

【产业经济】

# 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究

杨顺顺

(湖南省社会科学院区域经济与系统工程研究所, 湖南 长沙 410003)

**[摘要]** 本文基于修正的投入产出模型和双比例平衡法(RAS法),利用投入产出表和能源消费数据,对中国23个工业部门的直接和完全碳排放、碳排放的部门间转移和进出口转移进行了定量评价和预测。结果显示:①中国能耗碳排放超过84%来源于工业部门,强度减排和总量减排的重点部门有所趋同;②绝大多数工业部门的引致碳排放远高于直接碳排放,部门间碳转移是构成工业部门完全碳排放的主要部分,不同部门间应负有共同减排责任;③23个工业部门包含5个表观高碳部门、5个传导型高碳部门和6个全过程高碳部门,不同类型部门应采取分类管理策略;④从供给端分析,工业部门间碳转移主要沿能源转化部门、采掘业、流程制造业、离散制造业的路径流动,通过关键路径的筛选可得到优先推进的减排部门组团;⑤通过进出口贸易隐含碳转移,工业部门减少了4.09%的碳排放,优化外贸结构有利于国内碳减排;⑥假定部门间技术经济联系平稳变化,按相关规划预测,2017年中国工业部门平均完全碳排放强度较2010年下降近40%,但完全碳排放总量继续提升,交通运输设备制造业等部门需要重点干预。

**[关键词]** 工业部门; 碳排放转移; 投入产出分析; 双比例平衡法; 评价预测

**[中图分类号]**F424.1 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2015)06-0055-13

## 一、问题提出

中国当前大部分区域仍处于城镇化和工业化加速推进阶段,工业部门仍是中国能源消费和碳排放的主导部门。据测算,中国超过70%的终端能源消费量和超过80%的能耗碳排放<sup>[1]</sup>来源于工业部门。因此,工业碳排放决定了中国碳排放的总体特征和演变趋势,以工业部门碳强度控制为核心的减排方式,是未来一段时期内中国低碳发展的主要手段。

自Bicknell et al.<sup>[2]</sup>将投入产出模型引入到对生态足迹的分析后,类似地借助投入产出法实现隐含碳分析的研究也逐步增多和规范,Matthews et al.<sup>[3]</sup>将工业碳排放定义为从仅包含生产运输过程直接碳排放的第一层面,到包含电力碳排放的第二层面,直至涉及整个生产链的直接、间接碳排放的第三层面。以中国产业部门隐含碳转移为对象的研究,主要集中于方法发展与现状分析<sup>[4]</sup>、部门评价<sup>[5]</sup>和国际贸易碳转移方面,特别是国际贸易碳转移一直是研究热点,很多研究认为由于国际产业转移和出口商品结构差异,中国与发达国家的贸易失衡中伴随着碳排放失衡<sup>[6]</sup>,大约有10%—

**[收稿日期]** 2015-04-20

**[基金项目]** 国家社会科学基金青年项目“我国工业部门碳排放转移路径及减排成本分担机制研究”(批准号13CJY051);湖南省社会科学基金一般项目“湖南省节能量交易试点及支撑机制研究”(批准号13YBB139)。

**[作者简介]** 杨顺顺(1981—),男,湖北宜昌人,湖南省社会科学院区域经济与系统工程研究所副研究员,理学博士。

30%的中国碳排放量因出口而引发<sup>[7,8]</sup>。相应地,也有研究认为若同时考虑进口避免的碳排放,中国并不是碳净出口国<sup>[9,10]</sup>。

相关学者的研究为本文的命题提供了理论和方法支持,但除上述代表性论述外,许多相关研究仍有可商榷之处:①中国电力、热力的碳排放因子不统一,部分研究在计算完全碳排放时,将电力热力碳排放按终端消费量分别计入各部门中,这种处理方式欠妥。②计算能耗碳排放时,未扣除能源非燃料使用的部分(如建筑业使用的沥青),导致部门碳排放被高估。③投入产出法被广泛使用于隐含碳、减排成本、规制方式<sup>[11]</sup>的分析,但部分研究中未考虑进口品对中间产品的影响,导致完全碳排放强度测算误差较大;而且,研究中主要进行部门的直接、间接碳排放累积量的宏观分析,对碳在具体部门间的转移特征讨论较少;此外,受到直接消耗系数难以预测的限制,目前基于投入产出方法的碳排放研究,大多数为历史、现状评价和短期“静态”分析,与其他模型组合进行动态预测的研究不多。上述问题将在本研究中尝试进行探讨和改进。

由于各产业部门间(不仅仅是工业部门)因中间产品的交换,存在着相互的生产与消费活动,中国相当数量的工业部门碳排放,并非用于满足本部门的最终需求,而是跟随产业链和中间产品转移到其他部门;同时,最终需求中也有一部分用于支持出口而影响了国内的碳排放量。从受益与责任相匹配出发,各部门应当承担共同的碳减排责任,因此有必要分析隐含碳如何通过产业链从上游部门转移到下游部门,甚至转移至其他国家。本文基于投入产出法,从最终需求角度分析各工业部门的完全碳排放和碳转移路径,并预测其未来的变化趋势。研究结论将有助于完善中国工业部门碳排放的评价方法,指导设计中国工业部门碳减排的调控政策,并为进一步明确各部门间的减排责任和分担方式打下基础。

## 二、研究方法 with 模型构建

### 1. 工业部门直接碳排放的核算

工业部门的碳排放主要分为能源燃用碳排放和工业过程碳排放,本文仅讨论前者,可用下式核算工业部门的直接碳排放:

$$DCE_i = \sum_t (Energy_{it} \times EF_{it} \times (1 - \eta_{it})) \quad (1)$$

式(1)中, $DCE_i$ 表示部门*i*的直接碳排放量,单位为 $tCO_2e$ (吨二氧化碳当量); $Energy_{it}$ 表示部门*i*第*t*种能源的终端消费量,单位为J(焦耳); $EF_{it}$ 表示部门*i*使用的第*t*种能源的碳排放因子,采用IPCC清单数据<sup>[12]</sup>,单位为 $tCO_2e/TJ$ (吨二氧化碳当量/ $10^{12}$ 焦耳); $\eta_{it}$ 表示部门*i*使用的第*t*种能源的非燃料使用比例。具体核算中应注意以下问题:①中国使用标准煤作为能源消费量的单位, $Energy_{it}$ 的计算中需要将其转换为热值,换算单位为每千克标煤等于 $2.93 \times 10^7 J$ 。② $EF_{it}$ 按照部门*i*消费第*t*种能源造成的 $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 三类温室气体排放因子,以100年的GWP(Global Warming Potential,全球变暖潜势)值折算汇总。③所有部门的直接碳排放均只计算不含电力、热力的其他能源终端消费所引发的碳排放量,并扣除用作原料、材料的能源消费量;各部门消费的电力、热力所造成的碳排放,按照电力(火电)、热力生产所造成的碳排放全部计入电力热力的生产和供应业(下文简称电力生产业)。本文按中国能源转化的统计数据,测算电力(火电)、热力的碳排放因子分别为 $7.254tCO_2e/吨标煤$ 电力(火电)和 $3.876tCO_2e/吨标煤$ 热力。

