DOI: 10.5846/stxb202203290776
李思佳,杨谨,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.
Li S J, Yang J, Fang D, Song D.The influencing factors of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from the perspective of industrial chain.Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3473-3487.

基于产业链视角的京津冀区域碳排放影响因素研究

李思佳[1],杨 谨[1,*],方 丹[1],宋 丹[2]
1 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083
2 北京市应对气候变化管理事务中心,北京 100089

摘要: 随着京津冀一体化程度不断加深,产业交叉现象严重,深入研究京津冀区域各产业链路径碳排放的影响因素,对区域协同减排具有重要意义。使用环境扩展投入产出分析对 2002—2017 年京津冀区域消费端碳排放进行核算;利用结构分解分析识别京津冀区域碳排放的驱动因素;通过结构路径分解进一步从微观产业链层面追溯引起京津冀区域碳排放变动的关键路径及其关键因素。研究结果表明:资本形成是构成京津冀区域消费端碳排放的主要需求类别;经济规模和人口是促进碳排放增加的重要因素,碳排放强度对碳排放起到显著抑制作用,区域内产业结构、消费结构对北京市、天津市和河北省的碳排放影响存在差异;从产业链路径来看,不同碳排放驱动因素对京津冀区域不同产业链路径的影响大小和方向不同,应聚焦具体路径,实施上下游综合治理。

关键词:碳排放;京津冀区域;结构分解分析;结构路径分解;关键路径

The influencing factors of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from the perspective of industrial chain

LI Sijia[1], YANG Jin[1,*], FANG Dan[1], SONG Dan[2]
1 *School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2 *Beijing Climate Change Management Center, Beijing* 100089, *China*

Abstract: Carbon emission is becoming one of the significantly environmental issues in the Beijing Tianjin -Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration. However, the development of urban agglomeration, which is nested in complex trading networks, has promoted carbon transmission and transference within the urban agglomeration. Ignoring the intercity connections and the driving forces may intensify the carbon emission of Jing-Jin-Ji urban agglomeration. To investigate the demand side carbon emissions and probe into the driving factors of embodied carbon emission along regional and industrial linkages within Jing-Jin-Ji urban agglomeration, the environmentally extended input-output analysis was used to calculate the consumption-based carbon dioxide in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2002 to 2017. The driving factors and key paths of carbon emissions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration are identified by combining Structural Decomposition Analysis (SDA) and Structural Path Decomposition (SPD). The results show that capital formation is the main contributor to consumption-based carbon emissions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration. The SDA results show that economic scale and population are key factors in promoting the increase of carbon emissions, and emission intensity plays an important role in offsetting carbon emissions. Backward industrial linkage, consumption structural effects of self-produced intermediate products and consumption structure play different roles on carbon emissions in Beijing, Tianjin and Hebei Province. Tracing the carbon emissions along the industrial chain, we found that the driving factors of carbon emissions have reversed impacts

基金项目:国家自然科学基金(72174187, 71704164, 72073017)
收稿日期:2022-03-29; **采用日期**:2022-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yangjin@cugb.edu.cn

on different paths. The results may shed light on the targeted emission reduction policy design and synergetic emission reduction in Jing-Jin-Ji urban agglomeration.

Key Words: carbon emission; Jing-Jin-Ji urban agglomeration; Structural Decomposition Analysis; Structural Path Decomposition; critical paths

全球气候变化是世界各国面临的共同挑战,中国也面临着巨大的碳减排压力[1]。京津冀区域是中国北方经济规模最大、最具活力的区域,包括北京市、天津市和河北省,在我国区域规划中占有无可替代的重要地位[2]。然而,以高耗能行业为主的产业结构导致京津冀区域排放大量的 CO_2,使得京津冀区域成为我国经济发展和资源环境矛盾最为尖锐的地区之一[3]。2019 年,京津冀区域碳排放量已达到 1160.83Mt[4],是我国乃至世界上碳排放量最大的都市圈[5]。2019 年 1 月,习近平总书记在京津冀协同发展座谈会上强调积极落实疏解北京非首都功能、推进产业迁移等低碳减排举措,积极促进京津冀区域协同减排[6]。

为实现京津冀区域协同减排,对京津冀区域碳排放进行核算必不可少。碳排放的核算方法主要分为生产端和消费端的碳排放核算[7]。早期关于碳排放的核算研究大多集中在生产端的碳排放,如 Peter 等[8]、Guan 等[9]和 Zhang[10]对影响中国生产端碳排放增长的因素进行了研究;Dhakal[11]核算了中国 35 个城市的生产端碳排放,得到人均能源消耗量及碳排放均以倍数增长,对环境造成了较大压力等结论。随着对碳排放的研究不断深入,学者们发现只研究生产端的碳排放是片面的,利用投入产出分析进行消费端核算日益成为重要的环境政策分析工具,消费端核算充分捕捉了上游生产导致的间接环境影响,将生产过程中的环境影响归咎于消费端对最终产品的需求[12—14]。因此,许多学者开始对消费端碳排放进行研究,如姚亮等[15]、王宪恩等[16]、张红丽等[17]分别从中国八大区域、省级层面、城市群层面基于消费端进行碳排放及碳转移分析。研究消费端的碳排放更有助于发现隐含的碳排放转移以及碳减排责任的分配。

基于碳排放的核算,探究碳排放变化背后的驱动因素对于减少碳排放至关重要。已有一些学者进一步挖掘碳排放背后的原因,对碳排放影响因素进行分析。常用的方法是分解分析,其中最流行的是结构分解分析(SDA)和指数分解分析(IDA), Ang 和 Zhang[18]、Su 和 Ang[19]以及 Wang 等[20]对这两种方法进行了详细描述。指数分解分析(IDA)灵活简单,数据要求相对较低,但它只涵盖直接影响,不考虑间接影响和最终需求[21]。结构分解分析(SDA)以投入产出表为数据基础,数据比较全面,运用该方法不仅可以进行时间动态分析,而且能够更加全面的研究碳排放直接或间接的影响因素[17]。郭朝先[22]利用 SDA 对 1992—2007 年我国 CO_2 排放增长进行了分解,认为能源消费强度效应是碳减排最主要的因素,最终需求的规模扩张效应和投入产出系数变动效应是促进碳排放增长的主要因素;Yang 等[23]利用 SDA 分析了 1990—2010 年北京市 $PM_{2.5}$ 排放变化的驱动因素,研究结果表明消费结构和人口规模是主要的驱动因素;Wang 等[24]利用 SDA 研究中国内部贸易碳排放的区域差异及驱动因素,并将列昂惕夫逆矩阵中的直接消耗系数和碳排放强度进一步分解,探究区域间的碳排放的影响与关联。尽管 SDA 从宏观层面将碳排放影响因素进行分解,但是无法体现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[25]。Wood 等[26]通过将 SPA 与 SDA 结合,提出了结构路径分解分析法 SPD,该方法不仅可以明确碳排放变动的具体产业路径,还可以找到每条路径上不同因素的贡献量。谢锐等[27]和张炎治等[25]采用 SDA 和 SPD 分别分析了 1995—2014 年和 2010—2015 年中国碳排放变化的驱动因素和关键路径。Fang 和 Yang[28]从消费视角利用 SDA 和 SPD 分析四川省黑碳排放的驱动因素与关键供应链路径。除了上述方法外,其它方法也被用于碳排放的研究,如 STIRPAT 模型[29—31]、LMDI 分解法[32—35],和空间计量方法[36—39]等。

近年来,京津冀区域碳排放问题引起了学者广泛关注。学者们分别从生产端和消费端对京津冀区域碳排放进行了核算[40—42]。其中 Bai 等[43]对 2012—2015 年间京津冀消费端的碳排放进行核算发现碳排放总量有所下降。在此基础上,许多研究进一步分析了京津冀区域碳排放的影响因素,如 Wang 等[44]对京津冀地区居

民消费碳排放进行结构分解分析,研究发现碳排放强度和居民消费水平是影响 2002 年—2012 年间接碳排放的主要因素,且不同区域的影响不同;李百吉和张倩倩[45]、宋健和赵怡芳[46]和王凤婷等[47]则运用 LMDI 因素分解法对京津冀区域碳排放影响因素进行分析。此外,也有学者运用空间计量模型分析京津冀区域碳排放的关键影响因素[48—49]。

综合已有文献,可以发现当前关于京津冀区域碳排放核算以及影响因素的研究已广泛开展,然而大部分研究主要从宏观层面上分析京津冀区域的碳排放影响因素。由于各因素在不同产业链上影响方向和影响程度差异较大,从微观层面上探究京津冀区域内各省市之间不同路径上不同因素的具体贡献能够进一步明确京津冀区域碳减排责任分配,更有针对性地指导京津冀区域低碳转型。因此,本文重点将京津冀区域作为整体,在分析京津冀区域内各省市碳排放影响因素的基础上,集成 SDA 与 SPD 方法,从产业链视角识别出碳排放的关键产业链路径及其影响因素,为京津冀区域协同减排提供参考。

