

【生态文明与区域发展】

生产和消费双重视角下中国省域碳排放脱钩 演变及贡献解析*

韩梦瑶 张泽 廖茂林

摘要:伴随着中国在碳减排领域承担着越来越重要的国际责任,基于碳排放及经济发展综合评估分省域碳排放分解及脱钩状态对于中国碳排放研究至关重要。综合投入产出分析,将Tapio脱钩模型与Kaya恒等式和LMDI分解法相结合,对中国2007—2017年各省份生产和消费双重视角下碳排放的分解效应及其与经济增长的脱钩关系开展研究,探讨不同省份之间的碳排放特征及演变趋势,结果显示:除2012—2015年碳排放量保持平稳,中国在2007—2017年碳排放量呈现增长趋势;中国碳排放量与经济增长总体呈现弱脱钩状态;黄河中下游地区碳排放增长量相对较高,产业结构较为落后;技术进步效应与产业结构效应对碳排放量起到抑制作用,而经济产出效应与人口规模效应起到促进作用。

关键词:LMDI;碳排放;脱钩;弹性投入产出

中图分类号:F062.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5766(2023)05-0120-11 **收稿日期:**2023-06-29

***基金项目:**国家社会科学基金项目“‘双碳’目标对中国跨境贸易网络的重塑及转型风险防范研究”(22CJY020);
国家重点研发计划项目“中国实现2030年碳排放峰值目标的优化路径研究”(2016YFA0602800)。

作者简介:韩梦瑶,女,中国科学院地理科学与资源研究所副研究员;剑桥大学环境、能源和自然资源管理中心客座研究员(北京 100101)。

张泽,男,中国社会科学院大学应用经济学院硕士生(北京 102488)。

廖茂林,女,中国社会科学院生态文明研究所副研究员,可持续发展经济学研究室副主任,博士(北京 100710)。

一、引言

气候变化是全球面临的最大环境挑战,温室气体排放是全球变暖的主要原因,共同应对气候变化已成为全球共识(蔡博峰等,2021;Guan, et al., 2008;韩梦瑶等,2020)。IPCC第五次评估报告指出,气候变化将会对生态系统产生不可逆的影响,在适应气候变化的基础上,持续降低温室气体排放是减缓气候变化的核心(郑秋红等,2020)。作为世界上最大的温室气体排放国,中国在应对气候变化

方面也承担着越来越重的责任(谢海生等,2016;Zheng, et al., 2020)。《国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知》提到,为降低中国温室气体排放,中国承诺到2020年单位国内生产总值(GDP)的二氧化碳排放量将比2005年下降40%—45%。2020年9月,中国进一步宣布力争2030年前实现二氧化碳排放达峰、2060年前实现碳中和,中国加速推动绿色低碳转型的信心和决心持续增强。

具体来看,一个国家或地区碳排放强度取决于GDP总量和碳排放总量的对比关系,综合考虑GDP

和碳排放可以进一步考察不同区域的碳强度相对关系及其脱钩趋势(周灵,2019)。截至目前,常用的碳排放衡量指标包括人均碳排放水平、单位碳排放水平(又称碳强度)、单位碳排放 GDP 等(Steininger, et al., 2014; 颜艳梅等, 2016)。中国各省份地理条件、自然资源禀赋、经济发展水平等方面存在较大差异,深入探讨各省份碳排放的影响因素及其与经济高质量发展之间的关系,对于中国实现“双碳”目标具有重要意义(梁中, 2017; 张诗卉等, 2021)。

在研究碳排放的影响因素中,主要的分解方式分为两种,即指数分解方法(IDA)与结构分解方法(SDA),与SDA方法相比,IDA方法适用于分解较少影响因素的模型(郭朝先, 2010)。LMDI分解法(对数平均迪氏分解法)是衡量资源要素与经济要素之间内在联系的重要工具。国内外学者从不同角度对LMDI模型展开研究(Ang, et al., 2001)。其中,韩岳峰和张龙(2013)从能源消耗与贸易角度对中国农业碳排放进行了分解研究。Wang等(2014)将固定资产投资与劳动力等因素与LMDI方法结合,通过广义LMDI法分析了中国能源消费的驱动因素。González等(2014)基于扩展IPAT模型,通过LMDI对建筑行业节能的影响因素进行了分析。徐国泉等(2021)通过二阶段LMDI模型对江苏省碳排放量的影响因素进行了动态研究。

此外, Tapio 脱钩模型可以用来测度经济增长与碳排放的脱钩关系,成为资源与环境领域的主要研究方法之一(胡剑波等, 2017; 齐亚伟, 2018; 周杰琦等, 2014)。具体到不同尺度,齐静等(2012)采用脱钩分析法研究了重庆市工业部门经济增长、能源消耗和碳排放之间的关联特征,并构建脱钩稳定性指标,对脱钩状态的波动情况进行了评价。刘博文等(2018)采用脱钩和LMDI分解模型,研究了中国碳排放的区域差异以及驱动因素的影响。杨英明等(2019)基于世界主要国家能源消费碳排放脱钩趋势,开展了碳排放脱钩驱动因素研究。潘竞虎等(2021)从时空交互视角利用改进的Tapio脱钩模型对中国地级单元环境碳负荷与经济增长之间的关系进行了综合分析。

上述研究大多从直接碳排放的角度进行分析,并对中国的碳排放及碳强度变化进行了系统研究。从直接排放的视角切入,可以从生产端视角分

析不同的重要关系。然而,越来越多的研究证明,从消费视角切入的研究已经占据了越来越重要的位置(刘红光等, 2014; Mi, et al., 2017; Peters, et al., 2008)。目前,已有研究分别从生产及消费的视角切入,系统比较了主要地区生产碳排放及消费排放的差别(Caro, et al., 2014; Chen, et al., 2018; Davis, et al., 2010)。随着中国多区域投入产出表的陆续公布,关于中国省(区、市)之间的多区域碳排放转移的研究也逐步增多(刘卫东等, 2018),不同城市及地区碳强度及碳强度伴生的失衡问题也逐渐得到关注(Wang, et al., 2019)。值得注意的是,随着全球产业转移,中国的地位逐渐从生产贡献者变为了消费贡献者。如果不能有效地将消费视角伴随的隐含碳流动引入研究中,很难全面反映中国各省(区、市)的碳总量及碳强度的变化趋势(Han, et al., 2020; Liang, et al., 2007)。

在此背景下,本研究结合投入产出分析,通过Kaya恒等式、LMDI分解法和Tapio脱钩模型将经济发展阶段与中国省域碳排放相关联,对中国各省份碳排放与经济增长的脱钩关系及碳排放的分解效应开展研究,旨在探索和挖掘不同视角下中国省域碳排放分解效应和碳排放脱钩状态及其影响。

