

引用格式: 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 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.] DOI: 10.18402/resci.2024.05.03

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

杨顺顺

(湖南省社会科学院(湖南省人民政府发展研究中心)经济研究所, 长沙 410003)

摘要:【目的】技术进步和需求结构的优化调整使产业部门低碳转型具备结构性动因,通过分解影响碳排放增长各类因素,从而分析这一变化规律将为宏观减排路线谋划提供理论支撑。【方法】本文耦合结构分解分析(SDA)和对数平均权重 Divisia 指数法(LMDI)两类经典分解法,研制2005—2020年可比价投入产出表,对产业部门整体和细分行业部门碳排放增长的驱动因素进行了识别和分析。【结果】①2005—2020年,产业部门碳排放总量由48.67亿t增长至106.77亿t,但5年平均增速已下降至2%以下;需求侧视角下,高碳部门向产业链下游延伸。②涉及技术进步的因素中,能源强度和生产结构效应的负贡献强于能源结构效应;涉及需求结构的因素中,投资扩张效应的正贡献始终强于消费拉动和出口变动效应;“十三五”以来,消费拉动效应的增碳和生产结构效应的减碳作用提升显著,部门间技术进步开始主导碳减排效应。③“十三五”时期,资源加工工业、电力热力燃气和水的生产和供应业、服务业整体处碳增长阶段,前者 and 后者分别主要受投资扩张和消费拉动效应影响;采掘业、轻纺工业、机械及电子工业均由历史上的碳增长转向碳削减阶段,前者 and 后者分别主要受进口替代和生产结构效应影响。【结论】2015年后,产业部门碳排放各类驱动因素的效力变化明显,促进最终需求结构和能源结构调整、产业链协同减排以及涉碳市场优化是未来产业部门碳减排的关注重点。

关键词: 产业部门碳排放; 结构分解分析; LMDI模型; 驱动因素; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.05.03

1 引言

统筹产业结构调整和应对气候变化,协同推进降碳、减污、扩绿、增长是党的二十大报告中对推动绿色发展、推进“双碳”战略提出的具体要求。近十几年来,中国经济已由追求总量的高速增长阶段逐步转向高质量发展的新阶段,一方面过去经济增长长期依赖要素、投资驱动的路径锁定效应尚未完全移除,另一方面产业转型升级和资源能源利用效率提升明显加快,中国碳排放开始步入总量趋于平稳、减排潜力收窄的“碳达峰”前期,碳减排驱动因素由能源效率主导向结构升级过渡,规制手段由政府管控为主向市场调节转变。考虑到产业部门能源消费和碳排放量占全国总量的90%左右,讨论中国产业部门

碳排放增长结构性动因变化及趋势,进而为探索新阶段下中国低碳发展的产业调整路径和减排战略创新提供理论依据,是极具现实意义的重要命题。

碳排放驱动因素的研究一直属于学界跟踪的热点问题,目前主要的分解技术包括指数分解法(IDA)、结构分解分析法(SDA)和非参数距离函数分解法等,报道中又以前两者更为常见。IDA模型历史悠久、最为成熟,分为类似于单因素敏感性分析的Laspeyres指数法(拉氏指数)和所有因素都进行微分操作的Divisia指数法(迪氏指数),其中对数平均权重 Divisia 指数法(LMDI)因同时解决了分解中的残差和零值问题而得到广泛应用。相较于IDA模型,SDA模型的显著区别在于其从需求侧入手,

收稿日期: 2023-07-12; 修订日期: 2023-10-10

基金项目: 国家社会科学基金项目(22BJL136)。

作者简介: 杨顺顺,男,湖北宜昌人,博士,研究员,主要研究方向为低碳经济与绿色发展、农村环境管理。E-mail: yangssmail@foxmail.com

<http://www.resci.cn>

以投入产出模型为核心进行因素分解,因此可进一步分析产业链关联与隐含碳转移^[1,2]、最终需求^[3](消费、投资、进出口)结构对碳排放的影响。比较而言,SDA模型天然适配结构性分析,其可依托生产结构深入剖析能源结构、能源强度等涉及技术进步的效应,并加之从最终需求层面分析产业部门碳排放的结构性归因,较LMDI模型的讨论范畴更为复杂化和精细化^[1],与本文的技术需求更为吻合。

目前,采用SDA模型实施能源消费或碳排放驱动因素分析的研究呈现两方面特征:一方面,研究尺度和领域进一步细化到区域、省级和居民消费层面。与以往更多关注国际贸易结构、国家间隐含碳流动^[4]以及全国尺度的分解分析^[5]相比,不少研究基于多区域或特定区域投入产出表以中国跨省域^[6]以及长江经济带^[7]、广东^[8]等热点区域为研究对象开展探索,试图寻找各类驱动因素的空间变化特征,有的则从产业分析为重点转向对居民碳排放的分析^[9,10]。另一方面,研究方法开始重视与其他经典方法实现集成应用。如罗芳等^[7]将SDA模型引入Tapio脱钩模型,识别了碳排放与经济增长脱钩状态的影响因素;潘晨等^[11]采用拓展的Kaya恒等式改造了SDA模型常用的目标分解框架;张炎治等^[1]、张聪等^[8]均将SDA模型与结构路径分析(SPA)相结合,辨析不同生产阶段的主导影响因素。此外,少数研究尝试从投入产出表的列方向出发^[12],按收益者原则实施SDA分解,但由于中国投入产出表中增加值的4类分项数据缺乏价格指数,长期跨期分解结论的可靠性会受到影响。

值得指出的是,虽然近年来SDA模型得到了较快发展,但应用研究中常存在全国层面各分解效应未同步归因至行业层面和各类最终需求层面的问题^[13],而分解技术中常用的保留交叉项法、中点权分解法、两极分解法和加权平均分解法4类算法多不能实现完全分解,且部分算法间结果差异较大^[14]是模型的技术瓶颈。考虑到LMDI和SDA模型分别关注从供给侧和需求侧进行影响因素分解,视角不同、各有优势,近年来,对碳排放影响因素同步实施这两类方法分解的报道逐渐增多,但多为使用两套方法分别进行分解再进行对比分析^[15-17];仅少数研究尝试将LMDI分解思路引入SDA模型,但倾向于构建模型间软连接,利用SDA模型计算部门隐含

碳,再对隐含碳数据进行常规的LMDI操作^[18],在实现两类模型的嵌套应用,特别是借助LMDI模型能实现完全分解的技术特点,从而克服SDA模型的余项偏差问题方面的探索上仍有改善空间。

本文采用SDA的分解框架,从需求侧视角解析2005—2020年中国产业部门碳排放增长(考虑到能耗碳排放占产业部门碳排放的绝大部分份额且具备相对权威的核算方法,本文仅讨论能耗碳排放)的结构性动因,在此框架下嵌入LMDI模型的分解技术,从而实现对碳排放增量的完全分解,并将碳排放增长的驱动因素分解为涉及技术进步的3类影响效应和涉及需求结构的5类影响效应,对产业部门整体和细分行业部门碳排放增长实施结构分解和详细讨论。本文试图厘清经济增长周期切换背景下中国产业部门碳排放的结构性特征、归因和政策启示,以期为制定合理的宏观减排路线提供理论基础,同时也具备一定的方法探索价值。

2 模型构建和数据处理

2.1 混合型投入产出表的SDA分解框架

常规的投入产出表中,各产业部门总产品、最终产品存在如下平衡关系:

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = [I - A]^{-1} Y \\ &= \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & b_{jj} & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_1 \\ \vdots \\ o_n \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: X 表示总产品矩阵; x_i 表示部门*i*的总产品量; n 表示产业部门的数量; I 表示*n*阶单位矩阵; A 表示直接消耗系数矩阵; $[I-A]^{-1}$ 表示Leontief逆矩阵,其元素 b_{ij} 为部门*j*每增加一单位最终需求所需要的部门*i*提供的产品量; Y 表示最终需求矩阵,可进一步写成不同矩阵的加减形式,其中元素 q_i 、 k_i 、 s_i 、 p_i 和 o_i 分别为部门*i*的最终消费、资本形成、出口额、进口额和其他项的量。

产业部门碳排放主要来源于能源消费,本文中部门能源消费量定义为该部门终端能源消费和能源加工转换中的净损失量之和^[19],而部门直接碳排放即为终端能源燃用(即能源消费中扣除用作原料、材料的部分)和能源加工转换过程的碳排放之和。由于直接碳排放会以隐含碳的形式转移至其他部门,部门完全碳排放被定义为部门最终需求所

2024年5月

对应的直接和引致其他部门碳排放之和。

需要特别指出的是,对于部门终端能耗中电力热力消费所造成的碳排放,不少研究中将火力发电和供热过程的碳排放按电力热力最终消费比例分摊计入各部门直接碳排放,但分摊算法与完全碳排放所要表达的意义存在差异,电力热力应属于电力热力的生产和供应业对各产业部门提供的产品和服务,其生产电力和热力时产生的碳排放全部应计入电力热力的生产和供应业的直接碳排放,再通过完全碳排放的计算方式纳入各部门,而各部门在终端消费中使用电力和热力的直接碳排放应计为0。