此外,由于下文的投入产出法涉及到所有的三次产业部门的关联分析,对农业、建筑业和服务业部门也应做相应的直接碳排放量核算。

### 2. 体现碳转移的工业部门完全碳排放核算和分类

投入产出分析提供了测算部门技术经济联系的基本方法。不同部门间通过中间产品而相互关联,这意味着有相当比例的部门直接碳排放跟随中间产品转移到其他部门。那么表现的低碳部门可

能由于中间产品大多来源于高碳部门而是实际的高碳部门;反之,一些表观的高碳部门,其碳排放可能大部分是服务于其他部门的生产。因此,从直接碳排放角度进行部门碳排放分类控制可能难以达到理想效果,有必要从最终需求出发,通过计算各部门最终产品的完全碳排放,实现对部门整个生产过程碳排放的核算、评价和控制。为与国际上许多学者按部门电、热消费所导致的碳排放定义的间接碳排放(如 Matthews et al.<sup>[3]</sup>提出的第二层面碳排放)等概念有所区别,本文将部门为生产自身最终产品,而使用的中间产品和服务(如原料、电力、热力)所引发的其他部门碳排放定义为部门的引致碳排放,即完全碳排放包含直接碳排放和引致碳排放。

本文将传统的价值型投入产出表和能源平衡表进行整合,通过将部门直接碳排放纳入投入产出分析实现对部门完全碳排放的计量,并使用完全碳排放这一指标,从需求端分析隐含了部门间碳转移情况的部门碳排放。

(1)部门完全碳排放的计算。部门直接消耗系数矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(2)中,  $a_{ij}$  为直接消耗系数,表示部门  $j$  生产单位总产品所需要的部门  $i$  产品的投入量;  $x_{ij}$  为部门  $i$  为部门  $j$  提供的中间产品的价值;  $X_j$  为部门  $j$  的总产品(总产出),  $n$  为部门数量。

假设各部门生产中间产品和最终产品的碳排放强度无差异,则部门的直接碳排放强度矩阵  $DCI$  为:

$$DCI = [DCI_1, DCI_2, \dots, DCI_n], \quad DCI_j = DCE_j / X_j \quad (3)$$

式(3)中,  $DCI_j$  为部门  $j$  的直接碳排放强度,表示部门  $j$  每生产单位总产品直接排放碳的数量。

部门的完全碳排放强度矩阵  $TCI$  为:

$$TCI = DCI \times [I - A]^{-1} = [TCI_1, TCI_2, \dots, TCI_n] \quad (4)$$

式(4)中,  $I$  为单位矩阵;  $[I - A]^{-1}$  为 Leontief 逆矩阵,其是  $n$  阶方阵( $n$  为部门数量),其第  $i$  行第  $j$  列的元素表示,部门  $j$  每生产一单位的最终产品,所需要的部门  $i$  的总产品的数量;  $TCI_j$  为部门  $j$  的完全碳排放强度,表示部门  $j$  每生产单位最终产品所造成的直接和引致碳排放总量。

部门的引致碳排放强度矩阵  $ICI$  为:

$$ICI = TCI - DCI = [ICI_1, ICI_2, \dots, ICI_n] \quad (5)$$

式(5)中,  $ICI_j$  为部门  $j$  的引致碳排放强度,表示部门  $j$  每生产单位最终产品所造成的其他部门的碳排放量。

(2)扣除进口贸易影响的完全碳排放修正。中国进出口的一大特点是加工贸易比重较大,很多部门使用的中间产品来自于进口。由于式(4)中实际暗示所有的中间产品都是本国生产,因此,若直接采用式(4)计算,会严重高估中国各工业部门的完全碳排放量。本文采用中国投入产出学会<sup>[3]</sup>提出的修正方法,假设在各部门的中间产品和最终产品中,进口品和国内产品所占的比重相同,在此条件下对完全碳排放强度公式进行修正:

$$TCI^* = DCI \times [I - (I - \mu)A]^{-1} = [TCI_1^*, TCI_2^*, \dots, TCI_n^*] \quad (6)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mu_{nn} \end{bmatrix}, \quad \mu_{jj} = \frac{IM_j}{X_j + IM_j} \quad (7)$$

式(6)—式(7)中,  $TCI^*$  是扣除进口贸易影响后,修正的部门完全碳排放强度矩阵;  $TCI_j^*$  是修正后的部门  $j$  的完全碳排放强度;  $\mu$  是  $\mu_{jj}$  组成的对角矩阵;  $\mu_{jj}$  为部门  $j$  中间产品中进口产品的比例;

$IM_j$  为部门  $j$  的进口额。采用修正后的完全碳排放强度即可计算各部门的完全碳排放和引致碳排放:

$$ICI^* = TCI^* - DCI = [ICI_1^*, ICI_2^*, \dots, ICI_n^*] \quad (8)$$

$$ICE_j^* = ICI_j^* \times Y_j \quad (9)$$

$$TCE_j^* = TCI_j^* \times Y_j \quad (10)$$

式(8)一式(10)中,  $ICI^*$  为修正的部门引致碳排放强度矩阵,  $ICI_j^*$  是修正后的部门  $j$  的引致碳排放强度;  $ICE_j^*$  是部门  $j$  的引致碳排放量;  $TCE_j^*$  是部门  $j$  的完全碳排放量;  $Y_j$  是部门  $j$  的最终产品量(政府消费、居民消费、投资和出口之和)。

(3) 基于完全碳排放强度的部门分类。按照前文所计算的部门直接碳排放强度、引致碳排放强度、完全碳排放强度, 可将各工业部门分为以下类型: ① 全过程高碳部门: 直接碳排放强度和引致碳排放强度均较高的部门。② 表观高碳部门: 直接碳排放强度较高, 但引致碳排放强度较低的部门。此类部门能源消费量较高, 但其碳排放的产生主要是为其他部门提供中间产品。③ 传导型高碳部门: 直接碳排放强度较低, 但引致碳排放强度较高的部门。此类部门虽然能源消费量较低, 但因中间产品使用引发了上游部门的高碳排放。④ 低碳部门: 不属于上述情况的其他部门。

按照碳排放强度进行部门分类以外, 还可进一步结合各部门的碳排放量实现部门碳排放的分类控制。一般来说, 全过程高碳部门是工业碳减排的关键部门; 表观高碳部门应侧重从优化能源结构、提高碳效率进行碳减排; 传导型高碳部门应侧重推动减量化等循环经济生产方式进行碳减排。

