

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2021.06.08

中国碳排放增长的多层递进动因 ——基于SDA和SPD的实证研究

张炎治,冯颖,张磊

(中国矿业大学经济管理学院,徐州 221116)

摘要:研究碳排放增长的多维、多层动因,识别关键的增排产业链和增排路径,对于宏观减排政策制定和微观减排路径选择都具有较强的现实意义。本文基于非竞争型投入产出模型,利用结构分解和结构路径分解的分析方法,从总体、生产阶段、产业链3个层次对中国碳排放增长进行了递阶分解分析,识别出了2010—2015年中国碳排放增长的主要动因和路径。研究结论表明:①需求规模变化是中国总体、生产阶段、产业链碳排放增加的主导影响因素;②煤炭消费发挥着减排作用且贡献巨大,但其他能源的增排效应使煤炭的减排贡献大打折扣;③能源效率变化对各生产阶段的影响为正且呈递减趋势,最终需求结构变化对第一生产阶段的碳排放具有显著减排效应,对其他生产阶段具有轻微增排效应;④需求规模变化和直接消耗系数变化是多数增排产业链的最大影响因素,30条增排路径占中国2010—2015年碳排放增加量的25.7%,构成了碳排放增加的关键路径和动因。最后,从宏观和微观两方面提出了相应的减排政策建议。

关键词:碳排放;结构路径分解;多层递进动因;增排路径;投入产出模型

DOI: 10.18402/resci.2021.06.08

1 引言

中国是世界上碳排放第一大国,随着城镇化、工业化的进一步发展,未来碳排放量仍将会不断攀升,如果不采取有效措施,2030年碳排放达峰的承诺将难以兑现。因此,碳减排成了中国重点关注和亟待解决的问题。

针对碳减排问题,专家学者致力于研究碳排放的影响因素及其效应,研究视角包括生产视角和需求视角。生产视角旨在考察生产过程中与能源使用有关的碳排放,研究对象主要是单一经济体,试图寻找碳排放的驱动因素,政策落脚点主要在于与低碳生产有关的能源结构调整、产业结构调整、需求结构调整和生产技术创新等^[1-3]。需求视角主要

考察产品消费需求中的隐含碳排放,研究对象既涉及单一经济体,也涉及多个经济体。针对单一经济体的研究主要包括贸易隐含碳排放及其影响因素、最终需求产品的完全排放系数及其影响因素等^[4,5],但技术同一性假设使其研究精度受到影响;针对多个经济体的研究则把多国生产技术模型化,较好地刻画了各经济体、各部门之间的产业关联和贸易联系,将生产碳排放分解为“内需排放”和“外需排放”^[6,7]。需求视角研究的政策落脚点在于加强碳排放的全生命周期管理,界定碳减排的义务和责任等。总体看,两个研究视角的政策意义截然不同,生产视角强调生产者责任,需求视角重视消费者责任,但并无优劣之分,而是互为补充。

收稿日期:2020-06-02 修订日期:2020-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(71874187)。

作者简介:张炎治,男,河南巩义人,副教授,主要研究方向为资源环境经济学。E-mail:zyzcumt2003@163.com

通讯作者:张磊,男,江苏徐州人,教授,主要研究方向为能源经济与管理。E-mail:mailing126@126.com

关于碳排放的影响因素,一致做法是从碳排放量的核算公式中进行析取,基本公式为 $TC = CLY$, 其中: TC 为碳排放总量; C 为碳排放强度,与能源利用效率有关; L 为列昂惕夫逆矩阵,反映了产业联系或生产技术; Y 为最终使用矩阵。因此,碳排放的影响因素一般分为3类:能源因素、技术因素和需求因素。根据研究需要,在基本公式的基础上进行扩展变形,可以得到更加具体的影响因素,如王锋等^[8]将碳排放的驱动因素划分为4大类11小类,4大类分别是能源强度因素、结构因素、活动强度因素和规模因素。廖明球等^[9]认为碳排放总量与能源消耗结构、直接能耗强度、投入结构和最终产品有关。Cao等^[10]将碳强度变化分解为效率效应、投入结构效应和最终需求效应。研究结论通常表明:最终需求是导致碳排放量增加的主导因素,能源利用和产业联系在不同阶段对碳排放的贡献不同。

在研究方法上,主流方法为分解分析,该方法将碳排放量变化分解为许多独立影响因素的影响效应之和,其中指数分解分析(IDA)和结构分解分析(SDA)是两种最常用的方法,关于两者的详细分析见Su等^[11]的综述论文。IDA具有模型简单、灵活,所需数据量少等优点,但不能反映行业间的投入产出联系以及最终需求对碳排放的影响,应用研究日趋减少。SDA利用投入产出表,考虑了产业特征、产业联系和贸易联系等,能够识别直接和间接驱动因素,延展了解析分析的深度,是一种更为复杂和精密的分解方法^[12,13],目前在能源环境领域得以广泛应用^[14,15]。尽管SDA受到了众多研究者的青睐,但本质上属于宏观层面的分解,弊端在于隐藏了一个经济系统中许多重要的细节,比如一些部门的进步可能被其他部门的退步所抵消,同一个影响因素在不同层次的经济活动中所起的作用存在差异等,除非进行更加精细的分解,否则这些细节难以被发现和评估。于是,Wood等^[16]提出将结构路径分析(SPA)和SDA相结合,构建结构路径分解(SPD)模型,从产业链视角对碳排放进行静态比较分析,从而得到更加丰富和更具现实指导意义的结论,并以澳大利亚为例进行了实证研究。Oshita^[17]利用同样的方法,识别出了日本碳排放量变化的主要因素和关键产业链路径。针对中国碳排放问题的

研究,一部分文献利用SDA方法,从生产视角或需求视角研究碳排放的影响因素及其贡献^[18,19],还有一些文献利用SPA方法识别碳排放的关键产业链路径^[20],但同时采用SPA和SDA,即SPD方法的研究文献并不多见。除了分解分析方法,还有一些学者利用计量经济模型探讨不同影响因素与碳排放的关系,如周迪等^[21]在扩展STRIPAT模型的基础上,运用静态面板模型和面板门槛模型,对绿色税收下产业结构变迁的碳排放效应进行了实证研究;徐博等^[22]在环境库兹涅茨曲线模型的基础上,利用面板数据模型检验了全球价值链分工地位对于碳排放水平的影响;王康等^[23]利用中介效应分析法定量研究了环境规制对碳排放的影响及作用路径。