按上述思路,纳入各产业部门能源消费量和碳排放因子,即可构造出“价值-实物”混合型投入产出表。部门直接碳排放和完全碳排放可表示为:

$$\mathbf{D} = [d_1, \dots, d_n] = \mathbf{FRE} = [f_1, \dots, f_m]$$

$$\begin{bmatrix} r_{11}(1 - \eta_{11}) & \dots & r_{1n}(1 - \eta_{1n}) \\ \vdots & r_{ij}(1 - \eta_{ij}) & \vdots \\ r_{m1}(1 - \eta_{m1}) & \dots & r_{mn}(1 - \eta_{mn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{e_1}{x_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \frac{e_i}{x_i} & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{e_n}{x_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [c_1, \dots, c_n] = \mathbf{FRE} [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} (\mathbf{Q} + \mathbf{K} + \mathbf{S} - \mathbf{P} + \mathbf{O}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{D} 表示直接碳排放矩阵; d_j 为部门 j 的直接碳排放量; \mathbf{F} 表示碳排放因子矩阵,其元素 f_h 为第 h 类能源的碳排放因子,数值主要参考《国家温室气体排放指南清单》; m 表示能源种类的数量; \mathbf{R} 表示能源燃用结构矩阵,其元素的组成部分 r_{hj} 代表部门 j 消费的第 h 类能源占其总能源消费量的比例, η_{hj} 代表部门 j 消费的第 h 类能源中未用于燃用的比例; \mathbf{E} 表示由总产品定义的能源强度矩阵,其主对角线元素是部门 i 能源消费量 e_i 与总产品量 x_i 的比值,即单位总产品能耗; \mathbf{C} 表示完全碳排放矩阵; c_j 为部门 j 的完全碳排放量; \mathbf{Q} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{P} 和 \mathbf{O} 是最终需求矩阵 \mathbf{Y} 的组成部分,分别表示最终消费矩阵、资本形成矩阵、出口额矩阵、进口额矩阵和其他项矩阵。

特别说明,除上述定义讨论外,由于本文侧重于从需求侧讨论,为表述简洁,对于由需求侧定义的完全碳排放,下文均简称为碳排放,直接碳排放仍用全称表述。

2.2 SDA-LMDI耦合分解模型

对式(2)按SDA模型分解框架,第0至 t 期碳排放增量可表示为:

$$\Delta \mathbf{C} = \mathbf{C}^t - \mathbf{C}^0 = \mathbf{F}^t \mathbf{R}^t \mathbf{E}^t [\mathbf{I} - \mathbf{A}^t]^{-1} (\mathbf{Q}^t + \mathbf{K}^t + \mathbf{S}^t - \mathbf{P}^t + \mathbf{O}^t) - \mathbf{F}^0 \mathbf{R}^0 \mathbf{E}^0 [\mathbf{I} - \mathbf{A}^0]^{-1} (\mathbf{Q}^0 + \mathbf{K}^0 + \mathbf{S}^0 - \mathbf{P}^0 + \mathbf{O}^0) \quad (3)$$

为克服SDA模型的余项问题,本文引入LMDI模型进行分解操作,以部门 j 为例:

$$\begin{aligned} \Delta C_j^{t-0} &= \Delta C_j^t - \Delta C_j^0 = \Delta C_{jq_j}^{t-0} + \Delta C_{jk_j}^{t-0} + \Delta C_{js_j}^{t-0} \\ &\quad - \Delta C_{jp_j}^{t-0} + \Delta C_{jo_j}^{t-0} \\ \Delta C_{jq_j}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t q_j^t - \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 q_j^0 \\ \Delta C_{jk_j}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t k_j^t - \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 k_j^0 \\ \Delta C_{js_j}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t s_j^t - \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 s_j^0 \\ \Delta C_{jp_j}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t p_j^t - \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 p_j^0 \\ \Delta C_{jo_j}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t o_j^t - \sum_{i=1}^n \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 o_j^0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ΔC_j^{t-0} 为部门 j 第0至 t 期间碳排放的增量; $\Delta C_{jq_j}^{t-0}$ 、 $\Delta C_{jk_j}^{t-0}$ 、 $\Delta C_{js_j}^{t-0}$ 、 $\Delta C_{jp_j}^{t-0}$ 和 $\Delta C_{jo_j}^{t-0}$ 分别代表将 ΔC_j^{t-0} 按最终需求先分解为受最终消费、资本形成、出口、进口和其他项影响的量;碳排放因子矩阵 \mathbf{F} 被视为固定值,不随时间变化; \mathbf{R}_i 是由能源燃用结构矩阵 \mathbf{R} 中抽出的第 i 列所构成的列向量,即部门 i 消费的各类能源的比例(且已扣除非燃用部分),则 \mathbf{FR}_i 经矩阵运算后为一个数值,含义是部门 i 按各类能耗占比换算的综合碳排放因子; E_i 为能源强度矩阵 \mathbf{E} 的第 i 行主对角线元素 e_i/x_i ,代表部门 i 按总产品定义的能源强度。则可对式(4)中各类最终需求引发的碳排放增量进一步分解,以 $\Delta C_{jq_j}^{t-0}$ 为例:

$$\begin{aligned} \Delta C_{jq_j}^{t-0} &= \sum_{i=0}^n w_{iq_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{\mathbf{FR}_i^t}{\mathbf{FR}_i^0} + \sum_{i=0}^n w_{iq_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{E_i^t}{E_i^0} \\ &\quad + \sum_{i=0}^n w_{iq_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{b_{ij}^t}{b_{ij}^0} + \sum_{i=0}^n w_{iq_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{q_j^t}{q_j^0} \\ w_{iq_j}^{t-0} &= \frac{\mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t q_j^t - \mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 q_j^0}{\ln (\mathbf{FR}_i^t E_i^t b_{ij}^t q_j^t) - \ln (\mathbf{FR}_i^0 E_i^0 b_{ij}^0 q_j^0)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $w_{iq_j}^{t-0}$ 为参考LMDI模型设计的最终消费相关的权重项。对 $\Delta C_{jq_j}^{t-0}$ 的分解表示部门 j 最终消费相关的碳排放,又可分解为受能源结构、能源强度、生产结构和最终消费自身变化的影响。

上述分解方法部分参考了文献[20],但对分解式中的行列关系进行了调整,以更符合从需求侧出发的逻辑思路。此外,中国投入产出表中极少数部门最终需求的部分类别可能会出现零值或负值,无法使用对数处理,这是引入LMDI技术的瓶颈问题,这类特殊情况在文献[20]中未给予回应。零值问题

可用分析极限策略解决,即将零值替换为 10^{-10} 到 10^{-20} 之间的极小数^[13]。针对负值问题,Ang等^[21]将其划分为3种类型分别处理,即第0至 t 期若相应因素均为负值,则根据对数减法法则改写 $w_{iq_j}^{t-0}$ 的分母部分;若相应因素从负值(或零值)转变为零值(或负值),则将零值改写为负极小数使负值变号;若相应因素从负值(或正值)转变为正值(或负值),则加入中间点mid并结合正负极小数,再分为两阶段处理。李虹等^[13]参考Ang等^[21]的研究给出了负值的处理策略和改进方案。本文考虑到负值出现情况少且绝对值小,依据LMDI模型的推导过程和分析极限策略,可对分解式中存在负值的变量先取绝对值再取对数(但非取对数时不可取绝对值)。与Ang等^[21]的研究相比,这种处理方法与其前两种类型的处理方法等效,与第3种类型相比不会导致所有的碳排放增量贡献全部分配给出现负值的因素,分解结果更为平衡,且可证明恒等式依然成立。按照式(5),可类似得到 ΔC_{jR}^{t-0} 、 ΔC_{jE}^{t-0} 、 ΔC_{jB}^{t-0} 和 ΔC_{jO}^{t-0} 的分解式和相应权重项,继而得到影响部门 j 碳排放增长的各项效应:

$$\begin{aligned}\Delta C_{jR}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n (w_{iq_j}^{t-0} + w_{ik_j}^{t-0} + w_{is_j}^{t-0} - w_{ip_j}^{t-0} + w_{io_j}^{t-0}) \cdot \ln \frac{FR_i^t}{FR_i^0} \\ \Delta C_{jE}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n (w_{iq_j}^{t-0} + w_{ik_j}^{t-0} + w_{is_j}^{t-0} - w_{ip_j}^{t-0} + w_{io_j}^{t-0}) \cdot \ln \frac{E_i^t}{E_i^0} \\ \Delta C_{jB}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n (w_{iq_j}^{t-0} + w_{ik_j}^{t-0} + w_{is_j}^{t-0} - w_{ip_j}^{t-0} + w_{io_j}^{t-0}) \cdot \ln \frac{b_{ij}^t}{b_{ij}^0} \\ \Delta C_{jQ}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n w_{iq_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{q_j^t}{q_j^0}; \Delta C_{jK}^{t-0} = \sum_{i=1}^n w_{ik_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{k_j^t}{k_j^0} \\ \Delta C_{jS}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n w_{is_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{s_j^t}{s_j^0}; \Delta C_{jP}^{t-0} = \sum_{i=1}^n w_{ip_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{p_j^t}{p_j^0} \\ \Delta C_{jO}^{t-0} &= \sum_{i=1}^n w_{io_j}^{t-0} \cdot \ln \frac{o_j^t}{o_j^0}\end{aligned}\quad (6)$$