(4) 进出口碳转移的计算。工业碳排放除跟随中间产品在部门间转移外, 也可以随出口转移至其他国家, 而进口国外产品则可以避免国内生产同类产品的碳排放。目前, 由于受加工贸易影响, 中国在进出口中是碳的净出口国还是净受益国, 研究中存在很多争论<sup>[9, 14]</sup>。上文中通过修正完全碳排放的计算方法, 已经规避了进口贸易对部门中间产品的影响, 可通过  $TCI^*$  矩阵计算各部门出口的碳排放量。同时, 进口产品用于提供中间产品, 而减少了出口产品碳排放的情况已经被扣除。因此, 计算进口产品中用于国内消费和生产国内消费品, 而减少国内的碳排放量时, 同样需要对 Leontief 逆矩阵作再次修正, 其修正方法可参考朱启荣<sup>[15]</sup>给出的估算方法。

$$ECE_j' = TCI_j' \times EX_j, \quad ICE_j' = TCI_j' \times IM_j \quad (11)$$

$$TCI' = DCI \times [I - \nu \times A]^{-1} = [TCI_1', TCI_2', \dots, TCI_n'] \quad (12)$$

$$\nu = \begin{bmatrix} \nu_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \nu_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \nu_{nn} \end{bmatrix}, \quad \nu_{jj} = 1 - \frac{EX_j}{X_j + IM_j} \quad (13)$$

$$VCE_j' = ECE_j' - ICE_j' \quad (14)$$

式(11)一式(14)中,  $ECE_j'$  是部门  $j$  因出口向其他国家转移的碳排放;  $ICE_j'$  是部门  $j$  因进口而减少的国内碳排放;  $TCI'$  是为了测算进口所减少碳排放量而再次修正的完全碳排放强度矩阵, 其中,  $TCI_j'$  是为测算部门  $j$  进口碳排放量而使用的部门  $j$  的再次修正的完全碳排放强度;  $\nu$  是  $\nu_{jj}$  组成的对角矩阵,  $\nu_{jj}$  为部门  $j$  的进口产品中用于国内消费和生产国内消费品的合计比例;  $EX_j$  为部门  $j$  的出口额;  $VCE_j'$  是部门  $j$  进出口中碳的净转移量。如果  $VCE_j' > 0$ , 则说明部门  $j$  在进出口中为其他国家承担了碳排放, 反之, 则说明部门  $j$  在进出口的碳转移中净受益(其他国家承担了本国碳排放)。

### 3. 工业部门碳转移路径分析

完全碳排放的核算是从需求端计算某部门接受其他部门碳转移的累计量, 解决了哪些部门是碳转移的主要接受者、哪些部门是碳转移的主要供给者的问题, 但完全可能出现部门  $i$  的大部分碳排放都随中间产品转移至部门  $j$ , 但在部门  $j$  所接受的其他部门的中间产品中, 部门  $i$  提供的中间产品只占较少部分的情况。这样从需求端考虑, 部门  $i$  到部门  $j$  的碳转移可能不会被判定为部门间碳

转移的主要路径。因此,从供给端出发来判断工业部门间碳转移的主要路径可能更为合适。

部门直接分配系数矩阵  $H$  为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}, h_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_i}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式(15)中,  $h_{ij}$  为直接分配系数,表示部门  $i$  向部门  $j$  提供的中间产品占部门  $i$  总产品的比重;  $X_i$  为部门  $i$  的总产品。直接分配系数的分母有时使用部门总供给(国内生产和进口之和),但本文研究部门碳转移,不涉及进口产品的具体分配情况,故未使用进口项。

完全分配系数矩阵  $W$  为:

$$W = [I - H]^{-1} - I \quad (16)$$

式(16)中,  $[I - H]^{-1}$  为 Ghosh 逆矩阵<sup>[16]</sup>,  $W$  的第  $i$  行第  $j$  列元素  $W_{ij}$  表示部门  $i$  单位初始投入(即增加值)中直接和间接分配给部门  $j$  的数量(不含初始投入本身)。由此,假设部门中间投入和初始投入对碳排放影响相同,即可计算某部门对其他所有部门的碳转移强度。

$$TCT = \begin{bmatrix} DCI_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & DCI_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & DCI_n \end{bmatrix} \times W = \begin{bmatrix} TCT_{11} & TCT_{12} & \cdots & TCT_{1n} \\ TCT_{21} & TCT_{22} & \cdots & TCT_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TCT_{n1} & TCT_{n2} & \cdots & TCT_{nn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)中,  $TCT$  为碳转移强度矩阵,是部门直接碳排放强度组成的对角阵与完全分配系数矩阵  $W$  的乘积,  $TCT_{ij}$  表示部门  $i$  每提供单位初始投入,会流向部门  $j$  的碳排放。根据  $TCT_{ij}$  的数值,可以判断工业部门间主要的碳转移路径。

#### 4. 基于 RAS 法的工业部门碳转移预测

由于投入产出表数年才发布一次数据,导致投入产出数据是缺乏时间序列的静态数据。利用投入产出法估计未来某时期部门间技术经济联系变动的主要障碍是如何合理预测目标期的直接消耗系数矩阵。针对这一问题,Stone and Brown<sup>[17]</sup>提出的双比例平衡法(Biproportional Scaling Method, RAS)在实践中得到了最广泛的应用,并且学界在其基础上相继发展出 TRAS、GRAS<sup>[18]</sup>、IDFC<sup>[19]</sup>等估计方法。RAS 法假定直接消耗系数的变动来自替代效应和制造效应的影响,并构造两套乘数矩阵  $R$  和  $S$  来表示这两种影响。

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_n \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & s_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & s_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)中,  $R$  为替代乘数矩阵,  $S$  为制造乘数矩阵。设基期为第  $t$  期,其直接消耗系数矩阵为  $A_t$ ; 预测的目标期为第  $p$  期,其直接消耗系数矩阵为  $A_p$ ,则存在  $R, S$  使  $A_p = RA_t S$  成立。在 RAS 法的基础上,本文设计了若干假设条件和目标函数。

设  $m$  期为基期前的某一时期,假设:①以  $m$  期至  $t$  期平均变化率为参考,第  $t$  期至第  $p$  期,各部门的中间需求率和中间投入率平稳变化。②以  $m$  期至  $t$  期平均变化率为参考,第  $t$  期至第  $p$  期,各部门的增加值平稳变化;且第  $p$  期进口结构与第  $t$  期相同。由此,可以估计第  $p$  期各部门的增加值、最终产品、进口量、总产品,以及中间投入和中间使用的比例。并设定目标函数为:

$$\min G = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\sum_{i=1}^n r_i \alpha_{ij} s_j X_{pj} + Z_{pj} - X_{pj}}{X_{pj}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\sum_{j=1}^n r_i \alpha_{ij} s_j X_{pj} + Y_{pi} - IM_{pi} - X_{pi}}{X_{pi}} \right]^2 \quad (19)$$

式(19)中,  $\alpha_{ij}$  为第  $t$  期直接消耗系数,  $Z_{pj}$  为第  $p$  期部门  $j$  的增加值,  $Y_{pi}$ 、 $IM_{pi}$ 、 $X_{pi}$  分别表示第  $p$  期部门  $i$  的最终产品量、进口量和总产品量。式(19)表示投入产出表的横向和纵向各项估计值和已

知值的误差平方和最小化。在这一目标下,通过反复迭代,使投入产出表数据收敛,得到目标期第  $p$  期的直接消耗系数矩阵。按照前文的计算方法,即可估计在不同的直接碳排放强度条件下,目标期的部门完全碳排放强度和总量的变化(这种变化体现了部门间碳转移的变化)。