从国内外文献看,仅有少数几篇文献利用SPD方法研究中国环境问题^[4,14],其中文献[4]的研究并没有深入到产业链层次;文献[14]的研究对象不是碳排放,而是 SO_x 排放。以上研究不足为本文研究碳排放提供了一个宝贵切入点,本文从生产视角,利用SPD方法和2010、2015两年的投入产出表数据,分别从宏观经济整体、中观生产阶段和微观产业链3个层面,对中国的碳排放增长进行了更加精细、深入的分解分析,不仅分析了能源结构变化、能源效率变化、生产技术变化、需求结构变化和规模变化对中国碳排放增长的影响,还进一步分析了8类能源、6种最终需求的影响。本文的贡献在于:不仅利用SPA识别出了中国碳排放增量最大的30条产业链,还利用SDA对这30条增排产业链进行了分解分析,得到了贡献最大的30条增排路径。

2 模型构建

2.1 碳排放的SDA模型

在一个开放经济体中,中间使用和最终使用来源于两部分:国内生产和国外进口。其中,国外进口产品的碳排放发生在外国,不在我国碳排放量的核算范围内。因此,为避免我国碳排放量的计算偏差,本文使用非竞争型投入产出表,根据非竞争型投入产出表的特性,存在如下平衡式:

$$A^d X + F^d = X \quad (1)$$

式中: A^d 为仅包含国内产品的直接消耗系数矩阵, X 为总产出矩阵, F^d 为国内产品的最终使用矩

2021年6月

阵。 X 可被表示为:

$$X = (I - A^d)^{-1} F^d = L F^d \quad (2)$$

式中: I 是单位矩阵, L 为列昂惕夫逆矩阵。因此,生产过程中排放的碳总量 TC 由下式计算:

$$TC = CEX = CELF^d \quad (3)$$

式中: C 为碳排放系数行向量, E 为分类能源效率矩阵。

将分类能源效率矩阵 E 进行变形,得到:

$$E = \begin{bmatrix} \frac{e_{11}}{x_1} & \dots & \frac{e_{1n}}{x_n} \\ \dots & \frac{e_{ij}}{x_j} & \dots \\ \frac{e_{m1}}{x_1} & \dots & \frac{e_{mn}}{x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_{11}}{\sum_{i=1}^m e_{i1}} & \dots & \frac{e_{1n}}{\sum_{i=1}^m e_{in}} \\ \vdots & \frac{e_{ij}}{\sum_{i=1}^m e_{ij}} & \vdots \\ \frac{e_{m1}}{\sum_{i=1}^m e_{i1}} & \dots & \frac{e_{mn}}{\sum_{i=1}^m e_{in}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m e_{i1} & \dots & 0 \\ \vdots & \sum_{i=1}^m e_{ij} & \vdots \\ 0 & \dots & \sum_{i=1}^m e_{in} \end{bmatrix} = ST \quad (4)$$

式中: e_{ij} 为部门 j 消耗第 i 类能源的数量, x_j 为部门 j 的总产出, S 为能源消耗结构矩阵, T 为综合能源效率矩阵, m 为能源类别数量, n 为部门数量。

最终使用矩阵 F^d 可以被进一步表示为:

$$F^d = \begin{bmatrix} \frac{f_{11}^d}{\sum_{j=1}^n f_{j1}^d} & \dots & \frac{f_{1k}^d}{\sum_{j=1}^n f_{jk}^d} \\ \vdots & \frac{f_{jl}^d}{\sum_{j=1}^n f_{jl}^d} & \vdots \\ \frac{f_{n1}^d}{\sum_{j=1}^n f_{j1}^d} & \dots & \frac{f_{nk}^d}{\sum_{j=1}^n f_{jk}^d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n f_{j1}^d \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n f_{jk}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1k} \\ \vdots & u_{jl} & \vdots \\ u_{n1} & \dots & u_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_k \end{bmatrix} = UH \quad (5)$$

式中: f_{jl}^d 为部门 j 的产品满足第 l 类最终需求的数量, U 为最终需求的行业结构矩阵, H 为最终需求的规模向量, k 为最终需求的类别数量。

根据投入产出方法的部门均一性假设,假设每个部门的中间投入和国内最终使用中进口产品所占的比例是一致的,这个比例用进口系数 m_{jj} 表示^[24]。

$$m_{jj} = \frac{M_j}{X_j + M_j - EX_j}$$

式中: X_j 、 M_j 、 EX_j 分别表示部门 j 的总产出、进口量和出口量,令 $\bar{M} = \text{diag}(m_{jj})$,于是,仅包含国内产品的直接消耗系数矩阵 A^d 和最终使用矩阵 F^d 被表示为:

$$A^d = (I - \bar{M})A \quad (6)$$

$$F^d = (I - \bar{M})(F^d - EX) + EX \quad (7)$$

将式(4)和(5)代入式(3),可得碳排放总量的计算公式:

$$TC = CSTLUH \quad (8)$$

碳排放变化量被表示为:

$$\Delta TC = TC^t - TC^0 = CS^t T^t L U^t H^t - CS^0 T^0 L U^0 H^0 \quad (9)$$

式中: TC^t 和 TC^0 分别表示第 t 期和第0期的碳排放总量,利用“极分解”方法^[25]得到 ΔTC 的分解公式:

$$\Delta TC = f(\Delta S) + f(\Delta T) + f(\Delta L) + f(\Delta U) + f(\Delta H)$$

$$f(\Delta S) = \frac{1}{2} C(\Delta S)(T^t L U^t H^t + T^0 L U^0 H^0)$$

$$f(\Delta T) = \frac{1}{2} C(S^0 \Delta T L U^t H^t + S^t \Delta T L U^0 H^0)$$

$$f(\Delta L) = \frac{1}{2} C(S^0 T^0 \Delta L U^t H^t + S^t T^t \Delta L U^0 H^0) \quad (10)$$

$$f(\Delta U) = \frac{1}{2} C(S^0 T^0 L \Delta U H^t + S^t T^t L \Delta U H^0)$$

$$f(\Delta H) = \frac{1}{2} C(S^0 T^0 L U^t \Delta H + S^t T^t L U^0 \Delta H)$$

式中: $f(\Delta S)$ 、 $f(\Delta T)$ 、 $f(\Delta L)$ 、 $f(\Delta U)$ 和 $f(\Delta H)$ 分别测量了碳排放量变化的能源结构效应、综合能源效率效应、部门联系效应、需求结构效应和需求规模效应。利用这个公式,还可以分析不同能源品种,不同需求类别的碳排放效应,只需令一种能源或需求可变,其他能源或需求保持不变即可。

2.2 碳排放的SPD模型

国民经济各行业、各部门之间存在着复杂的投入-产出联系,对某一部门产品的最终需求不仅直接诱发了该部门的生产活动,同时也间接诱发了其投入品的生产,以及间接诱发了其后向产业链一系列部门的连锁生产。因此,国民经济活动是由以满