式中: ΔC_{jR}^{t-0} 、 ΔC_{jE}^{t-0} 和 ΔC_{jB}^{t-0} 分别为将部门 j 第0至 t 期碳排放增量分解后,其中受能源结构效应、能源强度效应和生产结构效应(反映产业部门间经济技术联系)影响的量。这3类效应都可以反映技术进步对部门碳排放的影响,被本文归类为涉及技术进步的因素,其中能源结构效应更受制于能源供应部门,能源强度效应更为关注部门内技术进步的影响,而生产结构效应则可以反映产业链技术进步的

影响。 ΔC_{jQ}^{t-0} 、 ΔC_{jK}^{t-0} 、 ΔC_{jS}^{t-0} 、 ΔC_{jP}^{t-0} 和 ΔC_{jO}^{t-0} 分别为将部门 j 第0至 t 期碳排放增量分解后,其中受消费拉动效应、投资扩张效应、出口变动效应、进口替代效应和其他效应影响的量,这5类效应都与最终需求紧密相关,被本文归类为涉及需求结构的因素。 $w_{ik_j}^{t-0}$ 、 $w_{is_j}^{t-0}$ 、 $w_{ip_j}^{t-0}$ 、 $w_{io_j}^{t-0}$ 分别为资本形成、出口、进口和其他项相关的权重项,计算过程可参考 $w_{iq_j}^{t-0}$ 的处理方式。

2.3 数据来源、投入产出表的归并及可比价处理

本文数据来源于2005年、2010年、2015年和2020年投入产出表及对应的《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》。由于投入产出表和能源平衡表报告部门不一致,需要对部门进行归并。其中,能源平衡表分类细于投入产出表的,对能源平衡表涉及的部门能耗按投入产出表部门分类进行汇总;能源平衡表分类粗于投入产出表的,将投入产出表涉及的部门按照能源平衡表部门分类进行行列合并。由此最终划分了28个产业部门和27种能源类型^①。

为剔除价格影响,需要将历年投入产出表换算为可比价,考虑到国家碳强度减排方案以2005年为对标节点,本文参考刘起运等^[22]提出的可比价换算方法,利用分类价格指数缩减法将各年度投入产出表数据调整为2005年不变价。各产业部门行方向上除进出口外采用同一价格指数,其中农林牧渔业采用农产品生产者价格指数,工业部门采用工业生产者出厂价格指数,建筑业采用建筑安装工程价格指数,第三产业采用相应的增加值平减指数,进出口分别采用进口、出口商品价格指数;列方向上,目前尚未编制增加值构成项价格指数,且大多数部门缺乏增加值指数数据,可先通过行列平衡关系估计各部门可比价增加值总量,再对农林牧渔业、建筑业、交通运输仓储业(含邮电通讯)、批发零售和住宿餐饮业4个可查询定基GDP指数的部门对列方向增加值进行修正,将由此产生的行列误差计入行方向其他项。

3 结果与分析

3.1 中国产业部门碳排放的总体特征

2005年以来,中国产业部门碳排放总量呈现增

① 能源种类分为煤、煤矸石、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、天然气、液化天然气、热力、电力、其他能源共计27类。按前文所述,终端消费中的电力热力碳排放系数按零计算。

2024年5月

量持续上行,但增速不断收窄的趋势。2005—2020年,中国产业部门碳排放总量由48.67亿t增长至106.77亿t(单位为tCO₂当量,下文简用t),总量增长一倍有余;但5年碳排放年均增速由2005—2010年的8.61%下降至2010—2015年的5.62%,直至2015—2020年的略低于2%,产业部门碳排放已逐步达到碳达峰前的平稳阶段。

碳排放强度方面,以增加值计量,按2005年不变价(下同),2020年中国产业部门碳排放强度为1.62 t/万元,较2005年累计下降了37.91%,在不计城乡生活能耗碳排放和其他非能耗碳排放强度降幅的情况下,基本完成了2020年碳排放强度较2015年累计下降40%的减排目标。以总产品计量,2020年中国产业部门直接碳排放强度为0.57 t/万元,较2005年累计下降了35.43%,其累计降幅相对偏低,说明2005—2020年中国产业部门增加值率总体上升,生产过程中消耗降低,产品附加值和产业盈利能力提升。

从供给侧方向看,中国产业部门直接碳排放高度集中于电力部门、资源加工工业和交通物流业。2020年,部门直接碳排放量最高的5个部门分别为电力热力的生产和供应业、金属冶炼和压延加工业、交通运输仓储业(含邮电通讯)、化学工业,以及非金属矿物制品业,与2005的情况类似(部门不变但顺序不同)。这5个部门的直接碳排放量占全国总量的比例由2005年的83.91%上升至2020年的90.61%,

是碳排放总量和强度“双控”的主要目标部门。

从需求侧方向看,中国产业部门碳排放来源部门向产业链下游延伸,主要集中于建筑业、服务业和机械制造业。2020年,部门碳排放量最高的5个部门分别为建筑业、其他服务业^②、交通运输仓储业(含邮电通讯)、通用专业设备制造业,以及电力热力的生产和供应业。排名前5位部门的碳排放量占全国总量的比例由2005年的66.70%上升至76.46%,即无论从供给侧还是需求侧看,中国产业部门碳排放来源部门都呈现日趋集中的态势。

从供给、需求双侧看,电力热力的生产和供应业、交通运输仓储业(含邮电通讯)按两种方式核算的碳排放均较高,是未来碳减排应关注的关键部门。近年来,交通运输仓储业(含邮电通讯)最终需求大幅提升,汽车产业、物流产业的消费升级将带动碳排放的快速增长。电力热力的生产和供应业是中国直接碳排放的最大来源,但从产业链看,下游用电用热部门应对其给予更多的减排成本补偿。

3.2 产业部门碳排放增长整体效应结构分解

2005—2020年,中国产业部门碳排放增量为58.10亿t,依据式(3)–(6),2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年各时期碳排放增量影响因素的分解结果如表1所示。

中国产业部门碳排放增长是技术变动的抑制效应和需求模式变动的拉动效应叠加的结果。从2005—2020年累计的总贡献率绝对值看,投资扩张

表1 2005—2020年中国产业部门碳排放增量影响因素分解结果

Table 1 Decomposition results of influencing factors of carbon emission growth in China's industrial sectors, 2005-2020

| 阶段 | 碳排放增量及 贡献率合计 | 涉及技术进步的因素 | | | 涉及需求结构的因素 | | | | |
|------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|--------|
| | | 能源结 构效应 | 能源强 度效应 | 生产结 构效应 | 消费拉 动效应 | 投资扩 张效应 | 出口变 动效应 | 进口替代 效应(取负) | 其他效应 |
| 2005—2010年/10 ⁸ t | 24.90 | -0.61 | -11.90 | -0.49 | 11.28 | 27.28 | 7.65 | -5.33 | -2.98 |
| 各类效应贡献率/% | 100.00 | -2.45 | -47.80 | -1.96 | 45.30 | 109.56 | 30.73 | -21.40 | -11.97 |
| 2010—2015年/10 ⁸ t | 23.14 | 4.98 | -12.23 | -2.42 | 14.63 | 19.23 | 4.32 | -4.34 | -1.03 |
| 各类效应贡献率/% | 100.00 | 21.51 | -52.86 | -10.44 | 63.22 | 83.09 | 18.68 | -18.76 | -4.45 |
| 2015—2020年/10 ⁸ t | 10.06 | -4.43 | 9.62 | -23.29 | 11.67 | 14.71 | 3.01 | -1.44 | 0.20 |
| 各类效应贡献率/% | 100.00 | -44.06 | 95.69 | -231.61 | 116.05 | 146.31 | 29.97 | -14.34 | 1.99 |
| 2005—2020年/10 ⁸ t | 58.10 | -0.06 | -14.51 | -26.19 | 37.58 | 61.22 | 14.99 | -11.11 | -3.81 |
| 各类效应贡献率/% | 100.00 | -0.11 | -24.98 | -45.09 | 64.68 | 105.38 | 25.80 | -19.13 | -6.56 |