1　研究方法与数据来源

1.1　京津冀区域投入产出表构建

京津冀区域投入产出表的基础是我国 30 省份多区域投入产出表。由于投入产出表编制受到年份限制,目前可获得 2002、2007、2012、2017 年中国多区域投入产出表[50—51]。通过将北京市、天津市、河北省三个区域的数据保留,其他省份数据依据部门求和,合并为一个区域,称为其他省份,构建京津冀多区域投入产出表,如表 1 所示。为了消除不同年份价格波动所带来的影响,本文以 2007 年为基年,使用双缩减的方法合成 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的可比价京津冀区域投入产出表,其中生产者价格指数来源于《中国统计年鉴》[52]。本文将固定资本形成和资本存量加总为“资本形成”类别,因此,京津冀区域投入产出表中的最终使用部分包括农村居民消费、城市居民消费、政府购买和资本形成四项。

表 1　京津冀区域投入产出表基本表式

Table 1　The basic format of the input-output table in Jing-Jin-Ji region

			中间使用 Intermediate use				最终使用 Final use					其他项 Error	总产出 Total output
			北京市	天津市	河北省	其他省份	北京市	天津市	河北省	其他省份	出口		
			1…n	1…n	1…n	1…n	y_1	y_2	y_3	y_4	EX	e	x
中间投入 Intermediate input	北京市	1…n	x^{11}	x^{12}	x^{13}	x^{14}	y^{11}	y^{12}	y^{13}	y^{14}	EX^1	e^1	x^1
	天津市	1…n	x^{21}	x^{22}	x^{23}	x^{24}	y^{21}	y^{22}	y^{23}	y^{24}	EX^2	e^2	x^2
	河北省	1…n	x^{31}	x^{32}	x^{33}	x^{34}	y^{31}	y^{32}	y^{33}	y^{34}	EX^3	e^3	x^3
	其他省份	1…n	x^{41}	x^{42}	x^{43}	x^{44}	y^{41}	y^{42}	y^{43}	y^{44}	EX^4	e^4	x^4
增加值 Value added		V	V^1	V^2	V^3	V^4							
总投入 Total input		x	x^1	x^2	x^3	x^4							

基于 CEADs 提供的 2002—2017 年 30 省份分部门 CO_2 排放清单[53—54]计算碳排放强度(各个区域部门的直接碳排放量与该部门总产出之比)。本文构建的京津冀区域投入产出表包含 42 个经济部门,但是 CO_2 数据包含 47 个排放部门。因此为确保数据的分类口径一致,本文将经济部门最终合并为 29 个部门,具体如表 2 所示。

表 2 部门序号及名称

Table 2 Sector classification

序号 No.	部门 Section	序号 No.	部门 Section
1	农林牧渔业	16	通用和专用设备制造业
2	煤炭开采和洗选业	17	交通运输设备制造业
3	石油和天然气开采业	18	电气机械和器材制造业
4	金属矿采选业	19	通信设备、计算机和其他电子设备制造业
5	非金属矿和其他矿采选业	20	仪器仪表制造业
6	食品制造和烟草加工业	21	其他制造业
7	纺织业	22	废品废料加工业
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	23	电力、热力的生产和供应业
9	木材加工和家具制造业	24	燃气生产和供应业
10	造纸印刷和文教体育用品制造业	25	水的生产和供应业
11	石油、炼焦产品和核燃料加工业	26	建筑业
12	化学工业	27	交通运输、仓储和邮政业
13	非金属矿物制品业	28	批发和零售、住宿和餐饮业
14	金属冶炼和压延加工业	29	其他服务业
15	金属制品业		

1.2 环境扩展投入产出分析

生产端碳排放核算是指一个区域内生产的所有产品所产生的碳排放完全由该区域承担,不论生产的产品是服务于本区域的最终需求还是用于出口[55]。然而,从生产端核算碳排放很容易造成“碳泄露”,不利于碳减排政策的实施[56]。从消费端研究碳排放可以进一步从最终消费的视角揭示碳排放的来源[57],更有利于揭示京津冀区域碳排放转移的真实情况,为碳减排政策做出正确的指导。区域间投入产出表反映了区域间不同经济部门之间的相互联系,结合各区域部门的碳排放强度,进行环境扩展投入产出分析,可以体现整个经济活动所带来的环境影响[58],这种影响不仅包含各个部门为满足其最终需求的直接排放,而且包含产业部门之间经济活动所隐含的间接排放[59],本文的环境指标用 CO_2 排放衡量。整个供应链直接和间接的碳排放量用区域 i 总产出 x_i 乘以碳排放强度 k 来计算。然而,碳排放不只是由最终需求拉动的直接和间接排放,没有进入生产环节的直接燃烧活动也会产生碳排放。在 2002—2017 年间,京津冀区域的居民直接排放占京津冀区域总碳排放的 4.53%—7.17%。因此,使用 $R_{\mathrm{direct}(i)}$ 标量来表示区域 i 居民直接排放(例如通过供暖和开车)。区域 i 的碳排放量可以用公式(1)计算:

$$E_{TCi} = k\,x_i + R_{\mathrm{direct}(i)} = k\,(I - A)^{-1}\,y_i + R_{\mathrm{direct}(i)} \tag{1}$$

i = 1 代表北京市, i = 2 代表天津市, i = 3 代表河北省, i = 4 代表其他省份。

根据公式(1), E_{TCi} 是区域 i 的碳排放总量, k 是京津冀区域及其他省份各个经济部门的碳排放强度的行向量, x_i 是在区域 i 各个部门的经济产出, A 是直接消耗系数矩阵,代表京津冀区域及其他省份各个部门生产单位总产出对相关部门的直接消耗; $(I - A)^{-1}$ 是列昂惕夫逆矩阵,代表各个部门为了获得单位最终产品而所需要生产的产品总量; y_i 代表区域 i 各经济部门的最终需求的列向量,总的最终需求矩阵为 $y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4]$; $R_{\mathrm{direct}(i)}$ 是区域 i 居民消费导致的 CO_2 直接排放。

1.3 结构分解分析(SDA)

结构分解分析是将经济系统中某一个因素的变动分解为其他各因素的变动的和,目的是为了测度其他各因素的变动对该因素变动的贡献大小[28]。当前结构分解分析已经广泛应用在能源消费、环境保护等多方面的研究中[60]。一般而言,区域碳排放受碳排放强度效应、生产技术效应、最终需求结构效应所影响。根据研究需要,已有学者在碳排放强度效应、生产技术效应、最终需求结构效应基础上进行进一步分解[61—64]。为探究京津冀区域碳排放总量效应、结构效应和内部产业关联效应,本文对京津冀区域的碳排放影响因素进行了

更加深入的分解分析,进一步将碳排放强度、列昂惕夫逆矩阵和最终需求进行分解得到更加具体的影响因素。其中,最终需求进一步分解为消费结构、经济规模、人口规模三个因素。根据 2002—2017 年京津冀区域投入产出表,在环境扩展投入产出分析的基础上,将 CO_2 排放根据公式(2)分解为以下影响因素:

$$E_{TCi} = k \times L \times B_i \times f_i \times p_i + R_{\mathrm{direct}(i)} \tag{2}$$

式中,k 是京津冀区域及其他省份的碳排放强度,即京津冀区域及其他省份各个部门生产活动产生的碳排放量与各个部门的经济产出的比值,L 是列昂惕夫逆矩阵,代表生产结构,B_i 表示区域 i 各个部门最终需求占区域 i 最终需求总量的比重,代表最终需求的消费结构,f_i 是区域 i 人均消费量,即区域 i 的最终需求总量与区域 i 人口数量的比值,代表经济规模,p_i 是区域 i 人口数量,$R_{direct(i)}$ 是区域 i 居民直接排放。其中,人口数据来自于历年的《中国统计年鉴》[65]。

已有学者在结构分解分析的基础上进一步对列昂惕夫逆矩阵和碳排放强度进行分解,揭示生产结构和碳排放强度引起碳排放在不同区域的贡献[24,55]。因此,本文在结构分解分析的基础上,对公式(2)中列昂惕夫逆矩阵 L 中的变化量 A 进行分解,即进一步将直接消耗系数矩阵 A 进行分解,以此揭示区域生产结构的联系与变化。

$$\begin{aligned} L &= (I - A)^{-1} \\ dL &= L_{(t)} - L_{(t-1)} = L_{(t)}\, dA\, L_{(t-1)} \end{aligned} \tag{3}$$