足最终需求为目的的连锁生产阶段组成,这些连锁生产阶段包含了相当数量的产业链条,而碳排放总量是这些生产阶段或产业链碳排放的加总(图1)。如图1所示,一阶部门是指直接满足最终需求的生产部门,所有的一阶部门构成了第一生产阶段,起始于一阶部门*i*,终止于最终需求*l*的产业链*i*→*l*称为一级产业链,反映了最终需求直接引发的碳排放量。二阶部门是指该部门产品作为一阶部门的中间投入,从而间接满足最终需求的生产部门,所有的二阶部门构成了第二生产阶段,起始于二阶部门*j*,终止于最终需求*l*的产业链*j*→*i*→*l*称为二级产业链,反映了最终需求间接引发的碳排放量。

将完全需要系数矩阵泰勒展开,得:

$$L = (I - A^d)^{-1} = I + A^d + (A^d)^2 + \dots \quad (11)$$

将式(11)代入式(8), *TC* 可表示为各生产阶段的碳排放量之和。

$$TC = CST \left[I + A^d + (A^d)^2 + \dots \right] UH = CSTUH + CSTA^dUH + CST(A^d)^2UH + \dots \quad (12)$$

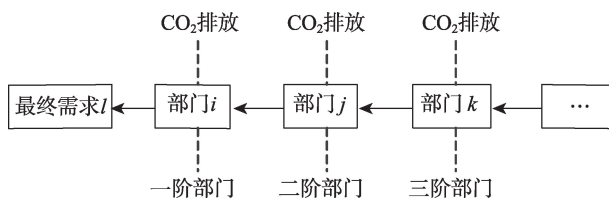


图1 产业链视角下的CO₂排放

Figure 1 CO₂ emissions from the perspective of industrial chain

式中: $CST(A^d)^lUH$ 表示第 $(t+1)$ 生产阶段的碳排放量,在该生产阶段共有 n^{t+1} 个节点。将直接消耗系数矩阵 A^d 进行拆解, *TC* 可表示为各产业链的碳排放量之和。

利用公式(10),可以对各生产阶段和各级产业链的碳排放量变化进行结构分解分析,在此不再赘述。

2.3 数据来源与处理

本文分析所使用的数据主要包括中国2010年和2015年^①的投入产出表数据和能源数据,各类能源的碳排放系数见表1。为保证数据口径一致,根据投入产出表行业分类和能源统计行业分类,将国民经济的行业部门合并为28个(表2)。中国目前所编制的投入产出表均为竞争型投入产出表,参考文献[24]的做法,将竞争型投入产出表转化为非竞争型投入产出表。利用农产品生产价格指数、工业品出厂价格指数、建筑安装工程固定资产投资价格指数、商品零售价格指数和交通运输、仓储和邮政业以及其他行业的增加值指数,将2015年当年价投入产出表调整为2010年可比价投入产出表。研究中用到的基础数据来源于历年《中国统计年鉴》。

3 实证分析

3.1 碳排放量变化的总体情况

经测算,2010年中国碳排放总量为77.63亿t,2015年为117.28亿t,增加排放39.65亿t。从生产阶段看(图2),第一至第五生产阶段的碳排放增量之

表1 各类能源的CO₂排放系数

Table 1 CO₂ emission coefficients of different energy sources

能源类型	平均低位发热量/ (TJ/10 ⁴ t)	单位热值含碳量/ (tC/TJ)	碳氧化率	折标准煤系数/ (tce/t)	CO ₂ 排放系数/ (tCO ₂ /tce)
原煤	20.91	26.4	0.94	0.71	2.66
焦炭	28.44	29.5	0.93	0.97	2.94
原油	41.82	20.1	0.98	1.43	2.11
汽油	43.07	18.9	0.98	1.47	1.99
煤油	43.07	19.5	0.98	1.47	2.05
柴油	42.65	20.2	0.98	1.46	2.13
燃料油	41.82	21.1	0.98	1.43	2.22
天然气	38.93 ^a	15.3	0.99	1.33 ^b	1.62

注:表中CO₂排放系数的计算方法为(以原煤为例): $2.66=20.91 \times 26.4 \times 0.94 \times 3.67 / (0.71 \times 1000)$,式中:3.67表示1 t C在氧气中燃烧后能产生大约3.67 tCO₂(C的分子量为12,CO₂的分子量为44,44/12=3.67)。a. 单位为MJ/m³。b. 单位为kg ce/m³。

① 撰写本文时投入产出表的最新数据为2015年,因此,选择2010和2015两年的数据进行实证分析。

2021年6月

表2 部门代码及名称

Table 2 Sectoral code and name

代码	部门	代码	部门
1	农林牧渔业	15	金属制品业
2	煤炭开采和洗选业	16	通用、专用设备制造业
3	石油和天然气开采业	17	交通运输设备制造业
4	金属矿采选业	18	电气机械及器材制造业
5	非金属矿及其他矿采选业	19	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
6	食品制造及烟草加工业	20	仪器仪表及文化办公用机械制造业
7	纺织业	21	工艺品及其他制造业(含废品废料)
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	22	电力、热力的生产和供应业
9	木材加工及家具制造业	23	燃气生产和供应业
10	造纸印刷及文教体育用品制造业	24	水的生产和供应业
11	石油加工、炼焦及核燃料加工业	25	建筑业
12	化学工业	26	交通运输、仓储和邮政业
13	非金属矿物制品业	27	批发、零售业和住宿、餐饮业
14	金属冶炼及压延加工业	28	其他行业

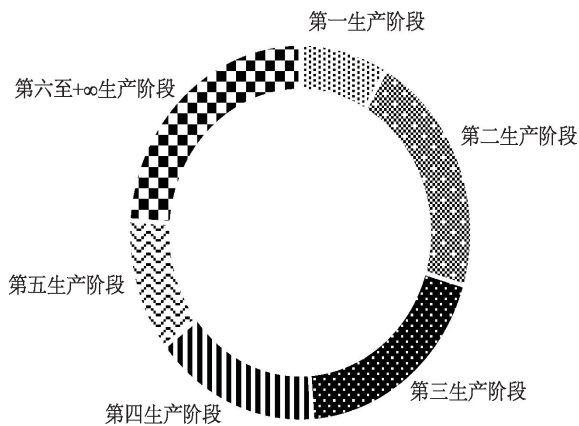


图2 2010—2015年各生产阶段碳排放增量占比

Figure 2 Proportion of carbon emissions increment in each production stage, 2010-2015