二、方法与数据来源

结合投入产出分析,通过Kaya恒等式、LMDI分解法和Tapio脱钩模型将经济发展阶段与中国省域碳排放相关联,对中国2007—2017年各省份碳排放与经济增长的脱钩关系及碳排放的分解效应进行研究设计。

(一)多区域投入产出分析

基于多区域投入产出模型,区域 r 部门 i 的碳排放均衡可以表达为:

$$d_i^r + \sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^s z_{ji}^{sr} = \varepsilon_i^r x_i^r \quad (1)$$

式(1)中, d_i^r 代表区域 r 部门 i 的直接排放, ε_j^s 代表区域 s 部门 j 的隐含强度, Z_{ji}^{rs} 表示从区域 r 部门 i 到区域 s 部门 j 的中间使用, ε_i^r 表示区域 r 部门 i 的隐含强度, x_i^r 代表区域 r 部门 i 的总产出,具体表述如下:

$$x_i^r = \sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij}^{rs} + \sum_{s=1}^m f_i^{rs} + p_i^r \quad (2)$$

式(2)中, Z_{ij}^s 是区域 r 部门 i 提供给区域 s 部门 j 的中间流出, f_i^s 代表区域 r 到区域 s 部门 i 的最终消费, 包括农村居民消费、城市居民消费、政府消费、固定资本形成总额和存货增加, p_i^r 是区域 r 部门 i 的贸易项及均衡项。

用矩阵 D 代表直接排放, 矩阵 E 代表单元产出强度, 矩阵 Z 代表中间产品投入, 矩阵 \hat{X} 代表总产出, 矩阵 \hat{F} 代表总需求, 则上述公式可分别表示为:

$$D + EZ = E\hat{X} \quad (3)$$

$$\hat{X} = Z + \hat{F} \quad (4)$$

对于经济体中的所有部门, 隐含强度矩阵 E 可以表示为:

$$E = D(\hat{X} - Z)^{-1} \quad (5)$$

生产端排放 (DEU) 指区域内的直接排放, 消费端排放 (EEU) 指区域内最终需求中的排放。基于隐含强度矩阵, DEU 和 EEU 可以表示为:

$$DEU^r = \sum_{i=1}^n d_i^r \quad (6)$$

$$EEU^r = \sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^s f_i^{sr} \quad (7)$$

其中, d_i^r 代表区域 r 部门 i 的直接排放, f_i^{sr} 代表从区域 s 到区域 r 部门 i 的最终需求。

(二) Tapio 脱钩分析

Tapio 脱钩模型可以分析碳排放和经济发展的关系, GDP 与碳排放的脱钩指数计算公式如下:

$$\varepsilon_{C,G} = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta G} = \frac{\frac{\Delta C}{C^0}}{\frac{\Delta G}{G^0}} = \Delta C \times \frac{G^0}{C^0 \times \Delta G} \quad (8)$$

式(8)中, $\varepsilon_{C,G}$ 即为 GDP 与碳排放的脱钩指数, $\% \Delta C$ 和 $\% \Delta G$ 分别表示碳排放和 GDP 增长率; ΔC 和 ΔG 分别表示碳排放和 GDP 增长值; C^0 和 G^0 分别表示基期的碳排放和 GDP。针对不同脱钩指数值的脱钩状态分类如图 1 所示。

考虑到中国各地区的经济发展与碳排放水平之间呈现出多种脱钩、复钩的波动状态, 脱钩状态的稳定性指标如下:

$$\delta = \frac{1}{N-1} \sum \left| \frac{\varepsilon(i+1) - \varepsilon(i)}{\varepsilon(i)} \right| \quad (9)$$

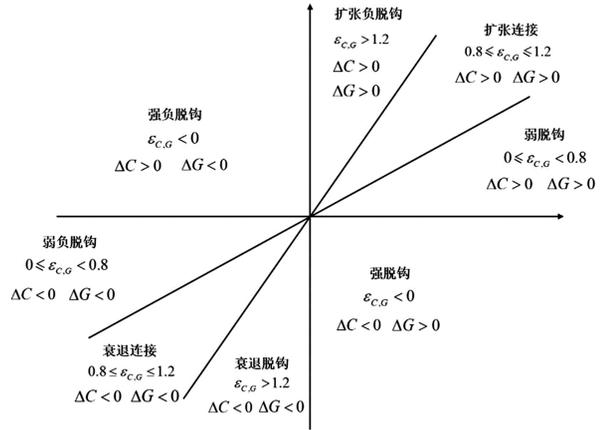


图 1 Tapio 碳排放脱钩分类图

资料来源:作者绘制。

其中,中国经济增长与碳排放总量之间的脱钩趋势存在较强的不稳定性。其值越小,说明脱钩状态越缓和,即脱钩稳定性越强;反之,则说明脱钩稳定性差。

(三) LMDI 碳排放分解法

以传统的指数分解法为基础,已有研究提出了对数平均迪氏指数分解法,即 LMDI (Ang, 2005)。与其他分解法相比, LMDI 具有适用范围广泛、解释性强、容易适用等特点。本文采用 LMDI 模型分析中国省域碳排放的主要影响因素。基于 Kaya 恒等式,碳排放量 (C_T) 分解为:

$$C_T = \frac{C_S}{GDP_S} \times \frac{GDP_S}{GDP_T} \times \frac{GDP_T}{POP} \times POP + \frac{C_{NS}}{GDP_{NS}} \times \frac{GDP_{NS}}{GDP_T} \times \frac{GDP_T}{POP} \times POP \quad (10)$$

式(10)中, C_T 、 C_S 、 C_{NS} 分别表示碳排放总量、第二产业碳排放总量、非第二产业碳排放总量,单位为百万吨; GDP_T 、 GDP_S 、 GDP_{NS} 表示 GDP 总量、第二产业 GDP、非第二产业 GDP,单位为亿元人民币; POP 表示地区常住人口数,单位为万人。

由此,上式可改写为:

$$C_T = TE \times I \times E \times POP \quad (11)$$

式(11)中, $TE = \frac{C_S}{GDP_S} + \frac{C_{NS}}{GDP_{NS}}$ 表示技术进步效应;

$I = \frac{GDP_S}{GDP_T} + \frac{GDP_{NS}}{GDP_T}$ 表示产业结构效应;

