其 EEPE 将上升 37.84%,即:  $1.3784 = 1.3845 \times 1.0027 \times 1.0910 \times 0.6057 \times 0.9539 \times 0.8794 \times 1.0004 \times 2.6051 \times 0.9999 \times 0.6874$ 。

由表 4—5 可以看出,最终需求总额的变化 ( $\Delta Q_y, \Delta Q_{-y}$ ) 是导致 EEPT 增长的主要因素,其次是最终需求结构变化 ( $\Delta S_y, \Delta S_{-y}$ ),这两个因素共同构成最终需求的变化。具体来看,黄河流域本地最终需求总额的变化 ( $\Delta Q_y$ ) 导致 EEPE 平均增加 0.48%。然而,区域外最终需求总额的变化 ( $\Delta Q_{-y}$ ) 导致 EEPE 平均增加 140.79%,表明区域外的最终需求总额变化对黄河流域贸易隐含碳排放产生了极大的影响。在 EEPI 中,区域外最终需求总额的变化 ( $\Delta Q_{-y}$ ) 导致 EEPI 平均增加 8.59%,而黄河流域本地最终需求总额的变化 ( $\Delta Q_y$ ) 导致 EEPI 平均增加 142.09%。由此可以看出,在 EEPE 的增加中,区域外最终需求总额占主导作用,而在 EEPI 的增长中,本地最终需求总额占主导作用。最终需求结构的变化 ( $\Delta S_y, \Delta S_{-y}$ ) 对黄河流域大部分省份的 EEPT 增加起促进作用。平均而言,本地最终需求结构的变化 ( $\Delta S_y$ ) 对 EEPE 增长起轻微的促进作用 (0.16%),而区域外的最

终需求结构的变化( $\Delta S_y$ )则较大的促进 EEPE 增长(1.63%)。意味着黄河流域的碳排放问题主要来源并不是本地的最终需求结构变化,而是区域外的最终需求结构变化。在 EEPI 中,本地最终需求结构的变化( $\Delta S_y$ )占比(8.59%)远超过区域外最终需求结构的变化( $\Delta S_y$ )占比(1.59%)。由此可以看出,在 EEPE 的增加中,区域外最终需求结构占主导作用,而在 EEPI 的增长中,本地最终需求结构占主导作用。综上所述,最终需求的扩大是推动区域碳排放快速增长的重要因素,并且同一因素在区域内外存在不同的影响,因此,在制定黄河流域的碳减排政策时,需要分别考虑本地和区域外最终需求对碳排放总量和 EEPT 的影响,以合理调整产品调出量的分布,促进可持续发展。

表 4 EEPE 结构分解结果(2007—2017 年)/%

Table 4 EEPE Structural Decomposition Results (2007—2017)

年份 Year	省份 Province	$C_y$	$C_{-y}$	$A_d$	$A_{fwd}$	$A_{bwd}$	$A_f$	$Q_y$	$Q_{-y}$	$S_y$	$S_{-y}$	$\Delta EEPE$
2007—2017	青海	38.45	0.27	9.10	-39.43	-4.61	-12.06	0.04	160.51	-0.01	-31.26	37.84
	四川	-32.16	-0.36	-3.73	-9.33	-4.42	-5.31	0.24	168.30	-0.01	9.43	57.14
	甘肃	-5.91	-0.25	27.17	-23.75	-3.19	-8.07	0.16	146.99	0.16	13.69	128.17
	宁夏	30.19	0.05	-15.04	55.43	0.13	-7.69	0.37	131.02	0.00	3.86	282.95
	内蒙	50.74	-0.50	-3.02	-33.02	1.02	-3.15	0.21	107.71	0.09	1.52	101.58
	陕西	-17.01	-0.36	-14.83	27.75	-3.11	-7.98	0.73	151.87	0.11	4.51	112.92
	山西	34.96	-0.06	-13.49	-24.47	0.61	-13.12	0.47	118.88	-0.09	16.52	97.24
	河南	-25.22	0.06	-19.68	-4.82	6.45	-8.00	1.53	145.41	0.64	3.15	44.89
	山东	-15.48	1.03	-13.30	13.82	-7.08	-8.42	0.56	136.42	0.54	-6.77	59.79