和占总增量的76%,其中,第一生产阶段占8%,第二生产阶段所占比重最大,达到了21%。第六生产阶段和其后的正无穷个生产阶段合计比重占总增量的24%。总体看,随着生产阶段的延伸,碳排放增量呈现出先增后减的趋势。出现这种趋势的原因在于:近年来,中国大力发展低碳经济,积极倡导低碳消费方式促使最终需求结构优化升级,从而使以直接满足最终需求为目的的第一生产阶段表现出低碳化、减碳化特征。因此,第一生产阶段的碳排放增量较小。虽然第一生产阶段具有低排放特征,但其引发的生产链有许多属于高碳产业链,典型的如建筑业产业链,批发、零售业产业链等,导致了后

续生产阶段的碳排放量增加,其中对第二生产阶段的影响最为显著,之后逐阶递减。这主要是因为随着产业链的延长,由最终需求引发的对后向产业链部门的生产性需求逐级减少,这一点由公式(12)可以看出。

从产业链看,表3列举了对中国碳增排贡献最大的30条产业链,其碳增排量之和占全国总增排量的30.09%。

首先,就最终需求而言,在这30条增排产业链中,16条与固定资本形成有关,8条与居民消费(城市居民消费或农村居民消费)有关,4条与出口有关,2条与政府消费有关,增排贡献率分别为19.72%、6.79%、2.29%和1.29%。可见,固定资本形成对增排产业链的影响最大,居民消费次之,其他最终需求影响较小。进一步分析发现,由固定资本形成所诱发的16条增排产业链中,有6条二阶产业链,9条三阶产业链,只有1条一阶产业链,其中一阶部门都是建筑业,间接诱发了高能耗、高排放部门11、12、13、14、22的产品生产,以满足建筑业发展的投入品需求。由此可见,由于建筑业发展的产业链效应,间接诱发了碳排放量的大量增加。与居民消费有关的8条产业链中,有6条一阶产业链,只有2条二阶产业链,说明居民消费所引发的碳排放产业链条较短,涉及的部门有11、12、26、27、28,其中,部门11的碳增排量最大,占了8条产业链总和的

表3 2010—2015年碳增排贡献最大的30条产业链

Table 3 Top 30 industrial chains contributing most to China's carbon emissions growth, 2010-2015

排序	CO ₂ 增排量/t	增排贡献/%	生产阶段	最终需求	部门(第一生产阶段)	部门(第二生产阶段)	部门(第三生产阶段)
1	1.72E+08	4.35	2	D	25	14	—
2	1.11E+08	2.79	1	A	11	—	—
3	9.43E+07	2.38	2	D	25	13	—
4	6.77E+07	1.71	2	D	25	11	—
5	6.67E+07	1.68	2	D	25	22	—
6	6.65E+07	1.68	3	D	25	14	14
7	4.48E+07	1.13	2	D	25	27	—
8	3.80E+07	0.96	3	D	25	27	11
9	3.43E+07	0.87	3	D	25	14	11
10	3.27E+07	0.82	2	D	25	12	—
11	3.11E+07	0.78	2	A	27	11	—
12	3.04E+07	0.77	1	F	14	—	—
13	2.88E+07	0.73	2	C	28	11	—
14	2.85E+07	0.72	3	D	25	22	22
15	2.81E+07	0.71	3	D	25	14	22
16	2.69E+07	0.68	2	F	27	11	—
17	2.61E+07	0.66	3	D	25	15	14
18	2.51E+07	0.63	1	B	11	—	—
19	2.50E+07	0.63	1	A	12	—	—
20	2.48E+07	0.63	2	A	28	11	—
21	2.27E+07	0.57	3	D	25	13	13
22	2.22E+07	0.56	3	D	25	13	11
23	2.22E+07	0.56	1	C	28	—	—
24	1.92E+07	0.48	1	A	28	—	—
25	1.87E+07	0.47	1	B	22	—	—
26	1.86E+07	0.47	1	D	25	—	—
27	1.85E+07	0.47	3	D	25	12	11
28	1.74E+07	0.44	1	F	12	—	—
29	1.60E+07	0.40	1	F	11	—	—
30	1.44E+07	0.36	1	A	26	—	—
合计	1.19E+09	30.09	—	—	—	—	—

注:A代表农村居民消费,B代表城市居民消费,C代表政府消费,D代表固定资本形成,E代表存货增加,F代表出口,下同。

71.13%。由此可见,对部门11(石油加工、炼焦及核燃料加工业)产品的消费是居民碳排放的主要来源。

其次,就产业链阶数而言,在这30条增排产业链中,有11条一阶产业链,10条二阶产业链和9条三阶产业链,增排贡献率分别为8.01%、14.89%和7.18%,二阶产业链是导致碳排放增加的首要因素,

与图2的分析结论相一致。

最后,就产业链涉及的部门而言,在这30条增排产业链中共涉及11个部门,按出现次数排序依次为:部门25(16次),部门11(12次),部门14(7次),部门22(5次),部门13(4次),部门12(4次),部门27(4次),部门28(4次),部门26(1次),部门15(1次),由此可见,部门25(建筑业)、11(石油加工、炼焦及

2021年6月

核燃料加工业)、14(金属冶炼及压延加工业)是增排产业链中的3个关键部门。

3.2 碳排放量增长的动因和路径

3.2.1 宏观经济层面碳排放增长的原因

表4显示了2010—2015年中国碳排放量增长的各种影响及其占比,可以看出,综合能源效率效应、部门联系效应和需求规模效应均促使了中国碳排放量增加。其中,需求规模效应起着绝对主导作用,92.16%的碳增加量来源于此。能源结构效应和需求结构效应都为负,说明能源消费结构和最终需求结构的变化有利于碳减排,但减排贡献较小,合计减排1.89亿t,仅占碳排放增加量的-4.77%。

不同能源、不同最终需求对中国碳排放的影响如表5、表6所示。由表5可知,在能源结构效应中,煤炭消费结构的改善使得碳减排了4.88亿t,而原油、焦炭消费结构的变化使得碳分别增排了1.83亿t和1.21亿t,三者对能源结构效应的贡献率分别为

