

# 基于非竞争进口型投入产出模型的中国碳排放 增长因素部门分解研究

计军平 胡广晓 马晓明\*

**摘要:**识别中国碳排放增长的关键驱动因素及关键部门对于科学地制定碳减排方案、尽早实现碳排放峰值目标具有重要指导意义。本文扩展了分部门的结构分解分析法,基于非竞争进口型投入产出模型研究了中国生产部门碳排放增长的关键驱动因素及部门。结果表明,最终需求规模是唯一的碳排放增长因素,固定资本形成总额、出口及城镇居民消费是碳排放增长的主要需求类型,而建筑业以及各类设备制造业是需求规模增长的主要部门;碳排放强度是主要的碳排放减缓因素,但与其他时期相比该因素引起的减排量较小,电力业碳排放强度不降反升是其主要原因;投入产出结构在2007年至2012年首次成为主要的减排因素,主要得益于电力业及建筑业投入产出结构的大幅优化。为使中国尽早实现减排目标,建议控制建筑业固定资本形成总额的过快增长,以提高发电效率、优化发电结构为抓手降低各部门碳排放强度,推动各生产部门提高投入产出效率。

**关键词:**环境投入产出分析;结构分解分析;部门分解;二氧化碳排放

## 一、引言

为积极应对气候变化,全球100多个国家和地区于2015年12月通过了《巴黎协议》,并于2016年4月签署了该协议。协议的核心内容是尽快实现全球温室气体排放峰值,在本世纪内将全球平均升温控制在工业化前的2℃以内,并为控温1.5℃而努力。中国是世界上主要的碳排放

---

\*计军平,北京大学深圳研究生院环境与能源学院城市人居环境科学与技术重点实验室,北京大学环境科学与工程学院,邮政编码:518055,电子信箱:jackyji@pku.edu.cn;胡广晓,北京大学深圳研究生院环境与能源学院城市人居环境科学与技术重点实验室,邮政编码:518055,电子信箱:hgx100871@163.com;马晓明(通讯作者),北京大学深圳研究生院环境与能源学院城市人居环境科学与技术重点实验室,北京大学环境科学与工程学院,邮政编码:518055,电子信箱:xmma@pku.edu.cn。

作者感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。

国之一。1992年至2012年,中国碳排放总量增长了2.56倍,占全球排放总量的比重由12.0%增至27.5%(CAIT,2015)。其中,2007年至2012年中国碳排放增量占全球总增量的79.1%。因此,中国的碳减排对于减缓全球碳排放增长、实现将全球升温幅度控制在2℃以内的目标至关重要。中国政府在2014年《中美气候变化联合声明》和2015年《中美元首气候变化联合声明》中明确提出,计划到2030年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰,到2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%。为科学地制定碳减排方案,使中国尽早实现碳排放峰值目标,有必要对中国碳排放增长的关键驱动因素及关键部门开展深入研究。

现有文献中用于分析碳排放增长驱动因素的方法主要有因素分解分析(Index Decomposition Analysis, IDA)和结构分解分析(Structural Decomposition Analysis, SDA)两类(Hoekstra & van den Bergh, 2003)。已有学者分别对IDA类研究(Ang, 1995; Ang, 2004; Ang & Zhang, 2000; Xu & Ang, 2013)和SDA类研究(Miller & Blair, 2009; Rose & Casler, 1996; Su & Ang, 2012)作过总结。IDA是一种分析一定驱动因素对某一指标(如碳排放)直接影响的方法,一般基于IPAT公式或其衍生公式<sup>①</sup>进行分解。使用IDA时仅需各部门常规的统计数据,易于应用。不过,IDA只能分析各驱动因素对研究指标的直接影响,不能反映因生产部门间的联动关系以及最终需求对生产部门的带动作用而引发的间接影响(Hoekstra & van den Bergh, 2003)。SDA是一种基于投入产出模型的因素分解方法。与IDA相比,SDA的一个特点是既可以计算最终需求对研究指标的拉动作用,也可以计算因生产部门相互关联而产生的间接影响,这一特点对政策分析具有十分重要的意义。SDA的另一个特点是可进行二级分解,即能够将投入产出结构因素(即Leontief逆矩阵)进一步分解为若干子因素(Su & Ang, 2012)。例如,将投入产出结构因素分解为国内直接消耗因素和总直接消耗因素(Jacobsen, 2000),或者基于KLEM生产函数<sup>②</sup>进行再分解(Rose & Chen, 1991)。通过二级分解可深入分析投入产出因素影响的来源,进而更好地解释待研究指标变化的成因。

随着中国碳排放问题在国际上的影响日益增加,为深入探讨中国碳排放增长的驱动因素,近年来众多学者采用SDA对中国进行了实证研究,主要文献见表1。

表1 采用SDA研究中国碳排放的主要文献

序号	文献	研究时段	研究指标	投入产出模型及碳排放因子	因素数量	分解方法
1	Peters等(2007)	1992-2002	能源相关碳排放及工业生产过程碳排放	95部门竞争型表,Peters等(2006)提供的中国化因子	4个	平均分解法(未进行部门分解)