$E = \frac{GDP_T}{POP}$ 表示经济产出效应。

当时间从 $t-1$ 变化到 t 时,碳排放量可分解为如

下影响因素:

$$\Delta C_T = \Delta C_T' - \Delta C_T^{t-1} = \Delta C_{TE} + \Delta C_I + \Delta C_E + \Delta C_P \quad (12)$$

$$\Delta C_{TE} = \frac{C_T' - C_T^{t-1}}{\ln C_T' - \ln C_T^{t-1}} \ln \left(\frac{TE^t}{TE^{t-1}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta C_I = \frac{C_T' - C_T^{t-1}}{\ln C_T' - \ln C_T^{t-1}} \ln \left(\frac{I^t}{I^{t-1}} \right) \quad (14)$$

$$\Delta C_E = \frac{C_T' - C_T^{t-1}}{\ln C_T' - \ln C_T^{t-1}} \ln \left(\frac{E^t}{E^{t-1}} \right) \quad (15)$$

$$\Delta C_P = \frac{C_T' - C_T^{t-1}}{\ln C_T' - \ln C_T^{t-1}} \ln \left(\frac{POP^t}{POP^{t-1}} \right) \quad (16)$$

式(12)中, ΔC_{TE} 为技术进步效应, 表示碳排放技术对碳排放总量的影响; ΔC_I 为产业结构效应, 表示工业发达程度对碳排放总量的影响; ΔC_E 为经济产出效应, 表示区域经济发展水平对碳排放总量的影响; ΔC_P 为人口规模效应, 表示人口数量对碳排放总量的影响程度。

(四)数据来源

化石能源的燃烧是 CO_2 排放的主要来源, 由于我国现有的统计资料并未直接提供区域或行业的 CO_2 排放数据, 因此已有的研究一般采用化石能源的消耗量来估算 CO_2 排放量。本文根据 IPCC 提供的方法对省级 CO_2 排放量进行估算, 具体估算公式如下:

$$\text{CO}_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{ij} AD_i \times NCV_i \times EF_i \times O_i \quad (17)$$

式(17)中, CO_2 表示省级化石能源燃烧 CO_2 排放量; i 表示化石能源类型; j 表示经济部门; AD_i 、 NCV_i 、 EF_i 和 O_i 分别表示 i 化石能源的消费量、平均低位热值、单位热值含碳量和碳氧化率。

为计算各省市碳排放强度以及分析产业结构对中国省级碳排放强度非均衡性的影响, 需要获取各省(区、市)的地区生产总值和各经济部门的增加值。该数据来源于 2007—2017 年《中国统计年鉴》的“各地区国内生产总值”。为了得到实际 GDP, 本文利用指数(上年=100)对各部门增加值进行修正, 最终以 2007 年不变价进行计量。本文所用化石能源消费数据来源于 2007—2015 年《中国能源统计年鉴》中 30 个省(区、市)(不含西藏、香港、澳门与台湾)的“地区能源平衡表”, 所涉及的能源类型包括

“地区能源平衡表”中 17 种(2007—2009 年)、27 种(2010—2017 年)化石能源。化石能源的平均地位热值来源于《中国能源统计年鉴》的“各种能源折标准煤参考系数”。单位热值含碳量和碳氧化率来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》和《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。中国各区域的具体划分见表 1。

表 1 中国区域划分

区域	包含省份
北部沿海地区	北京、天津、河北、山东
黄河中下游地区	山西、内蒙古、河南、陕西
东北地区	辽宁、吉林、黑龙江
东部沿海地区	上海、江苏、浙江、
长江中游地区	安徽、江西、湖北、湖南
南部沿海地区	福建、广东、海南
西南地区	广西、重庆、四川、贵州、云南
西北地区	甘肃、青海、宁夏、新疆

资料来源:作者整理。

三、结果分析

结合生产侧与消费侧两个维度, 本文对各省份碳排放量变化趋势、碳排放脱钩对比、碳排放分解研究进行深入分析。

(一)生产侧与消费侧碳排放量趋势对比

整体来看, 全国生产侧碳排放强度大于消费侧碳排放强度, 2007—2017 年, 中国生产侧与消费侧碳排放均呈现增长趋势, 生产侧与消费侧碳排放量分别由 2007 年的 68.21 亿吨、54.94 亿吨增长到 2017 年的 101.72 亿吨、86.41 亿吨, 增长幅度与增长量大致相同。从区域角度看, 西北地区 2017 年生产侧与消费侧碳排放量分别为 2007 年的 2.51 倍、2.40 倍, 增速位于全国首位, 而黄河中下游地区生产侧与消费侧碳排放增长绝对量远超其他地区。具体到不同省份, 北京市生产侧碳排放量及天津、吉林、上海消费侧碳排放量出现下降趋势, 其余省份生产侧及消费侧碳排放量均出现不同幅度的提升。

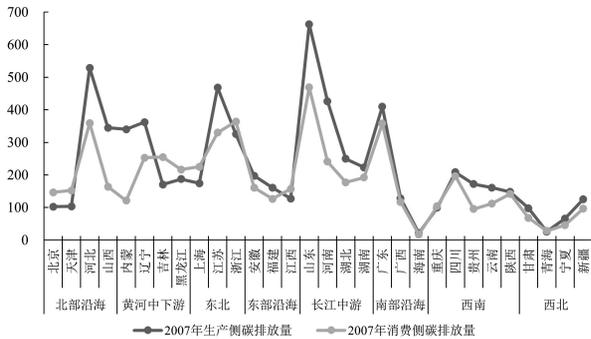
图 2 展示了 2007 年与 2017 年全国 30 个省(区、市)的生产侧及消费侧碳排放量占当年碳排放总量的比重。总体来看, 2007 与 2017 年, 大部分省(区、市)生产侧碳排放量超过消费侧。其中, 除西南地区 2017 年消费侧碳排放量超过生产侧以外, 其余区域在两个时间阶段内生产侧碳排放量均超过消费

侧,表明我国生产侧与消费侧的发展并不均衡。具体到各省份,2007年,北京、天津、上海与吉林生产侧碳排放量仅占约四成,明显低于消费侧,重庆、四川、陕西的生产侧碳排放强度与消费侧碳排放强度大致持平,而内蒙古、山西、贵州消费侧碳排放量仅为生产侧碳排放量的0.36倍、0.48倍、0.55倍,山东生产侧碳排放量与消费侧碳排放量均位居全国首位,分别为6.63亿吨、4.69亿吨,而海南、青海在生产侧与消费侧碳排放总量均未超过0.3亿吨,位居全国末位。

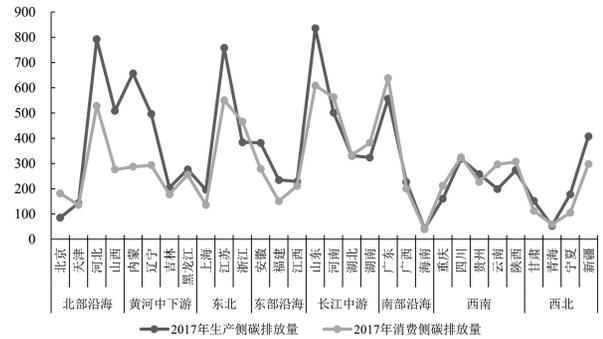
2017年,北京市生产侧碳排放量占比进一步减少,仅占32%,远低于其他省份。吉林、黑龙江、上海生产侧碳排放比重有所上升。湖北、四川、海南