注:式(3)、(5)、(8)中由于进口替代效应减少碳排放,公式中用减号表示。本表为了表述的直观,进口替代效应直接按带负号的结果呈现。下同。贡献率按碳排放增量分解至各类效应的量的比例计算,因存在负值项,单项效应的贡献率可能大于100%。

② 受部门能源数据获取限制,第三产业中除交通运输仓储业(含邮电通讯)、批发零售和住宿餐饮业外,合并为其他服务业。

效应、消费拉动效应、生产结构效应、出口变动效应和能源强度效应是影响中国产业部门碳排放的主要因素,但不同时期也有其相对突出的影响因素。

3.2.1 涉及技术进步的因素分解结果

相较于能源结构效应,技术进步驱动的产业低碳化进程更多体现在能源强度效应和生产结构效应上,2015年前以能源强度效应为主,之后生产结构效应的负贡献大幅提升,暗示技术推动的碳减排效应可能由部门内技术进步主导逐步转向产业链部门间技术进步主导,而能源结构效应总体上对碳排放的影响不突出,在2015年后才逐步显现出较明显的碳减排效应。

能源结构效应主要体现能源供应部门的技术变动,长期累计效果上,2005—2020年该效应对产业部门碳增长的总贡献率仅为-0.11%,能源结构优化的减排效果并不明显,这一结论与不少使用2017年及之前数据开展研究的结果一致^[1,23,24]。相关研究认为,能源结构效应对碳排放影响较弱或仍存在碳排放增长效应是由中国固有的资源禀赋或产业高碳能源消费依赖决定的^[24],且不同阶段能源结构的变化并不总利于降低碳排放^[23]。但与本文2015年后结果相近,近期一些研究也发现,近年来能源结构效应(有的用碳排放系数效应表示)开始显现出相对明显的减碳作用^[11,25]。从产业部门一次能源消费结构看,与碳排放关系最密切的煤类能源在2005—2015年占比稳定在75%左右,其中2015年为74.97%,较2010年还略有增长,同时电力占比由2010年的5.17%下降至4.36%,共同导致2010—2015年能源结构效应体现为碳增长效应;而2015—2020年,煤类能源、油品能源、天然气、电力占比结构由74.97:15.34:5.33:4.36调整为70.83:14.62:8.64:5.91,高碳类化石能源占比下降,天然气和电力占比快速提升,能源低碳化趋势加速,即“十三五”时期是能源结构效应变化的关键阶段,之前其对产业部门并非一直体现为减排效果且影响程度相对较低,而“十三五”后则显现出较强的碳减排效应。

降低部门能源强度是减少碳排放最直接的手段,2005—2010年、2010—2015年能源强度效应对产业部门碳排放增长的贡献率分别为-47.80%和-52.86%,是碳减排最大的贡献源,该结论与大多数同类报道一致^[6,26,27]。但2015—2020年,能源强度效应转而体

现为正效应,贡献率为95.69%,部分前人研究中也有类似发现,认为可能是因部分产业耗能增加导致^[25]。这里提出另一种解释,由于本文采用总产品而非增加值来表征能源强度,2015—2020年产业部门能耗累计增长12.49%(不含回收能),而总产品仅累计增长10.42%,致使总产品能源强度反而上升了1.88%,能源强度效应从而体现为正贡献。这说明2015—2020年中国产业部门整体增加值率上升(由30.94%提升至35.42%),总产品增长幅度被倒逼压缩,显现为总产品能源强度上升,而能源利用效率实际提高的碳减排效应则被体现为产业链中中间产品占比下降,即2015—2020年能源强度效应的减碳作用部分被转移至生产结构效应上,因此2015—2020年生产结构效应体现为更大的负贡献。在部分对增加值效应进行了单独分解的研究中,可以得到支持上述解释的佐证,如张聪等^[8]、李虹等^[28]均计算得出2012—2017年增加值率效应造成能源消费或碳排放总量上升,此时生产结构效应总体为负。

生产结构效应通过提高产业链部门间的资源能源利用效率,减少中间产品投入来实现减碳效果。2005—2015年生产结构效应体现为碳减排效应但比例不高,而2015年后其负效应大幅提升,部分原因前文已述,除能源强度效应对其贡献率的加成影响外,也说明近年来产业链中跨部门技术进步冲击和生产协同的减排效应日益明显和强化。该结论延续了Yan等^[29]的发现,其研究中2012年后生产结构效应出现较弱的负效应,认为“十二五”期间部门间技术进步的减排效应就开始逐步显现。

3.2.2 涉及需求结构的因素分解结果

涉及需求结构的因素中,投资扩张效应始终强于消费拉动效应,而出口变动效应的影响则被进口替代效应部分抵消。类似研究中,一般认为最终需求对中国碳排放的影响在2007年前主要归因于投资和出口的增长,之后出口效应衰减而投资效应增强^[6],本文则进一步说明在2015年后消费拉动效应的贡献率有明显提升。

2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年消费拉动效应带来的碳排放增量分别为11.28亿t、14.63亿t和11.67亿t。单位最终消费所导致的碳排放增量由2005—2010年的2.02 t/万元下降至2010—2015年的1.69 t/万元,此后降幅趋缓,2015—2020

2024年5月

年下降至1.65 t/万元,可能意味着2015年后单位最终消费所引发的碳排放增量已相对稳定,进一步下降潜力空间有限,而消费拉动效应贡献率仍处稳定上升通道,已与投资扩张效应共同成为碳增长的核心因素。

2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年中国资本形成总额5年年均增速由15.94%快速回落至7.66%、4.57%。与之对应,投资扩张效应带来的碳排放增量也呈逐步下降走势,由27.28亿t下降至19.23亿t、14.71亿t,相应时段单位资本形成总额所导致的碳排放增量也由3.09 t/万元下降至2.55 t/万元、2.40 t/万元。相对于最终消费,控制投资规模、提高投资效益的减排效力更为明显。

产品进出口伴随着隐含碳的国际间转移,出口会导致部分本应在其他国家产生的碳排放由中国承担,而进口会削减国内碳排放总量。2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年中国因出口变动效应分别增加了国内7.65亿t、4.32亿t、3.01亿t碳排放;因进口替代效应分别削减了国内5.33亿t、4.34亿t、1.44亿t碳排放,大部分时间段进出口总效应为碳增长效应。2005—2020年,单位出口和进口所引发的碳排放变动相近,前者为增加碳排放2.18 t/万元,后者为减少碳排放2.29 t/万元,从效应强度上看,进口替代效应略强于出口变动效应。针对这一现象,部分研究给出的解释是“十二五”时期中国将更多的能源密集型产品的生产外包至东南亚等其他新兴市场,从而提升了进口品的隐含碳强度^[29]。但“十三五”时期有所不同,单位出口和进口所引发的碳增量和减少量分别为1.55 t/万元和1.13 t/万元,前者已超过后者,出口和进口蕴藏的隐含碳差距的拉大,可能造成未来贸易顺差背后的碳逆差的进一步扩大。

整体而言,碳增长贡献率方面,投资扩张效应虽有波动,但始终占据最大比例,2005—2020年总贡献率达到105.38%;消费拉动效应贡献率保持正增长,且增速较快,2005—2020年总贡献率64.68%,仅次于投资扩张效应;出口变动效应贡献率呈V型走势,进口替代效应的负贡献率(绝对值)呈下降态势,净出口在2005—2020年总贡献率为6.67%,即中国在进出口中存在一定贸易碳逆差,但在总碳排放增量中占比尚不高。

3.3 细分行业部门碳排放增长及影响因素分析

3.3.1 各行业部门碳排放增量的趋势特征

本文分析了2005—2020年各产业部门碳排放增量的变化趋势。与碳排放总量类似,碳排放增量的来源部门也相对集中,2005—2010年机械及电子工业、建筑业,2010—2015年建筑业和服务业,2015—2020年金属冶炼和压延加工业、电力热力的生产和供应业以及服务业部分部门碳排放增量相对较高。尤其是2005—2015年建筑业碳排放增量遥遥领先于其他部门,与这一时期基建和房地产业大规模扩张进程相一致。按不同时期碳排放增量的变化趋势,28个产业部门可分为4个上升型部门,5个下降型部门,7个V型部门和12个倒V型部门,如图1所示。

其中,V型部门中食品饮料和烟草制品业碳排放增量已处于负值区间;倒V型部门中,交通运输仓储业(含邮电通讯)、石油煤炭和其他燃料加工业、金属制品业、建筑业、燃气生产和供应业在“十三五”时期碳排放增量仍为正值。即共有接近一半的部门(13个部门)已呈现出碳排放达峰下降趋势,5个部门处于碳排放仍有增长但增量收窄阶段。