根据公式(3)列昂惕夫逆矩阵 L 与直接消耗系数 A 之间的关系,可以将直接消耗系数矩阵 $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}$ 分解为五个部分。以北京市最终需求为例,$A = A_{ii}^* + A_{nn}^* + A_{1i}^* + A_{i1}^* + A_{ij}^*$。其中 A_{ii}^* 表示直接消耗系数矩阵 A 中的子矩阵 A_{11},反映了北京市自产中间产品的使用结构。A_{nn}^* 表示直接消耗矩阵 A 中子矩阵 A_{ii}($i \neq 1$)即 A_{22}、A_{33}、A_{44},反映了其他区域自产中间产品的使用结构。A_{i1}^* 表示直接消耗矩阵 A 中子矩阵 A_{i1}($i \neq 1$)即 A_{21}、A_{31}、A_{41},反映了北京市产业部门对其他区域中间产品的使用结构,代表北京市的后向产业关联。A_{1i}^* 表示直接消耗矩阵 A 中子矩阵 A_{1i}($i \neq 1$)即 A_{12}、A_{13}、A_{14},反映了其他区域对北京市中间产品的使用结构,代表北京市的前向产业关联。每个产业部门都是产业系统中的一个环节,每个部门的生产依赖于其它部门的产品和服务的投入,而每个部门的产品和服务的输出又被用作其它产业部门的投入品。$A_{ij}^* = A - A_{ii}^* - A_{nn}^* - A_{1i}^* - A_{i1}^*$ 表示其他区域生产部门之间的产业关联。由上述的关系可以得到直接消耗系数 A 的变化量是 A_{ii}^*、A_{nn}^*、A_{1i}^*、A_{i1}^*、A_{ij}^* 这五个因素的变化量决定的,可以用公式(4)计算:

$$dA = dA_{ii}^* + dA_{nn}^* + dA_{1i}^* + dA_{i1}^* + dA_{ij}^* \tag{4}$$

同时,本文对碳排放强度 k 这一因素进行了分解,如公式(5)所示:

$$k = k_i + k_{-i} \tag{5}$$

其中 k_i 为区域 i 的碳排放强度,k_{-i} 为除区域 i 以外其他区域的碳排放强度。以北京市为例,k_1 为北京市的碳排放强度,$k_{-1} = [0 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]$ 为除北京是以外其他区域的碳排放强度。由上述的关系可以得到碳排放强度 k 的变化量是 k_i、k_{-i} 这两个因素的变化量决定的,可以用公式(6)计算:

$$dk = dk_i + dk_{-i} \tag{6}$$

本文使用加权分解法,将从时间 $t-1$ 到时间 t 的京津冀区域的碳排放变化分解为以上六个影响因素导致的变化之和。实际上,SDA 可以实现许多形式的分解,其中最常见的分解方法是两极分解法和中点权分解法。当只有两个分解因素时,两者都是准确的;但是,如果分解因素个数 n 大于 2,两极分解法和中点权分解只能得到近似值[53],加权平均分解法虽然计算量大但可以得到精确解[66],这种分解方法已经在许多学者的研究中加以运用[23,51]。因此本研究使用加权平均分解法,针对式(2)中的第一项有 5 个因素,有 5! =120 种

一阶分解形式,并且本文对列昂惕夫逆矩阵 L 中的直接消耗系数 A 和碳排放强度 k 进行了进一步的分解。

1.4 结构路径分解(SPD)

京津冀区域间各部门之间存在着复杂的投入产出联系。以北京市为例,北京市的钢铁需求主要由位于河北省的首钢集团生产供应,即为满足北京市钢铁的最终需求不仅引起北京市该部门的生产活动,同时也引起了河北省的相关投入品的生产,以及间接引起北京市及其他区域后向产业链一系列的连锁生产。因此,为进一步探究京津冀区域碳排放影响因素背后的上下游产业关系,本文利用 Wood 和 Lenzen 提出的 SPD 模型[26],首先进行结构路径分析(SPA),即将列昂惕夫逆矩阵 L 分解为各个部门最终使用对其他部门产品的直接消耗和经过多个部门的间接消耗,具体如公式(7)所示:

$$L = (I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \cdots \tag{7}$$

通过引入列昂惕夫逆矩阵的展开式可以计算出区域 i 不同阶的碳排放:

$$E_{TCi} = k(I + A + A^2 + A^3 + \cdots) + R_{\mathrm{direct}(i)} = kI\,y_i + kA\,y_i + k\,A^2\,y_i + k\,A^3\,y_i + \cdots + R_{\mathrm{direct}(i)} \tag{8}$$

其中 $kI\,y_i$ 表示区域 i 的最终需求 y_i 在第一阶直接消耗各部门产出引起的碳排放,该效应没有流经中间部门直接流向了最终需求,如北京居民对电力、热力的生产和供应业的需求引起的碳排放;$kA\,y_i$ 表示区域 i 的最终需求对某一部门的直接需求所引起的对另一部门的间接需求引起的碳排放,如为满足北京居民对建筑业的需求而引起河北金属冶炼和压延加工业的投入和消耗,此排放量为二阶路径效应;$k\,A^2\,y_i$ 表示区域 i 的三阶路径效应;四阶以上以此类推,影响路径及相关部门更多、更细致。

在结构路径分析的基础上,我们对每一阶路径进行结构分解分析(SDA),具体如公式(9)所示:

$$E_{TCi} = kI\,y_i + kA\,y_i + k\,A^2\,y_i + k\,A^3\,y_i + \cdots + R_{\mathrm{direct}(i)} = kI\,B_i f_i\,p_i + kA\,B_i f_i\,p_i + k\,A^2\,B_i f_i\,p_i + \cdots + R_{\mathrm{direct}(i)} \tag{9}$$

因此,根据公式(10)可以计算出每一阶产业路径中不同因素所导致的碳排放变化量:

$$\begin{aligned} d\,E_{TCi} = {} & (dk)\,B_i f_i\,p_i + k(d\,B_i) f_i\,p_i + kB_i(d\,f_i)\,p_i + kB_i f_i(d\,p_i) \\ & + (dk)\,A\,B_i f_i\,p_i + k(dA)\,B_i f_i\,p_i + kA(d\,B_i) f_i\,p_i + kAB_i(d\,f_i)\,p_i + kAB_i f_i(d\,p_i) \\ & + (dk)\,AA\,B_i f_i\,p_i + k(dA)\,A\,B_i f_i\,p_i + kA(dA)\,B_i f_i\,p_i + kAA(d\,B_i) f_i\,p_i \\ & + kAAB_i(df_i)\,p_i + kAAB_i f_i(d\,p_i) + \cdots + R_{\mathrm{direct}(i)} \end{aligned} \tag{10}$$

其中第一行是对区域 i 第一阶的碳排放进行结构分解,表示因素 k 、B_i 、f_i 、p_i 在各部门直接流向最终使用的路径上对碳排放变化的影响;第二行是对区域 i 第二阶的碳排放进行结构分解,增加直接消耗系数 A ,表示五因素在流经两个部门的产业路径上为满足区域 i 最终需求导致的碳排放变化;第三行和第四行对区域 i 三阶效应进行分解,增加部门间直接消耗系数 A_1 和 A_2 ,表示六因素在流经三个部门的产业路径上为满足区域 i 最终需求导致的碳排放变化。以此类推更高阶的效应涉及更多的中间部门和分解因素。通过结构路径分解分析,可以实现对区域 i 不同阶影响路径的深入分析,探究每条路径上碳排放强度、生产结构、消费结构、经济规模和人口数量的影响,最终确定京津冀区域的碳排放的关键路径和占主导地位的影响因素。

2 研究结果与讨论

2.1 京津冀区域生产端和消费端碳排放情况

图 1 展示了 2002—2017 年京津冀区域生产端和消费端碳排放的变化情况。从整体来看京津冀区域生产端碳排放,即由京津冀区域本地生产的所有产品所产生的 CO_2 排放量在 2002—2012 年持续增加,于 2012 年达到峰值 970.20Mt,2017 年 CO_2 排放量为 951.81Mt,与 2012 年相比有小幅下降趋势。碳排放量降低与国家的重视程度、政策措施的出台密切相关,由于 2013 年《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》、2015 年《京津冀协同发展规划纲要》等政策相继出台,京津冀区域碳减排取得了初步的成效。

具体从每个地区来看,北京市和天津市生产端的 CO_2 排放总量在 15 年间均呈现先上升后下降的变化趋势,北京市于 2007 年达到峰值 102.90Mt,天津市于 2012 年达到峰值 158.00Mt。2002—2017 年期间河北省生