生产与消费侧碳排放强度大致持平。山东省在生产侧与消费侧碳排放总量依然位居第一位,但与其余省份的差距在不断缩小。值得注意的是,2007—2017年,从生产侧来看,青海、宁夏、新疆、安徽和内蒙古的碳排放量增长率超过100%;作为对比,在消费侧30%以上的省份均出现碳排放量增长翻倍的情况,可以看出尽管消费侧的碳排放总量稍低,但增长率远超生产侧。我国通过产业结构与能源结构改革解决碳排放增长与环境污染问题,改变原有的以牺牲资源与环境成本换取经济粗放式增长的传统模式,有助于实现碳达峰与碳中和目标。

(二)生产侧与消费侧碳排放脱钩对比



(a)2007年



(b)2017年

图2 各省份生产侧及消费侧碳排放量演变趋势

资料来源:作者绘制。

整体来看2007—2017年中国省域生产侧和消费侧碳排放量脱钩情况,可以发现,中国的碳排放与经济增长呈现弱脱钩趋势,但具体到不同省份与不同的时间尺度来看,处于弱脱钩的省份仍为大多数,且不同省份的碳强度脱钩弹性指数及脱钩趋势有所不同,呈现特定的区域性特征。2007—2010年,所有省份脱钩指数均为正,表明该时间段内所有省份生产侧碳排放量均呈现上升态势。具体来看,北京脱钩指数为全国最低值,仅为0.06,其碳排放量增长率约为2%。河北、山西、安徽、重庆、四川、宁夏与新疆处于扩张连接状态,陕西脱钩指数为1.34,处于扩张负脱钩状态,展现出脱钩状态较为落后的省份主要分布于黄河中下游地区与西部地区,其经济水平低于中部、东部地区,且经济增长伴随着大量的碳排放,产业结构有待进一步优化。从消费侧来看,脱钩状态分化程度较大,未表现出明显的地域性分布特征。其中,东北地区的吉林、黑龙江与东部沿海地区

的浙江、长江中游地区的江西处于强脱钩状态,脱钩指数分别为-0.08、-0.05、-0.12、-0.08。10省份处于扩张连接或扩张负脱钩状态,黄河中下游地区4省份脱钩指数均超过1.2,均处于扩张负脱钩状态,仅内蒙古碳排放增量达到1.5亿吨,黄河中下游地区也是该阶段全国脱钩状态最不理想的地区,此外,西南地区的云南以及西北地区的宁夏、新疆脱钩状态同样不理想,脱钩指数分别为1.18、1.29、1.24。

2010—2012年,碳排放脱钩情况出现了一定变化。其中,北京生产侧碳排放量由2010年的1.05亿吨下降到2012年的0.98亿吨,处于强脱钩状态,脱钩指数为-0.39。与2007—2010年相比,处于扩张连接与扩张负脱钩的省份逐渐转移到黄河中下游、东北、西北以及南部沿海地区,黄河中下游地区的内蒙古、东北地区的黑龙江、南部沿海地区的海南脱钩指数分别为1.07、1.03、1.30。西北地区的青海、宁夏、新疆等省份脱钩指数分别为1.52、1.44、

2.05,均处于扩张负脱钩状态,主要体现在青海、宁夏与新疆2012年生产侧碳排放量较2010年分别上升了40.5%、39.5%与51.1%,短时间内大量的碳排放增长使得上述地区的脱钩状况不佳。其余绝大部分省份处于弱脱钩状态,东部省份脱钩指数普遍低于中部省份。对于消费侧而言,原有的强脱钩省份转变为北京、天津、吉林、上海与广东,主要为经济水平较为发达的省份。半数省份处于扩张连接与扩张负脱钩状态,2010—2012年全国消费侧脱钩情况普遍较差。除北部、东部、南部沿海地区的部分省份外,其余地区碳排放量增速均维持在较高水平。各省份消费侧脱钩指数与脱钩情况的差异较生产侧而言更为明显,处于强脱钩、扩张连接与扩张负脱钩的省份均多于生产侧。

2012—2015年,从生产侧角度来看,长江中游地区的江西与西北地区的新疆脱钩指数分别为0.95、1.25,分别处于扩张连接与扩张负脱钩状态,其余28省份脱钩指数均低于0.8,处于强脱钩或负脱钩状态,这一时期的脱钩态势与上一时期相比出现明显好转。处于强脱钩和弱脱钩状态的省份数量大致相同,山西、吉林、湖北、云南生产侧碳排放下降幅度显著,脱钩指数分别为-0.45、-0.42、-0.50、-0.53。消费侧脱钩情况同样出现明显好转,仅有4省份处于扩张连接或扩张负脱钩状态。其中,北京消费侧碳排放量出现大幅回弹,由2012年的1.40亿吨增长到2015年的2.05亿吨,增幅达46.4%,脱钩指数为1.99,天津、广东、重庆消费侧碳排放量同样出现较高幅度增长,脱钩指数为0.89、0.85、0.94,处于扩张连接状态。此外,西北地区在这一阶段生产侧碳排放量增长,而消费侧碳排放量下滑,表明西北地区各省份居民消费水平出现下降,消费侧具有较大减排潜力。

2015—2017年,生产侧总体而言脱钩情况较为良好,虽少数省份碳排放量回升较为明显,但整体上脱钩态势较好。处于扩张连接或扩张负脱钩状态的省份由上一时期的2省份上升到5省份,分别为黄河中下游地区的山西与内蒙古、西南地区的广西、西北地区宁夏与新疆,其中,山西、内蒙古与广西脱钩指数大幅增长,由强脱钩转为扩展连接状态,碳排放量回升趋势显著,湖北与云南脱钩指数上升同样明显。然而,对于消费侧而言,脱钩情况则完全不同,处于强脱钩、弱脱钩与扩张负脱钩状态的省份数量大致相同,各省份间脱钩状态分化较

为明显。辽宁经济发展停滞,2015—2017年经济仅增长1.6%,加上消费侧碳排放量降低14.2%,使得辽宁脱钩指数为-8.93,为全国最低值。北京、海南、重庆由扩张负脱钩等状态转为强脱钩,而黄河中下游地区的山西、内蒙古与西北地区的青海、宁夏、新疆转为扩张负脱钩状态。