$C_y$ : 黄河流域区域内碳排放强度;  $C_{-y}$ : 黄河流域区域外碳排放强度;  $A_d$ : 黄河流域区域内中间产品的流动结构;  $A_{fwd}$ : 部门的前向关联效应;  $A_{bwd}$ : 部门的后向关联效应;  $A_f$ : 除黄河流域外其他省产品部门的流动结构;  $Q_y$ : 黄河流域区域内的最终需求总额;  $Q_{-y}$ : 黄河流域区域外的最终需求总额;  $S_y$ : 黄河流域区域内的最终需求结构;  $S_{-y}$ : 黄河流域区域外的最终需求结构

表 5 EEPI 结构分解结果(2007—2017 年)/%

Table 5 EEPI Structural Decomposition Results (2007—2017)

年份 Year	省份 Province	$C_y$	$C_{-y}$	$A_d$	$A_{fwd}$	$A_{bwd}$	$A_f$	$Q_y$	$Q_{-y}$	$S_y$	$S_{-y}$	$\Delta EEPI$
2007—2017	青海	0.02	-0.02	7.79	-0.08	-40.23	-14.02	130.03	3.45	1.70	-6.37	25.42
	四川	-0.09	-5.37	1.81	-0.13	-23.49	-17.14	146.31	12.61	-1.46	0.91	68.05
	甘肃	-0.02	-3.42	3.00	-0.10	-30.08	-15.27	94.74	7.11	17.08	5.72	51.97
	宁夏	0.14	-4.71	-5.57	0.19	-0.78	-18.79	278.76	2.09	-0.70	-1.52	175.06
	内蒙	0.80	-6.96	-5.36	-1.03	24.30	-20.52	89.49	9.59	6.74	8.00	107.78
	陕西	-0.11	-4.03	0.85	0.34	-7.13	-16.37	168.62	28.84	3.21	0.11	169.49
	山西	0.50	-1.14	-8.81	-0.39	29.85	-21.38	93.41	0.66	-1.44	8.42	91.66
	河南	-0.52	-0.40	-3.25	0.22	37.68	-18.73	168.59	9.33	11.77	1.80	259.23
	山东	-0.29	2.69	5.98	-0.18	-62.06	-23.36	108.64	3.63	21.51	-2.71	-19.49

碳排放强度变化( $\Delta C_y, \Delta C_{-y}$ )对黄河流域 EEPE 增加起促进作用,对 EEPI 增加起抑制作用,在一定程度上抵消了由最终需求引起的部分 EEPT。具体而言,区域外的碳排放强度变化( $\Delta C_{-y}$ )对 EEPE 起轻微的抑制作用(-0.02%),黄河流域的碳排放强度变化( $\Delta C_y$ )对 EEPE 起促进作用(6.51%)。该现象主要发生在青海、宁夏、内蒙、陕西和山西,这些地区一方面依赖高碳能源、拥有大量的重工业和能源密集型产业。另一方面,由于地理位置的特殊性,取暖制冷、交通等高能耗的生活方式,导致其 EEPT 较大。以内蒙为例,在参与全国产业布局分工过程中,承接煤化工、电解铝、铁合金等项目使得能源消费需求出现刚性增长,推动 EEPT 迅速增长。对于 EEPI,黄河流域的碳排放强度变化( $\Delta C_y$ )起轻微的促进作用(0.05%),区域外的碳排放强度变化( $\Delta C_{-y}$ )则产生抑制作用(-2.59%),表明黄河流域还需进一步降低碳排放强度。综上所述,在 EEPE 中,黄河