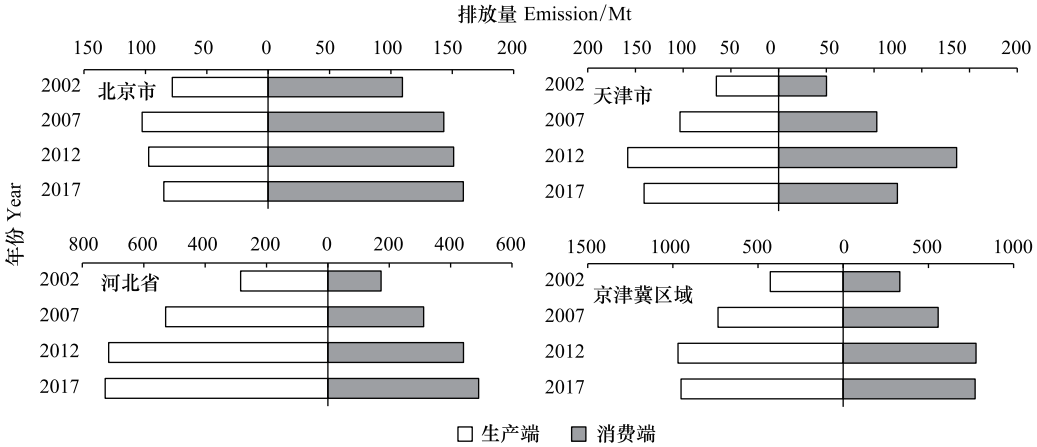

图 1　京津冀区域 2002—2017 年 CO_2 排放总量

Fig.1　Total carbon dioxide emissions in Jing-Jin-Ji region during 2002-2017

产端的 CO_2 排放总量持续上升,2017 年达到 725.92Mt。可见,京津冀区域碳排放量分布呈非均衡特征,河北省是京津冀区域的"碳排放大户"远高于北京市和天津市,天津市次之,北京市最低。近年来北京市实施了调整能源结构、优化产业结构、加大环境治理力度等一系列措施。天津市碳排放水平在北京市和河北省之间,并且天津市在借鉴北京市碳排放治理经验、推广碳排放治理模式试点等工作后也取得了显著的成效。但是,河北省的碳排放量仍然较高,不利于京津冀区域碳排放的长期治理,需要充分借助北京市、天津市的辐射带动作用,进一步优化京津冀区域的资源配置。

通过将生产端与消费端碳排放量进行对比可以发现。从整体来看京津冀区域消费端碳排放量变化情况与生产端相同,呈现上升后下降的趋势,2012 年达到峰值 779.28Mt。然而京津冀区域消费端碳排放量却始终低于生产端碳排放量,可见京津冀区域碳排放不仅由本区域最终使用所引起,还有部分是由于服务其他省份所引起的碳排放。具体从每个地区来看,2002—2017 年北京市消费端碳排放量始终高于生产端碳排放量,2012 年天津市消费端碳排放量超过生产端碳排放量,而河北省消费端碳排放量却始终低于生产端碳排放量。

图 2 展示了 2002—2017 年期间北京市、天津市、河北省各类最终需求导致的 CO_2 排放以及京津冀区域 CO_2 总排放量。从整体来看,作为京津冀区域碳排放的最大贡献者的资本形成在 2002 年占总排放量的 45.17%(150.27Mt),2012 年以后资本形成贡献率有所下降。城市居民消费是京津冀区域碳排放第二贡献者,且在 2002—2017 年期间贡献率保持不断上升。具体从每个区域来看,2002—2007 年期间,北京市碳排放的第一贡献者和第二贡献者分别为资本形成和城市居民消费,由于北京市不断完善轨道交通、高速铁路、建筑等基础设施建设需要大量的高能源高碳原材料,如钢材、水泥等,进而引起北京市的碳排放。但是随着北京市人均消费水平的提高,生活方式的改变,城市化进程的推进,城市化率增至 86.20%,导致居民生活能源消费和碳排放增多,在 2012 年城市居民消费甚至超过资本形成,成为北京市第一贡献者。2002—2012 年期间,天津市和河北省的碳排放第一贡献者均为资本形成,贡献率呈先上升后下降趋势,天津市和河北省在 2012 年资本形成贡献率均达到峰值分别为 64.85%(120.88%)和 57.28%(253.01Mt)。然而,作为天津市和河北省碳排放第二贡献者的城市居民消费,其中天津市城市居民消费贡献率呈先下降后上升趋势,而河北省城市居民消费贡献率在 2002—2017 年期间持续上升。天津市和河北省城市化的迅猛发展以及居民生活水平的提高,使得建筑和基础设施的需求量快速增加,特别是住房和交通部分,进而诱发大量碳排放。

2.2　京津冀区域消费端碳排放变化的驱动因素

本文对京津冀区域 2002—2017 年间的消费端碳排放进行结构分解分析,图 3 以 2002 年为基年,分解为六个影响因素:碳排放强度、生产结构、消费结构、经济规模、人口数量以及居民直接排放,展示了各因素所导

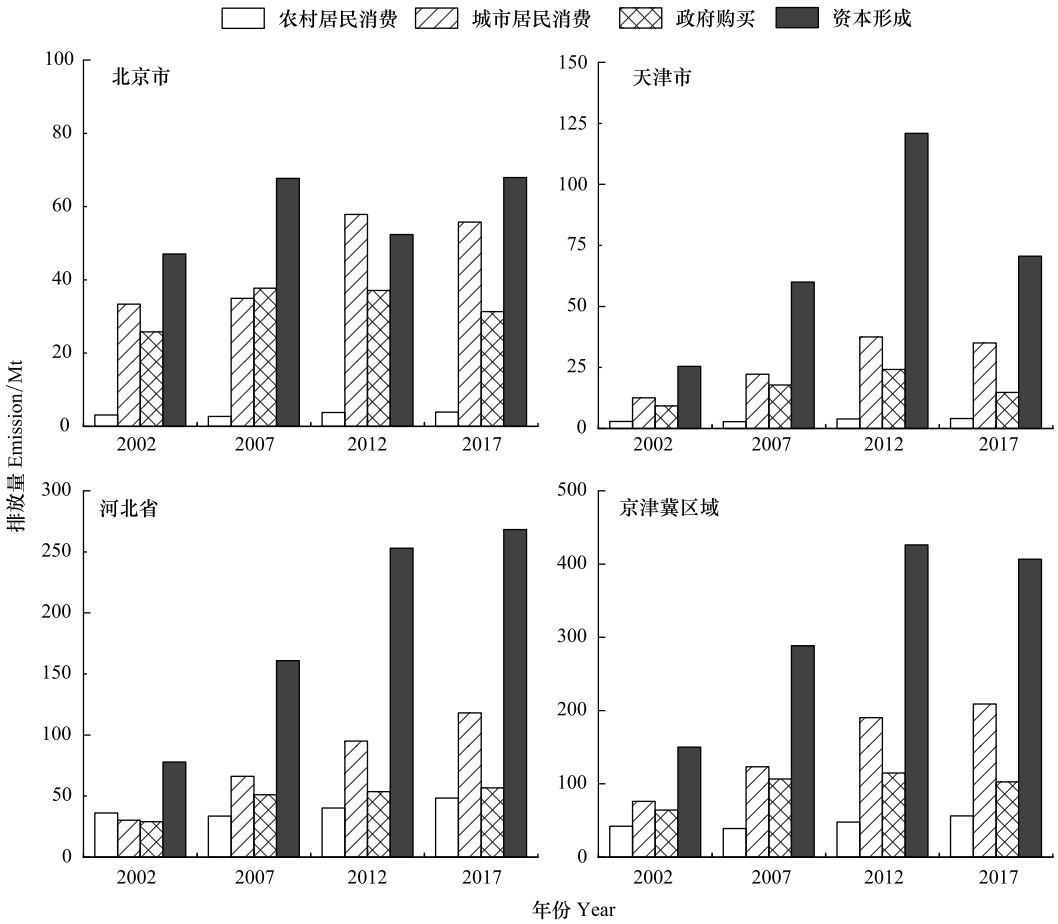

图 2 京津冀区域 2002—2017 年各类最终需求导致的碳排放量

Fig.2 Contributions of major final demands in Jing-Jin-Ji region during 2002−2017

致碳排放变动的贡献百分比。经济规模是导致碳排放增加的主要因素,2002—2017 年经济规模扩大导致 CO_2 排放增加 186.48%。经济发展、生活水平的提高增加了对商品和服务的需求,从而间接增加了经济生产活动和碳排放。人口和居民直接排放作为导致碳排放增加的因素,2002—2017 年间分别增加 CO_2 排放 149.72Mt 和 34.35Mt,可见城市化、居民节能意识应进一步提升。碳排放强度是抵消碳排放增加的主要因素,2002—2017 年间抵消 CO_2 排放 116.91%,体现了能源利用效率的提升。生产结构在 2002—2012 年导致 CO_2 排放增加 33.88%,2012 年后 CO_2 排放增速放缓,说明政府的空气治理政策推广清洁生产技术、促进厂房设备升级等取得了一定的成效。消费结构对碳排放的影响在 2012 年前后从促进碳排放转变为抑制碳排放,2012—2017 年促进 CO_2 排放减少 54.20Mt,说明目前京津冀的消费模式正在向清洁模式转型。

