

京津冀地区产业链空间网络及其隐含碳排放研究

杨子涵^{1,2}, 彭宝玉³, 孙 君^{4*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;
3. 河南大学地理与环境学院, 河南 开封 475004; 4. 中国自然资源经济研究院, 北京 101149)

摘 要:京津冀协同发展战略背景下, 区域间经济往来密切, 其中蕴含着产业链的分工和隐含碳排放的流动, 从而影响区域的功能协同和碳排放责任明晰。论文采用2012年和2017年中国多区域投入产出表数据, 借助投入产出分析法构建了京津冀地区产业链空间网络, 考察京津冀地区间产业联系及其隐含碳排放流动关系, 并分析了隐含碳排放的主要行业和地区, 以期京津冀地区产业协同发展和“双碳”目标提供决策依据。研究结果表明: ① 京津冀地区存在有分工、缺协同、产业空间联系和隐含碳流动对重工业依赖性较强的特征。建筑领域产业链和机械设备制造产业链等重工业产业链是地区间产业联系的主要路径。② 京津冀地区制造业生产环节薄弱。核心产业链的上游和下游产出占比始终高于中游, 制造业至生产性服务业的空间网络联系薄弱。③ 从隐含碳排放的空间格局看, 北京和河北分别是京津冀地区流入和流出隐含碳排放最多的省份, 天津隐含碳排放流出量占地区碳排放总量的比例最高。在此基础上, 论文从深化产业链空间融合、率先开展碳税与碳排放权交易试点等方面提出了政策建议。

关键词: 产业协同发展; 产业链空间网络; 隐含碳排放; 投入产出法; 京津冀地区

京津冀地区是中国北方的经济中心, 也是推动中国经济社会发展的重要引擎。2015年国务院出台《京津冀协同发展规划纲要》(以下简称《纲要》), 提出以有序疏解北京非首都功能为核心, 推动京津冀地区在交通、生态环境保护、产业等方面率先突破。产业协同作为率先突破的重点领域之一, 受到相关部门的重视。但是, 由于经济发展水平差异和行政体制分割等原因, 京津冀地区仍存在产业发展水平差距过大、产业链合作不够紧密等问题。因此, 亟需了解区域产业分工现状, 明确京津冀地区的优势主导产业及其在全国产业链分工中的地位, 进一步从空间异质性视角审视不同地区在产业链中的功能地位和关联关系, 为推动京津冀产业协同发展提供决策依据。

随着地区间的空间关系由行政区划下的等级关系向网络化下的功能关系的转变, 学者们也开始

从地区网络视角观察和分析区域的空间关联和空间结构^[1-3]。地区间产业分工合作为地区网络演化提供了重要基础^[4], 产业链下企业的竞争与合作为城市网络的发展提供了重要的经济联系^[5]。一定范围内以产业链为依托所联系起来的空間经济网络, 即可称为产业链空间网络^[6]。近年来对产业链空间网络的研究主要集中在产业链内部的行业联系强度的测度^[6-8]、产业联系的空间布局模式探究^[9-10]以及产业空间联系的形成机制^[11-13]三个方面。目前关于产业链空间网络的研究存在两点不足: 一是研究内容主要集中于产业链某环节, 如服务业和制造业的空间配置, 较少涉及更加详细的产业部门层面的空间联系; 二是研究对象多为单一的产业增加值或是收入分配关系, 较少将能源消耗和碳排放等资源环境因素纳入考量范围。

区域产业链分工使得同一产品的生产链条被

收稿日期: 2023-07-19; 修订日期: 2023-11-27。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040401); 国家自然科学基金项目(41871117)。[Foundation: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Class A), No. XDA19040401; National Natural Science Foundation of China, No. 41871117.]

第一作者简介: 杨子涵(2000—), 女, 河南南阳人, 硕士生, 研究方向为经济地理与区域发展。E-mail: yangzihan9701@163.com

*通信作者简介: 孙君(1973—), 男, 副研究员, 研究方向为自然资源经济。E-mail: 67704210@qq.com

引用格式: 杨子涵, 彭宝玉, 孙君. 京津冀地区产业链空间网络及其隐含碳排放研究 [J]. 地理科学进展, 2024, 43(2): 215-230. [Yang Zihan, Peng Baoyu, Sun Jun. Spatial network of industrial chains and their embodied carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geography, 2024, 43(2): 215-230.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.02.002

分割到不同地区,进而使其碳排放也产生自不同的地区^[14]。经济收益和隐含碳排放是区域参与产业分工的正反两方面的影响^[15],如何将区域产业链分工带来的经济收益和隐含碳排放进行结合研究是一个新的话题^[16-20]。因此,对产业链空间网络及其带来的隐含碳排放流动情况进行综合分析,对节能减排要求下的区域产业分工合理化具有重要意义。随着产业间上、下游的关系网络日益复杂,隐含碳的问题得到越来越多的学者关注^[21-22]。目前,学者多采用生命周期法^[23]和投入产出法^[24-25]对隐含碳在产业和空间中的流动关系进行分析;产业方面,学者多从产业链传导^[26]和产业区位转移^[27]入手,对其中隐含碳流动的特征进行分析;空间方面,学者通过相关分析证明能源结构、城市化水平、对外贸易和产业结构等因素是影响碳排放空间格局的重要因素^[28-31],城市碳排放存在马太效应^[32]、空间溢出效应^[33]等。这些研究主要从产业或空间方面对隐含碳排放流动进行分析,未能对地区间由于产业分工所引致的碳排放流动格局进行深入探讨。

综上所述,本文采用投入产出分析法和社会网络分析法,判断京津冀地区主导产业链的空间网络及其隐含碳排放的流动,以此为京津冀产业协同发展和“双碳”目标提供决策参考。本文的贡献体现在两个方面:一是试图基于省域视角对京津冀地区产业链空间网络进行系统刻画,对京津冀地区核心产业链的上、中、下游衔接特点及演变进行分析,特别是对生产性服务业和制造业之间的关系进行深入探讨;二是采用了最新发布的2017年中国省市区域间投入产出表,对京津冀地区核心产业链空间网络及其隐含碳排放的流动情况进行测算,与已有研究相比更能反映出京津冀地区的产业发展和环境影响的关系,对碳减排背景下的区域产业分工合理化提供了借鉴意义。

1 理论框架、数据来源与研究方法

1.1 理论框架

1.1.1 产业链空间网络与区域产业分工

特定空间范围内由特定产业链驱动形成的空间经济联系网络,可以称之为产业链空间网络^[6]。狭义上的产业链是指产业在生产产品和提供服务过程中按照其内部的经济技术关联将其有关的生产阶段、经济活动、经济过程或经济业务连接起来

的链式结构^[34]。在以产业内分工为主的产业转移背景下,产业链不同环节在区域间的合理分工成为推动区域产业协同发展的重要途径。藉由产业链的关联性形成的产业链空间网络可以直观反映区域内部产业的空间分布格局和功能协同水平。

作为区域协调发展的核心,区域产业分工能够反映区域经济一体化发展水平与区域合作格局。基于产业链空间网络的产业分工研究能够较为准确地刻画区域的产业结构特征及各个地区间的产业联系。以区域联系为基础的产业链能够促进生产要素集聚、发展多样化的区域产业知识、推动区域产业结构升级^[35]。作为中国北方的增长极,京津冀地区仍存在区域发展不平衡、地区之间协同发展能力不高、产业分工不合理等情况^[36],亟需厘清区域产业链,探究其分工协作机制。

1.1.2 产业链视角下的隐含碳排放与责任分担

产业链分工带来的地区间产业联系不仅能带来经济收益,还会导致隐含碳排放的流动^[37]。由于地区之间经济发展水平和碳排放强度的差异,地区间隐含碳排放的流动使得碳责任分配问题更加复杂^[14,38]。自《京都议定书》生效以来,区域间碳减排的协同性与公平性得到广泛关注。产业合作中涉及的隐含碳排放责任归属是其中一个重要议题^[39]。该议题为从产品供应链角度评价碳排放责任、碳减排政策提供了重要的视角^[40]。对产业链空间网络及其视角下的隐含碳排放的流动进行分析,可以对区域内部产业协作所获得的经济收益和产生的碳排放代价进行综合考量,为制定区域内部公平有效的产业分工方案、实现碳减排具有重要意义。

随着京津冀区域协同发展战略的推进,地区间的经济往来日益密切,地区间隐含碳排放的流动也更加频繁。然而,京津冀地区间产业结构趋同、协同效率低等问题又导致地区碳排放成本不断增加。因此,综合考量地区间经济—环境的复合效应成为现阶段的重要问题。北京、天津、河北三省市的产业链价值分工差异较大,作为产业链中的不同角色对区域及部门碳排放量及其隐含碳排放流动的影响也各不相同。基于产业链视角下的隐含碳排放流动更能准确地反映京津冀地区利益分配和CO₂分割情况,从而体现地区间共同但有区别的责任。