对比来看,生产侧碳排放总体上处于强脱钩状态的省份数量保持增长,15个省份于2012—2015年阶段实现强脱钩。2012—2015年全国生产侧总体脱钩情况最为理想,仅有2个省份处于扩张连接与扩张负脱钩状态。北京在2010—2012年、2012—2015年、2015—2017年三个时间段的脱钩系数分别为-0.39、-0.23、-0.56,呈现出明显的强脱钩状态,也是唯一在三个时间段内呈现强脱钩状态的地区。碳排放量增速较高的黄河中下游地区、西南地区和西北地区脱钩态势逐渐转好,但仍有较大的提升空间。沿海地区脱钩情况最为理想,其中北部沿海地区最为明显。从消费侧碳排放的角度来看,消费侧省份集中于强脱钩、弱脱钩及扩张负脱钩状态,各个省份碳排放与经济增长的脱钩情况和生产侧相比较为分化。与生产侧不同,北京在消费侧各个阶段的脱钩情况不断变化,消费侧碳排放量波动幅度较大,是2012—2015年全国唯一处于扩张负脱钩状态的地区。和生产侧相同,2012—2015年是全国总体脱钩状态最优的阶段,仅有4省份处于扩张连接或扩张负脱钩状态。此外,消费侧处于扩张负脱钩的省份数量远多于生产侧,其中黄河中下游地区和西北地区的大部分省份消费侧碳排放量增速超过同期其他地区。值得注意的是,东北地区的辽宁经济发展停滞,经济增长率低于全国其他地区,其脱钩状况的不断进步在一定程度上与经济停滞不前密切相关。相反,海南2012年消费侧碳排放量较2010年增长约一倍,西北地区的青海、宁夏、新疆在2015—2017年消费侧碳排放量增长幅度同样超过五成,使其处于扩张负脱钩阶段。

(三)生产侧与消费侧碳排放分解研究

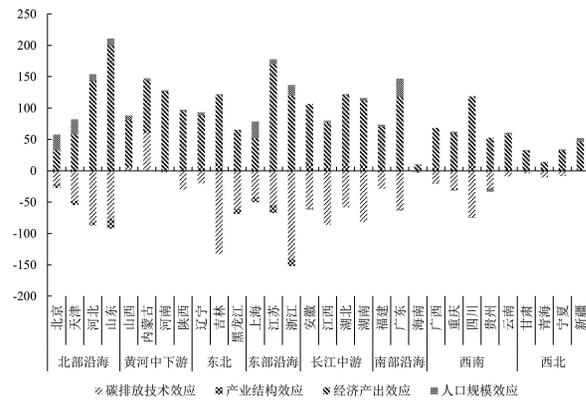
图3选取技术进步效应、产业结构效应、经济产出效应与人口规模效应四个方面,从工业发达程度、经济发展水平、人口规模、碳排放技术来展示生产侧与需求侧以及分区域碳排放分解结果。2007年,全国生产侧与消费侧碳排放量分别为68.21亿吨、54.94亿吨,而2010年全国生产侧与消

费侧碳排放量分别为85.97亿吨、69.23亿吨,双侧碳排放量均提升26%。从生产侧来看,技术进步效应使得碳排放量降低了15.34亿吨,而产业结构效应、经济产出效应与人口规模效应分别带来了0.18亿吨、30.94亿吨、1.98亿吨的碳排放量增长,表明碳减排技术水平与经济高速增长带来的影响是显著且完全相反的。分省份来看,四川、贵州、安徽的人口规模在该时间阶段内出现下降,导致人口规模效应为负。产业结构效应为负的地区主要集中于北部、东部、南部沿海地区,表明中国沿海地区的产业发展程度较高、产业结构较为发达。北部沿海地区的河北、山东以及东部沿海地区的江苏在2007—2010年GDP分别上升48%、49%、59%,3省份经济发展分别带来了2.20亿吨、2.77亿吨、2.35亿吨的碳排放量增长。从消费侧来看,黄河中下游地区能源较为丰富的4省份消费侧碳排放量为4.28亿吨,位居全国首位。产业结构效应对于碳排放量变化几乎没有影响。四川、贵州、安徽的人口下降抑制了消费侧碳排放增长。技术进步效应与经济产出效应对碳排放量变化的影响分别为-12.07亿吨、24.45亿吨,其中以山东、广东、江苏为代表的沿海地区经济发展增速较高,经济产出效应也较为显著。

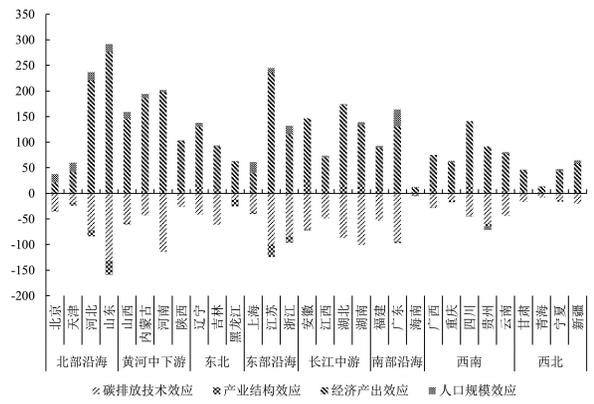
2010—2012年,2012年生产侧与消费侧碳排放量相比于2010年分别增长11.45亿吨、13.66亿吨,碳排放增量与增幅与上一时期变化不大。从生产侧来看,产业结构效应由促进效应转为抑制效应,使得碳排放量降低了1.09亿吨,显示出总体上中国产业结构的优化升级取得了阶段性进展。技术进步效应降低了12.68吨碳排放量,而经济产出效应提升了23.64吨碳排放量。具体来看,贵州产业结构带来的碳排量变化基本为0,表示该地区在此阶段产业结构改革出现停滞或改革成效不显著。值得注意的是,产业结构为负的地区由上一时期的沿海省份逐步扩张到西南地区、东北地区与西北地区,半数左右的省份产业优化改革取得了阶段性成效。在消费侧,经济增长带来的碳排放量增长值约为技术进步带来的碳排放量下降值的3倍,这一差值的扩大展示出此阶段碳排放技术的进步较为明显。技术进步效应为正的省份数量开始增多,由上一阶段的黄河中下游地区转为西北地区、西南地区以及长江中游地区。

2012—2015年,全国生产侧碳排放增量仅为0.89亿吨,仅为上两个阶段碳排放增量的5%与7.7%,同期消费侧碳排放变化量出现负值,较2007—2010年、2010—2012年阶段碳排放变化量出现巨大变化。具体来看,生产侧碳排放增量大幅下降的主要原因在于产业结构效应降低了7.43亿吨碳排放量,约为上一阶段1.09亿吨的7倍,体现出中国自2012年至2015年间在优化产业结构、着力构建现代产业发展新体系方面取得了重要进展。与此同时,消费侧产业结构效应也降低了4.27亿吨的碳排放量,为上一阶段0.67亿吨的6.37倍。从区域层面看,黄河中下游地区在此阶段生产侧与消费侧分别降低了6亿吨以及2.39亿吨的碳排放量,规模位居全国首位,其中内蒙古、河南生产侧碳排放技术进步显著,而山西生产侧产业结构效应显著,减少的碳排放量约为第二名的2倍,消费侧结果同理。该结果体现出传统产业比重偏大、能源工业集中、生态环境污染风险较高的黄河流域,特别是黄河中下游地区在新发展理念下逐步推进生态环境保护与经济社会发展之间的平衡关系,实现高质量协同发展。