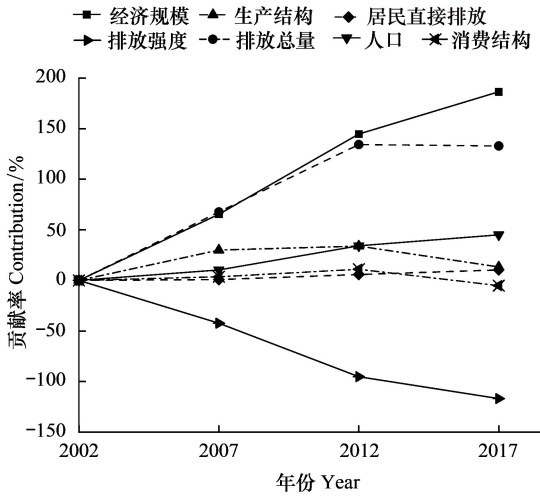

图 3 京津冀区域 2002—2017 年各个驱动因素对碳排放变化的贡献百分比

Fig.3 Contributions of driving factors to changes in carbon dioxide emissions in Jing-Jin-Ji region during 2002—2017

在对京津冀区域整体 2002—2017 年间的消费端碳排放进行结构分解分析的基础上,本文进一步针对北京市、天津市、河北省三个区域分别进行结构分解分析,将生产结构中的直接消耗系数分解为本区域自产中间产品的使用结构、其他区域自产中间产品的使用结构、前向产业关联、后向产业关联、其他区域间的产业关联五部分;将碳排放强度分解为本区域碳排放强度和其他区域碳排放强度两部分;不仅细化展示了不同产业关联的影响,还明确了各个因素对不同区域的贡献度。图 4 展示了北京市、天津市、河北省每个相邻时间内消费端碳排放的变化量和各个影响因素的贡献程度。北京市消费端 CO_2 排放在 2002—2017 年均呈上升趋势,但是上升幅度呈逐渐下降趋势,由 30.88%下降到 5.16%。2012 年是天津市消费端 CO_2 排放的转折点此前呈上升趋势,此后在 2012—2017 年间下降了 33.23%,碳减排效果显著。河北省消费端 CO_2 排放在 2002—2017 年虽然持续上升,但是增速放缓。由此可见北京市、天津市、河北省消费端碳排放增速均处于下降趋势,说明京津冀区域碳排放量逐渐得到控制。

进一步深入分析驱动因素,可以发现 2002—2017 年期间,经济规模是导致北京市、天津市、河北省消费端碳排放增加的最主要的因素,说明京津冀区域在经济发展的同时,消费增加进而导致碳排放增加。人口因素对北京市、天津市、河北省均起到促进碳排放的作用,人口的增加会引起更多的最终需求从而导致更多的碳排放。2002—2012 年期间,本区域碳排放强度在北京市、天津市和河北省始终发挥着减排作用,这意味着京津冀区域在提高能效方面的长期努力,为减少碳排放做出了积极贡献;然而在 2012—2017 年河北省碳排放强度却导致河北省 CO_2 排放增加 5.16%,需进一步加强关注河北省碳排放强度对碳排放的影响。此外,2002—2017 年期间,其他区域碳排放强度在北京市、天津市和河北省均发挥着减排作用,但减排效果有降低的趋势。

2002—2017 年期间后向产业关联、本区域自产中间产品的使用结构、消费结构和对北京市、天津市和河北省的消费端碳排放影响存在差异。后向产业关联在 2002—2007 年抵消北京市 CO_2 排放 2.57%,2007—2012 年促进北京市 CO_2 排放增长 20.62%,而在 2012—2017 年抑制北京市 CO_2 排放 19.98%,表现为先抑制后促进再抑制,这意味着北京市产业部门作为下游的产业消耗其他区域上游产业部门提供的产品过程中,跟随产品流向北京市的碳排放量出现波动,一方面是由于北京市的产业结构更新升级,另一方面是由于北京市进口发展驱动。2002—2007 年期间后向产业关联促进天津市 CO_2 排放增加 26.68%,而在 2007—2017 年表现为抑制作用,说明天津市产业部门作为下游的产业消耗其他区域上游产业部门提供的产品过程中,跟随产品流向天津市的碳排放量已得到控制,且成效显著;后向产业关联对河北省起到先促进后抑制再促进的作用与对北京市的作用恰恰相反,这意味着河北省产业部门作为下游的产业消耗其他区域上游产业部门提供的产品过程中,跟随产品流向河北省的碳排放量仍然较大,说明河北省从其他区域进口的高耗能产品较多,带来了隐含碳排放。

北京市自产中间产品的使用结构对北京市消费端碳排放表现为先促进后抑制和再促进的作用;天津市自产中间产品的使用结构对天津市消费端碳排放表现为先抑制后促进的作用,说明北京市和天津市的各产业部门在使用本区域自产的产品和劳务过程中仍然引起碳排放的增长。而河北省自产中间产品的使用结构对河北省消费端碳排放的作用已从促进转变为抑制,其中在 2012—2017 年抵消河北省 CO_2 排放 11.77%,说明河北省各产业部门在使用本区域自产的产品和劳务过程中碳排放已得到一定的控制。

消费结构始终对北京市消费端碳排放起到抑制的作用,且抑制程度逐渐增大,2012—2017 年抵消北京市 CO_2 排放 10.49%;消费结构在 2002—2017 年对天津市消费端碳排放的作用从促进逐渐转变为抑制,其中 2012—2017 年抑制天津市 CO_2 排放 26.18%,是 2012—2017 年抑制天津市碳排放最主要的因素。这说明北京市和天津市的转变能源消费结构、绿色低碳发展已取得一定成效。然而 2002—2017 年消费结构始终促进河北省消费端碳排放增加,因此需要进一步加强推动河北省的消费结构清洁化。此外,前向产业关联、其他区域自产中间产品的使用结构、其他区域间的产业关联和居民直接消费对北京市、天津市、河北省消费端碳排放的影响程度较小。