流域的碳排放强度变化( $\Delta C_y$ )起主导作用,而在 EEPI 中,区域外的碳排放强度( $\Delta C_y$ )起主导作用。

生产结构变化( $\Delta A_d, \Delta A_{fwd}, \Delta A_{bwd}, \Delta A_f$ )对黄河流域 EEPT 增加起显著的抑制作用。黄河流域大部分省区的生产结构变化对 EEPE 起抑制作用,表明其生产结构正朝着低碳化的方向发展。其中山西省生产结构对 EEPE 的抑制作用以及山东省对 EEPI 的抑制作用最强,分别为 $-50.47\%$ 、 $-79.62\%$ 。可能的原因是这两个省份积极践行减排政策,对产业内部结构的优化升级与调整,使其能够有效抑制贸易隐含碳排放的产生。从生产结构的构成来看,产业的前向联系效应( $\Delta A_{fwd}$ )对黄河流域大部分省区的 EEPE 具有抑制作用,平均为 $-4.20\%$ ;产业的后向联系效应( $\Delta A_{bwd}$ )对 EEPE 的抑制作用明显小于前向联系效应,平均为 $-1.58\%$ 。表明黄河流域产业部门作为下游产业消耗区域外上游产业部门提供的产品过程中,跟随产品流向黄河流域的碳排放量要比黄河流域流出产品产生的碳排放量要多,可能的原因是由于区域外的发达经济体中间投入产品生产结构的提升效果远大于黄河流域生产结构的提升,但在一定程度上可以带动其产业结构升级从而减少碳排放。区域外的产业结构变动( $\Delta A_f$ )同样对 EEPE 具有抑制作用。黄河流域大部分省区的生产结构变化对 EEPI 起抑制作用(河南省除外),而作用较显著的为区域外的产业结构变动( $\Delta A_f$ )和产业的后向联系效应( $\Delta A_{bwd}$ )。值得注意的是,个别省区的产业结构变动带来了 EEPT 的增加。比如产业的前向联系效应( $\Delta A_{fwd}$ )对宁夏、陕西和山东的 EEPE 产生了较大的促进作用,而产业的后向联系效应( $\Delta A_{bwd}$ )对河南、内蒙和山西的 EEPI 产生了较大的促进作用。这一现象表明,在国内生产一体化的进程中,单从一个地区的生产结构提升并不能完全解决碳排放的治理问题,而从产品源头出发,基于产业链的减排政策制定更有利于实现减排目标。

整体而言,从 2007—2017 年,部分省份的 EEPI 大于 EEPE 的增长率,如四川、内蒙、陕西和河南,说明这些省份正在积极践行减排政策的实施,并且正在向区域外分配其减排压力。而部分资源大省如甘肃、宁夏和山东省,其 EEPE 增长率较高,EEPI 增长率较低,也就是说,其减排压力持续在加大。因此,在黄河流域碳减排政策的实施中,应重点关注这三个省份。

### 3 结论及政策建议

#### 3.1 结论

本文基于 MRIO 模型,测算了 2007—2017 年长时间段黄河流域 9 个省区贸易隐含碳的构成,以及其在省级和行业层面的转移路径;通过 SDA 模型,追踪黄河流域贸易隐含碳排放区域内的驱动因素,揭示其区域内外贸易隐含碳排放影响因素的异质性。主要研究结果如下:

第一,从 2007—2017 年,黄河流域碳排放量呈收敛态势,在 2012 年后进入缓慢增长的平台期和下降期,该流域碳排放量生产端大于消费端,为净贸易隐含碳转出地区,主要由中间投入的贸易方式进入其他各省的生产需求时导致,并且区域外资本形成和城镇居民消费是隐含碳排放的主要构成。

第二,从贸易隐含碳排放的转移趋势来看,在生产供应链中黄河流域的生产供应和整体需求是向中西部和东北地区移动,对东南沿海省份的供应和需求正在逐渐减少,而对中西部和东北地区的供应和需求正在增加的转移趋势。