610%,-229%和-151%。在分类能源效率效应^②和能源结构效应中,只有煤炭发挥着减排作用且贡献巨大,而其他能源均不同程度地导致了碳排放量增加,在能源效率效应中,煤炭效率的提升使得碳减排了9.23亿t,而原油、柴油效率的相对降低使得碳分别增排了5.47亿t和2.59亿t,三者对能源效率效应的贡献率分别为-369%,219%和104%。可见,在能源因素中,煤炭发挥着巨大的碳减排作用,造成这种现象的原因在于:“十二五”期间,国家实施了控制温室气体排放方案,要求2015年单位国内生产总值CO₂排放比2010年下降17%,同时能源消费总量控制方案也同步实施。这两项方案的实施促进形成了减排和节能的倒逼机制,煤炭毫无疑问是实现碳减排目标和节能目标的重要抓手,于是,煤炭利用效率和煤炭消费结构都有了明显改善,这些进步对碳减排贡献巨大。但与此同时,经济的发展惯性对能源的总体需求并没有减少,煤炭的减量化、

表4 2010—2015年碳排放量变化的结构分解

Table 4 Structural decomposition of China's carbon emissions growth, 2010-2015

	$f(\Delta S)$	$f(\Delta T)$	$f(\Delta L)$	$f(\Delta U)$	$f(\Delta H)$	ΔTC
绝对值/10 ⁸ t	-0.80	3.30	1.69	-1.09	36.54	39.65
贡献率/%	-2.02	8.33	4.27	-2.75	92.17	100.00

表5 2010—2015年不同能源品种对碳排放量变化的贡献

Table 5 Contribution of different energy sources to the change of carbon emissions, 2010-2015

	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	合计
$f(\Delta S)$ 绝对值/10 ⁸ t	-4.88	1.21	1.83	0.42	0.09	0.04	0.13	0.36	-0.80
贡献率/%	610	-151	-229	-53	-11	-4	-16	-46	100
$f(\Delta E)$ 绝对值/10 ⁸ t	-9.23	0.26	5.47	1.52	0.55	2.59	0.60	0.73	2.50
贡献率/%	-369	10	219	61	22	104	24	29	100

注:因能源结构效应为负,贡献率为正表示减排贡献,为负表示增排贡献。

表6 2010—2015年不同最终需求对碳排放量变化的贡献

Table 6 Contribution of different final demands to the change of carbon emissions, 2010-2015

	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	固定资本形成总额	存货增加	出口	合计
$f(\Delta U)$ 绝对值/10 ⁸ t	0.32	-0.69	0.11	0.96	-1.66	-0.13	-1.09
贡献率/%	-29	63	-10	-89	153	12	100
$f(\Delta H)$ 绝对值/10 ⁸ t	2.36	8.57	1.21	17.99	0.06	6.34	36.54
贡献率/%	6	23	3	49	0.2	17	100

注:因需求结构效应为负,贡献率为负表示增排贡献,为正表示减排贡献。

② 因综合能源效率变化(ΔT)无法进一步分解,在这里,对公式(3)中的分类能源效率变化(ΔE)进行分解,以此来考察不同能源品种的效率变化对碳排放的影响。

清洁化和高效化利用必然引发能源替代,取而代之以相对“清洁”的原油、柴油和焦炭等,而这些能源的利用效率并没有得到足够重视,其相对低效利用导致能源总体的减排贡献大打折扣。

表6显示,在需求结构效应中,发挥减排贡献的是存货增加、城市居民消费和出口的部门结构变化,其中,存货增加的减排贡献最大,贡献率高达153%;发挥增排贡献的是固定资本形成总额、农村居民消费和政府消费的结构变化,其中,固定资本形成总额的增排贡献最大,贡献率为-89%。6类最终需求的规模变化对需求总量效应均有正向贡献。其中,固定资本形成总额的贡献最大,贡献率高达49%;其次是城市居民消费和出口,贡献率分别为23%和17%;政府消费和存货增加的贡献较小。

结合表4、表5和表6可以得出:宏观层面上,固定资本形成总额、城市居民消费和出口是2010—2015年中国碳排放量增加的三大主要因素,共增排32.9亿t;煤炭效率的提升是中国碳排放量减少的主要原因,减排9.23亿t。

3.2.2 中观生产阶段层面碳排放增长的原因

表7显示,各因素对不同生产阶段的碳排放具有不同程度、不同方向的影响。综合来看,需求规模变化的影响居主导地位,其对各生产阶段的碳排放都具有最显著的增排效应,按增排量大小排序依次为第二生产阶段、第三生产阶段、第四生产阶段、第五生产阶段和第一生产阶段。这说明:碳排放的

增加并不是主要来源于与最终需求有直接联系的第一生产阶段,而是来自于满足第一阶段生产的投入品及后续生产阶段。能源结构变化对各生产阶段的碳排放具有减排效应,但贡献较小。综合能源效率变化对各生产阶段的碳排放具有正向影响,但随着生产阶段的不断延伸其影响程度逐渐降低。这说明:综合能源效率变化对处在产业链前端的生产活动影响较大,对后端生产影响较小。最终需求结构变化对第一生产阶段的碳排放具有负向影响且影响程度较大,对其他生产阶段的碳排放具有正向影响但影响程度较小。这说明:需求结构变化显著诱发了第一阶段的生产由高碳产品向低碳产品的转变,但并没有引起后端生产结构的低碳化转变,反而有轻微高碳化效应。直接消耗系数变化对各生产阶段的碳排放没有明确的影响规律,既有正向影响也有负向影响。

从各生产阶段看,除了需求规模变化始终是各生产阶段碳排放的最主要影响因素之外,综合能源效率变化和需求结构变化是第一生产阶段的另两个主要影响因素,影响一正一负且数值相等,对第一生产阶段碳排放增加的贡献率分别为52%和-52%。第二、三生产阶段碳排放增加量的次重要影响因素分别是该生产阶段对其后向生产阶段的直接消耗系数变化,影响为负,贡献率分别为-13%和-22%;第四、五生产阶段碳排放增加量的次重要影响因素是第一生产阶段对第二生产阶段的直接

表7 2010—2015年各生产阶段碳排放增加量的结构分解

Table 7 Structural decomposition of carbon emissions growth in each production stage, 2010-2015

(10⁸ t)

	$f(\Delta S)$	$f(\Delta T)$	$f(\Delta A_4^d)$	$f(\Delta A_3^d)$	$f(\Delta A_2^d)$	$f(\Delta A_1^d)$	$f(\Delta U)$	$f(\Delta H)$	合计
$\Delta TC1$	-0.11 (-3%)	1.72 (52%)	-	-	-	-	-1.73 (-52%)	3.42 (103%)	3.31 (100%)
$\Delta TC2$	-0.15 (-2%)	0.72 (9%)	-	-	-	-1.08 (-13%)	0.51 (6%)	8.40 (100%)	8.40 (100%)
$\Delta TC3$	-0.17 (-2%)	0.62 (8%)	-	-	-1.65 (-22%)	0.79 (10%)	0.32 (4%)	7.74 (101%)	7.65 (100%)
$\Delta TC4$	-0.13 (-2%)	0.23 (4%)	-	-0.57 (-9%)	-0.10 (-2%)	0.94 (15%)	0.26 (4%)	5.63 (90%)	6.25 (100%)
$\Delta TC5$	-0.09 (-2%)	0.06 (1%)	-0.22 (-5%)	-0.02 (0%)	0.12 (3%)	0.72 (16%)	0.17 (4%)	3.79 (84%)	4.53 (100%)