### 三、数据来源

本文的数据来源于《中国投入产出表》(2010)和相应年份的《中国能源统计年鉴》中的能源平衡表数据。由于两者对工业部门的划分有所差异,根据数据可得性,本文将投入产出表的 41 个部门归并为 28 个部门,其中,将 39 个工业部门归并为 23 个,将 16 个服务业部门归并为 3 个,加之农林牧渔业和建筑业,归并后共计 28 个部门。归并的具体方法为:对投入产出表部门分类粗于能源平衡表的,按照能源平衡表计算的部门直接碳排放量进行加总(如将能源平衡表中黑色、有色金属矿采选业合并成投入产出表中的金属矿采选业,碳排放量加总),这一步将能源平衡表中 39 个工业部门对应归并成投入产出表中的 23 个工业部门,不改变投入产出表结构;对投入产出表部门分类细于能源平衡表的,将投入产出表中的部门进行行列合并(如投入产出表中的交通运输及仓储业、邮政业两项合并为能源平衡表中的交通运输仓储和邮政业,其他部门接受这两个部门的中间产品按行加总合并,其他部门对这两个部门的中间投入按列加总合并),这一步将投入产出表中第三产业的 16 个部门对应归并成能源平衡表中的 3 个部门,从而使最终的 28 个部门在两个表中得以一致。在 RAS 法分析中,采用的 2005 年投入产出表做同样处理。

### 四、实证结果及分析

#### 1. 中国工业部门碳排放转移现状评价

采用前文直接、引致、完全碳排放相关计算方法,本文依据部门总产品和能源消费量测算了 2010 年中国工业部门直接碳排放量;按照最终产品体现的部门间碳转移情况,测算了部门完全碳排放强度及排放量、引致碳排放强度及排放量,以及进出口碳转移量。

表 1 的结果显示,按照传统的以部门终端能源消费量核算的部门直接碳排放量进行考察,2010 年工业部门能耗碳排放总量  $62.31 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ , 占中国总能源消费造成碳排放量的 84.02%, 工业部门的平均直接碳排放强度是  $0.80 \text{tCO}_2\text{e}/\text{万元}$ 。其中,电力、热力的生产和供应业(下文简称电力生产业)直接碳排放量最高,达到  $34.21 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ , 占有工业部门排放量的 54.90%;其次是金属冶炼及压延加工业(下文简称金属加工业)、非金属矿物制品业(下文简称非金属制品业)、化学工业、石油加工炼焦及核燃料加工业(下文简称石油加工业)、煤炭开采和洗选业(下文简称煤炭开采业)5 个部门。这 6 个部门的直接碳排放量都在  $1 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$  以上,直接碳排放量占到工业部门总排放量的 94.42%。即从总产品角度考虑,上述 6 个部门是未来中国工业碳排放控制的关键部门。

但是,从最终产品角度考虑,工业部门完全碳排放强度和排放量的计算结果显示,由于最终产品仅占总产品的 40%(所有 28 部门),导致一方面,部门完全碳排放强度整体远高于直接碳排放强度;另一方面,工业部门完全碳排放总量仅占按总产品核算的直接碳排放总量的约 70%,说明工业部门为非工业部门,特别是建筑业和第三产业提供了较多的中间产品。完全碳排放强度前 5 位的工业部门分别是电力生产业、金属加工业、非金属制品业、水的生产和供应业(下文简称水生产业)和金属制品业,它们的完全碳排放强度都接近或超过  $3 \text{tCO}_2\text{e}/\text{万元}$ ;完全碳排放量前 5 位的工业部门分别是通用专用设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业(下文简称电气机械制造业)、通信设备计算机及其他电子设备制造业(下文简称通信设备制造业)和电力生产业,它们的完全碳排放量都超过了  $3.5 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ 。可见,工业部门的完全碳排放强度和直接碳排放量上有一定的相关性,两者数值最高的 3 个部门是重合的。但是,完全碳排放量较高的部门与直接碳排放量较高的部门则差异很大,如电力生产业,其完全碳排放量仅为直接碳排放量的约 1/10,这是由于完全

表 1

2010 年中国工业部门碳排放和碳转移核算表

编号	部门		$DCE_j$	从最终产品角度核算			
				$TCI_j^*$	$ICI_j^*$	$TCE_j^*$	$VCE_j'$
	缩写	全称		万 tCO <sub>2</sub> e	tCO <sub>2</sub> e/万元	tCO <sub>2</sub> e/万元	万 tCO <sub>2</sub> e
1	MWC	煤炭开采和洗选业	13207.1916	2.0690	1.4140	1009.3795	-2521.4529
2	EPN	石油和天然气开采业	4179.4376	1.9006	1.5426	578.6040	-16693.0988
3	MMO	金属矿采选业	1408.4905	2.7877	2.6642	1914.8881	-22078.0163
4	MNO	非金属矿及其他矿采选业	1129.3140	2.4565	2.2470	518.5873	-402.3665
5	MFT	食品制造及烟草加工业	6245.0076	0.9631	0.8705	30192.5552	-306.9355
6	MOT	纺织业	3515.8706	1.3733	1.2655	13301.1330	11145.3840
7	MTW	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	819.2625	1.1539	1.1200	16838.8463	5949.4570
8	PTF	木材加工及家具制造业	1001.5515	1.6923	1.6257	8098.6856	3810.2608
9	MPA	造纸印刷及文教体育用品制造业	4649.3416	1.7994	1.5759	5951.1894	2219.4819
10	PPN	石油加工、炼焦及核燃料加工业	16143.2230	1.7472	1.2117	3759.0289	-3347.4590
11	CHI	化学工业	40394.3420	2.4002	1.9670	33489.5269	-7650.4960
12	MNM	非金属矿物制品业	47441.6944	3.6443	2.4601	9640.0439	4794.7361
13	SPM	金属冶炼及压延加工业	129063.5406	4.1296	2.5572	19288.0091	-8366.6155
14	MMP	金属制品业	1265.9184	2.9652	2.9135	13559.4785	7980.5132
15	MGS	通用、专用设备制造业	5096.1473	2.1548	2.0779	71914.1449	-6916.8644
16	MTE	交通运输设备制造业	2545.7146	1.7165	1.6731	56458.2667	-2151.2430
17	MEE	电气机械及器材制造业	933.2425	2.1860	2.1656	50362.1499	10460.5011
18	MCE	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	714.8764	1.2751	1.2625	43428.1047	8924.2750
19	MMI	仪器仪表及文化办公用机械制造业	144.7218	1.3820	1.3618	7760.5749	-2006.6317
20	MAO	工艺品及其他制造业 (含废品废料)	662.2466	1.1309	1.0824	6718.7118	-2174.3524
21	PDE	电力、热力的生产和供应业	342118.4052	12.9021	5.0820	36751.0913	780.8710
22	PDG	燃气生产和供应业	358.8405	1.3799	1.2198	1375.3650	0.0000
23	PDW	水的生产和供应业	82.2341	3.5632	3.5160	3222.5280	0.0000

资料来源:作者计算。

碳排放量考察最终产品碳排放量,而直接碳排放量考察的是总产品碳排放量,电力生产业主要为其他部门提供电力和热力中间产品,最终产品量很少,导致完全碳排放量较低,金属加工业和非金属制品业也显示出类似的情况。