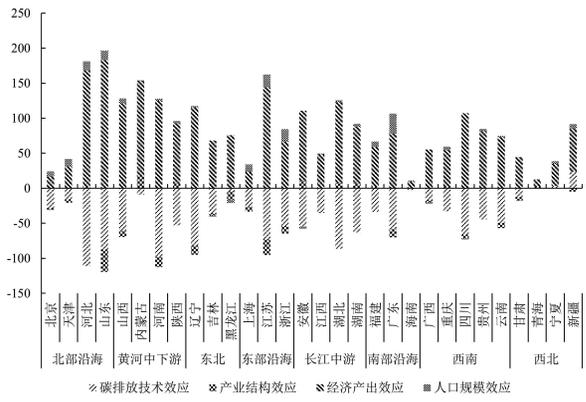
全国2017年生产侧与消费侧碳排放量相较于2015年分别提升3.40亿吨与4.05亿吨,与2012—2015年阶段相比,出现小幅反弹,但远低于第一阶段与第二阶段碳排放量增长水平。从人口规模来看,7省份人口在2015—2017年间出现下降,其中东北地区3省份均出现人口负增长,人口净流出趋势明显。与上一阶段相比,生产侧与消费侧技术进步效应与经济产出效应对碳排放量的影响均降低,但技术进步效应对碳排放量的抑制作用弱于经济产出效应对碳排放量的促进作用。北部沿海地区,以北京、天津、河北、山东为代表,在此阶段是全国唯一一个生产侧与消费侧碳排放量净负增长的地区,分别为-0.32亿吨、-0.47亿吨。宁夏、黑龙江是生产侧技术进步增加碳排放量的省份,其产业碳强度降低动力不足。此外,山西和西北地区的青海、宁夏生产侧产业结构效应为正,青海与宁夏消费侧产业结构效应为正,山西由上一阶段的产业结构碳减排量首位转为此阶段最末位,青海与宁夏由于产业发展较为薄弱,其任何时期的产业结构效应都不显著。



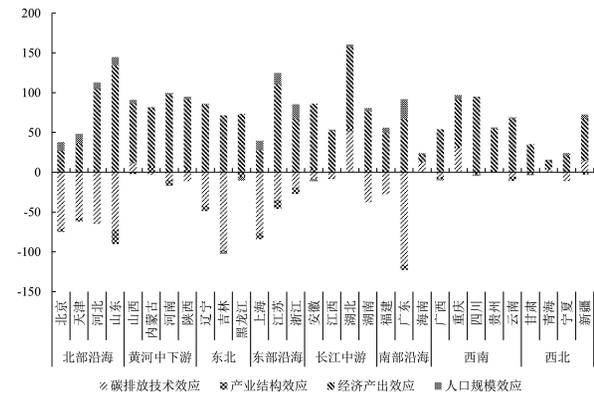
(a) 2007—2010年生产侧



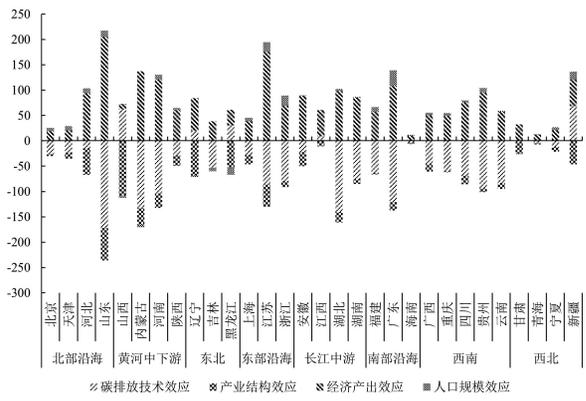
(b) 2007—2010年消费侧



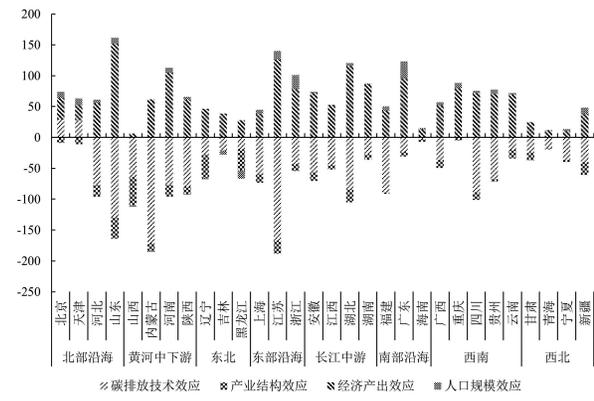
(c) 2010—2012年生产侧



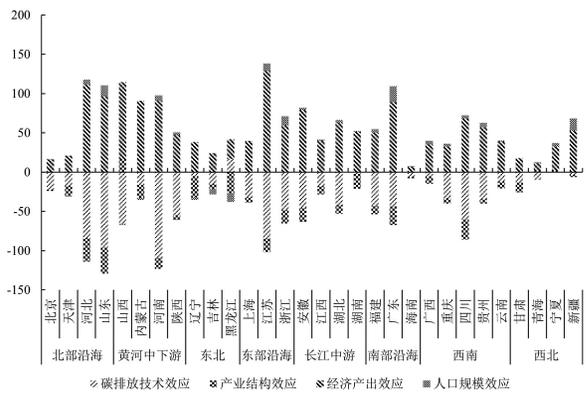
(d) 2010—2012年消费侧



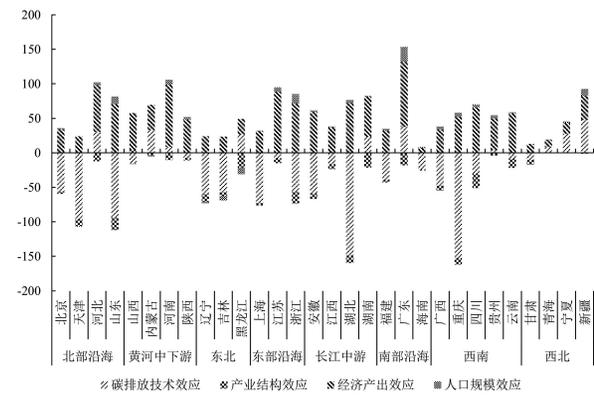
(e) 2012—2015年生产侧



(f) 2012—2015年消费侧



(g) 2015—2017年生产侧



(h) 2015—2017年消费侧

图3 各省份生产侧及消费侧碳排放变化量影响因素分解效应

资料来源:作者绘制。

四、主要结论与政策建议

2015年11月30日,巴黎气候大会上中国在“国家自主贡献”中提出,将于2030年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现,2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%—65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右。中国各省区市也相继提出了碳减排目标。总体来看,中国各省份的发展情况不一,结合投入产出分析、LMDI及Tapio脱钩模型,可以从生产及消费视角对中国不同区域经济增长与碳排放量脱钩关系以及碳排放量的影响因素进行测算。