2.3　影响京津冀区域消费端碳排放的关键路径

通过结构分解分析,对影响京津冀区域消费端碳排放的驱动因素有了宏观层面上的认识,但是忽略了京津

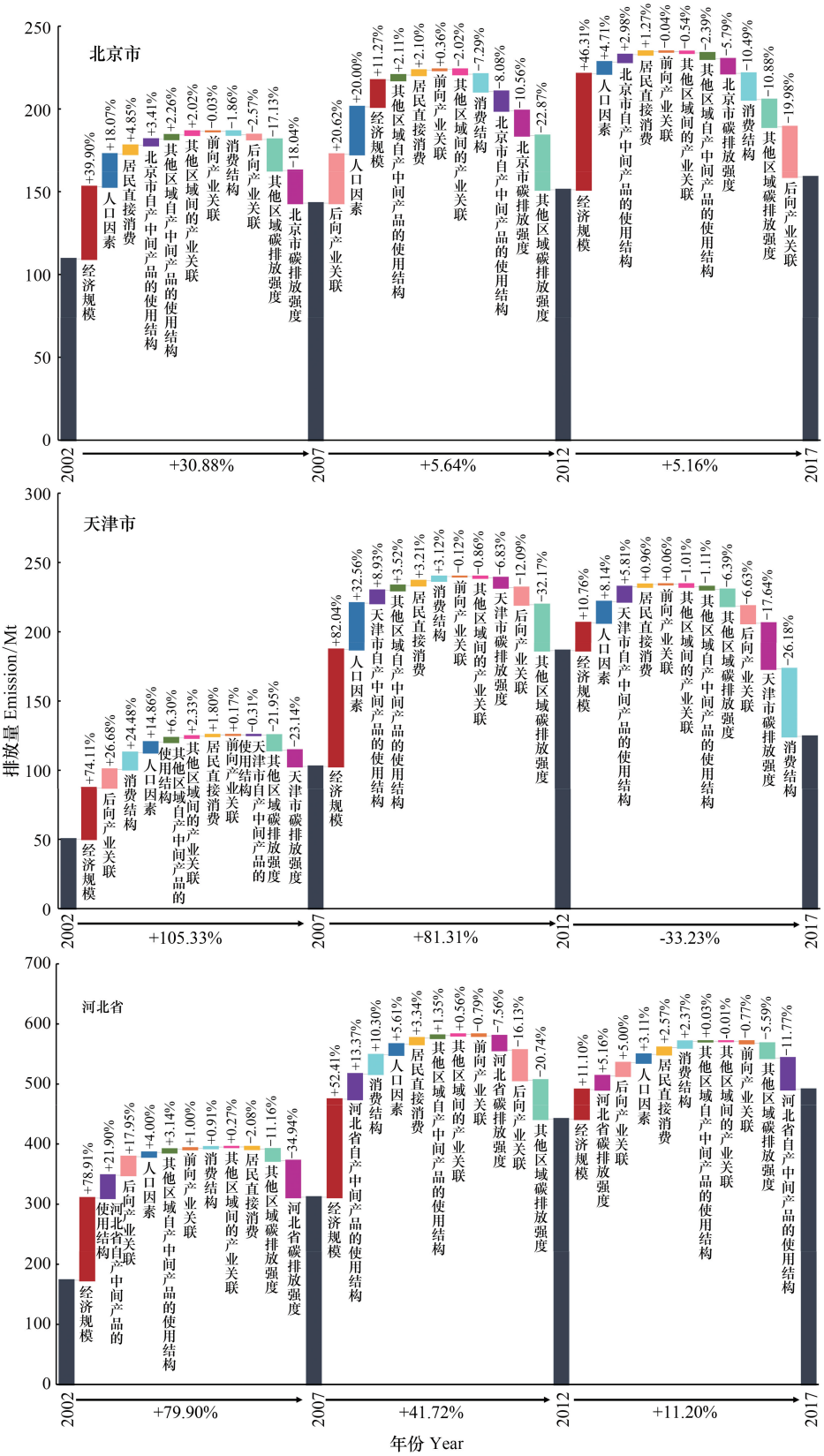

图 4 2002—2017 年京津冀区域各省市消费端碳排放变化的驱动因素贡献量

Fig.4 Contributions of different driving factors to changes in carbon emissions in Jing-Jin-Ji region during 2002–2017

冀区域内部门间的相互抵消作用,无法识别影响碳排放的区域间的关键路径和每条路径减排的重点。因此,参考上文京津冀区域消费端碳排放在 2012—2017 年开始实现碳减排,本文利用结构路径分解对 2012—2017 年期间影响消费端碳排放变化的关键路径及影响路径的关键因素进行识别,从历史获取减排经验。由于三阶以上的产业路径影响较小,涉及中间部门多而复杂,因此本文的关键路径分析集中于前三阶路径。

本文首先通过结构路径分析 2012—2017 年京津冀区域消费端碳排放变化的前 30 条关键路径,进而针对前 30 条路径进行结构分解分析,表 3 展示了 2012—2017 年京津冀区域碳排放驱动因素引起碳排放变化的关键路径。其中“阶数”代表构成关键产业路径的部门数量,与表中后三列部门名称相对应:如果为 1,一阶产业路径表示为“部门 1→最终使用”;如果为 2,二阶产业路径表示为“部门 1→部门 2→最终使用”;如果为 3,三阶产业路径表示为“部门1→部门2→部门3→最终使用”。“序号”表示导致碳排放变化的因素路径,包括碳

表 3　2012—2017 年京津冀区域各驱动因素引起碳排放变化的前 30 条关键路径

Table 3　The top 30 key paths of carbon emission changes caused by different driving factors in Jing-Jin-Ji region during 2012—2017

序号 Factor rank	阶数 Order	排放变化 Emission change(Mt)	影响方向 Direction	部门 1 Sector (1st order)	部门 2 Sector (2nd order)	部门 3 Sector (3rd order)	最终使用 Final use
				经济规模 f			
f1	2	3.07	↑	河北省金属冶炼和压延加工业	河北省建筑业		河北省
				碳排放强度 k			
k1	2	11.52	↑	河北省金属冶炼和压延加工业	河北省建筑业		河北省
k2	2	-8.24	↓	河北省非金属矿物制品业	河北省建筑业		河北省
k3	1	-4.78	↓	河北省其他服务业			河北省
k4	1	-3.80	↓	天津市电力、热力的生产和供应业			天津市
k5	2	-3.72	↓	其他省份非金属矿物制品业	其他省份建筑业		河北省
k6	2	3.21	↑	河北省金属冶炼和压延加工业	河北省建筑业		其他省份
				投入产出结构变动 A_1			
$A_1$1	2	-8.20	↓	河北省金属冶炼和压延加工业	北京市建筑业		其他省份
$A_1$2	2	-6.73	↓	河北省金属冶炼和压延加工业	北京市建筑业		北京市
$A_1$3	2	4.06	↑	河北省非金属矿物制品业	河北省建筑业		河北省
$A_1$4	2	3.74	↑	天津市电力、热力的生产和供应业	天津市建筑业		天津市
$A_1$5	2	-3.49	↓	其他省份非金属矿物制品业	北京市建筑业		其他省份
$A_1$6	2	3.09	↑	河北省电力、热力的生产和供应业	河北省其他服务业		河北省
$A_1$7	2	3.04	↑	其他省份电力、热力的生产和供应业	北京市电力、热力的生产和供应业		其他省份
				消费结构 B			
B1	2	17.03	↑	河北省金属冶炼和压延加工业	河北省建筑业		河北省
B2	2	-13.15	↓	河北省金属冶炼和压延加工业	河北省建筑业		其他省份
B3	2	-12.78	↓	其他省份非金属矿物制品业	其他省份建筑业		河北省
B4	2	-11.13	↓	其他省份非金属矿物制品业	其他省份建筑业		天津市
B5	2	8.73	↑	河北省非金属矿物制品业	河北省建筑业		河北省
B6	2	-6.69	↓	河北省非金属矿物制品业	河北省建筑业		其他省份
B7	1	-6.17	↓	其他省份电力、热力的生产和供应业			北京市
B8	2	-5.57	↓	其他省份金属冶炼和压延加工业	其他省份建筑业		河北省
B9	2	-4.86	↓	其他省份金属冶炼和压延加工业	其他省份建筑业		天津市
B10	1	-4.72	↓	河北省电力、热力的生产和供应业			河北省
B11	2	4.30	↑	河北省电力、热力的生产和供应业	河北省其他服务业		河北省
B12	2	-4.21	↓	其他省份电力、热力的生产和供应业	其他省份建筑业		天津市
B13	3	-3.83	↓	其他省份电力、热力的生产和供应业	其他省份非金属矿物制品业	其他省份建筑业	河北省
B14	2	3.64	↑	河北省电力、热力的生产和供应业	河北省其他服务业		其他省份
B15	3	-3.33	↓	其他省份电力、热力的生产和供应业	其他省份非金属矿物制品业	其他省份建筑业	天津市
B16	1	3.21	↑	北京市交通运输、仓储和邮政业			北京市

“↑”代表促进碳排放的关键路径,“↓”代表抑制碳排放的关键路径

排放强度 k 、各部门间直接消耗系数即投入产出结构 A_1 和 A_2 、消费结构 B 、人均消费量即经济规模 f 、人口因素 p ;“排放变化”表示在研究时间内“因素”在“关键产业路径”上所导致的碳排放变动。

从路径整体影响来看,对京津冀区域消费端碳排放增长整体影响第一大的路径为“河北省金属冶炼和压延加工业→河北省建筑业→河北省最终使用”,碳排放强度 k 、消费结构 B 、经济规模 f 均在该路径上起到促进碳排放的作用,增加 CO_2排放 31.62Mt。“河北省金属冶炼和压延加工业/河北省非金属矿物制品业→河北省建筑业→河北省最终使用”路径类型和“河北省电力、热力的生产和供应业→河北省其他服务→河北省最终使用”路径对河北省消费端碳排放增长影响巨大。“河北省金属冶炼和压延加工业→北京市建筑业→北京市最终使用”和“其他省份电力、热力的生产和供应业→北京市最终使用”作为北京市的关键路径起到抑制碳排放的作用。但是“北京市交通运输、仓储和邮政业→北京市最终使用”路径引起了北京市消费端碳排放增长。“其他省份非金属矿物制品业/其他省份金属冶炼和压延加工业/其他省份电力、热力的生产和供应业→其他省份建筑业→天津市最终使用”路径类型是抑制天津市碳排放的关键路径,但是在“天津市电力、热力的生产和供应业→天津市建筑业→天津市最终使用”路径上引起天津市消费端 CO_2排放增长 3.74Mt。