综上,本文的研究目的是分析京津冀地区核心产业链的空间网络及其特征,在此基础上进一步考察京津冀地区在产业联系和区域协同中隐含碳排

放的流动,深入剖析隐含碳排放的主要行业和地区,以此为“双碳”目标下的京津冀产业协同发展提供决策参考。基于此,本文构建分析框架(图1),主要包括以下三个方面的内容:①识别核心产业链,通过投入产出表中的经济技术联系,将制造业与服务业、上中下游产业建立联系并构成一个相对完整的产业链;②识别核心产业链空间网络,通过识别出来的核心产业链并将其映射到空间上,更加突出地理学的研究特色,使其具有空间属性;③基于核心产业链的空间分布特点,分析地区间的隐含碳排放及流动情况,使产业研究与环境研究相结合,提高研究成果的应用价值,为各地区实现“双碳”目标、体现共同但有区别责任原则提供科学基础。

1.2 研究方法

1.2.1 核心产业链的识别方法

文章参考石敏俊等^[6]的研究方法,将地区内部产出份额超过1.5%的工业和生产性服务业部门定义为产业链核心部门,并按部门将地区内部的数据进行加总,得到京津冀区域间投入产出表。通过区域间投入产出表,可以得到地区内部核心部门与其他部门之间的直接消耗系数、直接分配系数、影响力系数和感应度系数。若两个部门之间的直接消耗系数和直接分配系数均高于均值,则认为这两个部门位于同一个产业链上。位于同一产业链上的部门的影响力系数越大,则认为该部门越为产业链

的下游部门;感应度系数越大,则认为该部门越为产业链的上游部门。相应系数的计算方法如下:

直接消耗系数 a_{ij} 为:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

$$x_j = \sum_{i=1}^m z_{ij} + v_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

直接分配系数 b_{ij} 为:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_i} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$x_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

式中: i 为产业链的核心部门; j 为所有的工业和生产性服务业部门; m 为核心部门的数量, n 为工业和生产性服务业部门的数量总和; a_{ij} 、 b_{ij} 分别表示 j 部门每单位产品中对 i 部门产品的消耗占比、 i 部门每单位产品对 j 部门产品的分配占比; z_{ij} 表示 j 部门对 i 部门产品的直接消耗量。式(1)和式(2)中, x_j 表示 j 部门的总投入, v_j 表示 j 部门的增加值;式(3)和式(4)中, x_i 表示 i 部门的总产出, y_i 表示 i 部门产品的最终需求量。

影响力系数 IC_j 为:

$$IC_j = \frac{\sum_{j=1}^n c_{jj}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n c_{jj}} \quad (5)$$

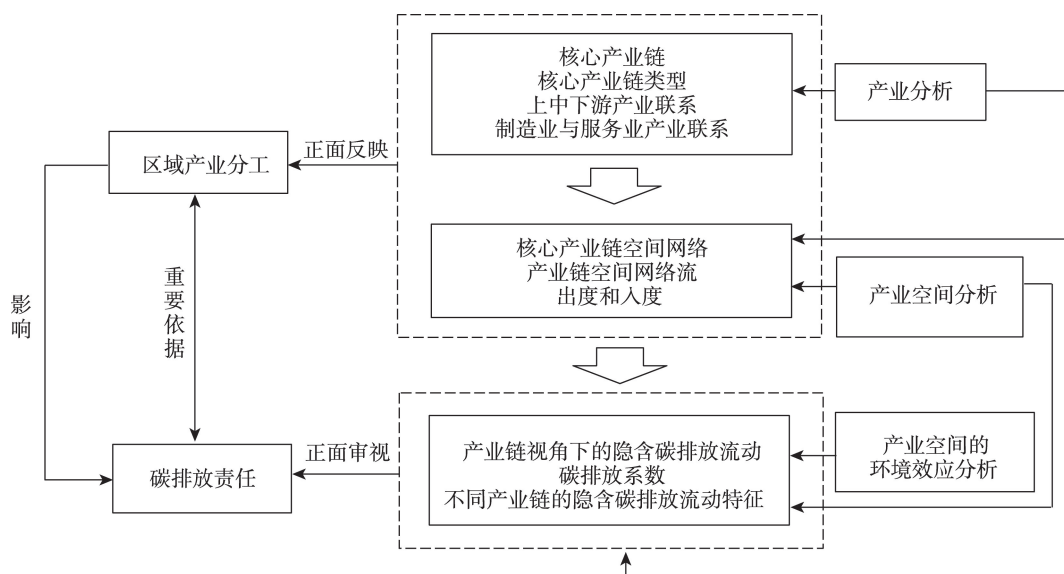


图1 京津冀地区核心产业链空间网络及其隐含碳排放的分析框架

Fig.1 An analytical framework for the spatial network of core industrial chains and their embodied carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region

感应度系数 RC_j 为:

$$RC_j = \frac{\sum_{j=1}^n c_{j_j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^n c_{j_j}} \quad (6)$$

式中: c_{j_j} 为完全消耗系数矩阵 $C = (I - A)^{-1}$ 中的元素, A 为直接消耗系数矩阵; J 和 j 含义相同, 均为所有的工业和生产性服务业部门, J 表示矩阵中的行, j 表示矩阵中的列; n 为工业和生产性服务业部门的数量总和。

1.2.2 产业链空间网络的识别方法

(1) 识别方法。地区间投入产出表的矩阵元素 z_{ij}^{rs} 表示 r 地区 i 产业向 s 地区 j 产业输送的货币价值。相应地, 将地区之间产业链内部的产品流动进行加总, 就可以识别出地区之间的产业链空间网络流 F^{rs} , 其公式为:

$$F^{rs} = \sum_{g=1}^o \sum_{h=1}^o z_{gh}^{rs} \quad (r, s = 1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

式中: r, s 为区域内任意地区; 矩阵 F^{rs} 表示特定产业链内 r 地区流向 s 地区的空间网络流; g, h 均为核心产业链内的产业部门; z_{gh}^{rs} 为特定产业链内 r 地区 g 部门向 s 地区 h 部门输送的产品或服务价值量; o 为产业链内的部门数量, p 为区域内部的地区数量, 各个地区之间的产业链空间网络流 F^{rs} 构成了产业链空间网络矩阵 F :

$$F = \begin{pmatrix} F^{11} & \dots & F^{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F^{r1} & \dots & F^{rs} \end{pmatrix} \quad (8)$$

(2) 中心度。中心度按照产业流动方向可以分为点出中心度和点入中心度(以下简称“出度”和“入度”), 分别表示节点输出的控制力强度和节点流入的吸引力强度。

r 地区出度 C_{ODR} 为:

$$C_{ODR} = \frac{\sum_{s=1}^p F^{rs} - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (9)$$

r 地区入度 C_{IDR} 为:

$$C_{IDR} = \frac{\sum_{r=1}^p F^{rs} - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (10)$$

式中: F_{\min} 、 F_{\max} 分别为产业链空间网络 F 的极小、极大值。

1.2.3 区域间隐含碳排放流动的识别方法

地区间投入产出表的编制是在地区投入产出表的基础上完成衔接, 能够较为全面、准确地估算京津冀地区间不同行业的贸易流量, 反映地区之间的产业关联, 目前已成为研究地区间产业结构优化的重要工具。根据多区域投入产出表中的行向平衡关系, 可以表示为:

$$\begin{pmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1w} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{w1} & A^{w2} & \dots & A^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y^{11} + Y^{12} + \dots + Y^{1w} \\ Y^{21} + Y^{22} + \dots + Y^{2w} \\ \vdots \\ Y^{w1} + Y^{w2} + \dots + Y^{ww} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^w \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: Y^{ST} 表示第 S 个地区流向第 T 个地区 N 个产业部门的 $N \times 1$ 维最终需求矩阵; X^S 表示第 S 个地区的 $N \times 1$ 维总产出列向量, \hat{X}^S 表示由第 S 个地区各部门总产出构成的对角阵, 令 Z^{ST} 表示第 S 个地区对第 T 个地区各产业部门的中间投入矩阵, 它是一个 $N \times N$ 维矩阵 ($S, T = 1, 2, \dots, w$); 则 $A^{ST} = Z^{ST} \cdot (\hat{X}^T)^{-1}$ 表示第 T 个地区各部门生产单位产品对第 S 个地区各部门产品的直接消耗系数矩阵。将式(11)展开, 整理可得:

$$X^S = (I - A^{SS})^{-1} \left[\sum_{\substack{T=1 \\ T \neq S}}^N (A^{ST} X^T + Y^{ST}) + Y^{SS} \right] \quad (S, T = 1, 2, \dots, w) \quad (12)$$

基于环境投入产出分析框架, 令 \hat{c}^S 表示第 S 个区域的碳排放系数, 它是由第 S 个区域 N 个产业部门单位产出的碳排放为元素构成的行向量, \hat{c}^S 为 \hat{c}^S 的对角化矩阵。根据式(12), 可得到为满足第 T 个区域中间需求和最终需求所引起的第 S 个区域向第 T 个区域的隐含碳排放流动的列向量 C^{ST} 为:

$$C^{ST} = \hat{c}^S (I - A^{SS})^{-1} (A^{ST} X^T + Y^{ST}) \quad (13)$$

由此得到 $N \times 1$ 维列向量元素, 即产业部门在两个地区的隐含碳排放的流量。

1.3 数据来源

截至2023年3月底, 最新的各省区投入产出表仅公布至2017年。为对京津冀协同发展战略提出前后的产业发展和地域功能协同情况进行对比分析, 本文选取2012年和2017年的数据进行处理, 2012年省区间投入产出表采用刘卫东等^[41]的数据,