注: A_1^d 表示一阶部门对二阶部门的直接消耗系数矩阵, A_2^d 表示二阶部门对三阶部门的直接消耗系数矩阵,以此类推,下同。表中括号内数值表示贡献率。

2021年6月

消耗系数变化,影响为正,贡献率分别为15%和16%。

3.2.3 微观产业链层面碳排放增长的原因

对表3中30条产业链的碳增排量进行结构分解,可得各影响因素的影响和贡献率(表8)。总体看,需求规模变化的影响最大,贡献率达53.16%,其次是直接消耗系数变化和 demand 结构变化,贡献率分别为20.70%和14.39%,能源结构变化的影响为负且数值较小,贡献率仅为-1.33%。从影响因素看,在30条增排产业链中,需求规模变化为首要增排因素

的产业链有13条,序号分别是1、3、4、6、9、12、15、20、21、22、25、26、28,增排贡献合计达36.99%;需求结构变化为首要增排因素的产业链有4条,序号分别是2、18、19、30,增排贡献合计达6.82%;直接消耗系数变化为首要增排因素的产业链有8条,分别是5、8、10、11、14、16、17、27,增排贡献合计达17.49%;综合能源效率变化为首要增排因素的产业链有5条,分别是7、13、23、24、29,增排贡献合计达7.29%。可见,需求规模变化和直接消耗系数变化

表8 30条增排产业链的结构分解

Table 8 Structural decomposition of carbon emissions growth in the top 30 industrial chains

排序	产业链	CO ₂ 增排量/t	增排贡献率/%					
			$f(\Delta S)$	$f(\Delta T)$	$f(\Delta A_1^d)$	$f(\Delta A_1^t)$	$f(\Delta U)$	$f(\Delta H)$
1	14→25→D	1.72E+08	0.31	-17.39	-	39.08	18.39	59.61
2	11→B	1.11E+08	-2.58	30.22	-	-	37.61	34.75
3	13→25→D	9.43E+07	-1.25	-45.74	-	-24.54	41.96	129.57
4	11→25→D	6.77E+07	-3.30	39.42	-	5.83	13.37	44.68
5	22→25→D	6.67E+07	-0.74	-18.98	-	58.87	14.07	46.78
6	14→14→25→D	6.65E+07	0.24	-13.88	29.17	23.99	13.98	46.51
7	27→25→D	4.48E+07	-0.53	70.65	-	-7.13	8.07	28.95
8	11→27→25→D	3.80E+07	-1.46	15.81	-3.63	67.90	4.13	17.26
9	11→14→25→D	3.43E+07	-2.88	34.05	23.06	-3.93	11.26	38.44
10	12→25→D	3.27E+07	1.29	10.35	-	45.70	9.49	33.17
11	11→27→B	3.11E+07	-1.58	17.36	-	187.51	-122.72	19.43
12	14→F	3.04E+07	0.46	-25.85	-	-	58.61	66.78
13	11→28→C	2.88E+07	-3.68	44.27	-	31.84	-0.07	27.63
14	22→22→25→D	2.85E+07	-0.65	-16.83	49.40	15.23	12.06	40.79
15	22→14→25→D	2.81E+07	-1.10	-27.76	47.83	-12.42	22.29	71.16
16	11→27→F	2.69E+07	-1.53	16.73	-	138.87	-68.12	14.06
17	14→25→25→D	2.61E+07	0.22	-12.44	53.24	5.69	12.17	41.12
18	11→A	2.51E+07	-1.94	22.02	-	-	55.32	24.60
19	12→B	2.50E+07	1.37	10.99	-	-	51.47	36.17
20	11→28→B	2.48E+07	-3.58	43.08	-	30.87	-20.44	50.07
21	13→13→25→D	2.27E+07	-1.03	-37.47	-19.70	19.37	33.72	105.11
22	11→13→25→D	2.22E+07	-5.57	68.65	-14.47	-52.06	24.81	78.64
23	28→C	2.22E+07	-2.37	71.96	-	-	-0.08	30.48
24	28→B	1.92E+07	-2.30	69.72	-	-	-22.66	55.25
25	22→A	1.87E+07	-1.59	-40.04	-	-	35.76	105.87
26	25→D	1.86E+07	-8.39	14.23	-	-	22.47	71.70
27	11→12→25→D	1.85E+07	-2.31	26.69	39.21	-1.88	8.39	29.90
28	12→F	1.74E+07	4.13	34.03	-	-	-22.23	84.07
29	11→F	1.60E+07	-6.67	82.72	-	-	-45.56	69.51
30	26→B	1.44E+07	-0.20	-13.96	-	-	89.62	24.54
合计		1.19E+09	-1.33	7.47	5.61	20.70	14.39	53.16

是多数产业链的最大影响因素,在减排政策制定中,应针对每条产业链的主要影响因素实施差异化的减排政策。

在结构分解的基础上,将30条增排产业链的各因素影响进行排序,可得30条影响最大的增排路径^③(表9),其碳增排量之和为10.2亿t,占30条增排产业链碳增排量之和的85.35%,占中国2010—2015年间碳排放增加量的25.7%。可见,这30条增排路

径构成了中国碳排放增加的关键路径和动因。在这30条增排路径中,共涉及20条增排产业链,影响因素包括除了能源结构变化的其余5个。一些增排路径包含相同的产业链,且增排贡献较大,如第2、3、11条增排路径,其产业链均为14→25→D(金属冶炼及压延加工业→建筑业→固定资本形成),影响因素分别为需求规模变化、部门25对部门14的消耗系数变化、部门25的需求结构变化,这3条