从关键路径涉及的重要部门来看,金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、电力、热力的生产和供应业作为起始部门,建筑业作为中间部门在 2012—2017 年期间对京津冀区域消费端碳排放变动的影响较大。从京津冀区域外部角度进行分析,由于京津冀区域的需求需要由其他省份提供产品满足,进而引起其他省份的碳排放,并以河北省为最终使用的路径居多;同样为满足其他省份的需求也需要由京津冀区域提供产品,进而引起京津冀区域的碳排放。从京津冀区域内部角度分析,流经河北省的路径占主要部分,且以河北省最终使用的路径为主;北京市和天津市所涉及的路径相对较少。

其中消费结构 B 在不同的路径上起到不同的作用,在路径 $B2$、$B3$、$B4$、$B6$、$B7$、$B8$、$B9$、$B10$、$B12$、$B13$、$B15$ 中抑制消费端 CO_2排放 76.44Mt;但是在路径 $B1$、$B5$、$B11$、$B14$、$B16$ 上发挥了增排作用,使得 CO_2排放增加 36.91Mt,说明河北省金属冶炼和压延加工业、河北省建筑业、河北省非金属矿物制品业、河北省电力、热力的生产和供应业、河北省其他服务业以及北京市交通运输、仓储和邮政业的消费结构清洁化有待加强。碳排放强度 k 在路径 $k2$、$k3$、$k4$、$k5$ 中抑制了 20.54Mt 的 CO_2排放,说明河北省非金属矿物制品业、其他省份非金属矿物制品业、河北省其他服务业和天津市电力、热力的生产和供应业实现了碳排放强度下降,能源效率较高、能源结构合理;但是在路径 $k1$、$k6$ 上起到促进碳排放的作用,河北省金属冶炼和压延加工品业和河北省建筑业的碳排放强度过大,导致了碳排放增长,是技术更新、节能减排重点关注的产业部门。

经济规模 f 在二阶效应路径 $f1$ 上起到促进碳排放的作用,促进消费端 CO_2排放 3.07Mt 侧面反映出经济规模扩大对碳排放的促进作用有所降低。投入产出结构变动 A_1 在 A_1 1、A_1 2、A_1 5 路径上导致 CO_2 排放减少了 18.42Mt;但是在路径 A_1 3、A_1 4、A_1 6、A_1 7 上促进 CO_2 排放 13.93Mt,说明河北省非金属矿物制品业、河北省建筑业、天津市电力、热力的生产和供应业和天津市建筑业投入产出关系有待优化。可以发现使用 SDA 和 SPD 方法得到最终需求的结果不完全相同,这也再次印证针对京津冀区域重点碳排放部门和具体部门间流向治理的重要性。

3 结论与政策建议

3.1 结论

本文结合环境扩展投入产出分析,核算了 2002—2017 年京津冀区域的消费端碳排放,利用结构分解分析和结构路径分解找出影响京津冀区域碳排放变化的关键路径及驱动因素。结合上文分析得到以下结论:

(1)京津冀区域虽然消费端碳排放量变化情况与生产端相同,但是消费端碳排放量却始终低于生产端碳排放量。消费端碳排放核算表明,资本形成是京津冀区域碳排放增长的主要动因,城市居民消费是京津冀区域碳排放的第二大贡献者。

(2)结构分解分析表明,从京津冀区域整体看,经济规模是京津冀区域碳排放增长的最主要的驱动因素,

并且具有刚性。人口变化导致了京津冀区域更多的碳排放。碳排放强度下降是抑制京津冀区域碳排放最主要的手段。具体从北京市、天津市、河北省每个区域来看,后向产业关联、本区域自产中间产品的使用结构、消费结构对北京市、天津市和河北省的碳排放影响存在差异。除了上述因素外,前向产业关联、其他区域自产中间产品的使用结构、其他区域间的产业关联和居民直接消费对北京市、天津市、河北省碳排放的影响程度较小。

(3)结构路径分解表明,经济规模在关键路径上起到促进碳排放增长的作用;而消费结构、碳排放强度和生产结构在不同路径中的作用存在差异。因此,应重点关注各驱动因素引起碳排放变化的关键路径,实施针对性的减排措施。比如,河北省金属冶炼和压延加工业、河北省建筑业是技术更新、节能减排重点关注的产业部门,且消费结构清洁化有待加强;河北省非金属矿物制品业、河北省电力、热力的生产和供应业和天津市电力、热力的生产和供应业、天津市建筑业投入产出关系有待优化。

3.2　政策建议

(1)京津冀区域为解决资本形成对碳排放带来的巨大影响,应强化人力资本投资和政策法规等软环境的建设,积极引导产业结构合理化、高级化发展,政府通过资金扶持、政策导向鼓励企业绿色生产,尤其加强河北省的政策扶持。其次,京津冀区域为解决城市居民消费对京津冀区域碳排放的显著影响,社区应倡导居民绿色消费、低碳消费,普及低碳相关知识,提升居民的低碳责任感;政府应实施低碳产品补贴和鼓励政策,扩大低碳产品供给。

(2)京津冀区域需要积极开发引导经济成果,技术与产业深度融合,促进设备引进和清洁技术创新,进一步降低生产部门的碳排放强度,加强对低碳生活的宣传,减少因消费增加引起的碳排放变化。具体从每个区域来看,由于后向产业关联对河北省碳排放仍起到促进的作用,应调整河北省的产业结构。北京市和天津市的各产业部门在使用本区域自产的产品和劳务过程引起了碳排放增长,北京市和天津市应淘汰落后产能、改善生产技术。消费结构始终促进河北省碳排放增加,因此需要进一步加强推动河北省的消费结构清洁化,不断引导低碳的消费模式和消费观念。

(3)从产业路径和重要部门层面分析,应正确认识区域间不同产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,在“河北省金属冶炼和压延加工业/河北省非金属矿物制品业→河北省建筑业→河北省最终使用”路径类型上,河北省应优化上下游结构、减少原材料损耗、提高投入产出效率,降低河北省金属冶炼和压延加工业对河北省建筑业排放强度是当务之急。“天津市电力、热力的生产和供应业→天津市建筑业→天津市最终使用”路径上引起天津市碳排放增长,天津市可以通过寻求清洁能源、加强生产技术创新等,减少天津市建筑业对天津市电力、热力的生产和供应业产品消耗。建筑业作为京津冀区域碳排放重要的中间部门,对此京津冀区域可以提高建筑利用率或者调整建筑投资以减少物耗进而达到减排目的,而房地产作为建筑业的下游,在推动建筑产业链整体低碳转型过程中起到核心作用。房地产应规范约束建筑工程商的低碳施工,或者可以通过实施绿色采购政策影响钢铁、水泥等建材企业的低碳生产,以此推动整个产业链的低碳转型。