2017年省区间投入产出表采用CEADS (China emission accounts and datasets)课题组的数据^[42],相应年份的分省部门碳排放和能源消耗数据同样采用了CEADS课题组的数据^[43]。

由于各年份投入产出表和分部门碳排放数据在部门分类上存在差异,本文对部门分类进行调整,最终得到了30个部门的地区间投入产出表和碳排放数据。此外,由于CEADS数据库中缺少除批发和零售、交通运输、仓储和邮政以外的生产性服务业相关的碳排放和能源消耗数据,而北京市作为典型的服务业主导型地区,其生产性服务业的碳排放和能源消耗情况具有一定的代表性,因此选取北京市的碳排放和能源消耗系数代表京津冀地区缺失的碳排放和能源消耗系数。

2 结果分析

2.1 京津冀地区核心产业链空间网络分析

2.1.1 核心产业链识别

基于2017年中国省市区域间投入产出表中京津冀地区的相关数据,利用式(1)~(6),根据投入产出关系判断出京津冀地区的核心产业链(表1)。

2017年京津冀地区核心产业链按照产出占比由低到高排列为:食品和烟草制造产业链、交通运输设备制造产业链、冶金工业产业链、机械设备制造产业链、建筑领域产业链。在食品和烟草制造产业链、交通运输设备制造产业链、冶金工业产业链、机械设备制造产业链中,上、中、下游分别为能源和原材料生产部门、制造业部门和生产性服务部门。例如,机械设备制造产业链的上游部门为电力、热力的生产和供应,金属冶炼和压延加工品,化学产品,交通运输设备等前端部门;中游部门为电气机械和器材制造业;下游部门为金融,交通运输、仓储和邮政,批发和零售等生产性服务业。建筑领域产业链的上游部门为前端部门,中游部门和下游部门分别为生产性服务业和建筑业。值得注意的是,相较于上游的材料部件生产环节和下游的生产性服务环节,机械设备制造产业链中游部门产出占产业链总产出的比例仅为3.09%,竞争优势较弱,呈现典型的“U”型曲线。

2.1.2 产业链空间分布

京津冀地区的产业空间分布具有错位发展与发展失衡的特征(图2)。一方面,京津冀地区错位发

展的分工格局明显。北京是各大核心产业链下游环节的主要产出地,是生产性服务业的核心;河北则一直在产业链上游占据重要地位,是前端生产部门的核心;北京、天津和河北是加工制造业的共同核心。这与石敏俊等^[6]的研究结果相一致。另一方面,产业发展不平衡的特征显著。京津冀地区中游的制造业部门产出水平相对薄弱,核心产业链上游和下游的产出占比始终高于中游,一定程度上制约着地区的产业协同。

2012—2017年,京津冀地区的产业链及其空间分布具有两个明显特征:一方面,针对产业链内部生产环节而言,京津冀地区制造业和生产性服务业水平有所提高,错位发展的空间格局进一步加强。与2012年相比,2017年京津冀地区核心产业链中游和下游产出占比明显升高,从时间变化上看,北京一直在生产性服务业环节占据重要地位,天津和河北一直在前端部门和加工制造业环节具有比较优势,且这种差距在2017年进一步加强。另一方面,从产业链的空间布局方面进行分析,核心产业链中的高产出产业链向京津集中,低产出产业链向津冀转移。具体而言,与2012年相比,2017年京津冀地区核心产业链中占比相对较高的产业链,如建筑领域产业链、机械设备制造产业链和冶金工业产业链有从河北向北京和天津转移的趋势,这种转移主要表现在产业链的中、下游部门(生产性服务业为主)进一步向两市集中;核心产业链中占比相对较低的产业链,如食品和烟草制造产业链、交通运输设备制造产业链则有从北京向天津和河北转移的趋势,个别产业的协同发展趋势有所增强。

2.1.3 产业链跨生产环节的空间网络

地区网络的功能协同要求产业链上、中、下游要在节点地区之间形成密切的产业联系,进而形成分工合理的产业空间。地区间跨生产环节的产业协同水平更能体现出地区网络内部的功能协同和错位发展的水平:网络流量越高,说明地区网络内部功能协同的水平越高。

图3显示了2017年核心产业链上游至中游的产业链空间结构特点。可见,产业链的网络融合水平由低到高为:冶金工业产业链、食品和烟草制造产业链、机械设备制造产业链、交通运输设备制造产业链、建筑领域产业链。

在交通运输设备制造产业链、建筑领域产业链中,北京和天津是上游至中游的空间网络中心;冶

表1 2017年京津冀地区核心产业链

Tab.1 Core industrial chains in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017

产业链	生产环节	产业部门	(1) 部门产出占京津冀 总产出的比例/%	(2) 京津冀产出占全国 总产出的比例/%	(3) 部门产出占产业链 总产出的比例/%
食品和烟草 制造产业链	上游	石油、炼焦产品和核燃料加工品	1.56	9.34	7.93
		化学产品	4.50	6.83	22.92
	中游	食品和烟草	3.41	6.11	17.38
	下游	批发和零售	5.21	10.15	26.52
		租赁和商务服务	4.96	15.60	25.25
交通运输设备 制造产业链	上游	金属制品	2.37	12.49	9.35
		电气机械和器材	1.52	5.69	5.98
		通信设备、计算机和其他电子设备	2.26	5.34	8.90
		通用设备	1.35	7.01	5.52
		专用设备	0.28	7.25	4.41
	中游	交通运输设备	4.44	11.56	22.66
	下游	交通运输、仓储和邮政	5.75	12.66	22.66
		批发和零售	5.21	10.15	20.52
	上游	电力、热力的生产和供应	3.33	13.53	10.71
		石油、炼焦产品和核燃料加工品	1.56	9.34	5.01
冶金工业 产业链	中游	金属冶炼和压延加工品	6.41	13.86	20.63
		金属制品	2.37	12.49	7.63
	下游	批发和零售	5.21	10.15	16.75
		租赁和商务服务	4.96	15.60	15.95
	上游	科学研究和技术服务	7.25	32.09	23.32
		电力、热力的生产和供应	3.33	13.53	6.77
	中游	金属冶炼和压延加工品	6.41	13.86	13.06
		化学产品	4.50	6.83	9.16
	下游	交通运输设备	4.44	11.56	11.70
		金属制品	2.37	12.49	4.83
机械设备 制造产业链	上游	通信设备、计算机和其他电子设备	2.26	5.34	4.60
		通用设备	1.35	7.01	2.85
	中游	电气机械和器材制造业	1.52	5.69	3.09
		金融	5.67	13.59	11.55
	下游	交通运输、仓储和邮政	5.75	12.66	11.70
		批发和零售	5.21	10.15	10.60
	上游	租赁和商务服务	4.96	15.60	10.09
		电力、热力的生产和供应	3.33	13.53	6.54
	中游	金属冶炼和压延加工品	6.41	13.86	12.60
		金属制品	2.37	12.49	4.66
建筑领域 产业链	上游	电气机械和器材	1.52	5.69	2.98
		金融	5.67	13.59	11.14
	中游	交通运输、仓储和邮政	5.75	12.66	11.29
		批发和零售	5.21	10.15	10.22
	下游	租赁和商务服务	4.96	15.60	9.74
		科学研究和技术服务	7.25	32.09	14.24
	上游	建筑	8.45	8.34	16.59
	中游				
	下游				