①IPAT公式由Ehrlich和Holdren(1971)提出,其一般形式为: $Impact = Population \times Affluence \times Technology$ 。其中,Impact为待研究的环境影响(如碳排放),Population为总人口,Affluence为经济发展水平(一般用人均GDP表示),Technology为技术发展水平(如单位GDP碳排放量)。

②KLEM是对资本、劳动、能源和其他原材料的简称。

续表1 采用SDA研究中国碳排放的主要文献

序号	文献	研究时段	研究指标	投入产出模型及碳排放因子	因素数量	分解方法
2	Guan等(2008)	1981-2002, 2002-2030	能源相关碳排放及工业生产过程碳排放	18部门竞争型表, 2006版指南缺省因子	5个	平均分解法(未进行部门分解)
3	Zhang(2010)	1992-2005	能源相关碳排放	29部门非竞争型表, 1996版指南缺省因子	4个	平均分解法(未进行部门分解)
4	郭朝先(2010)	1992-2007	能源相关碳排放	29部门竞争型表, 2006版指南缺省因子	7个	两极近似分解法(仅将因素分解至四个产业)
5	计军平、马晓明(2011)	1992-2007	温室气体排放	24部门非竞争型表, 中国化参数	4个	平均分解法(仅按最终需求部门分解各因素)
6	Minx等(2011)	1992-2007	能源相关碳排放及工业生产过程碳排放	95部门竞争型表, Peters等(2006)中国化因子	6个	平均分解法(仅按最终需求部门对投资及出口的相关因素进行部门分解)
7	Li和Wei(2015)	2002-2010	能源相关碳排放	17部门竞争型表, 文章未说明采用何种碳排放因子	3个	平均分解法(仅按最终需求部门分解各因素)
8	彭水军等(2015)	1995-2009	能源相关碳排放及工业生产过程碳排放	35部门国际投入产出表, 2006版指南缺省因子	10个	两极近似分解法(未进行部门分解)
9	Chang和Lahr(2016)	2005-2010	能源相关碳排放	24部门竞争型表, 2006版指南缺省因子	3个	两极近似分解法(仅按最终需求部门分解各因素)
10	顾阿伦、吕志强(2016)	1992-2010	能源相关碳排放	33部门竞争型表, 2006版指南缺省因子	5个	两极近似分解法(未进行部门分解)
11	本文	2007-2012	能源相关碳排放及工业生产过程碳排放	35部门非竞争型表, 采用分部门的中国化碳排放因子	4个	平均分解法(扩展了SDA法, 将各因素分解至35部门)

注:除本文外,本表其他文献整理自Web of Science及CNKI的搜索结果,搜索日期为2016年6月10日。“竞争型表”指采用竞争进口型投入产出表计算,“非竞争型表”指采用非竞争进口型投入产出表计算,“能源相关碳排放”指与化石燃料相关的CO<sub>2</sub>排放,“1996版指南”指文献IPCC等(1997),“缺省因子”指在计算时采用IPCC指南缺省碳排放因子,“2006版指南”指文献IPCC(2006)。“平均分解法”及“两极近似分解法”是SDA的两种分解方法,其中后者是前者的近似,相关分析见李景华(2004)。

与这些文献相比,本文在SDA分解方法、投入产出模型及碳排放数据等方面进行了改进。首先,现有研究主要关注驱动因素的总体影响,对各因素在部门层面的分解关注较少。然而,政策制定者关心的问题往往是需要针对哪些主要行业的哪些方面采取减排措施。虽然部分学

者按最终需求部门对各因素进行了部门分解(Chang & Lahr, 2016; Li & Wei, 2015; Minx et al., 2011; 计军平、马晓明, 2011),但是这种方法无法反映各生产部门的碳排放强度因素及投入产出结构因素对碳排放变化的影响,应当从生产部门角度对这两个因素进行分解。为此,本文扩展了SDA法,对各因素尤其是投入产出结构因素(Leontief逆矩阵)做了部门分解。其次,大部分研究采用竞争进口型投入产出表进行计算,即假设进口产品的单位产值碳排放与国内产品的相同,导致碳排放计算结果偏大(Su & Ang, 2013)。这主要有两个原因:一是通常情况下中国主要贸易伙伴拥有的生产技术较为先进,单位产值碳排放比中国低,采用上述假设高估了中国生产产品可能引起的碳排放;二是进口产品生产于国外,按照目前国际上普遍采用的碳排放责任认定方法,其生产过程产生的碳排放属于出口国,不应计入中国。因此,本文借鉴Weber等(2008)的方法建立了非竞争进口型模型,将进口产品从现有投入产出表的中间使用和最终使用中分离,以便更好地研究中国国内产生的碳排放与各类经济活动的关系。最后,多数研究均采用IPCC国家温室气体清单指南(IPCC et al., 1997; IPCC, 2006)缺省碳排放因子,而这会显著高估中国的碳排放(Liu et al., 2015)。虽然部分学者(Minx et al., 2011; Peters et al., 2007)采用了Peters等(2006)估算的中国化碳排放因子,但是随着相关研究的开展,目前已有更符合中国实际的排放因子。为更加准确地估算中国碳排放,本文主要采用中国最新公布的分部门化石燃料碳排放系数(国家发展改革委应对气候变化司, 2014)以及修订后的2010年至2012年能源消费数据(国家统计局能源统计司, 2015)。除了上述三方面改进外,本文还结合最新发布的中国2012年投入产出表,重点分析中国2007年至2012年碳排放增长的影响因素。受投入产出调查表可获取性的限制,目前大部分文献仅分析了中国1992年至2007年间的碳排放驱动因素<sup>①</sup>。2007年至2012年,中国实施了大量节能减碳措施,碳排放增速比2002年至2007年下降了一半(CAIT, 2015),识别其中的原因对中国制定未来的碳减排方案具有重要意义。