第三,黄河流域净贸易隐含碳转出行业集中在采选业、石油及化学工业、非金属矿物制品、电力热力燃气及水的生产和供应业以及运输仓储邮政这 5 个行业,主要流向能源密集型产业和资本密集型产业。

第四,生产结构和最终需求是影响黄河流域 EEPT 增加的关键因素。区域外的最终需求和本地的碳排放强度是影响 EEPE 增加的主要因素,区域内的最终需求和区域外的碳排放强度是影响 EEPI 增加的主要因素。生产结构对黄河流域 EEPT 主要起抑制作用,但宁夏、陕西和山东省的前向产业部门以及河南、内蒙古和山西省的后向产业部门对黄河流域的 EEPT 产生了较大的促进作用。

#### 3.2 政策建议

基于以上结论,我们对黄河流域碳排放治理提出以下建议:

第一,黄河流域仍需要持续提高低碳排放强度的生产技术。以上结论表明,甘肃、宁夏、内蒙和山西经济

发展与净贸易隐含碳转移量之间存在明显的不平衡。因此,积极鼓励这些省份加大对清洁能源和绿色技术的投入,降低生产过程中的碳排放。通过技术创新和产业升级提高低碳排放强度的生产技术,减少能源密集型产业和资本密集型产业对碳排放的贡献。

第二,拓展流域间及流域外的碳市场交易。为了实现共同但有区别的责任,应逐步建立完善碳交易市场,保障黄河流域内和流域外经济与环境的协同发展。支持中西部和东北地区发展碳中和产业,减少对高碳产业的依赖,降低碳排放。同时,促进中西部和东北地区的消费市场发展,减少对黄河流域产品的需求,从而降低区域间碳排放转移。加强黄河流域与中西部、东北地区的合作与沟通,共享低碳技术和经验,共同应对碳排放问题,实现区域间碳减排的协同效应。

第三,生产结构的改进对于黄河流域贸易隐含碳排放具有显著的抑制作用,下一步的减排工作可关注于提升中间投入生产技术。结构分解的结果表明,相比较与碳排放强度代表的终端技术进步,生产结构的变化对于碳排放的抑制作用更明显。因此,黄河流域应加强对生产结构的引导,推动向清洁低碳产业转型升级,逐步从终端低碳技术升级向中间生产技术升级转换,以减少隐含碳排放。

#### 4 局限性和进一步研究

由于数据获取方面的局限性,当前研究仍存在待完善的地方。首先,文中采用与能源相关的部门方法来划分省份部门排放量,该数据来自 CEADs,包括产业碳排放和家庭碳排放<sup>[57]</sup>。由于投入产出表数据不能涵盖家庭使用能源部分,本文的计算忽略了相应的排放量,这可能会导致各省的生产端碳排放量数据偏小。但根据 CEADs 的数据,在 2007—2017 年间,中国各省家庭能源使用造成的直接碳排放量占碳排放总量的比重在 1.1%—24.1%,中位数分别为 3.9%、3.9%、4.2%、4.2%和 4.4%。即忽略这部分碳排放量可能导致各省碳排放量约被低估 4.1%,这一误差在可控范围内。其次,由于投入产出表的编制需要投入大量的人力、物力与财力,当前中国省级多区域投入产出表更新较慢,目前可应用的最新数据为 2017 年,本文尽量选择长时间段对黄河流域贸易隐含碳排放及影响因素进行研究,以抵消数据时效性带来的问题。此外,本文所采用的估算和分解方法可以被广泛应用于未来不同地区、不同排放的相关研究中,将有助于区域尺度降碳减污目标的实现。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R, Hauck J, Olsen A, Peters G, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quééré C, Canadell J, Ciais P, Jackson R, Alin S, Aragão L, Arneeth A, Arora V, Bates N, Becker M, Benoit-Cattin A, Bittig H, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L, Evans W, Florentie L, Forster P, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R, Ilyina T, Jain A K, Joetzjer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Marland G, Metzl N, Munro D, Nabel J, Nakaoka S, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A, Tanhua T, Tans P, Tian H, Tilbrook B, van der Werf G R, Vuichard N, Walker A, Wanninkhof R, Watson A, Willis D, Wiltshire A, Yuan W, Yue X, Zaehle S. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.
- [ 2 ] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [ 3 ] 周从越,王竹,郑媛,张钊,邹轶群. 尺度重组视角下县域“协同治碳联盟”的碳额空间分异研究——基于浙江省减碳潜力的分析. *地理研究*, 2023, 42(6): 1545-1559.
- [ 4 ] 侯丽朋,王琳,钱瑶,唐立娜. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [ 5 ] 王少剑,苏泳娟,赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素. *地理学报*, 2018, 73(3): 414-428.
- [ 6 ] 胡鞍钢,高宇宁,李萌. 省际贸易隐含碳与分区施策的省级减排路线图设计. *CIDEG 决策参考*, 2023, 3(28): 1-5.
- [ 7 ] Xu Z C, Li Y J, Chau S N, Dietz T, Li C B, Wan L W, Zhang J D, Zhang L W, Li Y K, Chung M G, Liu J G. Impacts of international trade on global sustainable development. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 964-971.
- [ 8 ] Peters G P, Minx J C, Weber C L, Edenhofer O. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(21): 8903-8908.