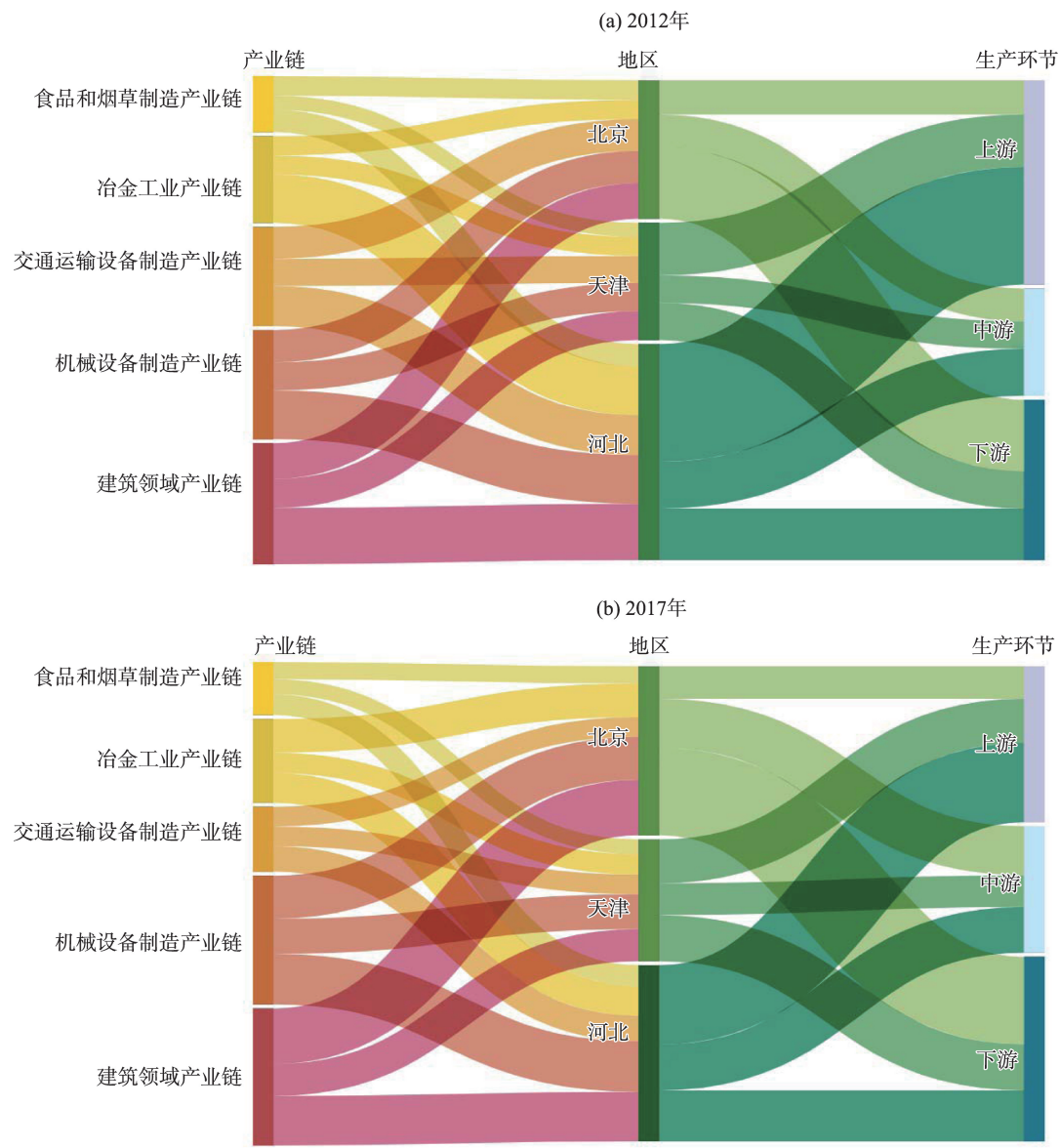


图2 京津冀地区上中下游的产业链产出桑基图

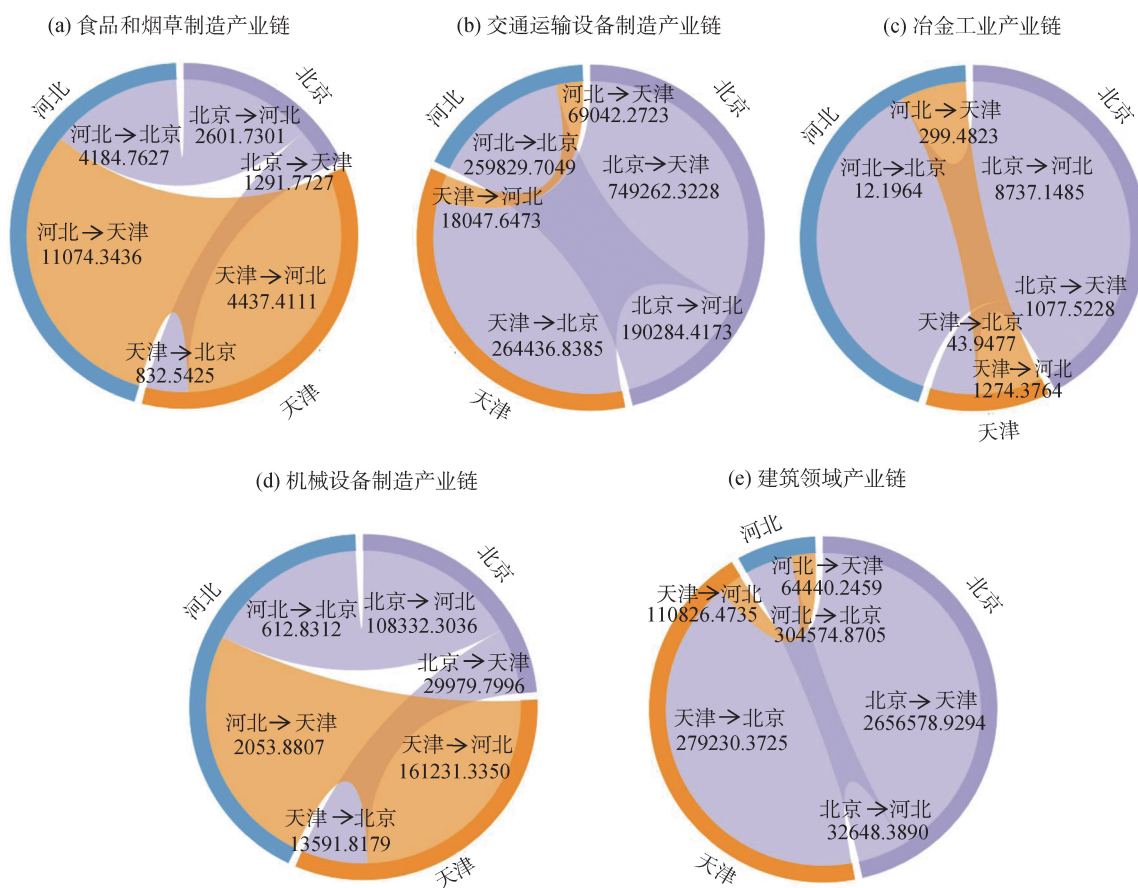
Fig.2 Sankey diagram of output of the upper, middle and lower reaches of the industrial chains in the Beijing-Tianjin-Hebei region

金工业产业链空间网络以北京和河北为网络中心；机械设备制造业、食品和烟草制造产业链则形成了以北京、天津和河北为核心的多核心空间格局；机械设备制造业产业链空间网络流流量明显高于食品和烟草制造产业链。在食品和烟草制造产业链、冶金工业产业链空间网络中没有超过10亿元的网络流流量，地区间产业联系较薄弱。

图4显示，2017年生产性服务至加工制造环节中产业链的空间融合水平由低到高为交通运输设备制造产业链、食品和烟草制造产业链、建筑领域产业链、机械设备制造产业链、冶金工业产业链。

产业链的生产性服务至加工制造环节的产业链空间网络的核心为北京和天津；食品和烟草制造产业链则以天津和河北为网络中心；交通运输设备制造产业链空间网络关系较为密切的则为北京和天津；在5个核心产业链中，冶金工业产业链的生产性服务至加工制造部门的空间网络流流量明显高于其他4个核心产业链。

出度和入度是对产业链空间网络的流动特点进行判断的重要依据。图5表示2012年和2017年上游至中游环节产业链空间网络中地区出度和入度。2017年北京是低入度—高出度型的地区，为其他地区的中游制造业提供初级产品；天津是高入度



注:数据表示产业链空间网络流(单位:万元)。

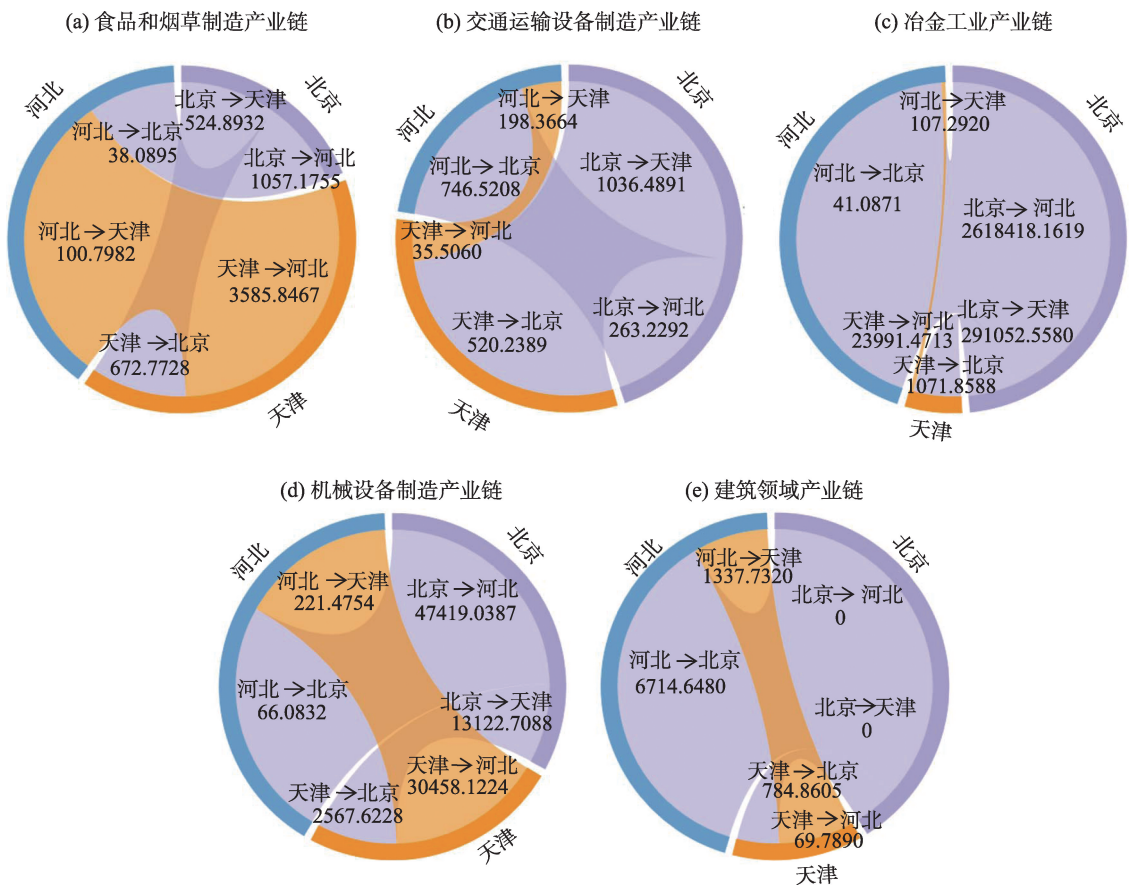
图3 2017年京津冀地区间上游至中游环节的产业链空间网络的流动关系

Fig.3 Flow relationships of the industrial chain spatial network from upstream to midstream links in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017