本文其余部分的内容如下:第二部分说明研究中使用的投入产出模型、SDA计算方法以及碳排放数据;第三部分从各个影响因素的部门层面分析2007年至2012年中国碳排放变化的原因;第四部分总结全文主要结论及减排政策建议。

## 二、方法与数据

### (一)环境投入产出模型

环境投入产出模型(Environmentally Extended Input-Output, EEIO)的基本思路是在经济投入产出模型中引入各经济部门的直接排污系数,从而反映最终需求以及投入产出结构对某地

---

<sup>①</sup>部分文献采用投入产出延长表将研究扩展至2010年。不过,由于投入产出延长表是采用非调查法在投入产出调查表的基础上更新而来,因此部分分类较粗、误差较大。

区污染物排放量的影响(Leontief, 1970)。本文采用的EEIO模型见公式(1):

$$c = Fx = F(I - A)^{-1}y \quad (1)$$

$$F_i = \frac{b_i}{x_i} \quad (2)$$

(1)式中,  $c$  为经济部门产生的碳排放总量,  $F$  为碳排放强度向量( $1 \times n$ ), 其元素通过公式(2)计算。 $n$  表示该地区的经济部门数量,  $x$  为总产出向量( $n \times 1$ ),  $I$  为单位矩阵( $n \times n$ ),  $A$  为直接消耗系数矩阵( $n \times n$ ),  $(I - A)^{-1}$  为投入产出结构矩阵(Leontief逆矩阵), 其元素表示增加某部门单位最终需求时对其他部门产品的完全消耗量,  $y$  为最终需求向量( $n \times 1$ )。公式(2)中,  $b_i$  为部门  $i$  的直接碳排放量,  $x_i$  为部门  $i$  的总产出,  $F_i$  为部门  $i$  的碳排放强度。

## (二)结构分解分析

### 1. 碳排放总量的结构分解

结构分解分析由 Leontief 和 Ford(1972)提出,是一种基于投入产出模型的用于分析一定驱动因素对某一指标直接和间接影响的方法。SDA 的加法和乘法形式都可被用来进行结构分解,加法分解通常用于分析一个指标的绝对量变动,乘法分解通常用于分析一个指标的相对量变动(如强度指标)(Su & Ang, 2015)。由于本文是对中国碳排放量的变动进行分解,是一种绝对量变动形式,因此本文采用 SDA 的加法形式。将公式(1)中的  $y$  用最终需求结构向量  $y_s$  和最终需求规模标量  $y_v$  的乘积表示,  $y_s$  中的各元素表示相应部门的最终需求在最终需求总量中所占的比重,  $(I - A)^{-1}$  以  $L$  表示,则某一时间段内碳排放的变化量  $\Delta c$  可表示为公式(3)(Minx et al., 2011; Peters et al., 2007):

$$\Delta c = \Delta F L y_s y_v + F \Delta L y_s y_v + F L \Delta y_s y_v + F L y_s \Delta y_v \quad (3)$$

(3)式中,等式右边第一项表示当其他因素不变时碳排放强度  $F$  改变引起的碳排放量变化,第二项为投入产出结构  $L$  改变引起的排放量变化,第三项为最终需求结构  $y_s$  改变引起的排放量变化,第四项为最终需求规模  $y_v$  改变引起的排放量变化。若某一项的结果为负,则说明该影响因素促使碳排放总量下降;若某一项的结果为正,则说明该影响因素促使碳排放总量上升。

结构分解分析的分解形式并不唯一。若分解模型存在  $n$  个独立变量,则存在  $n!$  种一阶分解形式(Dietzenbacher & Los, 1998)。本文采用加权平均法对所有的分解形式取均值(Li, 2005)。

### 2. 各影响因素的部门分解

为识别各影响因素中的主要部门,本文对公式(3)等式右边各项做进一步分解。对投入产出结构  $L$  的二级分解是本文与现有相关文献的主要不同点之一。碳排放强度、最终需求结构及最终需求规模变化的部门分解方法是将相关向量对角化为矩阵,见公式(4)、公式(5)及公式(6)。

$$\Delta c_F = \widehat{\Delta F} L y_s y_v \quad (4)$$

$$\Delta c_{y_s} = FL\widehat{\Delta y_s}y_v \quad (5)$$

$$\Delta c_{y_v} = FLy_s\widehat{\Delta y_v} \quad (6)$$

(4)-(6)式中,  $\Delta c_F$  为碳排放强度改变引起的碳排放量变化,  $\Delta c_{y_s}$  为最终需求结构改变引起的碳排放量变化,  $\Delta c_{y_v}$  为最终需求规模改变引起的碳排放量变化,  $\widehat{\Delta F}$  为碳排放强度变化量  $\Delta F$  的对角矩阵,  $\widehat{\Delta y_s}$  为最终需求结构变化量  $\Delta y_s$  的对角矩阵,  $y_s\widehat{\Delta y_v}$  为最终需求规模变化量  $\Delta y_v$  与最终需求结构  $y_s$  乘积的对角矩阵。