3.3.2 各行业部门碳排放增长的主要影响因素分析

28个产业部门碳排放增长的影响因素分解结果见表2所示,由于数据较多,仅呈现不同时期对碳排放变动贡献居于前3位的影响因素。

结合图1和表2,2005—2020年从行业分类看,采掘业整体由2010—2015年的碳排放上行阶段转向2015—2020年的削减阶段,2010年后生产结构效应对其碳增长产生支撑作用,暗示产业链间高碳环节仍未打断,而2015—2020年进口替代效应是其碳减排的主要影响因素。轻纺工业2005—2020年碳排放累计增量为正值,历史增量高但2010年后就开始呈现削减态势,2010—2015年其主要的减排因素为生产结构效应和能源强度效应,而2015—2020年则转变为生产结构效应和能源结构效应,说明低碳能源的使用正在推动其减碳过程。机械及电子工业与轻纺工业类似,主要碳排放部门在2015年后受生产结构效应影响转向大幅度的削减,产业链协同减排推动了行业的低碳转型,但由于该行业在2005—2015年受投资拉动效应影响,出现了一轮较长时

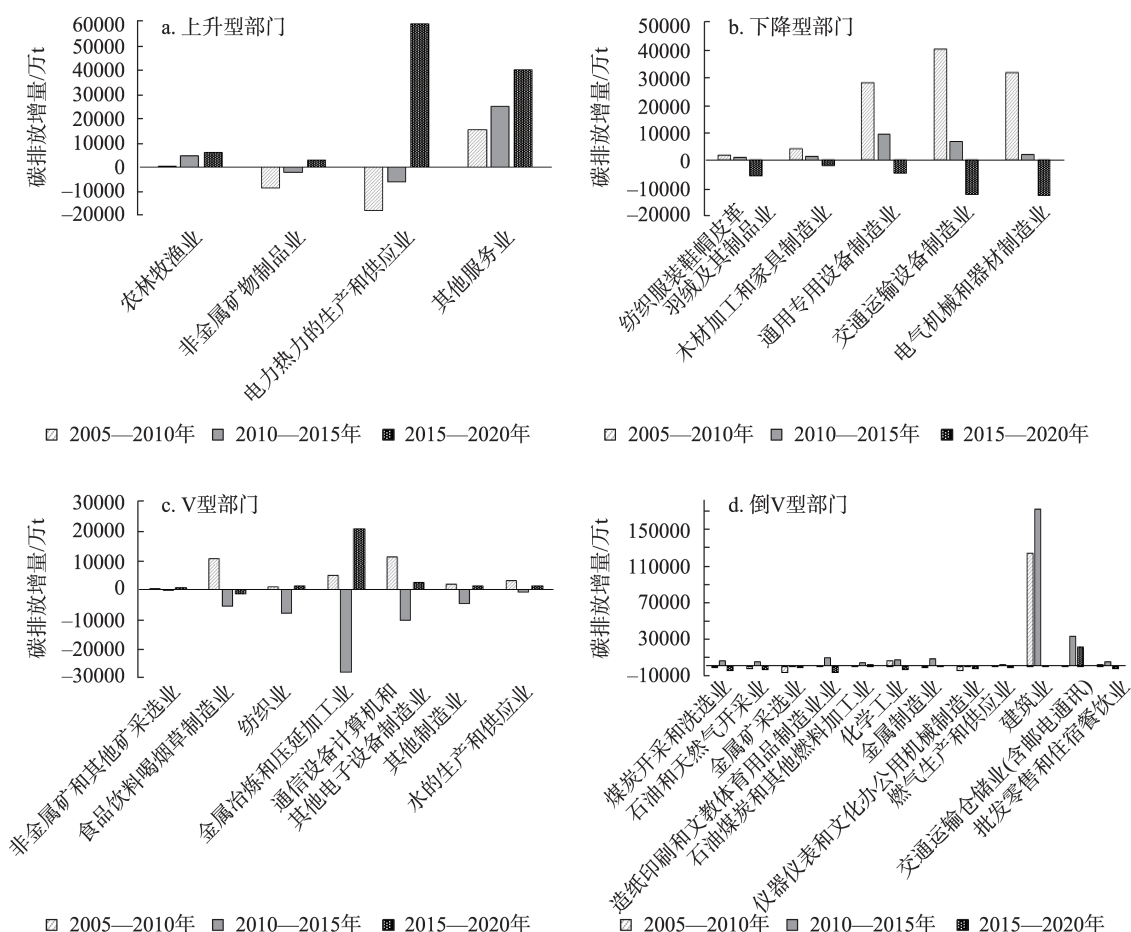


图1 2005—2020年不同时期中国产业部门碳排放增量情况及变化趋势类型

Figure 1 Carbon emission growth and changing trends of China's industrial sectors in different periods, 2005-2020

间的碳排放增长,使其在2005—2020年碳排放仍表现为累计增长。资源加工工业整体处于碳排放增长阶段,但受2010—2015年投资扩张效应衰减影响,非金属矿物制品业、金属冶炼和压延加工业两部门2005—2020年碳排放增量累计为负,2015年后投资扩张效应和出口变动效应主导了该行业的碳增长,国际贸易对其碳排放带动作用相对突出。电力热力燃气和水的生产和供应业、服务业处于碳排放增长阶段,且都主要受消费拉动效应影响。建筑业碳排放累计增量较高,但2015—2020年增长已趋于停滞,可能已处于碳达峰前的高位平稳阶段。此外,农林牧渔业一直处于碳排放增长阶段,主要受其他效应和消费拉动效应的影响,由于其他效应主要反映投入产出表的平衡项以及跨期价格换算中的累计误差,进一步辨析其碳增长原因还需要可比价投入产出表研制方法的探索和提升。

3.3.3 影响碳排放变化的关键部门进一步分析

2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年,不同时期影响整个产业部门碳排放变化的关键部门不尽相同。将各时期碳排放增长和削减量最高的4个部门分别定义为高增长和高削减部门,则其他服务业一直属于高增长部门,建筑业在2005—2015年属于高增长部门,交通运输仓储业(含邮电通讯)、电力热力的生产和供应业分别在2010年和2015年后成为高增长部门;高削减部门的分布较为分散,值得关注的是,交通运输设备制造业由2005—2010年的高增长部门转为2015—2020年的高削减部门,产业低碳化改造进程明显加快。考虑到“十三五”时期与当前情况最为接近,图2给出了2015—2020年的4个碳排放高增长部门(其增量均大于2亿t,占全部15个碳增长部门增量的87.88%),以及4个碳排放高削减部门(其削减量均

2024年5月

表2 2005—2020年各产业部门碳排放增量的主要影响因素

Table 2 The main driving factors of carbon emission growth in various industrial sectors, 2005-2020