进一步对比工业部门的完全碳排放强度和引致碳排放强度。可以发现,除完全碳排放强度较高的部门中部分受直接碳排放强度影响较大外,其他多数工业部门的完全碳排放强度绝大部分由引致碳排放强度贡献。这说明,中国仅有少数处于产业链上游的工业部门,自身能源消费高、碳排放量高、最终产品少,并通过提供中间产品将碳排放转移至其他部门,其中,电力生产业的情况最为显著,其是其他工业部门完全碳排放提高的最主要因素;而其他多数工业部门都通过中间产品的使用,接受其他部门的碳转移,是推动中国工业碳排放增长的隐藏因素。如果仅针对直接碳排放强度和排放量较高的部门进行控制,不考虑其他部门中间需求的拉动影响,就难以有效利用不同工业部

门的碳减排成本差异<sup>[20]</sup>,达到工业碳减排经济和环境双赢的最优效果。因此,有必要针对这些部门的不同特点设计碳排放的分类控制政策,协调不同类型的部门碳减排。

中国工业部门进出口碳转移测算结果显示,中国出口和进口转移的碳排放量基本平衡,23个工业部门中, $VCE_j' \geq 0$ 的部门11个, $VCE_j' < 0$ 的部门12个,进口碳排放量略高于出口碳排放量(此结论可能受后金融危机时期出口低迷影响)。其中,净进口碳排放量较大的部门主要是金属矿采选业、石油和天然气开采业(下文简称油气开采业)等,净出口碳排放量较大的部门主要是纺织业、电气机械制造业等。中国所有28个部门净进口碳排放量 $1.02 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ ,相当于削减了所有部门完全碳排放总量的1.28%;23个工业部门净进口碳排放量 $1.86 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ ,相当于削减了中国所有工业部门完全碳排放量的4.09%。即中国通过进出口贸易,在国际碳转移方面略有得益。

此外,对比一般的完全碳排放计算方法和本文的修正方法,本文方法更为准确。在不存在进出口的情况下,应有 $\sum_i DCE_i = \sum_j TCE_j$ 的关系存在,但如前文所述,中国是进口贸易大国,由于进口产品被广泛用于各部门所需要的中间产品,导致在不修正Leontief逆矩阵的情况下,部门完全碳排放会被显著高估。若按照未修正的 $TCE_j$ 计算,所有部门(含非工业部门)的完全碳排放量为 $98.22 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ ,较理论值高出32.44%,经过本文模型修正的 $TCE_j^*$ 计算,所有部门(含非工业部门)的完全碳排放量为 $78.40 \times 10^8 \text{tCO}_2\text{e}$ ,与理论值的误差缩小到5.72%。误差为正值说明,前文中“各部门的中间产品和最终产品中,进口品和国内产品所占的比重相同”的假设不完全符合实际,事实上,进口品在中间产品中的比重还要略高于用于满足最终需求的部分。

## 2. 工业碳排放转移结构分类

对23个工业部门的完全碳排放强度(直接、引致碳排放强度)进行分类分析。由图1(a)可知,由于工业部门大量地使用电力、热力等二次能源,除电力生产业的直接碳排放强度高于引致碳排放强度外,其他所有工业部门的完全碳排放强度都以引致碳排放强度为主,以电力部门为核心的减排方式确有其依据;直接碳排放强度较高的工业部门,除电力生产业外,主要是金属加工业、非金属制品业、煤炭开采业、石油加工业、化学工业、油气开采业等,这些部门主要涉及到能源开采、矿物冶炼和石油化工这些传统的高能耗行业。

进一步,本文将23个工业部门的直接碳排放强度和引致碳排放强度进行分区,将 $DCE_j$ 数值较高的11个部门划分为直接高碳部门,将 $ICE_j^*$ 数值较高的11个部门划分为引致高碳部门,从而将23个工业部门分为4类,见图1(b)。其中,A区域为全过程高碳部门,包含电力生产业等6个部门;B区域为表观高碳部门,包含煤炭开采业等5个部门;C区域为传导型高碳部门,包含水生产业等5个部门;D区域为低碳部门,包含食品制造及烟草加工业等7个部门。其中,全过程高碳部门和传导型高碳部门正好构成了完全碳排放强度最高的11个部门,这说明引致碳排放的控制在未来工业碳减排中相当重要。

B区域部门,其直接碳排放强度高,而引致碳排放强度相对较低,是目前碳减排较为关注的部门,这些部门在工业部门碳转移中处于产业链的上游,部门能源强度高,接收其他部门的碳转移相对较少。控制这类部门碳排放主要应提高行业能耗准入标准,控制产能过快增长,并在生产过程中,降低煤、石油等高碳化石能源使用比例、提高天然气等低碳化石能源及清洁能源的使用,推进清洁生产,提高单位能耗的产出。C区域的部门,其直接碳排放强度低,而引致碳排放强度相对较高,这些部门一次能源使用量较少,但其上游部门多是直接碳排放强度较高的部门,导致碳转移的中间需求高。控制这类部门的碳排放主要应减少中间需求量,建设工业园区、产业聚集区,通过推广源头减量化、资源循环利用、再制造和能源梯级利用等方式,提高单位物耗的产出。A区域的部门,也是目前碳减排较为关注的部门,其直接和引致碳排放强度都较高,导致碳转移的中间产品供应和需求都比较旺盛,可以作为碳减排的优先控制部门(特别是重视火电、钢铁、化工、有色等行业的节能减排),重点实施政策干预,组合使用上述各类方法。