- [ 9 ] Pan X F, Wang Y Q, Shen Z Y, Song M L. Technological progress on embodied carbon emissions in G7 countries' exports; a structural decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: 133800.
- [ 10 ] Zhang Z H, Lu X, Su B, Zhao Y H, Wang S, Liu Y, Li H, Zhang Y F, Ashfaq A, Shi G. Energy, CO<sub>2</sub> emissions, and value added flows embodied in the international trade of the BRICS group; a comprehensive assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109432.
- [ 11 ] 邓荣荣, 陈鸣. 中美贸易的隐含碳排放研究——基于 I-O SDA 模型的分析. *管理评论*, 2014, 26(9): 46-57.
- [ 12 ] 金继红, 居义羲. 中日贸易隐含碳排放责任分配研究. *管理评论*, 2018, 30(5): 64-75.
- [ 13 ] 张兵兵, 李玮雯. 新附加值贸易视角下中日贸易隐含碳排放的再测算. *资源科学*, 2018, 40(2): 250-261.
- [ 14 ] Huang R, Chen G W, Lv G N, Malik A, Shi X P, Xie X T. The effect of technology spillover on CO<sub>2</sub> emissions embodied in China-Australia trade. *Energy Policy*, 2020, 144: 111544.
- [ 15 ] Wang S H, Tang Y, Du Z H, Song M L. Export trade, embodied carbon emissions, and environmental pollution: an empirical analysis of China's high- and new-technology industries. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111371.
- [ 16 ] 胡剑波, 闫烁, 王蕾. 中国出口贸易隐含碳排放效率及其收敛性. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 95-104.
- [ 17 ] 兰天, 韩玉晶. 中国对外贸易隐含碳排放及省际转移研究——基于环境投入产出模型的分析框架. *中南大学学报: 社会科学版*, 2022, 28(4): 94-106.
- [ 18 ] 郭正权, 荣彤. 中国区域间贸易隐含碳转移时空格局演变分析. *山西大学学报: 哲学社会科学版*, 2021, 44(6): 97-108.
- [ 19 ] Feng K S, Davis S J, Sun L X, Li X, Guan D B, Liu W D, Liu Z, Hubacek K. Outsourcing CO<sub>2</sub> within China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(28): 11654-11659.
- [ 20 ] Li M, Li Q, Wang Y N, Chen W. Spatial path and determinants of carbon transfer in the process of inter provincial industrial transfer in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 95: 106810.
- [ 21 ] Dong B, Xu Y Z, Li Q N. Carbon transfer under China's inter-provincial trade: evaluation and driving factors. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 32: 378-392.
- [ 22 ] 黄和平, 易梦婷, 曹俊文, 邹艳芬, 黄先明. 区域贸易隐含碳排放时空变化及影响效应——以长江经济带为例. *经济地理*, 2021, 41(3): 49-57.
- [ 23 ] 李艳梅, 牛苗苗, 张红丽. 京津冀区域内增加值贸易的经济收益和隐含碳排放比较. *资源科学*, 2019, 41(9): 1619-1629.
- [ 24 ] 黄蕊, 钟章奇, 孙翊, 刘昌新, 刘丽. 区域分部门贸易的隐含碳排放——以北京为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 933-943.