由于  $L$  的变化实质上是由直接消耗系数矩阵  $A$  的变化引起的,因此  $\Delta L$  的分解可以转变为  $\Delta A$  的分解(Miller & Blair,2009),见公式(7)。令  $n \times n$  矩阵  $\Delta A_{(j)}$  为公式(8),则  $\Delta A$  可表示为公式(9)。因此,各部门直接消耗系数变化对碳排放总量变化的影响可通过公式(10)计算。

$$\Delta L = L_1\Delta A L_0 = L_0\Delta A L_1 \quad (7)$$

$$\Delta A_{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \Delta a_{1,j} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \Delta a_{n,j} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \Delta a_{1,1} & \cdots & \Delta a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta a_{n,1} & \cdots & \Delta a_{n,n} \end{bmatrix} = \Delta A_{(1)} + \cdots + \Delta A_{(j)} + \cdots + \Delta A_{(n)} = \sum_{j=1}^n \Delta A_{(j)} \quad (9)$$

$$\Delta c_L = F\Delta L y_s y_v = FL_1 \left( \sum_{j=1}^n \Delta A_{(j)} \right) L_0 y_s y_v = \sum_{j=1}^n FL_1 \Delta A_{(j)} L_0 y_s y_v \quad (10)$$

(7)-(10)式中,下标0表示研究时段的起始年份,下标1表示研究时段的终了年份,  $\Delta A_{(j)}$  表示部门  $j$  的直接消耗系数变化矩阵,  $\Delta c_L$  表示投入产出结构引起的碳排放量变化。

### (三)数据说明

#### 1. 非竞争进口型可比价投入产出表

投入产出表的处理包括三个方面。一是编制可比价投入产出表。根据刘起运和彭志龙(2010)的价格指数缩减法,在《中国投入产出表2007》(135产品部门)和《中国投入产出表2012》(139产品部门)的基础上编制2007年及2012年可比价投入产出表,价格基年为2000年。各部门的价格指数来自历年《中国统计年鉴》及《工业统计年报》。

二是将竞争型投入产出表调整为非竞争进口型投入产出表。国家统计局编制的投入产出调查表均为竞争进口型表,即中间使用和最终使用产品同时包括国内产品和进口产品。现有文献通常假设进口产品的碳排放强度与中国国内产品的相同,导致最终需求引起的碳排放计算结果偏大(Su & Ang,2013)。为避免上述问题,本文参考Weber等(2008)的方法构建非竞争进口型投入产出表。假设各部门中间需求和最终需求(不含出口)中进口产品的比例与相应部门的平均进口比例相同,按比例将进口从各部门的需求中减去,计算方法见公式(11)-(13)。

$$s_i = \frac{m_i}{x_i + m_i - e_i} \quad (11)$$

$$A_d = (I - \hat{s})A' \quad (12)$$

$$y_d = (I - \hat{s})y' \quad (13)$$

式(11)-(13)中,  $s_i$  为部门  $i$  的平均进口比例,  $s$  为各部门平均进口比例向量 ( $n \times 1$ ),  $\hat{s}$  为  $s$  的对角矩阵 ( $n \times n$ ),  $m_i$  为部门  $i$  的进口量,  $e$  为部门  $i$  的出口量,  $A_d$  为非竞争进口型表的国内直接消耗系数矩阵 ( $n \times n$ ),  $A'$  为竞争进口型表的直接消耗系数矩阵 ( $n \times n$ ),  $y_d$  为非竞争进口型表的国内最终需求(不含出口),  $y'$  为竞争进口型表的最终需求(不含出口)。

三是合并部门。为使投入产出表和碳排放数据的部门分类相对应,依据《国民经济行业分类与代码》(GB/T 4754-2011)合并了部分部门,调整后共有 35 个部门,见表 2。为便于表述,下文图表中使用表 2 中的序号代表相应的部门。

表 2 部门分类

序号	部门	序号	部门
1	农林牧渔业	19	电气、机械及器材制造业
2	煤炭开采和洗选业	20	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
3	石油和天然气开采业	21	仪器仪表及文化办公用机械制造业
4	金属矿采选业	22	其他制造业
5	非金属矿采选业	23	废品废料
6	开采辅助服务和其他采矿产品	24	金属制品、机械和设备修理服务
7	食品制造及烟草加工业	25	电力、热力的生产和供应业
8	纺织业	26	燃气生产和供应业
9	服装皮革羽绒及其制品业	27	水的生产和供应业
10	木材加工及家具制造业	28	建筑业
11	造纸印刷及文教用品制造业	29	交通运输及仓储业
12	石油加工、炼焦及核燃料加工业	30	邮政业
13	化学工业	31	批发和零售业
14	非金属矿物制品业	32	住宿和餐饮业
15	金属冶炼及压延加工业	33	金融保险业
16	金属制品业	34	房地产业
17	通用、专用设备制造业	35	其他服务业
18	交通运输设备制造业		