表9 增排效应最大的30条增排路径

Table 9 Top 30 critical paths increasing carbon emissions

排序	增排路径		CO ₂ 增排量/t	增排贡献率/%	生产阶段
	产业链	影响因素			
2	14→25→D	ΔH	1.03E+08	8.61	2
3	14→25→D	ΔA_1^d	6.74E+07	5.65	2
11	14→25→D	ΔH	3.17E+07	2.66	2
1	13→25→D	ΔH	1.22E+08	10.25	2
6	13→25→D	ΔU	3.96E+07	3.32	2
5	11→B	ΔU	4.16E+07	3.49	1
8	11→B	ΔH	3.85E+07	3.22	1
10	11→B	ΔT	3.34E+07	2.80	1
7	22→25→D	ΔA_1^d	3.93E+07	3.29	2
13	22→25→D	ΔH	3.12E+07	2.62	2
14	14→14→25→D	ΔH	3.09E+07	2.59	3
22	14→14→25→D	ΔA_2^d	1.94E+07	1.63	3
25	14→14→25→D	ΔA_1^d	1.60E+07	1.34	3
4	11→27→B	ΔA_1^d	5.83E+07	4.89	2
19	14→F	ΔH	2.03E+07	1.70	1
23	14→F	ΔU	1.78E+07	1.49	1
9	11→27→F	ΔA_1^d	3.74E+07	3.14	2
24	11→13→25→D	ΔH	1.75E+07	1.46	3
12	27→25→D	ΔT	3.16E+07	2.65	2
15	11→25→D	ΔH	3.02E+07	2.54	2
16	11→25→D	ΔT	2.67E+07	2.24	2
17	11→27→25→D	ΔA_1^d	2.58E+07	2.16	3
18	13→13→25→D	ΔH	2.38E+07	2.00	3
20	22→14→25→D	ΔH	2.00E+07	1.68	3
21	22→A	ΔH	1.98E+07	1.66	1
26	28→C	ΔT	1.60E+07	1.34	1
27	11→13→25→D	ΔT	1.52E+07	1.28	3
28	12→25→D	ΔA_1^d	1.49E+07	1.25	2
29	12→F	ΔH	1.46E+07	1.23	1
30	22→22→25→D	ΔA_2^d	1.41E+07	1.18	3
合计	—	—	1.02E+09	85.35	—

③ 增排路径是指包含影响因素的增排产业链。

2021年6月

增排路径的贡献合计达16.92%(占30条增排产业链碳总增加量的比重)。类似包含相同产业链的增排路径还有第1、6条,其产业链均为 $13 \rightarrow 25 \rightarrow D$ (非金属矿物制品业 \rightarrow 建筑业 \rightarrow 固定资本形成),增排贡献合计达13.57%;第5、8、10条,其产业链均为 $11 \rightarrow B$ (石油加工、炼焦及核燃料加工业 \rightarrow 城市居民消费),增排贡献合计达9.51%。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文将SDA和SPA两种方法相结合,构建了SPD模型,利用中国2010和2015两年的投入产出表数据和相关数据,从宏观、中观和微观3个层次对中国碳排放量增加的原因进行了递阶分解分析。得出如下结论:

(1)宏观上,固定资本形成总额是中国碳排放量增加的主要动因,煤炭消费结构的改善和利用效率的提升发挥了巨大的减排作用,但其他能源的增排效应导致能源总体的减排贡献大打折扣。

(2)中观上,碳排放的增加量按大小依次为第二、三、四、五、一生产阶段,说明碳增加主要来源于满足中间投入的生产性需求。

(3)微观上,30条增排路径的碳排放增量占中国总增量的比例高达25.7%,构成了中国2010—2015年间碳排放增加的关键路径。其中,一些增排路径具有相同的产业链,且碳增量较大,如金属冶炼及压延加工业 \rightarrow 建筑业 \rightarrow 固定资本形成,非金属矿物制品业 \rightarrow 建筑业 \rightarrow 固定资本形成,石油加工、炼焦及核燃料加工业 \rightarrow 城市居民消费等,需重点加以关注。

(4)方法上,SPD模型融合了SDA模型和SPA模型两者的优点,打开了列昂惕夫逆矩阵这个黑箱,深入产业联系内部,不仅能够从宏观上把握碳排放增长的原因,也能够从微观上识别高排放产业链及其驱动因素,使国家在减排政策制定上更加有的放矢。

4.2 政策建议

本文研究为中国碳减排提供了丰富的政策启示,国家在制定减排政策时不仅要考虑宏观引导性,也要根据各行业、各部门在国民经济中的功能

地位和产业链特性,具备针对性。

在宏观政策方面,首先,为应对固定资本形成对中国碳排放的巨大影响,国家应建立投资信息平台,融合国家、地方的产业发展政策、产业发展规模、产业发展形势和产业发展趋势等各类信息,使企业对投资的现状和前景形成正确认识,从而避免重复、低效和无序投资。其次,为应对城市居民消费对碳排放的显著影响,国家应倡导绿色消费、低碳消费,加快推进低碳产品认证工作,降低居民对低碳产品的甄别成本,实施低碳产品补贴和鼓励政策,扩大低碳产品供给。最后,在能源消费方面,应继续加强煤炭的清洁化、高效化利用,为避免能源替代所带来的碳减排抵消效应,一方面应提高石油、柴油和焦炭的利用效率,减少碳排放,另一方面应加快实施可再生能源替代战略和电能替代战略,减少化石能源消费。

在微观政策方面,首先,应正确认识不同行业部门在国民经济中的层次地位,实施差异化的减排政策。比如,除了应普遍加强固定资产投资管理政策之外,对第一生产阶段的高排放部门还应重点实施能源利用技术创新政策,以提高能效;对其他生产阶段的高排放部门还应重点实施生产技术创新政策,以减少物耗。其次,应重点关注碳排放增加量最大的30条增排产业链,针对每一条产业链,对增排效应最大的影响因素实施针对性的减排措施。比如,产业链 $22 \rightarrow 25 \rightarrow D$ (电力、热力的生产和供应业 \rightarrow 建筑业 \rightarrow 固定资本形成),应重点实施中间投入品替代或生产技术革新等有利于减少建筑业对电力、热力的生产和供应业产品消耗的措施;产业链 $27 \rightarrow 25 \rightarrow D$ (批发、零售业和住宿、餐饮业 \rightarrow 建筑业 \rightarrow 固定资本形成),应重点实施节能或能源利用技术革新等有利于提高批发、零售业和住宿、餐饮业能源利用效率的措施。此外,30条增排路径构成了中国碳排放增加的关键路径和动因,应对其实施严格的碳排放控制和改进措施。

参考文献(References):

- [1] 杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰.中国碳减排实现的影响因素和当前挑战:基于技术进步的视角[J].经济研究,2019,54(11):118-132.