—低出度的地区,中游制造业对其他地区的依赖性较强;河北是低入度—低出度型的地区,上游和中游的发展水平均处于较低水平,与北京和天津的联系较为薄弱。相比2012年,2017年北京の出度明显提高、入度则显著降低,天津の出度降低而入度有所提高,河北の出度和入度均有所降低。图6表示2012年和2017年生产性服务业至制造业环节分地区产业链空间网络の出度和入度。2017年北京是低入度—高出度型的地区,为其他地区的中游制造业提供生产性服务;天津是低入度—低出度型的地区,中游制造业对其他地区的生产性服务业的吸引力不高,本地生产性服务业的发展水平较低;河北是高入度—低出度型的地区,本地加工制造环节吸纳的生产性服务较多。与2012年相比,2017年北京の出度明显提高、入度显著降低;天津の出度和入度均有所降低,河北の出度降低而入度有所提高。

结合图5、图6来看,京津冀地区跨生产环节的

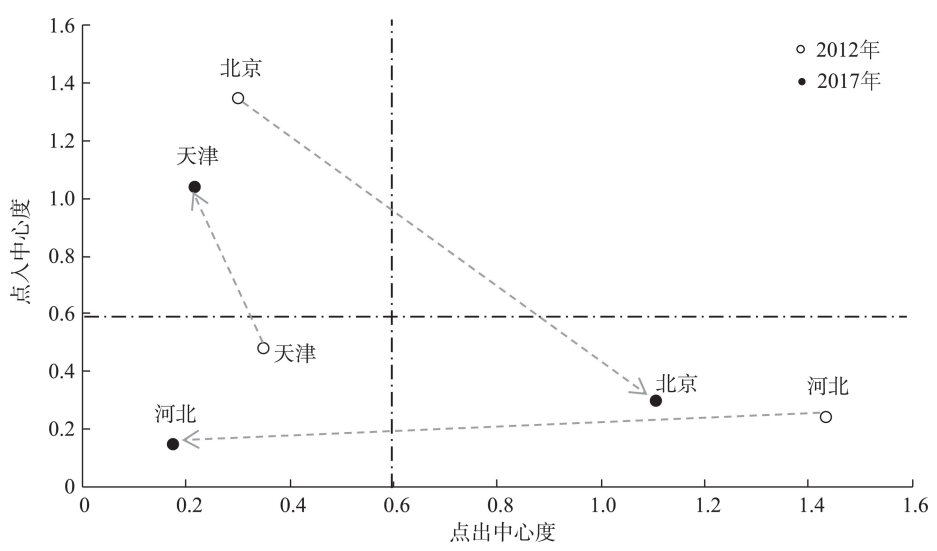
空间网络流的特点表现在两个方面:一方面,产业协同水平有待提高,与2012年相比,2017年天津和河北在京津冀的输出能力显著下降,对京津冀地区的产业互动贡献能力仍有待提高;另一方面,北京的辐射带动力度明显提高,这种带动力主要体现在对津冀的加工制造业的带动,即在京津冀内部,北京在上游至中游环节、生产性服务业至加工制造业环节の出度显著提升。以上变化可能是由于2015年《纲要》的提出促进了京津冀一体化,改变了区域分工:北京强化了区域规划引领,而非单纯的资源吸纳中心;天津定位为港口物流、高端制造和研发基地,吸引投资的同时提升了生产性服务业内效,减少了外部依赖;河北与京津功能分工更明确,部分产业转移或边缘化,影响产业链地位,同时面临环境和产业升级压力。这就导致其传统产业减弱或迁移,前端联系减少;同时向高端制造和服务业转型,对生产性服务业的需求提高,点入中心度提



注：数据表示产业链空间网络流(单位：万元)。

图4 2017年京津冀地区间生产性服务至加工制造环节产业链空间网络的流动关系

Fig.4 Flow relationships of the industrial chain spatial network from producer services to manufacturing links in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017



注：平行于坐标轴的虚线分别为2017年出度、入度均值，高于均值的节点表示在京津冀地区处于较高水平。图6同。

图5 上游至中游环节分地区产业链空间网络地区点出(入)中心度交叉分类

Fig.5 Cross classification of different region' outflow and inflow centrality of upstream to midstream link industrial chain spatial network

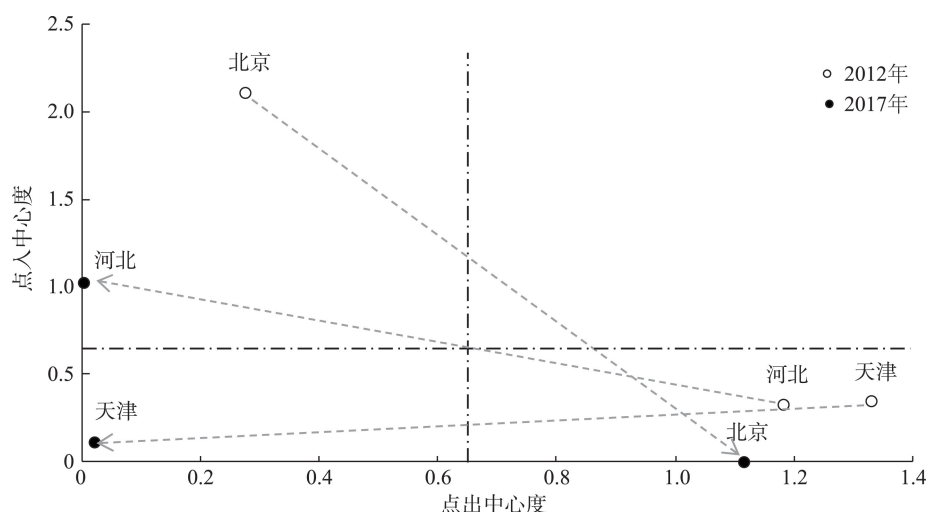


图6 生产性服务业至制造业环节分地区产业链空间网络地区点出(入)中心度交叉分类
Fig.6 Cross classification of different region' outflow and inflow centrality of producer services to manufacturing link industrial chain spatial network

高而点出中心度降低,因为本地企业开始寻求更多内部或本地化的服务,而不是对外输出。

2.2 京津冀地区隐含碳排放的流动特征

产业协同是京津冀协同发展的实体内容和关键支撑,也是协同发展三个率先突破的重点领域之一。作为产业协同的重要内容,区域产业分工的合理化需要综合考虑经济收益和隐含碳排放两个方面。对重工业产业链的依赖性决定了京津冀地区是一个重要的碳排放地区,面临双碳发展的约束。从京津冀协同发展角度看,以 CO_2 为表征的环境污染问题已经成为制约京津冀地区产业协同和高质量发展的重要因素^[44-45],京津冀地区的产业分工格局决定了河北省是重要的前端部门输出基地,作为京津冀碳排放份额最大的地区,河北省是否存在“收益在外、损害留存”的碳排放损益不公的情况?这种不公多大程度上制约着河北发展进而影响京津冀产业协同?在对核心产业链空间网络进行剖析的基础上对地区间隐含碳排放进行了测度,可为制定京津冀地区间的产业对接协作和生态环境保护提供研究基础和科学依据。

2.2.1 碳排放系数的区域差异分析

根据京津冀地区各区域分行业能源排放总量、碳排放总量和总产出数据,计算得出2017年京津冀地区分区域核心产业链主要部门的碳排放系数(表2)。

从表2可以看出:第一,京津冀地区碳排放系数与区域经济发展水平呈反比。经济越发达的地区,

平均每万元生产总值的碳排放量越小,即碳排放系数有北京<天津<河北的特点。第二,石油、炼焦产品和核燃料加工品,金属冶炼和压延加工品,电力、热力的生产和供应等行业是碳排放总量最高的行业,也是系数最高的行业。尤其是电力、热力的生产和供应行业,北京、天津、河北的碳排放系数最高的产业均集中在这些行业。第三,除了北京的交通运输、仓储和邮政碳排放系数高于行业均值以外,金融、租赁和商务服务等生产性服务业的碳排放系数普遍低于均值。