## 2. 二氧化碳排放数据

本文参考 Peters 等(2006)的方法计算碳排放,包括能源相关排放和工业生产过程排放。前者为各部门化石燃料燃烧排放的二氧化碳,后者包括水泥、黑色金属、有色金属、合成氨、氯化钙及碳酸钠等生产过程中排放的二氧化碳。

碳排放估算要用到两类数据。一类是活动水平数据,即化石燃料的消耗量和工业产品的产量。数据取自各类统计年鉴,主要包括《中国能源统计年鉴》以及《中国工业经济统计年鉴》。其中,《中国能源统计年鉴2014》对2000年至2012年的能源消费数据做了修订,本文采用最新修订的数据。另一类是碳排放因子数据,即单位化石燃料燃烧的碳排放量和单位工业产品产量的碳排放量。与已有文献主要采用IPCC缺省值不同,本文采用最新的中国化分部门排放因子进行计算,结果较贴近中国的实际情况。排放因子主要取自国家发展改革委应对气候变化司(2014)、国家发展改革委应对气候变化司(2011)、Lei等(2011)以及Chen和Zhang(2010)。

### 三、结果与讨论

#### (一)各因素总体影响

2007年至2012年,中国生产部门碳排放增长了40.05%(2742.1MtCO<sub>2</sub>),几乎完全由最终需求规模驱动(见图1)。

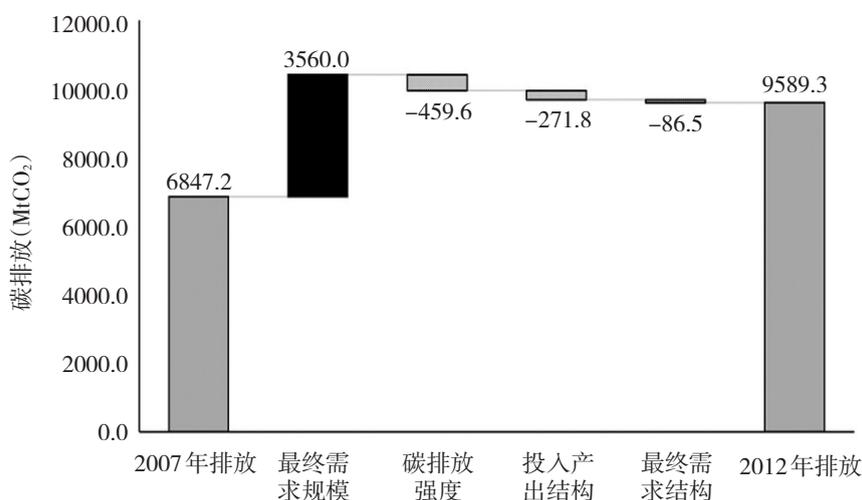


图1 2007年至2012年各驱动因素引起的中国生产部门碳排放变化量

最终需求规模是唯一的碳排放增长因素,引起的排放增量占总增量的比重达到129.82%(3560.0MtCO<sub>2</sub>)。碳排放强度、投入产出结构及最终需求结构均为碳排放减缓因素,但引起的减排量较小,分别仅占总增量的-16.76%(-459.6MtCO<sub>2</sub>)、-9.91%(-271.8MtCO<sub>2</sub>)及-3.15%(-86.5MtCO<sub>2</sub>)。

与其他时期相比,2007年至2012年中国碳排放增长的驱动因素发生了重大变化,即该时期最终需求规模对碳排放的增长作用进一步增强,其他因素对碳排放变化的影响大幅弱化。1992年至2002年,中国的碳排放增长是“一场消费增长与效率提升之间的竞赛”(Peters et al.,2007),其特征是碳排放强度因素带来的碳减排量大幅抵消了最终需求规模引起的碳排放增长量。

2002年至2007年,投入产出结构成为导致中国碳排放快速增长的另一个重要因素(Minx et al., 2011)。该因素引起的碳排放增量约为最终需求规模因素引起的碳排放增量的三分之二,与碳排放强度因素的减排量相当。2007年至2012年,中国的碳排放增长几乎完全由最终需求规模驱动,碳排放强度虽然仍是主要的减缓因素,但是其减排量大幅下降,仅占总增量的-16.76%。这表明,随着中国节能减排工作的持续开展,碳排放强度整体已处于较低水平,减排潜力已得到较大程度的发挥,进一步挖掘潜力的难度将逐步增大。此外,投入产出结构由2002年至2007年的主要增长因素转变为2007年至2012年的主要减缓因素,说明优化投入产出结构可能是中国未来碳减排的另一个重要途径。

### (二)最终需求规模的影响

固定资本形成总额、出口及城镇居民消费规模的大幅增长是2007年至2012年中国碳排放增长的主要原因,三者共占最终需求规模因素总增量的87.68%(3121.5MtCO<sub>2</sub>),见图2。