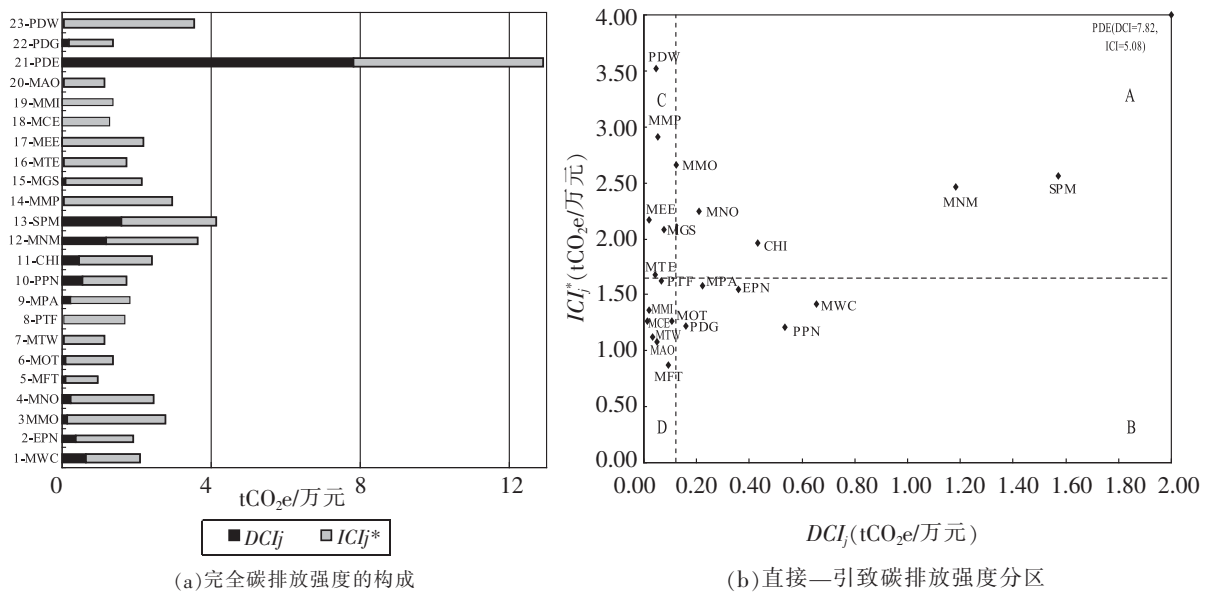


图 1 中国工业部门完全碳排放强度构成及分区

资料来源:作者根据计算数据绘制。

此外,本文计算了  $ICI_j^*/DCI_j$ ,发现有 11 个部门这一比值超过 20,属于差异性较大的部门。除所有的传导型高碳部门的差异性都较大外,在 D 区域的低碳部门中也有一部分差异性大的部门,如通信设备制造业等,这些部门的发展可能带来其他高碳产业的增长,是未来潜在的碳排放增长部门,值得进一步关注。

### 3. 工业部门间碳转移主要路径分析

本文从供给端出发,对 23 个工业部门间的碳转移强度进行了测算,对 506 个碳转移强度(529 个部门间数据中,扣除 23 个部门自身之间碳转移的数据)选取数值前 10% 的 50 个(最低值为  $0.1197tCO_2e/万元$ )作为部门间的主要碳转移路径,其中有 22 个为电力部门向其他工业部门的碳转移,如图 2 所示。

图 2 显示出中国工业部门间碳转移路径的几个特点:①能源转化部门(电力生产业)对除燃气生产和供应业(下文简称燃气生产业)之外的其他所有工业部门的碳转移都是碳的主要流动方向。②主要的碳转移路径中,采掘业流向流程制造业,流程制造业流向离散制造业为主要方向,并存在流程制造业部门间的主要转移路径。③不存在采掘业部门间,离散制造业部门间,从离散制造业流向采掘业和流程制造业,以及从流程制造业流向采掘业的主要碳转移路径。从供给

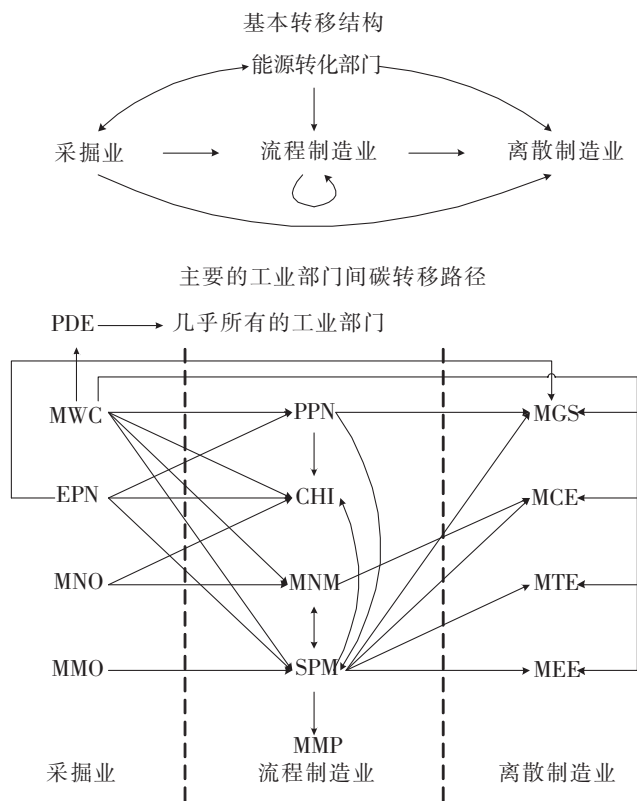


图 2 中国工业部门间主要的碳排放转移路径示意

资料来源:作者绘制。

端考虑,上述这些主要的碳转移路径将是未来工业部门碳排放控制的关键环节。

#### 4. 未来中国工业部门碳排放转移变化预测

基于《中国投入产出表》,本文以 2010 年为预测基期(第  $t$  期),以 2005 年为参照的第  $m$  期。由于投入产出表体现的部门间经济技术联系的稳定性具有时间限制,不宜于预测过长时期的变化,考虑到 2017 年是未来最近的有投入产出数据公布的年份,本文以 2017 年为预测的目标期(第  $p$  期),便于未来研究的数据对比。

本文采用 RAS 法,估计了 2017 年的直接消耗系数矩阵,在假定部门直接碳排放强度不变(与 2010 年相同)和按国内规划目标<sup>①</sup>下降的情况下,各部门的完全碳排放强度和排放量(涉及货币的一律按 2010 年不变价折算)结果如表 2 所示。

表 2 2017 年中国工业部门完全碳排放强度和排放量预测

假设: $DCI_t$ 与 2010 年相同				假设: $DCI_t$ 按相关规划变化				乘数迭代结果	
部门	$TCI_j^*$ (tCO <sub>2</sub> e/ 万元)	较 2010 年 变动(%)	$TCE_j^*$ (万 tCO <sub>2</sub> e)	部门	$TCI_j^*$ (tCO <sub>2</sub> e/ 万元)	较 2010 年 变动(%)	$TCE_j^*$ (万 tCO <sub>2</sub> e)	$r_i$	$s_j$
MWC	1.8840	-8.9379	2252.7919	MWC	1.3128	-36.5487	1569.7276	1.4985	1.6200
EPN	2.1235	11.7306	1314.6115	EPN	1.2891	-32.1747	798.0252	0.7438	1.4425
MMO	2.2924	-17.7657	444.7875	MMO	1.4003	-49.7688	271.6900	2.2977	2.1891
MNO	2.0840	-15.1656	759.6024	MNO	1.3254	-46.0478	483.0845	1.2552	1.3008
MFT	1.0971	13.9078	57212.2771	MFT	0.6695	-30.4841	34915.6511	2.0367	1.8014
MOT	1.3748	0.1074	15716.0888	MOT	0.8653	-36.9899	9892.1031	1.4773	1.2157
MTW	1.2230	5.9860	19001.5326	MTW	0.7605	-34.0987	11815.0025	1.9262	1.0753
PTF	1.7785	5.0971	17325.4861	PTF	1.0897	-35.6053	10615.6131	1.4456	1.6819
MPA	1.8486	2.7295	5226.4598	MPA	1.1231	-37.5848	3175.4320	1.2610	1.1699
PPN	1.8895	8.1480	2636.6255	PPN	1.2863	-26.3771	1794.9100	1.4750	2.1170
CHI	2.4577	2.3981	77256.4612	CHI	1.5346	-36.0609	48240.2027	1.2705	1.5383
MNM	3.6904	1.2667	11358.8372	MNM	2.2237	-38.9801	6844.4564	1.5316	1.6474
SPM	3.8593	-6.5452	38388.9390	SPM	2.3765	-42.4511	23639.6799	1.3989	1.4754
MMP	2.8564	-3.6677	15304.7307	MMP	1.7389	-41.3544	9317.2779	1.3784	1.4305
MGS	2.0918	-2.9216	102358.8709	MGS	1.2819	-40.5093	62726.6277	1.8645	1.5823
MTE	1.7406	1.4086	204805.7698	MTE	1.0700	-37.6649	125892.5945	1.4394	2.2763
MEE	2.1806	-0.2476	127632.5740	MEE	1.3392	-38.7381	78384.2353	1.6104	1.7922
MCE	1.1174	-12.3694	43892.5319	MCE	0.6896	-45.9221	27086.6105	1.8795	0.9470
MMI	1.2520	-9.4065	4061.8111	MMI	0.7721	-44.1354	2504.7191	1.6709	0.9169
MAO	1.1117	-1.6994	16816.4219	MAO	0.6942	-38.6120	10501.7332	1.6187	1.7865
PDE	12.7381	-1.2718	52847.5230	PDE	7.4119	-42.5532	30750.2594	1.1442	1.4342
PDG	1.5796	14.4755	4025.1966	PDG	0.9725	-29.5200	2478.2244	1.9224	2.9044
PDW	3.2919	-7.6123	4008.2448	PDW	1.9457	-45.3953	2369.0294	1.0246	1.0817