| 产业部门 | 2005—2020年碳排放累计增量/10 ⁴ t | 对碳排放变动贡献居前3位的影响因素 | | |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| | | 2005—2010年 | 2010—2015年 | 2015—2020年 |
| 农林牧渔业 | 11183.76 | Ⅷ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ | Ⅷ、Ⅱ ⁻ 、Ⅳ | Ⅷ、Ⅳ、Ⅲ ⁻ |
| 采掘业 | | | | |
| 煤炭开采和洗选业 | 1169.45 | V、Ⅶ ⁻ 、Ⅱ | Ⅷ ⁻ 、Ⅱ、Ⅲ | Ⅷ ⁻ 、V ⁻ 、Ⅶ ⁻ |
| 石油和天然气开采业 | -399.51 | Ⅱ、Ⅲ ⁻ 、Ⅶ ⁻ | Ⅲ、V ⁻ 、Ⅱ | Ⅶ ⁻ 、Ⅲ、Ⅷ |
| 金属矿采选业 | -6532.73 | Ⅶ ⁻ 、Ⅱ、Ⅲ ⁻ | Ⅲ、Ⅱ、V ⁻ | Ⅶ ⁻ 、Ⅲ、Ⅷ |
| 非金属矿和其他矿采选业 | 954.46 | V、Ⅱ、Ⅵ ⁻ | Ⅷ ⁻ 、Ⅱ、Ⅶ | Ⅷ、Ⅶ ⁻ 、V |
| 轻纺工业 | | | | |
| 食品饮料和烟草制品业 | 3461.78 | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、V ⁻ | Ⅳ、Ⅲ ⁻ 、Ⅱ ⁻ | Ⅳ、Ⅰ ⁻ 、Ⅲ ⁻ |
| 纺织业 | -5864.80 | Ⅱ ⁻ 、Ⅵ、Ⅶ | Ⅵ ⁻ 、Ⅲ ⁻ 、Ⅱ ⁻ | Ⅵ、Ⅷ、Ⅲ ⁻ |
| 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业 | -3054.13 | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ | Ⅳ、Ⅲ ⁻ 、Ⅱ ⁻ | Ⅳ ⁻ 、Ⅰ ⁻ 、Ⅲ ⁻ |
| 木材加工和家具制造业 | 3399.21 | V、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ | Ⅳ、Ⅲ ⁻ 、Ⅱ ⁻ | Ⅲ ⁻ 、Ⅰ ⁻ 、Ⅵ |
| 造纸印刷和文教体育用品制造业 | 2670.18 | Ⅱ ⁻ 、Ⅳ、Ⅶ | Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ ⁻ | Ⅳ ⁻ 、Ⅲ ⁻ 、V ⁻ |
| 资源加工工业 | | | | |
| 石油煤炭和其他燃料加工业 | 7544.88 | Ⅳ、Ⅱ、Ⅶ | Ⅳ、Ⅶ ⁻ 、Ⅷ | Ⅵ、Ⅷ、Ⅳ ⁻ |
| 化学工业 | 9627.36 | Ⅵ、Ⅷ ⁻ 、Ⅶ ⁻ | Ⅳ、Ⅷ ⁻ 、Ⅵ | Ⅶ ⁻ 、Ⅷ、Ⅵ |
| 非金属矿物制品业 | -8429.50 | Ⅵ ⁻ 、V、Ⅷ ⁻ | Ⅵ、V ⁻ 、Ⅷ ⁻ | Ⅷ、Ⅵ ⁻ 、Ⅶ ⁻ |
| 金属冶炼和压延加工业 | -2459.77 | Ⅷ ⁻ 、V、Ⅵ | V ⁻ 、Ⅶ ⁻ 、Ⅵ | V、Ⅶ、Ⅱ ⁻ |
| 金属制品业 | 7841.16 | Ⅱ ⁻ 、Ⅶ、Ⅲ | V、Ⅱ ⁻ 、Ⅰ | Ⅲ ⁻ 、Ⅱ、Ⅷ |
| 机械及电子工业 | | | | |
| 通用专用设备制造业 | 32818.87 | V、Ⅶ ⁻ 、Ⅵ | V、Ⅱ ⁻ 、Ⅵ | Ⅲ ⁻ 、Ⅱ、V |
| 交通运输设备制造业 | 34338.74 | V、Ⅱ ⁻ 、Ⅶ ⁻ | Ⅳ、V、Ⅱ ⁻ | Ⅲ ⁻ 、Ⅱ、Ⅳ |
| 电气机械和器材制造业 | 21059.55 | V、Ⅵ、Ⅱ ⁻ | Ⅱ ⁻ 、Ⅵ、Ⅳ | Ⅲ ⁻ 、Ⅱ、Ⅵ |
| 通信设备计算机和其他电子设备制造业 | 3334.15 | Ⅵ、Ⅲ ⁻ 、Ⅱ ⁻ | Ⅲ ⁻ 、Ⅵ、Ⅱ ⁻ | Ⅲ ⁻ 、V、Ⅱ |
| 仪器仪表和文化办公用机械制造业 | -5601.02 | Ⅵ ⁻ 、Ⅷ ⁻ 、Ⅳ | Ⅵ ⁻ 、Ⅶ、Ⅳ | Ⅶ ⁻ 、V ⁻ 、Ⅳ ⁻ |
| 其他制造业 | -1845.00 | Ⅶ ⁻ 、Ⅳ、V | Ⅳ ⁻ 、V ⁻ 、Ⅶ | Ⅶ、Ⅵ、Ⅷ |
| 电力热力燃气和水的生产和供应业 | | | | |
| 电力热力的生产和供应业 | 35176.53 | Ⅲ ⁻ 、Ⅳ、Ⅱ | Ⅷ ⁻ 、Ⅳ、Ⅱ ⁻ | Ⅳ、Ⅷ、Ⅲ ⁻ |
| 燃气生产和供应业 | 2089.10 | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ ⁻ | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ | Ⅲ ⁻ 、Ⅳ、Ⅱ |
| 水的生产和供应业 | 3534.17 | Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ ⁻ | Ⅱ ⁻ 、Ⅲ ⁻ 、Ⅳ | Ⅳ、Ⅲ ⁻ 、V |
| 建筑业 | 295482.63 | V、Ⅲ、Ⅱ ⁻ | V、Ⅱ ⁻ 、Ⅷ | Ⅲ ⁻ 、V、Ⅱ |
| 服务业 | | | | |
| 交通运输仓储业(含邮电通讯) | 54141.03 | Ⅷ ⁻ 、Ⅳ、V | V、Ⅰ、Ⅶ ⁻ | Ⅷ ⁻ 、V、Ⅳ |
| 批发零售和住宿餐饮业 | 4356.64 | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ ⁻ | Ⅵ、Ⅳ、Ⅷ ⁻ | Ⅳ、Ⅰ ⁻ 、Ⅷ ⁻ |
| 其他服务业 | 80968.29 | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅲ | Ⅳ、Ⅱ ⁻ 、Ⅷ ⁻ | Ⅳ、Ⅲ ⁻ 、Ⅰ ⁻ |

注:罗马数字Ⅰ至Ⅷ分别代表能源结构效应、能源强度效应、生产结构效应、消费拉动效应、投资扩张效应、出口变动效应、进口替代效应和其他效应,带上标-的表示为负效应。

大于5000万t,占全部13个碳减排部门削减量的60.42%) 在2005—2020年不同时期各种影响因素的贡献率,分析其变化规律可为重点产业的低碳政策安排提供方向指导。

2005—2020年,碳排放增量与总量前列的产业部门重合度较高,存在“惯性增长”现象,从需求侧视角看,增量控制与总量控制的目标部门相对一致。2015—2020年,碳排放增长量最高的4个部门

中(图2),除金属冶炼和压延加工业外,均属于该时期碳排放总量最高的前5位部门。其中,电力热力的生产和供应业长期主要受消费拉动效应影响,作为大部分生产部门和生活消费的上游部门,其碳减排依赖于电力热力的节约使用。其他服务业也主要受消费拉动效应影响,近年来居民收入提升背景下,文体娱乐、公共服务、商务服务、居民服务等各类新兴服务业快速扩张,消费需求加快释放,其他

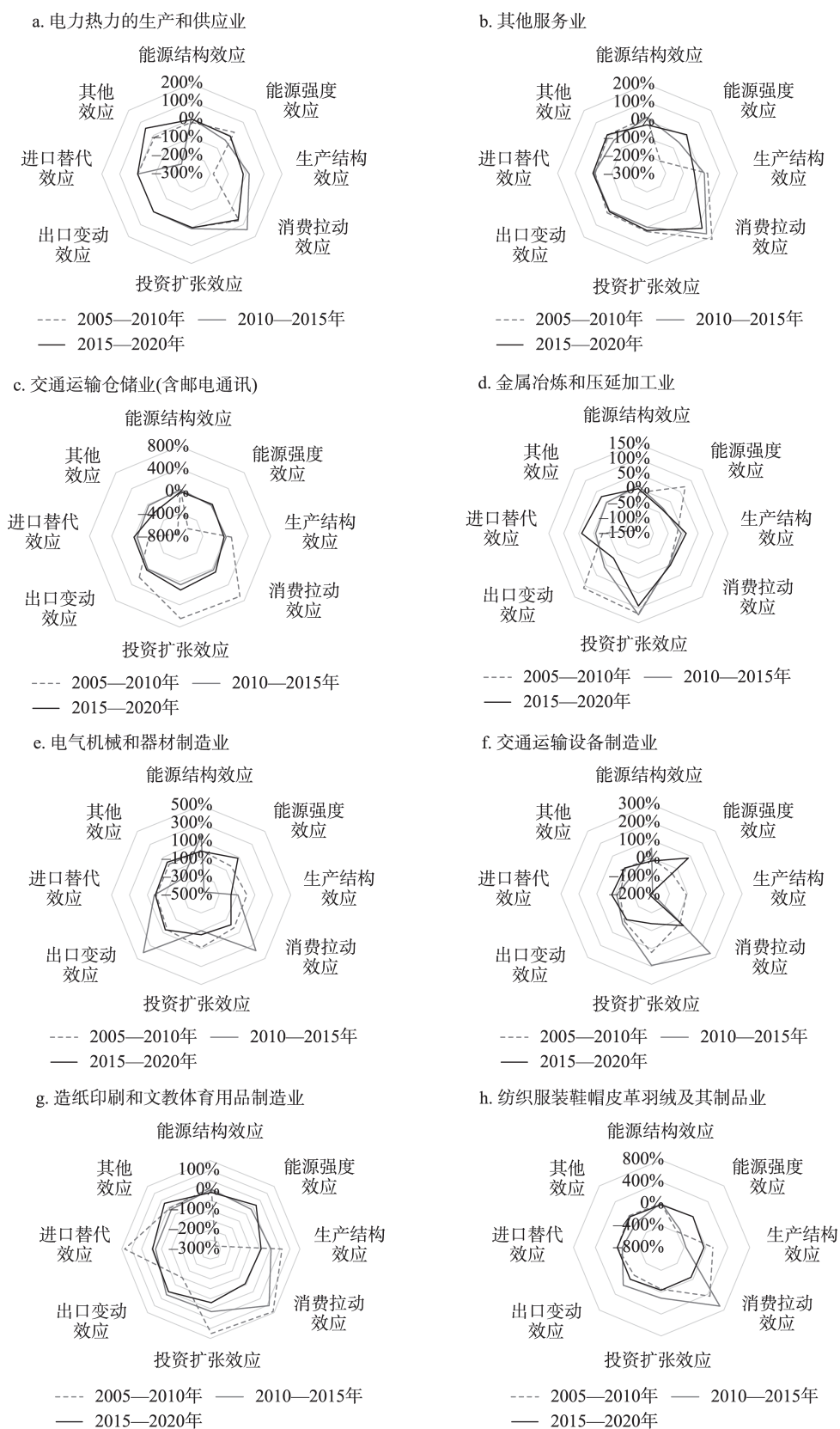


图2 2005—2020年碳排放增长/削减关键部门的不同时期各影响因素贡献率变化

Figure 2 Changes in the contribution rates of various influencing factors during different periods in sectors with high levels of carbon emission growth/reduction, 2005-2020