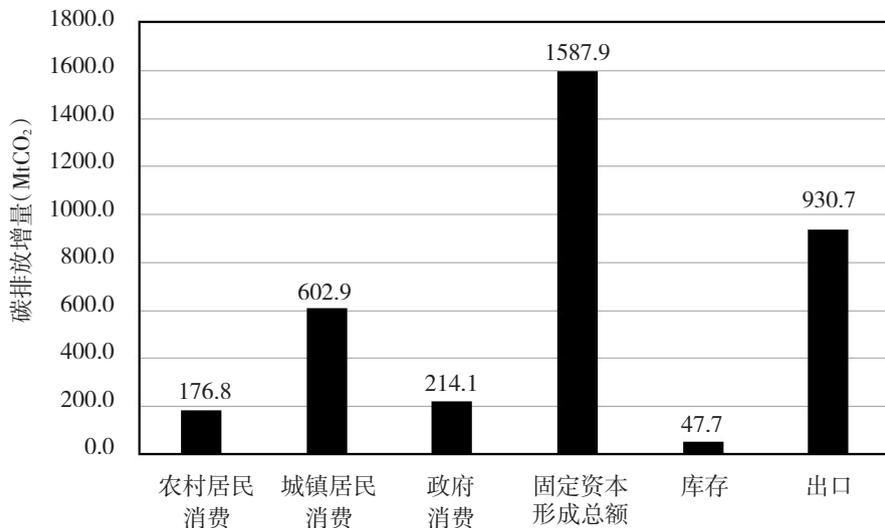


图2 2007年至2012年分需求类型的最终需求规模变化引起的碳排放差值

固定资本形成总额中,建筑业(部门28)占比达到70.56%(1120.5MtCO<sub>2</sub>),是单一最大的增长来源(见表3)。

其主要原因是,2007年至2012年中国大力推进城市化建设,加之2008年出台了四万亿经济刺激政策,建筑业的需求大幅增长。由于建筑业使用大量碳密集型产品,如电力、钢铁及水泥等,因此间接地拉动了碳排放的快速增长。

出口是拉动碳排放增长的第二大需求,占最终需求规模因素总增量的26.14%。出口产品的部门主要集中在制造业,包括通信电子产品(部门20)、金属冶炼品(部门15)、化工产品(部门13)以及各类机械设备(部门19、部门17和部门18)等,如表3所示。总体上,出口产品的隐含碳排放量较高,这与我国虽然已成为“世界工厂”,但仍处于相对低端的下游产业链有关。

城镇居民消费是拉动碳排放增长的第三大需求因素,占最终需求规模因素总增量的16.94%。城镇居民消费的增长主要集中在电力(部门25)、副食品(部门7)、服务(部门35)、交通出行(部门18和部门29)以及医药和日用化学品(部门13)等与生活密切相关的部门(见表3)。城镇人口的快速增长及城镇居民生活水平的提高是城镇居民消费碳排放增长的两大主要原因。2007年至2012年,中国城镇人口比重从45.89%增长到52.57%,城镇人口净增长1.05亿人,城镇居民人均可支配收入从1.38万元增至2.46万元(当年价)(国家统计局,2015)。随着我国新型城镇化的深入推进,城镇人口数量及城镇居民消费水平将继续快速增长,城镇居民消费碳排放仍将持续增长。

表3 2007年至2012年主要部门最终需求规模变化引起的碳排放增量 (单位: MtCO<sub>2</sub>)

序号	最终需求部门	农村居民消费	城镇居民消费	政府消费	固定资本形成总额	存货增加	出口	合计
28	建筑业	0.0	8.4	0.0	1120.5	0.0	7.2	1136.1
35	其他服务业	19.5	85.0	195.3	17.2	0.0	22.6	339.5
17	通用、专用设备制造业	0.2	1.0	0.0	186.9	1.4	73.5	262.9
18	交通运输设备制造业	5.0	26.6	0.0	122.9	3.6	36.1	194.2
19	电气、机械及器材制造业	5.5	18.0	0.0	56.6	2.9	88.5	171.4
25	电力、热力的生产和供应业	35.2	124.7	0.0	0.0	0.0	4.4	164.3
20	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	1.6	5.8	0.0	13.7	1.2	125.8	148.1
13	化学工业	8.0	29.4	0.0	0.0	4.1	97.5	139.1
7	食品制造及烟草加工业	31.8	85.7	0.0	0.0	6.1	11.4	135.1
15	金属冶炼及压延加工业	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	99.6	108.6
29	交通运输及仓储业	7.2	26.9	16.1	7.8	1.1	44.2	103.4
合计		114.1	411.6	211.4	1525.5	29.5	610.7	2902.8
占各类需求排放增量的比重		64.56%	68.28%	98.74%	96.07%	61.76%	65.62%	81.54%

### (三)碳排放强度的影响

虽然2007年至2012年碳排放强度仍是减缓碳排放增长的主要因素,但与其他时期相比其减排量大幅减少。绝大多数部门的碳排放强度在这一时期持续下降,减少了碳排放,而电力、热力的生产和供应业(部门25,以下简称电力业)碳排放强度不降反升是造成上述现象的主要原因。2007年至2012年,电力业碳排放强度由11.76tCO<sub>2</sub>/万元增至13.27tCO<sub>2</sub>/万元(2000年可比价),引起的碳排放增量为425.5MtCO<sub>2</sub>,占碳排放强度因素总减排量的-92.59%