(4)应重点关注北京市、天津市和河北省内部产业链以及跨区域间产业链的合理布局,区域间上下游部门综合治理是京津冀区域碳减排政策新的落实点。河北省碳排放量远高于北京市和天津市,河北省应增强就业吸纳能力,减少区域发展差距,同时北京市和天津市应发挥技术创新优势为河北省分担减排责任,从而提升京津冀区域整体治理水平。此外,提高区域间上下游部门的投入产出效率,优化产业结构,鼓励京津冀区域多采用节能减排技术,通过加强碳排放强度在关键路径的减排作用,向低能耗、低排放的方向发展,最终在产业链上实现京津冀区域的碳减排。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 张伟, 张杰, 汪峰, 蒋洪强, 王金南, 姜玲. 京津冀工业源大气污染排放空间集聚特征分析. 城市发展研究, 2017, 24(9): 81-87.
[3] 赵玉焕, 李浩, 刘娅, 曹叶, 张中华, 王淞. 京津冀CO_2排放的时空差异及影响因素研究. 资源科学, 2018, 40(1): 207-215.
[4] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, Chen H L, Wang D, Hubacek K. Assessment to China's recent emission pattern shifts. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.
[5] Han R, Tang B J, Fan J L, Liu L C, Wei Y M. Integrated weighting approach to carbon emission quotas: an application case of Beijing-Tianjin-Hebei region. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 448-459.
[6] 王楠, 谢文萱. 面向碳中和的京津冀城市群发展路径. 企业经济, 2021, 40(8): 44-52.
[7] Zhang B, Qiao H, Chen Z M, Chen B. Growth in embodied energy transfers via China's domestic trade: evidence from multi-regional input-output analysis. Applied Energy, 2016, 184: 1093-1105.
[8] Peters G P, Weber C L, Guan D B, Hubacek K. China's growing CO_2 emissions-a race between increasing consumption and efficiency gains. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17): 5939-5944.
[9] Guan D B, Hubacek K, Weber C L, Peters G P, Reiner D M. The drivers of Chinese CO_2 emissions from 1980 to 2030. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 626-634.
[10] Zhang Y G. Supply-side structural effect on carbon emissions in China. Energy Economics, 2010, 32(1): 186-193.
[11] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. Energy Policy, 2009, 37(11): 4208-4219.
[12] Feng K S, Hubacek K, Sun L X, Liu Z. Consumption-based CO_2 accounting of China's megacities: the case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing. Ecological Indicators, 2014, 47: 26-31.
[13] Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories. Ecological Economics, 2008, 65(1): 13-23.
[14] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. Ecological Economics, 2009, 69(2): 211-222.
[15] 姚亮, 刘晶茹, 王如松, 尹科. 基于多区域投入产出(MRIO)的中国区域居民消费碳足迹分析. 环境科学学报, 2013, 33(7): 2050-2058.
[16] 王宪恩, 赵思涵, 刘晓宇, 段海燕, 宋俊年. 碳中和目标导向的省域消费端碳排放减排模式研究——基于多区域投入产出模型. 生态经济, 2021, 37(5): 43-50.
[17] 张红丽, 沈镭, 李艳梅. 京津冀经济活动隐含的碳排放转移——基于多区域投入产出模型的分析. 资源科学, 2017, 39(12): 2287-2298.
[18] Ang B W, Zhang F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176.
[19] Su B, Ang B W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments. Energy Economics, 2012, 34(1): 177-188.
[20] Wang H, Ang B W, Su B. Multiplicative structural decomposition analysis of energy and emission intensities: some methodological issues. Energy, 2017, 123: 47-63.
[21] Zeng L, Xu M, Liang S, Zeng S Y, Zhang T Z. Revisiting drivers of energy intensity in China during 1997-2007: a structural decomposition analysis. Energy Policy, 2014, 67: 640-647.
[22] 郭朝先. 中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术. 中国工业经济, 2010, (12): 47-56.
[23] Yang J, Song D, Fang D L, Wu F. Drivers of consumption-based $PM_{2.5}$ emission of Beijing: a structural decomposition analysis. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 734-742.
[24] Wang Z H, Li Y M, Cai H L, Yang Y T, Wang B. Regional difference and drivers in China's carbon emissions embodied in internal trade. Energy Economics, 2019, 83: 217-228.
[25] 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. 资源科学, 2021, 43(6): 1153-1165.
[26] Wood R, Lenzen M. Structural path decomposition. Energy Economics, 2009, 31(3): 335-341.
[27] 谢锐, 王振国, 张彬彬. 中国碳排放增长驱动因素及其关键路径研究. 中国管理科学, 2017, 25(10): 119-129.
[28] Fang D, Yang J. Drivers and critical supply chain paths of black carbon emission: a structural path decomposition. Journal of Environmental Management, 2021, 278: 111514.
[29] 何永贵, 于江浩. 河北省碳排放及其影响因素变化趋势研究. 环境科学与技术, 2018, 41(1): 184-191.
[30] 吕天宇, 曾晨, 刘泽瑾, 杨婧. 空间互动视角下 CO_2排放驱动因素及溢出效应——基于全球 98 个国家的数据分析. 生态学报, 2020, 40(24): 8974-8987.
[31] 周国富, 宫丽丽. 京津冀能源消耗的碳足迹及其影响因素分析. 经济问题, 2014, (8): 27-31.
[32] 张雪华, 董会忠. "2+26"城市碳排放时空演变特征及其驱动因素研究. 资源开发与市场, 2021, 37(12): 1448-1456.
[33] 宋旭, 贾俊松, 陈春谛, 陈皆红. 江西省能耗碳排放时空特征、脱钩关系及其驱动因素. 生态学报, 2020, 40(20): 7451-7463.
[34] 陈贵景, 常克亮, 陈慧琴, 施智杰. 基于生产侧和消费侧的京津冀地区电力工业 CO_2排放因素分解分析. 科技管理研究, 2019, 39(20): 251-258.

[35] 郑颖, 逯非, 刘晶茹, 王效科. 我国典型城市化石能源消费 CO_2排放及其影响因素比较研究. 生态学报, 2020, 40(10): 3315-3327.
[36] 王少剑, 苏泳娴, 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.
[37] 赵巧芝, 闫庆友, 赵海蕊. 中国省域碳排放的空间特征及影响因素. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2018, 20(1): 9-16.
[38] 刘汉初, 樊杰, 曾瑜晢, 郭锐. 中国高耗能产业碳排放强度的时空差异及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(22): 8357-8369.
[39] 崔盼盼, 赵媛, 张丽君, 夏四友, 许昕. 基于不同需求层次的中国城镇居民消费隐含碳排放时空演变机制. 生态学报, 2020, 40(4): 1424-1435.
[40] Chen M M, Wu S M, Lei Y L, Li S T. Study on embodied CO_2 transfer between the Jing-Jin-Ji region and other regions in China: a quantification using an interregional input-output model. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(14): 14068-14082.
[41] 蒋雪梅, 郑可馨. 京津冀地区间贸易隐含碳排放转移研究. 地域研究与开发, 2019, 38(6): 126-130, 135-135.
[42] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉. 京津冀区域生产和消费 CO_2排放的时空特点分析. 环境科学, 2014, 35(9): 3619-3631.
[43] Bai Y C, Zheng H R, Shan Y L, Meng J, Li Y. The consumption-based carbon emissions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration over China's economic transition. Earth's Future, 2021, 9(9): e2021EF002132.
[44] Wang C, Zhan J Y, Li Z H, Zhang F, Zhang Y. Structural decomposition analysis of carbon emissions from residential consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1357-1364.
[45] 李百吉, 张倩倩. 京津冀地区碳排放因素分解——兼论"新常态"下的变动趋势. 生态经济, 2017, 33(4): 19-24.
[46] 宋健, 赵怡芳. 京津冀能源消费碳排放分解比较研究. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2018, 32(2): 141-148.
[47] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证. 工业技术经济, 2019, 38(8): 32-40.
[48] 边宇, 蔺雪芹, 周笑, 崔惟佳. 京津冀工业碳排放时空演化特征及影响因素. 环境科学与技术, 2021, 44(11): 37-47.
[49] 蔺雪芹, 边宇, 王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素. 经济地理, 2021, 41(6): 187-195.
[50] Pan C, Peters G P, Andrew R M, Korsbakken J I, Li S T, Zhou P, Zhou D Q. Structural changes in provincial emission transfers within China. Environmental Science & Technology, 2018, 52(22): 12958-12967.
[51] Zheng H R, Bai Y C, Wei W D, Meng J, Zhang Z K, Song M L, Guan D B. Chinese provincial multi-regional input-output database for 2012, 2015, and 2017. Scientific Data, 2021, 8(1): 244.
[52] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2008. 北京: 中国统计出版社, 2008.
[53] 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_2 emission accounts 1997-2015. Scientific Data, 2018, 5: 170201.
[54] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, Hubacek K. China CO_2 emission accounts 2016-2017. Scientific Data, 2020, 7: 54.
[55] 彭水军, 张文城, 孙传旺. 中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究. 经济研究, 2015, 50(1): 168-182.
[56] Rocco M V, Golinucci N, Ronco S M, Colombo E. Fighting carbon leakage through consumption-based carbon emissions policies: empirical analysis based on the world trade model with bilateral trades. Applied Energy, 2020, 274: 115301.
[57] 樊纲, 苏铭, 曹静. 最终消费与碳减排责任的经济学分析. 经济研究, 2010, 45(1): 4-14, 64-64.
[58] Feng K S, Davis S J, Sun L X, Hubacek K. Drivers of the US CO_2 emissions 1997-2013. Nature Communications, 2015, 6: 7714.
[59] Miller R E, Blair P D. Input-Output Analysis: Foundations and extensions. Englewood: Prentice Hall, 1985.
[60] 李景华. SDA 模型的加权平均分解法及在中国第三产业经济发展分析中的应用. 系统工程, 2004, 22(9): 69-73.
[61] Li Q P, Wu S M, Lei Y L, Li S T, Li L. Evolutionary path and driving forces of inter-industry transfer of CO_2 emissions in China: evidence from structural path and decomposition analysis. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142773.
[62] Mi Z F, Meng J, Guan D B, Shan Y L, Song M L, Wei Y M, Liu Z, Hubacek K. Chinese CO_2 emission flows have reversed since the global financial crisis. Nature Communications, 2017, 8(1): 1712.
[63] Wang Y F, Zhao H Y, Li L Y, Liu Z, Liang S. Carbon dioxide emission drivers for a typical metropolis using input-output structural decomposition analysis. Energy Policy, 2013, 58: 312-318.
[64] Wang Z H, Yang Y T. Features and influencing factors of carbon emissions indicators in the perspective of residential consumption: evidence from Beijing, China. Ecological Indicators, 2016, 61: 634-645.
[65] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2018. 北京: 中国统计出版社, 2018.
[66] 李艳梅, 付加锋. 中国出口贸易中隐含碳排放增长的结构分解分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 53-57.