2.2.2 隐含碳排放的流动特征

基于核心产业链空间网络及其流量,图7展示了2017年京津冀地区五大核心产业链的地区间隐含碳排放的流动关系。

2017年京津冀地区间隐含碳排放的流动量由高到低的产业链依次为建筑领域产业链、机械设备制造产业链、冶金工业产业链、交通运输设备制造产业链、食品和烟草制造产业链,这与核心产业链特点(表1)相吻合。从隐含碳排放的流入和流出总量来看,流入总量具有北京>天津>河北的特点,而流出总量则具有河北>天津>北京的特点,说明高耗能、高排放的产品需求在北京和天津并未消失,而是由北京和天津转至河北生产后再调回。

从空间格局上来看,建筑领域产业链、机械设备制造产业链隐含碳排放的空间网络格局较为相似,在这两大产业链中,北京和河北之间的隐含碳排放流动量最大,其中河北→北京的隐含碳排放流

表2 2017年京津冀地区分区域分行业的碳排放系数

Tab.2 CO₂ emission coefficients of the Beijing-Tianjin-Hebei region by area and industry in 2017

部门	碳排放系数		
	北京	天津	河北
食品和烟草	0.00867	0.01232	0.04370
石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.59445	0.39193	0.35659
化学产品	0.00333	0.02699	0.10396
金属冶炼和压延加工品	0.01121	0.89596	3.22314
金属制品	0.02395	0.55953	0.01786
通用设备	0.01092	0.01417	0.15822
专用设备	0.01018	0.13336	0.03756
交通运输设备	0.00484	0.01370	0.02574
电气机械和器材	0.00645	0.02441	0.01455
通信设备、计算机和其他电子设备	0.00198	0.00271	0.03787
电力、热力的生产和供应	0.71065	4.75472	13.04931
建筑	0.01838	0.09144	0.02597
批发和零售	0.06832	0.08536	0.18467
交通运输、仓储和邮政	0.58235	0.24408	0.32735
信息传输、软件和信息技术服务	0.00250	0.00250	0.00250
金融	0.00129	0.00129	0.00129
租赁和商务服务	0.02183	0.02183	0.02183
科学研究和技术服务	0.01143	0.01143	0.01143
均值	0.11626	0.40487	0.98019

注：由于天津、河北部分碳排放和能源消耗数据缺失，用北京的数据代替。

量最高,建筑领域产业链、机械设备制造产业链中河北→北京的隐含碳排放流量依次高达82981747.6282 t和40808901.7456 t CO₂,在京津冀地区间对应的产业链隐含碳排放流动总量中分别占54.35%和38.75%;冶金工业产业链中,北京和河北的隐含碳排放流量也相对较高,隐含碳排放流量达46000863.2599 t CO₂,占京津冀地区间该产业链的50.46%;交通运输设备制造产业链、食品和烟草制造产业链的隐含碳排放的流动关系具有相似的空间格局,隐含碳排放流量相对较高的为北京和天津,其中天津→北京的隐含碳排放流量最高,两大产业链中隐含碳排放流量分别达2116845.6851 t和590202.5899 t CO₂,在京津冀地区间对应的产业链隐含碳排放流动总量中分别占29.28%和41.18%。

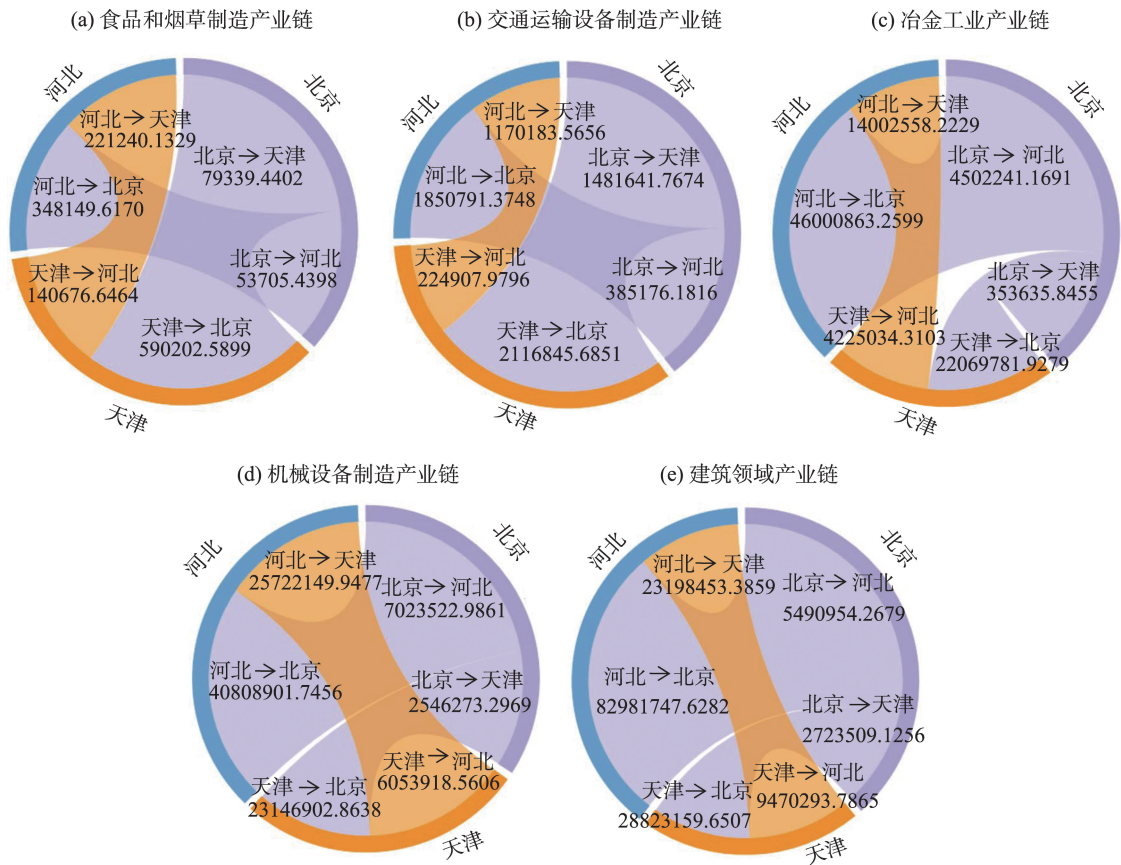
为了进一步明晰京津冀地区间由于产业分工所造成的隐含碳排放分工格局,分析不同产业链在京津冀不同地区的隐含碳排放的流出量占比。对2017年京津冀地区分区域分产业链隐含碳排放流出量占地区碳排放量总值的比例进行计算,结果如表3所示。可见,冶金工业产业链、机械设备制造产业链、建筑领域产业链在北京、天津和河北的流出

量占比均处于较高地位,这与图7相吻合。从空间格局来看,天津产业链隐含碳排放流出量占地区碳排放量总值的比例显著高于河北和北京,这与3个地区的经济结构与产业结构高度相关。河北作为中国的重工业大省和重要的钢铁冶炼区,每年生产大量的高耗能工业产品,因此其在向外流出大量隐含碳排放的同时自身也产生较多的碳排放;北京作为重要的国际化大都市,服务业占比较高,加上非首都功能疏解,所需的制造业产品,尤其是高耗能产品主要依赖其他地区的流入,因此其隐含碳排放流出量占比较低;而天津作为传统的工业城市,制造业比重相对较高,加之承接了非首都功能疏解的部分产业,因此其隐含碳排放流出量占比在京津冀地区占据首位。

3 结论与政策建议

3.1 结论

本文选取最新发布的2017年投入产出表,基于产业链空间网络视角,研究京津冀地区产业链空间网络及其隐含碳排放。在此基础上,将2017年与



注:数据表示隐含碳排放空间网络流(单位:t)。

图7 2017年京津冀地区间隐含碳排放的流动关系

Fig.7 Embodied carbon transfers of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017

表3 2017年京津冀地区分区域分产业链

隐含碳排放流出量占比

Tab.3 Proportion of embodied carbon emission outflow by area and industrial chain in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017 (%)

产业链	隐含碳流出量占比		
	北京	天津	河北
冶金工业产业链	5.68	18.26	7.57
交通运输设备制造产业链	2.18	1.63	0.38
机械设备制造产业链	11.18	20.28	8.40
建筑领域产业链	9.60	26.59	13.40
食品和烟草制造产业链	0.16	0.51	0.07
均值	5.76	13.45	5.96

2012年的产业链空间网络进行了对比分析。结果表明:京津冀协同发展战略取得了一定成效,但是京津冀地区仍存在着有分工、缺协同、对重工业为主的产业链依赖性较强的特征。具体表现如下:

第一,京津冀地区产业链空间网络具有对重工业产业链依赖性较强、制造业至生产性服务业的空间网络薄弱的特点。具体体现在以下两个方面:首

先,建筑领域产业链和机械设备制造产业链等以重工业为主的产业链是京津冀地区产业协同发展的关键,京津冀五大核心产业链的地区间空间网络流的关系表现为:建筑领域产业链>机械设备制造产业链>冶金工业产业链>交通运输设备制造产业链>食品和烟草制造产业链。其次,京津冀地区中游的制造业部门产出水平相对薄弱,核心产业链的上游和下游产出占比始终高于中游,制造业至生产性服务业环节之间空间网络薄弱,天津和河北在京津冀的输出能力显著下降,对京津冀地区的产业互动贡献能力仍有待提高。