(一)主要结论

总体来看,中国在研究时段内的生产侧碳排放量均高于消费侧,消费侧碳排放量增速高于生产侧,发展并不均衡。中国整体碳排放量与生产侧、消费侧碳排放量在五个时间节点内总体保持上升趋势,于2012—2015年保持平稳态势。2007—2017年,生产侧碳排放量超过消费侧碳排放量的省份数量维持在21个省份。西北地区碳排放量增速位居全国首位,黄河中下游地区碳排放量增长绝对值名列前茅,而东北地区碳排放量增速与增量均不显著。中国北部地区与黄河中下游传统能源产业和高污染、高耗能产业较为集中的区域,产业转型的成效不够显著。值得注意的是,北京市生产侧碳排放量远低于消费侧碳排放量,且比重远低于其他省份。

针对中国2007—2017年各省份生产侧与消费侧碳排放量脱钩情况,中国整体上呈现弱脱钩状态,省域层面同样主要呈现弱脱钩状态。2012—2015年是总体脱钩情况最优的时间段,半数左右的省份均处于强脱钩状态,2015—2017年次之。从区域层面看,生产侧与消费侧的黄河中下游地区、西北地区脱钩状况劣于全国其他地区,且并未随着时间趋势出现好转态势。具体到省份,北京是唯一在生产侧与消费侧碳排放量保持大幅下滑的地区,强脱钩态势明显。东北地区作为老工业基地,近年来经济发展停滞不前,尤其是2015—2017年,辽宁省经济几乎没有增长,使得脱钩状态远远劣于其他省份。海南省虽双侧碳排放量波动较为明显,但总体保持稳中向好态势。

对于不同时间段内碳排放变化量的影响因素,本文从碳排放技术进步、产业结构、经济发展水平与人口规模四个维度进行研究。2007—2010年,生产侧与消费侧碳排放量均提升26%,在四个阶段中增幅最大。生产侧产业结构为负的地区集中于北部、东部和南部沿海地区,沿海地区产业较为发达。黄河中下游地区消费侧碳排放量远超其他地区,而以广东、江苏、山东为代表的沿海地区经济产出效应较为显著。2010—2012年,生产侧产业结构效应由正转负,负效应省份范围由沿海地区扩张到西南地区、东北地区与西北地区,显示中国整体产业结构优化取得一定成效。消费侧碳排放技术进步幅度较为显著,效应为正的省份由黄河中下游地区转为西北地区、西南地区与长江中游地区,东北地区人口下降幅度明显。2012—2015年,随着党的十八大提出优化产业结构的要求,全国碳排放总量、生产侧与消费侧碳排放量均维持稳定,主要体现在产业结构升级所降低的碳排放量大幅提高,其中高污染产业集中的黄河中下游地区碳减排规模位居全国首位,逐步实现经济高质量发展与生态环境保护之间的平衡。2015—2017年,双侧碳排放增量小幅回弹,但远低于2007—2010年与2010—2012年增量,人口净流出的省份集中于中国北部,尤其是东北地区,人口下降趋势明显。北部沿海地区,包括京津冀地区以及邻近的山东,是全国唯一双侧碳排放均负增长的地区,该地区产业结构优化与升级取得了明显成效。无论是生产侧宁夏与黑龙江的碳排放技术进步、山西和西北地区的青海以及宁夏生产侧产业结构,还是消费侧山西与产业薄弱的青海、宁夏产业结构,均具有较大的优化空间。

(二)政策建议

现有的减排措施更多地侧重生产端的减排效率提升,而如何实现生产端及消费端省份的低碳协同发展具有重要研究意义。与此同时,经济发展与碳排放的相对关系呈现了前所未有的不稳定性,为整体碳排放脱钩趋势分析增加了较大的不确定性。针对上述情况,本文提出政策建议如下。

1. 优化产业结构,推进产业供给侧结构性改革

目前,传统的粗放式产业与高污染、高耗能密切相关,对传统产业进行改造升级,加速新旧动能转换,对于落后的、低于行业平均水平的产能、工艺、产品,有助于提高发展质量和效益。要以政策

激励和约束相结合的方式完善政策措施,坚持控制增量与做优存量双措并举,支持企业通过产能等量或减量置换建设能耗低、排放低、生产工艺技术装备先进的项目,形成淘汰落后与发展先进的良性互动机制。加速培育发展节能环保、信息、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等新兴产业。对于处于经济结构深度调整期的中国,加强产业关键技术和前沿技术研究,建立产业创新支撑体系,推进重大科技成果产业化和产业集聚发展,推动现代化产业加速向数字化、网络化、智能化发展。

2.合理规划产业布局,促进区域协调发展

针对东、中、西部地区经济社会发展水平的不平衡性,要合理优化产业布局,发挥各个地区自然环境与地理区位优势,形成东中西相互促进、优势互补、共同发展的新格局具有重要意义。东部地区率先实现经济结构优化与增长方式转变,重点发展先进制造业、高技术产业与服务业,承接高技术产业和现代服务业转移。中部地区逐步改善产业结构,提高产业层次,加强基础设施建设,将钢铁、化工、有色、建材等优势产业进行供给侧结构性调整,并引进先进装备制造业与高技术产业。东北老工业基地加快产业结构调整与国有企业改造,对资源枯竭型城市开展经济转型试点,加强市场体系建设及其与周边地区的经济、技术合作,促进老工业基地振兴。西部地区加强生态环境保护,发展特色产业,将资源优势转为产业优势,并加强清洁能源、优势矿产资源开发及加工,增强自身发展能力。

3.推动绿色金融与碳金融有效融入新时期低碳发展

设立激励性政策框架,通过税收优惠、补贴和奖励计划,以鼓励企业和个人投资于绿色和碳减排项目,促使更多资金流向低碳领域。强化信息披露,确保企业和金融机构能够向公众和投资者报告其环境和碳排放情况。制定统一的绿色金融标准,明确何种项目符合绿色标准。建立风险管理体系,由政府 and 金融机构联合评估绿色碳减排项目相关的风险,并提供相应的风险保障和解决方案。强化监管与执法,打击虚假宣传和绿色洗钱等违法行为,确保市场健康有序发展。促进国际合作,通过政府和国际组织的紧密合作,分享最佳实践与经验,共同推动绿色金融和碳金融的发展,营造有利于推动经济繁荣与环境保护协调可持续发展的新局面。