资料来源:作者计算。

① 《工业应对气候变化行动方案(2012—2020 年)》确定了钢铁、有色金属、石化等部门的碳排放强度下降率。

表 2 结果显示,若直接碳排放强度不发生变化,由于部门中间关联变动,2017 年,23 个工业部门中,有 11 个部门的完全碳排放强度提高,工业部门的平均完全碳排放强度下降 0.88%,整体平稳,但总产品的大幅增加导致  $\sum_j TCE_j^*$  较 2010 年提高 89.08%。即若不对供给端实施碳减排,则在未来一段时期内工业部门间碳转移的强度水平变化不大,但部门碳排放总量提升显著。

若中国各工业部门均达到相关规划中,直接碳排放强度每 5 年下降 17%—22%的目标值,则至 2017 年,所有工业部门的完全碳排放强度都会有明显下降,23 个工业部门的平均完全碳排放强度较 2010 年下降 38.59%。其中,降幅最大的 4 个部门是金属矿采选业、非金属矿及其他矿采选业(下文简称非金属矿采选业)、通信设备制造业和水生产业,它们的完全碳排放强度较之 2010 年下降超过 45%,从需求端分析,这几个部门将是未来碳强度削减的重要贡献部门;2010 年完全碳排放强度最高的电力生产业,2017 年完全碳排放强度将下降 42.55%,超过平均降幅;2017 年,完全碳排放量最高的部门将从通用专用设备制造业转变为交通运输设备制造业,未来交通运输设备制造业引发的碳排放将占到更大份额;石油加工业和燃气生产业两个部门的完全碳排放强度下降率较小,低于 30%,可能需要在技术改造和清洁能源使用方面给予更多的政策干预。进一步的,还可以分析引致碳排放强度的变化情况,2017 年,非金属矿采选业、通信设备制造业、水生产业、金属加工业和煤炭开采业 5 个部门的引致碳排放强度降幅最高,超过 45%,说明这 5 个部门未来接受其他部门的碳转移强度将明显减小。综上,结果表明若供给端的碳减排达到预期效果,工业部门间中间产品关联变化造成的碳转移增减变化幅度将远低于直接碳排放强度减少所影响的幅度,未来部门间碳转移强度和总量将有极为明显的下降。但另一方面,即使达到中国政府要求的直接碳排放强度削减比例,2017 年,  $\sum_j TCE_j^*$  较 2010 年仍将提高 16.04%,这意味着至 2017 年中国工业碳排放的峰值仍未达到,中国现阶段依然只能采用碳强度削减的控制目标,未来工业碳排放总量减排的任务极为艰巨。

## 五、研究结论与启示

本文基于 IPCC 清单分析法和修正的投入产出模型,对中国工业部门直接、引致和完全碳排放、碳排在工业部门间和国际贸易间的转移情况进行了核算、分类和评价,并借助 RAS 法预测了 2017 年工业碳排放结构的变化。对研究结果的分析和讨论显示:

(1)在强度减排和绝对量减排的关系方面,中国工业部门实施完全碳排放强度控制,抑或实施直接碳排放量控制,两者可能并不冲突,且在部门选择上具有一定的一致性;但完全碳排放量和直接碳排放量控制对应的部门则差异显著。从最终需求测算,中国工业部门完全碳排放强度控制和直接碳排放总量控制的对象趋同,并且会以干预 5—6 个关键部门为主,这几个关键部门占到碳排放总量的 90%以上。电力生产业、金属加工业、非金属制品业既是直接碳排放量最高的部门,又是完全碳排放强度最高的部门,这些产业能耗大、最终产品少,无论是选择绝对量减排还是强度减排,都是未来的重点控制部门。考虑到强度减排未来势必向总量减排过渡,选择完全碳排放强度作为控制目标,相比直接碳排放强度,既符合责任共担原则,也可能保证了政策的延续性。

(2)中国工业部门的完全碳排放,很大部分来源于引致碳排放,按照直接—引致碳排放的构成,对不同类型的高碳部门应实施分类控制。受工业能耗中电力消费的影响,除电力生产业外,其他 22 个工业部门引致碳排放强度都超过了直接碳排放强度。具体的分类控制上,对煤炭开采业、石油加工业等 5 个表观高碳部门,应重点改变高碳能源消费结构,提高低碳能源、清洁能源的使用比例;对水生产业、金属制品业等 5 个传导型高碳部门,应重点控制中间产品使用量,鼓励减量化、资源梯级利用、循环利用的生产技术;而对电力生产业、金属加工业等 6 个全过程高碳部门,则需要多种减排手段的组合应用。减排目标设定和操作方法方面,一方面应通过责任归属、减排能力、减排成本的综

合平衡来确定适当的上下游部门碳减排比例;另一方面,若未来中国实施碳交易政策,则发达国家对电力部门实施的“祖父式”配额和利益再分配方式也有其合理和可借鉴之处,可以给予直接碳排放强度较高而引致碳排放强度较低的部门更多的初始配额,通过市场的配额交易和自行调整,弥补上游产业由于提供中间产品而需要额外付出的减排成本。

(3)受部门间碳转移影响,不同部门间需承担共同减排责任,并可形成一些可优先考虑的部门减排组团。从供给端分析的碳转移路径显示,电力生产业与其他部门间,采掘业和流程、离散制造业的部分部门间(如煤炭开采业与石油加工业、油气开采业与化学工业之间等),流程制造业的部分部门间(如石油加工业和化学工业、非金属制品业与金属加工业之间等),以及流程制造业和离散制造业的部分部门间(如金属加工业与通用专用设备制造业、非金属制品业与通信设备制造业之间等)碳转移联系紧密,可根据部门能流、物流和技术特征设计协同减排措施。