第二,京津冀地区具有错位发展的产业分工格局,时空演变数据表明京津冀协同发展战略取得了一定成效。首先,从分工格局来看,北京是生产性服务业中心,河北是前端生产部门和加工制造业的核心,天津在产业链上、中、下游均占据重要地位。其次,从时空演变来看,与2012年相比,2017年京津冀地区的产业空间布局得到一定优化。具体体现在两个方面:一方面,2017年京津冀地区核心产

业链中占比相对较高的产业链,如机械设备制造产业链等有从河北向北京和天津转移的趋势,这种转移主要表现在产业链的生产性服务业环节向两市集中;另一方面,2017年北京对天津、河北的辐射带动力度明显提高,这种带动力主要体现在对京津冀的加工制造业的带动,即在京津冀内部,北京在上游至中游环节、生产性服务业至加工制造业环节的出度显著提升,相应地,天津上游至中游的入度、河北生产性服务业至加工制造业的入度也明显提升。

第三,从碳排放空间格局来看,北京和河北分别是京津冀地区转移和承接隐含碳排放最多的省份,天津产业链隐含碳排放流出量占地区碳排放总量的比例最高;以重工业为主的产业链是京津冀地区隐含碳排放流动的主要途径,石油、炼焦产品和核燃料加工品,金属冶炼和压延加工品,电力、热力的生产和供应等是碳排放量最高的行业。

3.2 政策建议与讨论

第一,深化产业链空间融合。产业链空间网络分析表明,京津冀地区产业链空间网络具有中游制造业部门产出水平相对薄弱、中游至上游或至下游之间的产业链空间网络薄弱的特征。从产业分工格局来看,一方面京津冀三省市已形成了初步的分工格局;另一方面,京津冀地区的产业结构特点意味着补强中游制造环节关键在于河北的产业转型升级。因此,一方面,应根据各地的产业特点促进区域科学分工,深化产业链空间融合。加强北京和天津在交通运输设备制造等产业链下游至中游的合作、北京和河北在冶金工业等产业链上游至中游的合作、天津和河北在机械设备制造业等产业链上游至中游的合作。另一方面,河北可以依照《纲要》中的政策,依托北京功能疏解,对已有制造业进行技术更新和产业升级,同时注重承接北京向外辐射的生产性服务业,加强与京津相关产业链的分工合作。

第二,注重重工业的产业升级和低碳转型,率先开展碳税与碳排放权交易试点。建筑领域产业链和机械设备制造产业链等以重工业为主的产业链是京津冀地区产业协同发展的重要领域,因此不能以简单的迁出形式对京津冀产业空间进行优化,而是要充分发挥北京的创新驱动能力和河北的主观能动性,创新产业生态链。在重工业为主的产业链中,石油、炼焦产品和核燃料加工品,金属冶炼和压延加工品,电力、热力的生产和供应等行业在京津冀三省市的碳排放系数最高,隐含碳排放流动量

也最高,因此,建议对上述三个细分行业施行区域统一的碳排放权交易试点,对重工业产业链中的其他产业试点实施碳税。

第三,关注北京、天津、河北内部与区域间产业链空间网络的合理性,区域间产业链上中下游的综合治理是京津冀地区体现共同但有区别责任、实现区域碳减排的重要政策落实点。作为京津冀地区碳排放的主要来源地,河北承接了区域内部最多的隐含碳排放流出量,但其隐含碳排放流出量占比却并未在京津冀地区占据高位,说明河北的碳排放压力受到区域间产业链空间网络及其隐含碳排放的流动和自身产业结构的双重影响。河北应增强创新驱动能力,降低区域产业梯度差距。同时,北京和天津应发挥技术优势和人才优势,为河北分担碳减排压力,承担碳排放责任。

由于按照现有研究方法难以确定产业链上、中、下游的具体边界,本文主要参考石敏俊等^[6]的产业链确定思路,即以制造业为核心进行上中下游溯源并以此为基础确定核心产业链,因此,在核心产业链中没有出现生产性服务业主导的产业链。本文选取北京市的碳排放和能源消耗系数代表京津冀地区生产性服务业的碳排放和能源消耗系数,而北京经济技术水平较高,因此该系数可能偏低,进而低估京津冀地区的碳排放及其流动量。

京津冀协同发展是重要的国家战略,产业协同作为这一国家战略需要率先突破的重点领域之一,具有重要的研究价值,本文以产业链空间网络为切入点进行研究,具有现实意义。但是,中国的三大城市群区域具有较高的开放性和较强的流动性,仅仅刻画区域内部的产业链空间网络难以揭示京津冀在全国尺度甚至全球尺度上的产业关联,下一步研究将重点探讨全国尺度的产业链空间网络及其隐含碳排放。

参考文献(References)

- [1] 赵金丽,张学波,任嘉敏,等.多元流视角下黄河流域城市网络空间结构及其影响因素[J].地理科学,2022,42(10):1778-1787. [Zhao Jinli, Zhang Xuebo, Ren Jiamin, et al. Spatial structure and influencing factors of urban network in the Yellow River Basin based on multiple flows. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1778-1787.]
- [2] Zhang F, Ning Y M, Lou X Y. The evolutionary mechanism of China's urban network from 1997 to 2015: An

- analysis of air passenger flows [J]. *Cities*, 2021, 109: 103005. doi: 10.1016/j.cities.2020.103005.
- [3] Zhang Y Z, Wang T, Supriyadi A, et al. Evolution and optimization of urban network spatial structure: A case study of financial enterprise network in Yangtze River Delta, China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(10): 611. doi: 10.3390/ijgi9100611.
- [4] 方创琳. 京津冀城市群协同发展的理论基础与规律性分析 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 15-24. [Fang Chuanglin. Theoretical foundation and patterns of coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 15-24.]
- [5] 安虎森. 空间经济学原理 [M]. 北京: 经济科学出版社, 2005: 206-223. [An Husen. *Principles of spatial economics*. Beijing, China: Economic Science Press, 2005: 206-223.]
- [6] 石敏俊, 孙艺文, 王琛, 等. 基于产业链空间网络的京津冀城市群功能协同分析 [J]. *地理研究*, 2022, 41(12): 3143-3163. [Shi Minjun, Sun Yiwen, Wang Chen, et al. Analysis on functional coordination of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on spatial network of industrial chain. *Geographical Research*, 2022, 41(12): 3143-3163.]
- [7] 赵渺希, 魏冀明, 吴康. 京津冀城市群的功能联系及其复杂网络演化 [J]. *城市规划学刊*, 2014(1): 46-52. [Zhao Miaoxi, Wei Jiming, Wu Kang. Functional linkages in the Beijing-Tianjin-Hebei conurbation region and the evolution of the complex networks. *Urban Planning Forum*, 2014(1): 46-52.]
- [8] Wang X X, Wang A J, Zhong W Q, et al. Analysis of international nickel flow based on the industrial chain [J]. *Resources Policy*, 2022, 77: 102729. doi: 10.1016/j.resourpol.2022.102729.
- [9] 吕康娟, 付旻杰. 我国区域间产业空间网络的构造与结构测度 [J]. *经济地理*, 2010, 30(11): 1785-1791. [Lv Kangjuan, Fu Minjie. The construction and structural measurement of inter-regional industrial spatial network in China. *Economic Geography*, 2010, 30(11): 1785-1791.]
- [10] Haberly D, Wójcik D. Regional blocks and imperial legacies: Mapping the global offshore FDI network [J]. *Economic Geography*, 2015, 91(3): 251-280.
- [11] 章屹祯, 汪涛, 张晗. 基于金融细分行业的长三角城市网络的组织模式及驱动因素 [J]. *地理科学进展*, 2022, 41(4): 567-581. [Zhang Yizhen, Wang Tao, Zhang Han. Organizational models and driving factors of the Yangtze River Delta urban network based on different financial industries. *Progress in Geography*, 2022, 41(4): 567-581.]
- [12] 杨雨, 盛科荣. 中国城市网络关联格局的演变及影响因素: 基于企业网络视角 [J]. *世界地理研究*, 2021, 30(6): 1208-1218. [Yang Yu, Sheng Kerong. Evolution and influencing factors of urban network linkage patterns in China: From the perspective of enterprise network. *World Regional Studies*, 2021, 30(6): 1208-1218.]
- [13] Meijers E J, Burger M J, Hoogerbrugge M M. Borrowing size in networks of cities: City size, network connectivity and metropolitan functions in Europe [J]. *Papers in Regional Science*, 2016, 95(1): 181-198.
- [14] 李艳梅, 牛苗苗, 张红丽. 京津冀区域内增加值贸易的经济收益和隐含碳排放比较 [J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1619-1629. [Li Yanmei, Niu Miaomiao, Zhang Hongli. Comparison of economic benefits and embodied carbon emissions of intraregional value-added trade in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1619-1629.]
- [15] 潘安. 对外贸易、区域间贸易与碳排放转移: 基于中国地区投入产出表的研究 [J]. *财经研究*, 2017, 43(11): 57-69. [Pan An. Foreign trade, interregional trade and carbon emissions transfer: Analysis based on China's regional input-output tables. *Journal of Finance and Economics*, 2017, 43(11): 57-69.]
- [16] Meng B, Peters G P, Wang Z, et al. Tracing CO₂ emissions in global value chains [J]. *Energy Economics*, 2018, 73: 24-42.
- [17] Dai F, Yang J J, Guo H, et al. Tracing CO₂ emissions in China-US trade: A global value chain perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145701. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145701.
- [18] Hertwich E G. Carbon fueling complex global value chains tripled in the period 1995-2012 [J]. *Energy Economics*, 2020, 86: 104651. doi: 10.1016/j.eneco.2019.104651.
- [19] Zhang Z K, Zhu K F, Hewings G J D. A multi-regional input-output analysis of the pollution haven hypothesis from the perspective of global production fragmentation. [J]. *Energy Economics*, 2017, 64: 13-23.
- [20] 余丽丽, 彭水军. 中国区域嵌入全球价值链的碳排放转移效应研究 [J]. *统计研究*, 2018, 35(4): 16-29. [Yu Lili, Peng Shuijun. Research on carbon emission transfer effect of Chinese regions in the global value chains. *Statistical Research*, 2018, 35(4): 16-29.]
- [21] Peters G P, Hertwich E G. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401-1407.
- [22] Zhou D Q, Zhou X Y, Xu Q, et al. Regional embodied carbon emissions and their transfer characteristics in China [J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2018, 46: 180-193.
- [23] Dong H J, Geng Y, Xi F M, et al. Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assess-