- [ 25 ] 钟章奇, 吴乐英, 陈志建, 何凌云. 区域碳排放转移的演变特征与结构分解及减排对策分析——以河南省为例. *地理科学*, 2017, 37(5): 773-782.
- [ 26 ] Li W, Wang Q, Jin B H, Li G M, Su B. Multiregional input-output analysis of carbon transfer in interprovincial trade and sectoral strategies for mitigation: case study of Shanxi Province in China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 391: 136220.
- [ 27 ] Serrano M, Dietzenbacher E. Responsibility and trade emission balances: an evaluation of approaches. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2224-2232.
- [ 28 ] Xu Y, Dietzenbacher E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade. *Ecological Economics*, 2014, 101: 10-20.
- [ 29 ] Yu Y, Hou J, Jahanger A, Cao X, Balsalobre-Lorente D, Radulescu M, Jiang T Y. Decomposition analysis of China's chemical sector energy-related CO<sub>2</sub> emissions: from an extended SDA approach perspective. *Energy & Environment*, 2023: 0958305X2311516.
- [ 30 ] Wang Q, Han X. Is decoupling embodied carbon emissions from economic output in Sino-US trade possible? *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 169: 120805.
- [ 31 ] Dong F, Yu B L, Hadachin T, Dai Y J, Wang Y, Zhang S N, Long R Y. Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 187-201.
- [ 32 ] Tae-Jin K, Nikolas T. Analysis of carbon emissions embodied in South Korea's international trade: production-based and consumption-based perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128839.
- [ 33 ] Wang W Z, Hu Y, Lu Y. Driving forces of China's provincial bilateral carbon emissions and the redefinition of corresponding responsibilities. *The Science of the Total Environment*, 2023, 857(Pt 2): 159404.
- [ 34 ] Pu Z N, Yue S J, Gao P. The driving factors of China's embodied carbon emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153: 119930.
- [ 35 ] Chen Z J, Ni W, Xia L T, Zhong Z Q. Structural decomposition analysis of embodied carbon in trade in the middle reaches of the Yangtze River. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(1): 816-832.
- [ 36 ] Wang C J, Wang F, Zhang X L, Deng H J. Analysis of influence mechanism of energy-related carbon emissions in Guangdong: evidence from regional China based on the input-output and structural decomposition analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(32):