2024年5月

服务业碳排放增长量一直处上行区间,未来需要提倡和落实绿色消费减缓其增长态势;交通运输仓储业(含邮电通讯)多属传统服务业,主要受投资扩张和消费拉动效应双重影响,又以前者为重,推动其碳减排的主要动力由能源强度效应逐渐转变为能源结构和生产结构效应,未来应主要通过推广新能源交通工具等清洁能源消费,并结合产业链优化来降低碳排放;金属冶炼和压延加工业主要受投资扩张效应影响,而能源强度效应是其主要负贡献源,即减少该部门碳排放主要需依靠部门内节能减排技术的升级换代。

2005—2020年,碳排放净削减的产业部门分布由集中走向分散,2005—2010年、2010—2015年和2015—2020年,碳排放净削减的产业部门分别为6个、9个和13个,减排量前列的产业部门主要出现于排放总量中高位部门,且在不同时期差别较大,2005年以来具有减排倾向的部门不断扩容。

2015—2020年,碳排放削减量最高的4个部门中(图2),电气机械和器材制造业、交通运输设备制造业均属于机械及电子工业,这两个部门碳减排主要源于生产结构效应的负贡献,其次是投资扩张效应,说明“十三五”时期产业链的低碳化和行业投资走弱是部门碳减排的主因,但电气机械和器材制造业的出口变动效应,以及交通运输设备制造业的消费拉动效应正贡献较高,未来可能造成碳排放反弹,值得进一步关注。造纸印刷和文教体育用品制造业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业均属于轻纺工业,这两个部门碳减排主要源于消费拉动和投资扩张效应的负贡献,此外生产结构效应和能源结构效应的负贡献逐渐明显,说明“十三五”时期部门的需求不足造成碳排放同步下降,考虑到需求变动可能受周期性影响,未来这类部门碳排放变化趋势尚难把握,但推动产业链技术升级和能源消费结构优化是该类行业部门碳减排的可行路径。

4 结论与政策启示

4.1 结论

本文耦合SDA和LMDI两类经典分解方法,利用中国2005—2020年投入产出表和相应能源统计数据,从需求侧视角,分析了产业部门碳排放增长的趋势特征和结构性动因。得出如下主要结论:

(1)SDA和LMDI耦合模型可以发挥两类分解

方法的自身优势,既保留SDA的结构分解框架,又在克服零值和负值问题的基础上,通过LMDI分解手段实现唯一分解形态的完全分解,同时本文对终端能耗中涉及电力热力消费碳排放的分摊方法进行了讨论和修正,是可供推广完善的方法思路。

(2)当前中国产业部门碳排放总量超过100亿t,但“十三五”期间碳排放年均增速已低于2%,产业部门碳排放已处于达峰前期。对比供给和需求侧核算结果,需求侧视角下高碳部门向机械制造业、建筑业、服务业等下游部门延伸。无论是供给抑或需求侧视角,电力热力的生产和供应业、交通运输仓储业(含邮电通讯)都是当前碳减排应重点关注的部门。

(3)产业部门整体层面的结构分解结果显示,涉及技术进步的因素和涉及需求结构的因素分别总体体现为负贡献和正贡献,“十三五”时期是碳排放各类影响因素地位更迭的关键转折期。2005—2020年,涉及技术进步的因素中,生产结构和能源强度效应带来的碳减排显著强于能源结构效应;涉及需求结构的因素中,投资扩张效应的碳增长贡献最强,出口变动效应造成的碳增长很大程度被进口替代效应抵消。“十三五”开始,上述影响因素逐步显现出新的变化特征,消费拉动效应的正贡献和能源结构效应的负贡献大幅走强;同时,表征产业链部门间技术进步的生产结构效应的碳减排作用开始强于表征部门内技术进步的能源强度效应。

(4)细分行业部门层面的结构分解结果显示,截至2020年碳排放增量变化趋势方面,28个产业部门中已有13个部门处达峰下降阶段(含5个下降型部门、7个倒V型部门和1个V型部门),5个部门碳排放仍有增长但增量收窄(其余的倒V型部门)。“十三五”以来,农林牧渔业、资源加工工业、电力热力燃气和水的生产和供应业、服务业门类整体处于碳增长态势,主要受消费拉动和投资扩张效应的影响,碳排放增量与总量前列部门基本一致;采掘业、轻纺工业、机械及电子工业由历史上的碳增长转向碳削减态势,生产结构和进口替代效应的影响较大,碳减排量前列部门大多为排放总量中高位部门;建筑业碳排放增长趋于停滞。

4.2 政策启示

上述发现,对中国产业部门碳减排政策安排有

如下启示:

(1)从控制碳增长的主要因素看,由于投资扩张效应走弱而消费拉动效应增强,未来一方面中国投资需求体量依然巨大,要加强产业投资的节能和低碳评估,特别是对资源加工工业这类投资扩张效应仍较强的行业,应避免盲目扩大产能和多元化,加大技改投资力度,鼓励投向资源精深加工、再生加工项目;另一方面,消费拉动效应日益凸显,要推动节约适度、绿色低碳的消费方式成为全民习惯,同时支持企业更多生产供应绿色产品,引导消费端绿色升级。此外,当前出口变动效应贡献强于进口替代效应,可适度扩大采掘业、资源加工工业等碳密集型行业的进口比重或在出口中增加减排成本考虑,通过调整进出口结构缩小国际贸易碳逆差。

(2)从引导碳削减的主要因素看,技术进步是实现碳减排的根本保障,政策关注点要更多从部门自身技术低碳升级转向能源结构低碳化以及产业链协同减排。目前,中国工业高能效设备和技术已相对成熟,陆地风电、光伏发电等新能源发电常规技术世界领先,但技术转化落地滞后于技术研发,应抓紧开拓清洁低碳技术市场,重点推广工业节能、新能源发电和储能、绿色交通、绿色建筑等低碳技术。同时,对生产结构效应突出,生产过程联系紧密的产业链上下游部门,如金属矿采选业、木材加工和家具制造业、金属制品业、燃气生产和供应业与其下游部门,通用专用设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械和器材制造业、通信设备计算机和其他电子设备制造业、建筑业与其上游部门之间,构建绿色供应链和合宜的成本分担机制推进联合减排。

(3)从国家碳减排政策发展趋势看,中国涉碳资源环境政策正由命令控制型向经济激励型探索,生态产品价值实现机制的提出意味着碳排放权益从“自然权利”向“法定权利”转化。考虑到碳排放并未纳入环保税征税范围,未来各类生态资源权益交易机制将成为碳减排的重要政策工具。一方面,供给和需求侧的核算结果都显示当前产业部门碳排放高度集中,发电行业率先启动全国碳市场具备合理性,但生产结构效应的影响提升势必要求推动产业链上下游共同参与减排,全国碳市场要加快向钢铁、石化等行业扩容,并研究将交通物流业纳入碳

市场的可行性。另一方面,当前涉碳生态资源权益交易机制种类较多,如碳排放权、用能权、发电权、大气排污权、绿色证书等,由于碳排放与能源消费、大气污染物排放具有同根、同源、同过程的特点,如何衔接各类市场协调运行也有待相应的政策创新。

参考文献(References):