- ment approach [J]. *Energy Policy*, 2013, 57: 298-307.
- [24] 韦韬, 彭水军. 基于多区域投入产出模型的国际贸易隐含能源及碳排放转移研究 [J]. *资源科学*, 2017, 39(1): 94-104. [Wei Tao, Peng Shuijun. Embodied energy and carbon emissions transferred in international trade using a MRIO model. *Resources Science*, 2017, 39(1): 94-104.]
- [25] 丁浩, 张晋, 刘建林, 等. 基于投入产出分析的广东贸易隐含碳排放研究 [J]. *环境化学*, 2023, 42(1): 231-240. [Ding Hao, Zhang Jin, Liu Jianlin, et al. Input-output analysis on regional trade embodied carbon emissions of Guangdong Province. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(1): 231-240.]
- [26] 廖双红, 肖雁飞. 污染产业区域间转移与中部地区碳转移空间特征及启示 [J]. *经济地理*, 2017, 37(2): 132-140. [Liao Shuanghong, Xiao Yanfei. Pollution industry transfer and carbon transfer space characteristic in midland of China. *Economic Geography*, 2017, 37(2): 132-140.]
- [27] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移 [J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1327-1338. [Shi Minjun, Wang Yan, Zhang Zhuoying, et al. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327-1338.]
- [28] 唐志鹏, 刘卫东, 公丕萍. 出口对中国区域碳排放影响的空间效应测度: 基于1997—2007年区域间投入产出表的实证分析 [J]. *地理学报*, 2014, 69(10): 1403-1413. [Tang Zhipeng, Liu Weidong, Gong Peiping. Measuring of Chinese regional carbon emission spatial effects induced by exports based on Chinese multi-regional input-output table during 1997-2007. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1403-1413.]
- [29] 姚秋蕙, 韩梦瑶, 刘卫东. “一带一路”沿线地区隐含碳流动研究 [J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2210-2222. [Yao Qiuhui, Han Mengyao, Liu Weidong. Tracking embodied carbon flows in the Belt and Road regions. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2210-2222.]
- [30] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究 [J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 681-690. [Liu Xianzhao, Gao Changchun, Zhang Yong et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 681-690.]
- [31] 郭忻怡, 闫庆武, 谭晓悦, 等. 基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟 [J]. *世界地理研究*, 2016, 25(4): 102-110. [Guo Xinyi, Yan Qingwu, Tan Xiaoyue, et al. Spatial distribution of carbon emissions based on DMSP/OLS nighttime light data and NDVI in Jiangsu Province. *World Regional Studies*, 2016, 25(4): 102-110.]
- [32] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素 [J]. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148. [Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148.]
- [33] 钟章奇, 吴乐英, 陈志建, 等. 区域碳排放转移的演变特征与结构分解及减排对策分析: 以河南省为例 [J]. *地理科学*, 2017, 37(5): 773-782. [Zhong Zhangqi, Wu Le-ying, Chen Zhijian, et al. Evolution characteristics and structural decomposition of regional carbon emission transfer and implications for carbon-reduction policy: Taking Henan Province as an example. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(5): 773-782.]
- [34] 邵昶, 李健. 产业链“波粒二象性”研究: 论产业链的特性、结构及其整合 [J]. *中国工业经济*, 2007(9): 5-13. [Shao Chang, Li Jian. Study on wave-particle duality of industrial chain: Characteristic, structure and integration of industrial chain. *China Industrial Economy*, 2007(9): 5-13.]
- [35] 贺灿飞, 陈韬. 外部需求冲击、相关多样化与出口韧性 [J]. *中国工业经济*, 2019(7): 61-80. [He Canfei, Chen Tao. External demand shocks, related variety and resilience of export. *China Industrial Economics*, 2019(7): 61-80.]
- [36] 刘浩, 马琳, 李国平. 京津冀地区经济发展冷热点格局演化及其影响因素 [J]. *地理研究*, 2017, 36(1): 97-108. [Liu Hao, Ma Lin, Li Guoping. Pattern evolution and its contributory factor of cold spots and hot spots of economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Geographical Research*, 2017, 36(1): 97-108.]
- [37] 高雪, 李惠民, 齐晔. 中美贸易的经济溢出效应及碳泄漏研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(5): 28-34. [Gao Xue, Li Huimin, Qi Ye. Study on the effect of Sino-US trade on global economic growth and carbon leakage. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(5): 28-34.]
- [38] 邓光耀, 陈荟荟. 增加值贸易视角下中国区域间隐含能贸易测算及其影响因素分析 [J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1036-1050. [Deng Guangyao, Chen Huihui. Estimating China's regional embodied energy trade from the perspective of value-added trade and its influencing factors. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1036-1050.]
- [39] 余金艳, 张英男, 刘卫东, 等. 电商快递包装箱的碳足迹空间分解和隐含碳转移研究 [J]. *地理研究*, 2022, 41(1): 92-110. [Yu Jinyan, Zhang Yingnan, Liu Weidong, et al. Study on the spatial decomposition of carbon footprint and the embodied carbon emission transfer of the e-commerce express box. *Geographical Research*, 2022, 41

- (1): 92-110.]
- [40] Peters G P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(4): 245-250.
- [41] 刘卫东, 唐志鹏, 韩梦瑶, 等. 2012年中国31省市区区域间投入产出表 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 58-225. [Liu Weidong, Tang Zhipeng, Han Mengyao, et al. The 2012 China multi-regional input-output table of 31 provincial units. Beijing, China: China Statistics Press, 2018: 58-225.]
- [42] 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, 15(7): 074001. doi: 10.1088/1748-9326/ab794f.
- [43] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11). doi: 10.1029/2021EF002241.
- [44] 李艳梅, 孙丽云, 张红丽, 等. 京津冀区域间产业转移对能源消费碳排放强度的影响 [J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2275-2286. [Li Yanmei, Sun Liyun, Zhang Hongli, et al. The impact of interregional transfer of industries on carbon emission intensity of energy consumption in Beijing-Tianjin-Hebei. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2275-2286.]
- [45] 李思佳, 杨谨, 方丹, 等. 基于产业链视角的京津冀区域碳排放影响因素研究 [J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3473-3487. [Li Sijia, Yang Jin, Fang Dan, et al. 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.]

Spatial network of industrial chains and their embodied carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region

YANG Zihan^{1,2}, PENG Baoyu³, SUN Jun^{4*}

- (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;
4. Chinese Academy of Natural Resources Economics, Beijing 101149, China)

Abstract: Under the background of collaborative development of Beijing, Tianjin and Hebei (BTH), interregional economic exchanges embody the division of labor in the industrial chain and the flow of embodied carbon emissions, thereby affecting the regional functional coordination and attribution of carbon emission responsibilities. Based on the Multi-Regional Input-Output (MRIO) Table of China in 2012 and 2017, this study constructed the industrial chain spatial network of the BTH region and analyzed the industrial links within the region and the embodied carbon emission flow relationships, in order to provide a decision-making basis for the coordinated development and for achieving the "dual carbon" goals of the region. The results show that: 1) The industrial division of the BTH region was clear, but the functional coordination was insufficient. There was also a strong dependence of industrial spatial connections and embodied carbon flow on heavy industry. The industrial chains in the construction field and equipment manufacturing are the main routes for interregional industrial linkages. 2) The production link of the manufacturing industry in the BTH region is weak. The upstream and downstream output of the core industrial chains is always higher than that of the midstream, and the spatial network linkage from manufacturing to producer services is weak. 3) From the perspective of spatial pattern of embodied carbon emissions, Beijing and Hebei are the areas that transfer and undertake the most embodied carbon emissions within the BTH region, and Tianjin's embodied carbon emissions account for the highest proportion of total carbon emissions in the region. On this basis, this article proposed policy recommendations including deepening the spatial integration of the industrial chain, and taking the lead in carrying out carbon tax and carbon emission trading pilot projects.

Keywords: coordinated industrial development; industrial chain spatial network; embodied carbon emissions; input-output method; Beijing-Tianjin-Hebei region