(见图3)。

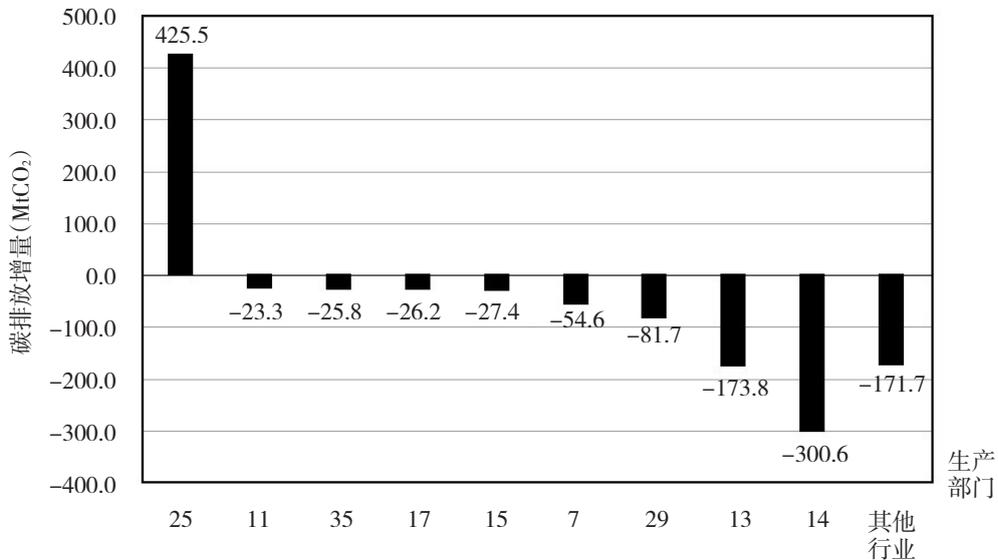


图3 2007年至2012年主要部门碳排放强度变化引起的碳排放差值

这是因为中国“富煤、缺油、乏气”的资源禀赋条件决定了以煤为主的发电结构。同时,随着节能减排工作的开展,中国煤电机组供电煤耗和电网线损率已接近国际先进水平,节能减排空间逐步缩小,降低碳排放强度的难度增大。2007年,中国平均电力碳排放因子为0.8646tCO<sub>2</sub>/MWh,2012年降至0.8341tCO<sub>2</sub>/MWh,但是电力业单位产值发电量由1.36MWh/万元增至1.591MWh/万元(2000年可比价),因此电力业碳排放强度不降反升。未来,电力业碳减排除了继续提高燃煤发电效率外,应着重从优化发电结构入手,提高燃气发电、核电、太阳能发电及风力发电等低碳电力的比重。

#### (四)投入产出结构的影响

投入产出结构因素代表的是广义技术进步,包括科学技术进步、管理集约化、产业结构变动等,其值为正表示技术进步使得碳排放量越来越多,即经济发展呈现“粗放式”;其值为负表示技术进步使得碳排放量降低,即经济发展呈现“集约式”或“低碳式”。1992年至2007年投入产出结构是碳排放增长因素(Minx et al.,2011;计军平、马晓明,2011),而2007年至2012年为主要减缓因素。这表明,2007年至2012年中国生产部门开始从“粗放式”向“集约式”发展转变,经济的发展更加注重效率和资源节约。这与我国“十一五”规划中提到的加快转变经济增长方式,加快建设资源节约型、环境友好型社会,促进经济发展与人口、资源、环境相协调的目标相一致。

电力业(部门25)及建筑业(部门28)投入产出结构的大幅优化是2007年至2012年投入产出结构成为主要减缓因素的重要原因(见图4)。

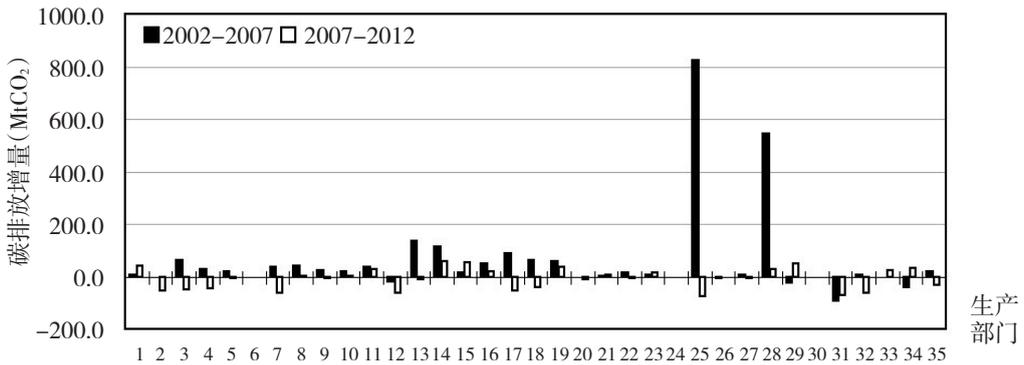


图4 各部门投入产出结构变化引起的碳排放变化量

与2002年至2007年相比,电力业和建筑业的排放增量分别由824.9MtCO<sub>2</sub>、542.9MtCO<sub>2</sub>下降为2007至2012年的-75.3MtCO<sub>2</sub>、29.8MtCO<sub>2</sub>,合计减少了1413.3MtCO<sub>2</sub>,减排量相当于巴西、英国和墨西哥2012年碳排放的总和(CAIT,2015)。可见,随着我国经济发展方式持续向绿色、循环、低碳转型,投入产出结构作为我国碳排放主要减缓因素的地位将得到进一步巩固。