(4)中国工业部门通过国际贸易在国家间碳排放转移中略有受益,未来可进一步有针对性地调整进出口贸易结构,促进工业低碳转型。中国净出口和净进口碳的工业部门各约占一半,其中碳出口贡献较大的部门,包括纺织业、电气机械制造业、通信设备制造业、金属制品业等。对纺织业等低碳部门,可维持一定的出口规模以减少对经济增长的影响,但对金属制品业等完全碳排放强度较高的部门,可适度降低出口比重或在出口成本中增加对碳成本的考虑。碳进口贡献较大的部门,包括金属矿采选业、油气开采业、金属加工业、化学工业等,这些部门基本都属于高碳部门和产业链前端,未来可以适当提高这些碳密集型部门产品的进口比重,减少国内碳排放。

(5)中国工业部门低碳转型具备其内部驱动力,工业部门强度减排的预期目标可达,但未来碳排放总量仍会提升,且若干部门需引起重点关注。未来中国工业部门的技术经济联系强度和完全碳排放强度显示出反向变化的特征,在RAS法和部门经济指标平稳变化的假定下,2017年所有的三次产业28个部门的平均增加值率略有下降且中间需求率上升,部门关联性提高应导致完全碳排放强度平均水平提高,但模型计算结果表明工业部门平均的完全碳排放强度下降了0.88%(直接碳排放强度不变时),这暗示即使按惯性发展,未来中国也会出现高碳部门间关联削弱、低碳部门间关联提升的结构变动趋势,中国工业低碳转型具备其内部动因。而按照相关规划的削减率预测,2017年中国工业部门的平均完全碳排放强度较2010年下降率接近40%,以此估计,2020年中国的碳强度减排目标应不难达到;但同时预测表明碳排放总量继续提升,峰值仍未到来。应注意的是,交通运输设备制造业可能成为未来完全碳排放量最高的部门,而石油加工业、燃气生产业在完全碳排放强度控制上可能较难达到理想目标,这些部门需要在减排操作中得到进一步干预。

#### [参考文献]

- [1]陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009,(4):41-55.
- [2]Bicknell, K.B., R.J. Ball, R. Cullen, and H.R. Bigsby. New Methodology for the Ecological Footprint with an Application to the New Zealand Economy[J]. Ecological Economics, 1998,27(2):149-160.
- [3]Matthews, H.S., C.T. Hendrickson, and C.L. Weber. The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries [J]. Environmental Science & Technology, 2008,42(16):5839-5842.
- [4]孙建卫,陈志刚,赵荣钦,黄贤金,赖力. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010,20(5):28-34.
- [5]曹淑艳,谢高地. 中国产业部门碳足迹流跟踪分析[J]. 资源科学, 2010,32(11):2046-2052.
- [6]张为付,杜运苏. 中国对外贸易中隐含碳排放失衡度研究[J]. 中国工业经济, 2011,(4):138-147.
- [7]刘强,庄幸,姜克隽,韩文科. 中国出口贸易中的载能量及碳排放量分析[J]. 中国工业经济, 2008,(8): 46-55.
- [8]樊纲,苏铭,曹静. 最终消费与碳减排责任的经济分析[J]. 经济研究, 2010,(1):4-14,64.
- [9]Peters, G.P., C.L. Weber, D. Guan, and K. Hubacek. China's Growing CO<sub>2</sub> Emissions: A Race between Increasing Consumption and Efficiency Gains[J]. Environmental Science & Technology, 2007,41(17):5939-5944.
- [10]Weber, C.L., G.P. Peter, D. Guan, and K. Hubacek. The Contribution of Chinese Exports to Climate Change

- [J]. Energy Policy, 2008,36(9):3572–3577.
- [11]Lee, C.F., S.J. Lin, C. Lewis, and Y.F. Chang. Effects of Carbon Taxes on Different Industries by Fuzzy Goal Programming: A Case Study of the Petrochemical-related Industries, Taiwan [J]. Energy Policy, 2007,35(8):4051–4058.
- [12]IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2015.
- [13]中国投入产出学会课题组. 国民经济各部门水资源消耗及用水系数的投入产出分析——2002年投入产出表系列分析报告之五[J]. 统计研究, 2007,24(3):20–25.
- [14]王媛,王文琴,方修琦,魏本勇,李东哲. 基于国际分工角度的中国贸易碳转移估算[J]. 资源科学, 2011,33(7):1331–1337.
- [15]朱启荣. 中国外贸中虚拟水与外贸结构调整研究[J]. 中国工业经济, 2014,(2):58–70.
- [16]Ghosh, A. Input-Output Approach in an Allocation System[J]. *Economica*, 1958,(97):58–64.
- [17]Stone, R., and A. Brown. A Computable Model of Economic Growth[M]. London:Chapman and Hall, 1962.
- [18]Junius, T., and J. Oosterhaven. The Solution of Updating or Regionalizing a Matrix with both Positive and Negative Entries[J]. *Economic Systems Research*, 2003,15(1):87–96.
- [19]叶震. 投入产出数据更新方法及其在碳排放分析中的应用[J]. 统计与信息论坛, 2012,27(9):39–44.
- [20]陈诗一. 节能减排与中国工业的双赢发展:2009—2049[J]. 经济研究, 2010,(3):129–143.

## Evaluation and Prediction on Carbon Emissions Transferring across the Industrial Sectors in China

YANG Shun-shun

(Institute of Regional Economy and Systems Engineering HASS, Changsha 410003, China)

**Abstract:** Based on the modified input-output model and the RAS method, this study quantitatively calculates direct and total industrial carbon emissions, carbon emissions across sectors and carbon emissions embodied in import and export of 23 industrial sectors in China, by using input-output table and energy consumption data. The results show that: ① More than 84% energy-related carbon emissions are contributed by industrial sectors. Carbon intensity abatement and total emissions reduction in the key sectors are relatively consistent. ② Induced carbon emissions are much higher than direct carbon emissions in most industrial sectors. It indicates that carbon emissions across industrial sectors are the main part of the total carbon emission of the industrial sectors. Therefore, the different industrial sectors are responsible jointly for carbon emission reduction. ③ The 23 industrial sectors are divided into 5 apparent-type ones, 5 transmission-type ones and 6 whole-process-type ones, all types of sectors with high carbon emissions should take classification management strategy. ④ From the perspective of supply direction, carbon emissions transferring across the industrial sectors are mainly along the energy sector-extractive industry-process manufacturing-discrete manufacturing. By selecting key transferring pathways, we can get some carbon emission reduction sector groups with a priority to promote. ⑤ About 4.09% of domestic industrial carbon emissions are reduced through the embodied carbon transferring in the input and output trade. Optimizing foreign trade structure is good for domestic carbon reduction. ⑥ This study assumed the technical and economic relations among sectors change smoothly, based on the planning data, compared with 2010, average intensity of total industrial carbon emissions will decrease by 40% in 2017, whereas the total industrial carbon emissions may continue to increase. Especially, some sectors, such as manufacture of transport equipment, need to be interposed emphatically.

**Key Words:** industrial sectors; carbon emissions transferring; input-output analysis; biproportional scaling method(RAS); evaluation and prediction

**JEL Classification:** C61 C67 Q54

[责任编辑:王燕梅]