- [Yang L S, Zhu J P, Jia Z J. Influencing factors and current challenges of CO₂ emission reduction in China: A perspective based on technological progress[J]. *Economic Research Journal*, 2019, 54(11): 118–132.]
- [2] 潘毅凡. 中国产业二氧化碳排放的因素分解: 2002–2017[J]. *经济学报*, 2020, 7(2): 139–161. [Pan Y F. Factor decomposition of CO₂ emission in China's industry: 2002–2007[J]. *China Journal of Economics*, 2020, 7(2): 139–161.]
- [3] 王圣云, 任慧敏, 李晶. 中国制造业碳排放演变的驱动效应与“十四五”趋势研判[J]. *环境经济研究*, 2020, 5(2): 50–63. [Wang S Y, Ren H M, Li J. Driving effects of carbon emissions evolution in Chinese manufacturing industry and the trend during the 14th Five-Year Plan period[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2020, 5(2): 50–63.]
- [4] Su B, Ang B W, Li Y Z. Structural path and decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities[J]. *Energy Economics*, 2019, 83: 345–360.
- [5] 黄和平, 易梦婷, 曹俊文, 等. 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[J]. *经济地理*, 2021, 41(3): 49–57. [Huang H P, Yi M T, Cao J W, et al. Trade embodied carbon emissions and its effects of China: Take the Yangtze River Economic Belt as an example[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(3): 49–57.]
- [6] 韩中, 陈耀辉, 时云. 国际最终需求视角下消费碳排放的测算与分解[J]. *数量经济技术经济研究*, 2018, 35(7): 114–129. [Han Z, Chen Y H, Shi Y. To measure and decompose consumption-based carbon emission from the perspective of international demand[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2018, 35(7): 114–129.]
- [7] 刘宏筵, 张济建, 张茜. 全球供应链视角下的中国碳排放责任与形象[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 652–668. [Liu H D, Zhang J J, Zhang X. China's carbon emission responsibility and image from the perspective of global supply chain[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 652–668.]
- [8] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. *经济研究*, 2010, 45(2): 123–136. [Wang F, Wu L H, Yang C. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions during economic development in China[J]. *Economic Research Journal*, 2010, 45(2): 123–136.]
- [9] 廖明球, 许雷鸣. 二氧化碳排放的IO-SDA模型及其实证研究[J]. *统计研究*, 2017, 34(7): 62–70. [Liao M Q, Xu L M. IO-SDA model of CO₂ emissions and its empirical research[J]. *Statistical Research*, 2017, 34(7): 62–70.]
- [10] Cao Y, Zhao Y H, Wang H X, et al. Driving forces of national and regional carbon intensity changes in China: Temporal and spatial multiplicative structural decomposition analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 1380–1410.
- [11] Su B, Ang B W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological development[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 177–188.
- [12] Kim Y G, Yoo J, Oh W. Driving forces of rapid CO₂ emissions growth: A case of Korea[J]. *Energy Policy*, 2015, 82: 144–155.
- [13] Li H N, Wei Y M. Is it possible for China to reduce its total CO₂ emissions?[J]. *Energy*, 2015, 83: 438–446.
- [14] Peng J Y, Zhang Y G, Xie R, et al. Analysis of driving factors on China's air pollution emissions from the view of critical supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 203: 197–209.
- [15] Wei J, Huang K, Yang S S, et al. Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions in Beijing: An input-output structural decomposition analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 58–68.
- [16] Wood R, Lenzen M. Structural path decomposition[J]. *Energy Economics*, 2009, 31(3): 335–341.
- [17] Oshita Y. Identifying critical supply chain paths that drive changes in CO₂ emissions[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(4): 1041–1050.
- [18] 肖皓, 陈娅妮, 毕慧敏. 国外最终需求对我国碳排放的诱发效应: 基于中间品贸易渠道的考察[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2549–2561. [Xiao H, Chen Y N, Bi H M. Foreign final demands' induced effect on China's carbon emissions: From the view of intermediate goods trade[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(10): 2549–2561.]
- [19] 谢锐, 赵果梅. GMRIO模型视角下中国对外贸易环境效应研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(5): 84–102. [Xie R, Zhao G M. Investigating the environmental effect of China's foreign trade in perspective of GMRIO model[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2016, 33(5): 84–102.]
- [20] 张琼晶, 田聿申, 马晓明. 基于结构路径分析的中国居民消费对碳排放的拉动作用研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 377–386. [Zhang Q J, Tian Y S, Ma X M. Identifying the impetus of Chinese household consumption of carbon emission in structural path analysis[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 377–386.]
- [21] 周迪, 罗东权. 绿色税收视角下产业结构变迁对中国碳排放的影响[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 693–709. [Zhou D, Luo D Q. Green taxation, industrial structure transformation and carbon emissions reduction[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 693–709.]
- [22] 徐博, 杨来科, 钱志权. 全球价值链分工地位对于碳排放水平的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 527–535. [Xu B, Yang L K, Qian Z Q. The impact of global value chain position on carbon emissions [J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 527–535.]

- [23] 王康,李志学,周嘉. 环境规制对碳排放时空格局演变的作用路径研究: 基于东北三省地级市实证分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 343–357. [Wang K, Li Z X, Zhou J. The effects of environmental regulation on spatio-temporal carbon emissions patterns: Empirical analysis of prefecture-level cities in Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 343–357.]
- [24] Zhang B, Qu X, Meng J, et al. Identifying primary energy requirements in structural path analysis[J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 425–435.
- [25] Dietzenbacher E, Los B. Structural decomposition techniques: Sense and sensitivity[J]. *Economics Systems Research*, 1998, 10 (4): 307–324.

Analysis on the progressive motivation of carbon emissions growth in China using structural decomposition analysis and structural path decomposition methods

ZHANG Yanzhi, FENG Ying, ZHANG Lei

(School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Identifying the key driving factors for the growth of carbon emissions in China is of great practical significance. Based on the non-competitive input-output (I-O) model and using the structural decomposition analysis and structural path analysis methods, this study examined the key driving factors for the growth of carbon emissions in China from the macro, meso, and micro levels. The research results show that: (1) The change of final demand scale was the leading factor influencing the increase of carbon emissions at the three levels; (2) Coal consumption played an important role in carbon emissions reduction and contributed a great deal, but its emissions reduction effect was offset by the emissions increase of other energy sources; (3) The effect of energy efficiency on each production stage was positive and showed a decreasing trend. The change of final demand structure had a significant effect on carbon emissions reduction in production stage 1, and a slight increase effect in other production stages; (4) Changes in final demand scale and direct consumption coefficients were the primary influencing factors for most of the top 30 industrial chains with emissions increase effect. The top 30 critical paths accounted for 25.7% of the increase of carbon emissions in China from 2010 to 2015, which constituted the key driving factors for the growth of carbon emissions in the country. Finally, the article put forward some corresponding recommendations on emissions reduction from the macro and micro levels.

Key words: carbon emissions; structural path decomposition; progressive motivation; path increasing emissions; input-output model