- [1] 张炎治,冯颖,张磊.中国碳排放增长的多层递进动因:基于SDA和SPD的实证研究[J].资源科学,2021,43(6):1153-1165. [Zhang Y Z, Feng Y, Zhang L. Analysis on the progressive motivation of carbon emissions growth in China using structural decomposition analysis and structural path decomposition methods[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1153-1165.]
- [2] Pu Z N, Yue S J, Gao P. The driving factors of China's embodied carbon emissions: A study from the perspectives of inter-provincial trade and international trade[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, DOI: 10.1016/j.techfore.2020.119930.
- [3] 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 Q, Tang X, Ren K P, 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.]
- [4] Dietzenbacher E, Kulionis V, Capurro F. Measuring the effects of energy transition: A structural decomposition analysis of the change in renewable energy use between 2000 and 2014[J]. Applied Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114040.
- [5] Cai H, Qu S J, Wang M. Changes in China's carbon footprint and driving factors based on newly constructed time series input-output tables from 2009 to 2016[J]. Science of The Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134555.
- [6] 潘晨,李善同,何建武,等.考虑省际贸易结构的中国碳排放变化的驱动因素分析[J].管理评论,2023,35(1):3-15. [Pan C, Li S T, He J W, et al. Analysis of driving forces of changes in China's CO₂ emissions considering inter-provincial trade structure[J]. Management Review, 2023, 35(1): 3-15.]
- [7] 罗芳,郭艺,魏文栋.长江经济带碳排放与经济增长的脱钩关系:基于生产侧和消费侧视角[J].中国环境科学,2020,40(3):1364-1373. [Luo F, Guo Y, Wei W D. Decoupling analysis between growth and carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt: Production and consumption perspectives[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1364-1373.]
- [8] 张聪,汪鹏,赵黛青,等.基于结构分解的碳排放驱动因素及行业影响分析:以广东为例[J].科技管理研究,2022,(16):204-217. [Zhang C, Wang P, Zhao D Q, et al. Analysis of carbon emission evolution factors and industry impact based on structural decomposition: Taking Guangdong as an example[J]. Sciences and

2024年5月

- Technology Management Research, 2022, (16): 204–217.]
- [9] Peng S, Wang X, Du Q, et al. Evolution of household carbon emissions and their drivers from both income and consumption perspectives in China during 2010–2017[J]. Journal of Environmental Management, 2023, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116624.
- [10] Yu Y Y, Liang Q M, Liu L J. Impact of population ageing on carbon emissions: A case of China's urban households[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2023, 64: 86–100.
- [11] 潘晨, 李善同, 刘强. 消费视角下中国各省份碳排放驱动因素探究[J]. 经济与管理, 2022, 36(3): 58–66. [Pan C, Li S T, Liu Q. Driving forces of Chinese provincial CO₂ emissions from the perspective of consumption[J]. Economy and Management, 2022, 36(3): 58–66.]
- [12] 李堃, 王奇. 整合消费与增加值视角的中国行业碳排放变动分解研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 37–48. [Li K, Wang Q. Decomposition analysis of China's industrial carbon emission change based on consumption and value-added integrated perspective[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(3): 37–48.]
- [13] 李虹, 王帅. 需求侧视角下中国隐含能源消费量及强度的影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1728–1742. [Li H, Wang S. Research on influencing factors of China's energy consumption and intensity: Based on the demand-side perspective[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1728–1742.]
- [14] 张纳军, 程郁泰. 碳排放 SDA 模型的算法比较及应用研究[J]. 统计与信息论坛, 2018, 33(4): 67–74. [Zhang N J, Cheng Y T. Algorithm comparison and application of carbon emission SDA model [J]. Journal of Statistics and Information, 2018, 33(4): 67–74.]
- [15] Wei Y J, Zhao T, Wang J, et al. Exploring the impact of transition in energy mix on the CO₂ emissions from China's power generation sector based on IDA and SDA[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(24): 1–15.
- [16] Chen J J, Lin Y Y, Wang X J, et al. Direct and indirect carbon emission from household consumption based on LMDI and SDA model: A decomposition and comparison analysis[J]. Energies, 2022, DOI: 10.3390/en15145002.
- [17] 王子龙, 王丹丹, 邱士雷. 产业碳排放强度因素分解研究[J]. 数学的实践与认识, 2023, 53(8): 21–35. [Wang Z L, Wang D D, Qiu S L. Influencing factors decomposition research of industrial carbon emissions intensity[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2023, 53(8): 21–35.]
- [18] 李峰, 胡剑波. 中国产业部门隐含碳排放变化的影响因素动态研究: 基于细分行业数据的实证分析[J]. 经济问题, 2021, (11): 77–87. [Li F, Hu J B. Dynamic analysis of influential factors on the change of embodied carbon emissions in China's industrial sectors: Empirical research based on the industrial data[J]. On Economic Problems, 2021, (11): 77–87.]
- [19] 杨顺顺. 纳入部门转移责任的用能权交易配额优化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 951–962. [Yang S S. Optimization of energy consumption right quotas through the consideration of responsibility transfer among industrial sectors[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(5): 951–962.]
- [20] 袁鹏, 程施, 刘海洋. 国际贸易对我国 CO₂ 排放增长的影响: 基于 SDA 与 LMDI 结合的分解法[J]. 经济评论, 2012, (1): 122–132. [Yuan P, Cheng S, Liu H Y. The effect of international trade on CO₂ emissions growth in China: Based on a method combined SDA with LMDI[J]. Economic Review, 2012, (1): 122–132.]
- [21] Ang B W, Liu N. Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 739–742.
- [22] 刘起运, 彭志龙. 中国 1992–2005 年可比价投入产出序列表及分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [Liu Q Y, Peng Z L. Comparable Input-output Table and Analysis of China from 1992 to 2005[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.]
- [23] 刘玉珂, 金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(1): 182–191. [Liu Y K, Jin S T. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of energy consumption carbon emissions in six provinces of central China[J]. Economic Geography, 2019, 39(1): 182–191.]
- [24] Yu Y, Hou J, Jahanger A, et al. Decomposition analysis of China's chemical sector energy-related CO₂ emissions: From an extended SDA approach perspective[J]. Energy & Environment, 2023, DOI: 10.1177/0958305X231151682.
- [25] 梁赛, 邓梓君, 钟秋萌. 社会经济转型新模式对中国 CO₂ 排放影响[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 140–150. [Liang S, Deng Z J, Zhong Q M. New patterns on socioeconomic drivers of CO₂ emissions in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 140–150.]
- [26] Yan J N, Su B. What drive the changes in China's energy consumption and intensity during 12th Five-Year Plan period?[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111383.
- [27] Liu M Z, Yang X T, Wen J X, et al. Drivers of China's carbon dioxide emissions: Based on the combination model of structural decomposition analysis and input-output subsystem method[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107043.
- [28] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5): 47–57. [Li H, Wang S. Changes and influencing factors of embodied energy consumption and intensity in China's industries[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(5): 47–57.]
- [29] Zheng H R, Zhang Z K, Wei W D, et al. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition [J]. Environmental Research Letters, 2020, DOI: 10.1088/1748-9326/ab794f.

Structural drivers of carbon emission growth in China's industrial sectors:

A decomposition method by coupling SDA and LMDI

YANG Shunshun

(Institute of Economics, Hunan Academy of Social Sciences, Changsha 410003, China)

Abstract: [Objective] Technological progress and the adjustment of demand structure have provided structural drivers for the low-carbon transformation of industrial sectors. By decomposing various factors that affect the growth of carbon emissions, the analysis of the above changes will provide a theoretical support for the formulation of carbon emission reduction policies. [Methods] This study, by coupling two classical decomposition methods of structural decomposition analysis (SDA) and logarithmic mean divisia index (LMDI), developed input-output tables from 2005 to 2020 with comparable prices data, and identified the driving factors of carbon emission growth of industrial sectors at the whole and specific sector levels. [Results] (1) From 2005 to 2020, the carbon emissions of the industrial sectors increased from 4.867×10^9 tons to 10.677×10^9 tons, while the five-year average growth rate has dropped to less than 2%. From the perspective of the demand side, more high-carbon emission sectors were in the downstream of the industrial chain. (2) Among the factors related to technological progress, the negative contribution of energy intensity and production structure effect were stronger than that of energy structure effect. Among the factors related to demand structure, the positive contribution of investment expansion effect was always stronger than that of consumption and export change effect. Since the 13th Five-Year Plan, the carbon emission growth impact of the consumption driving effect and the carbon emission reduction impact of the production structure effect have increased significantly, which means that intersectoral technological progress has begun to dominate the carbon emission reduction effect. (3) During the 13th Five-Year Plan period, the carbon emissions of the resource processing industry, electric power industry, gas and water production and supply industry, and services industry were continuously growing. Among them, the resource processing industry was mainly affected by the investment expansion effect, and the other two types of industries were mainly affected by consumption driving effect. The carbon emissions of mining industry, textile and light industry, and machinery and electronics industry have all shifted from the historical carbon emission growth stage to carbon emission reduction stage. Among them, the mining industry was mainly affected by the import substitution effect, and the other two types of industries were mainly affected by the production structure effect. [Conclusion] After 2015, the effectiveness of various carbon emission driving factors has changed significantly. The adjustment of final demand structure and energy structure, coordinated emission reduction of the industrial chain, and optimization of carbon-related markets are the focus of carbon emission reduction of industrial sectors in the future.

Key words: industrial carbon emissions; structural decomposition analysis; LMDI decomposition method; driving factors; China