参考文献

- [1]蔡博峰,曹丽斌,雷宇,等.中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J].中国人口·资源与环境,2021,31(1).
- [2]Guan Dabo, Klaus Hubacek, Christopher L, et al. The Drivers of Chinese CO₂ Emissions from 1980 to 2030[J]. Global Environmental Change, 2008, 18: 626—634.
- [3]韩梦瑶,姚秋蕙,劳浚铭,等.中国省域碳排放的国内外转移研究:基于嵌套网络视角[J].中国科学:地球科学, 2020(6).
- [4]郑秋红,巢清尘,吴灿,等.气候变化研究的中国知识贡献及其影响局限[J].中国人口·资源与环境,2020(3).
- [5]谢海生,庄贵阳.碳锁定效应的内涵、作用机制与解锁路径研究[J].生态经济,2016(1).
- [6]Zheng H, Zhang Z, Wei W, et al. Regional Determinants of China's Consumption-based Emissions in the Economic Transition [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(7).
- [7]周灵.基于Tapio模型的我国低碳经济发展研究[J].经济问题探索,2019(6).
- [8]Steininger K, Lininger C, Droege S, et al. Justice and Cost Effectiveness of Consumption-Based Versus Production-Based Approaches in the Case of Unilateral Climate Policies[J]. Global Environmental Change, 2014, 24: 75—87.
- [9]颜艳梅,王铮,吴乐英,等.中国碳排放强度影响因素对区域差异的作用分析[J].环境科学学报,2016(9).
- [10]梁中.“产业碳锁定”的内涵、成因及其“解锁”政策:基于中国欠发达区域情景视角[J].科学研究,2017(1).
- [11]张诗卉,李明煜,王灿,等.中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J].中国人口·资源与环境,2021(9).
- [12]郭朝先.中国碳排放因素分解:基于LMDI分解技术[J].中国人口·资源与环境,2010(12).
- [13]Ang B W, Liu F L. A New Energy Eecomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation[J]. Energy, 2001, 26(6).
- [14]韩岳峰,张龙.中国农业碳排放变化因素分解研究:基于能源消耗与贸易角度的LMDI分解法[J].当代经济研究,2013(4).
- [15]Wang W, Liu X, Zhang M, et al. Using a New Generalized LMDI(Logarithmic Mean Divisia Index) Method to Analyze China's Energy Consumption[J].Energy, 2014, 67: 617—622.
- [16]Gonzalez P F, Landajo M, Presno M J. Multilevel LMDI Decomposition of Changes in Aggregate Energy Consumption. A Cross Country Analysis in the EU-27[J]. Energy Policy, 2014, 68: 576—584.
- [17]徐国泉,蔡珠,封士伟.基于二阶段LMDI模型的碳排放时空差异及影响因素研究:以江苏省为例[J].软科学,

- 2021(10).
- [18]胡剑波,高鹏,张伟.中国对外贸易增长与隐含碳排放脱钩关系研究[J].管理世界,2017(10).
- [19]齐亚伟.中国区域经济增长、碳排放的脱钩效应与重心转移轨迹分析[J].现代财经(天津财经大学学报),2018(5).
- [20]周杰琦,汪同三.地区经济增长与碳强度差异的收敛性及其机理:基于中国省际面板数据的实证分析[J].社会科学学报,2014(5).
- [21]齐静,陈彬.城市工业部门脱钩分析[J].中国人口·资源与环境,2012(8).
- [22]刘博文,张贤,杨琳.基于LMDI的区域产业碳排放脱钩努力研究[J].中国人口·资源与环境,2018(4).
- [23]杨英明,孙健东.世界主要国家能源消费碳排放脱钩及驱动因素研究[J].煤炭工程,2019,51(7).
- [24]潘竞虎,张永年.中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J].地理学报,2021(1).
- [25]刘红光,王云平,季璐.中国区域间产业转移特征、机理与模式研究[J].经济地理,2014(1).
- [26]Mi Z, Meng J, Guan D, et al. Pattern Changes in Determinants of Chinese Emissions [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(7).
- [27]Peters G P, Hertwich E G. CO₂ Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy [J]. Environmental Science & Technology: ES&T, 2008(5).
- [28]Caro D, Bastianoni S, Borghesi S, et al. On the Feasibility of A Consumer-Based Allocation Method in National GHG Inventories [J]. Ecological Indicators, 2014, 36:640—643.
- [29]Chen Z M, Ohshita S, Lenzen M, et al. Consumption-Based Greenhouse Gas Emissions Accounting with Capital Stock Change Highlights Dynamics of Fast-Developing Countries[J]. Nature Communications, 2018, 9(1).
- [30]Davis S J, Caldeira K. Consumption-Based Accounting of CO₂ Emissions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(12).
- [31]刘卫东,唐志鹏,韩梦瑶,等.2012年中国31省区市区域间投入产出表[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [32]Wang S, Wang J, Fang C, et al. Inequalities in Carbon Intensity in China: A Multi-Scalar and Multi-Mechanism Analysis [J]. Applied Energy, 2019, 254A (Nov.15).
- [33]Han M, Lao J, Yao Q, et al. Carbon Inequality and Economic Development Across the Belt and Road Regions [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262.
- [34]Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. Multi-Regional Input-Output Model for Regional Energy Requirements and CO₂ Emissions in China[J]. Energy Policy, 2007, 35(3).
- [35]Ang B W. The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7).

Decoupling and Decomposition of China's Provincial Carbon Emissions from Production- and Consumption-Based Perspectives

Han Mengyao Zhang Ze Liao Maolin

Abstract: Along with China's increasingly important responsibility in the field of carbon emission reduction, a comprehensive assessment of the decomposition and decoupling statuses of carbon emissions by province through integrating carbon emissions and economic development is crucial to the study of China's carbon emissions. Using input-output analysis and combining the Tapio decoupling model with the Kaya identity and the LMDI decomposition method, we analyze the decomposition effect of carbon emissions and its decoupling relationship with economic growth under the dual perspectives of production and consumption in China's provinces during the period of 2007—2017, and explore the characteristics of carbon emissions and the evolution trend among different provinces, which show that: except for the 2012—2015 period when carbon emissions remained stable, China's carbon emissions showed an increasing trend during the 2007—2017 period. China's carbon emissions are weakly decoupled from economic growth in general. The growth of carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yellow River is relatively high, mainly due to the backward industrial structures. The effects of technological upgrade and industrial structure inhibit carbon emission, while the effects of economic output and population size promote carbon emission.

Key Words: LMDI; Carbon Intensity; Decoupling Elasticity; Input-Output Analysis

(责任编辑:江 夏)