25190-25203.

- [37] Chen W M, Lei Y L, Wu S M, Li L. Opportunities for low-carbon socioeconomic transition during the revitalization of Northeast China: insights from Heilongjiang Province. *The Science of the Total Environment*, 2019, 683: 380-388.
- [38] Wang H, Ang B W, Su B. Assessing drivers of economy-wide energy use and emissions: IDA versus SDA. *Energy Policy*, 2017, 107: 585-599.
- [39] Su B, Ang B W. Multiplicative structural decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities. *Energy Economics*, 2017, 65: 137-147.
- [40] 曲永义. 以产业链协同推动黄河流域生态保护和高质量发展. *城市与环境研究*, 2023, 10(1): 3-7.
- [41] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展. *地理学报*, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [42] 贾佳, 田世民, 江恩慧, 梁帅, 赵庆庆, 邹清洋, 陈融旭, 张杨. 黄河流域碳排放状况及“双碳”目标实现路径研究. *人民黄河*, 2023, 45(12): 8-13.
- [43] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据. *地理研究*, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [44] Liu J H, Diao K H, Tian M M, Xu P. Multiscale spatial-temporal evolution of energy carbon footprint in the Yellow River Basin of China based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS integrated data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(1): 312-330.
- [45] Meng Q X, Zheng Y N, Liu Q, Li B L, Wei H J. Analysis of spatiotemporal variation and influencing factors of land-use carbon emissions in nine provinces of the Yellow River Basin based on the LMDI model. *Land*, 2023, 12(2): 437.
- [46] Gong W F, Zhang H X, Wang C H, Wu B, Yuan Y Q, Fan S J. Analysis of urban carbon emission efficiency and influencing factors in the Yellow River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(6): 14641-14655.
- [47] Wang X P, Shen Y S, Su C. Spatial-temporal evolution and driving factors of carbon emission efficiency of cities in the Yellow River Basin. *Energy Reports*, 2023, 9: 1065-1070.
- [48] Song M, Gao Y J, Zhang L Y, Dong F R, Zhao X X, Wu J. Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon emission efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(43): 96795-96807.
- [49] 张永姣, 王耀辉. 基于省际贸易隐含碳排放视角的流域生态补偿测算——以黄河流域为例. *生态经济*, 2023, 39(2): 26-33.
- [50] 雷涯邻, 李东芮, 张安, 李莉, 江勇, 葛建平. 消费驱动下黄河流域隐含碳流动特征研究. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2022, 43(4): 83-90.
- [51] Yuan X L, Sheng X R, Chen L P, Tang Y Z, Li Y, Jia Y S, Qu D F, Wang Q S, Ma Q, Zuo J. Carbon footprint and embodied carbon transfer at the provincial level of the Yellow River Basin. *The Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149993.
- [52] Dietzenbacher E, Los B. Structural decomposition analyses with dependent determinants. *Economic Systems Research*, 2000, 12(4): 497-514.
- [53] 刘卫东, 陈杰, 唐志鹏. 中国 2007 年 30 省市区区域间投入产出表编制理论与实践. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [54] 刘卫东, 唐志鹏, 陈杰. 2010 年中国 30 省市区区域间投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [55] Zheng H R, Zhang Z K, Wei W D, Song M, Dietzenbacher E, Wang X Y, Meng J, Shan Y, Ou J M, Guan D. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(7): 074001.
- [56] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, Ou J M, Li Y, Meng J, Mi Z F, Liu Z, Zhang Q. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997-2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [57] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, Hubacek K. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016-2017. *Scientific Data*, 2020, 7: 54.
- [58] Xu W H, Xie Y L, Ji L, Cai Y P, Yang Z F, Xia D H. Spatial-temporal evolution and driving forces of provincial carbon footprints in China: an integrated EE-MRIO and WA-SDA approach. *Ecological Engineering*, 2022, 176: 106543.
- [59] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径. *资源科学*, 2022, 44(1): 59-69.
- [60] Sun X M, Zhang H T, Ahmad M, Xue C K. Analysis of influencing factors of carbon emissions in resource-based cities in the Yellow River Basin under carbon neutrality target. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(16): 23847-23860.
- [61] 钟章奇, 张旭, 何凌云, 陈博文. 区域间碳排放转移、贸易隐含碳结构与合作减排——来自中国 30 个省区的实证分析. *国际贸易问题*, 2018(6): 94-104.
- [62] 李思佳, 杨瑾, 方丹, 宋丹. 基于产业链视角的京津冀区域碳排放影响因素研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3473-3487.
- [63] Cheng S P, Meng L J, Xing L. Energy technological innovation and carbon emissions mitigation: evidence from China. *Kybernetes*, 2022, 51(3): 982-1008.
- [64] Copeland B R, Taylor M S. North-south trade and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 1994, 109(3): 755-787.