(五)最终需求结构的影响

固定资本形成总额及出口是导致最终需求结构因素碳排放变化的两类主要需求,如图5所示。

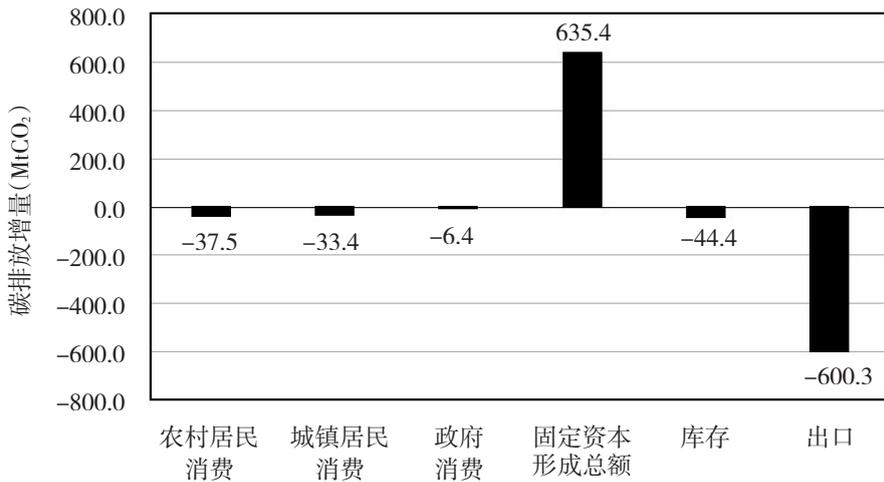


图5 2007年至2012年各类最终需求结构变化引起的碳排放量变化

2007年至2012年,固定资本形成总额中高碳行业的比重大幅增加,由此增长的碳排放达到635.4MtCO<sub>2</sub>。其中,建筑业(部门28)、交通运输设备制造业(部门18)及通用、专用设备制造业(部门17)的增幅最为明显,三者共占固定资本形成总增量的88.68%(见图6)。另一方面,出口中的高碳行业比重有所下降,由此减排了600.3MtCO<sub>2</sub>。其中,金属冶炼及制品(部门15、部门16)、通讯电子设备(部门20)、办公文化设备(部门21)、纺织品(部门8)及化工产品(部门13)的降幅较大,共占出口总减排量的83.81%(见图6)。

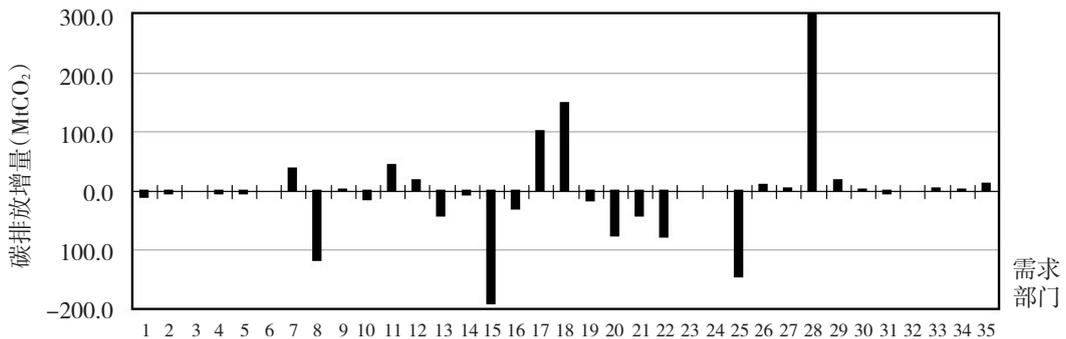


图6 2007年至2012年最终需求结构变化引起的碳排放变化量

#### 四、结论与建议

2007年至2012年中国生产部门碳排放总量增长了2742.1MtCO<sub>2</sub>。最终需求规模是唯一的碳排放增长因素,引起的排放增量为3560.0MtCO<sub>2</sub>,碳排放强度、投入产出结构及最终需求结构均为碳排放减缓因素,但引起的减排量较小,合计仅为-817.9MtCO<sub>2</sub>。

固定资本形成总额、出口及城镇居民消费是引起最终需求规模碳排放大幅增长的主要需求类型,三者共占该因素增量的87.68%(3121.5MtCO<sub>2</sub>)。固定资本形成总额引起的碳排放增量主要集中在建筑业,出口主要集中在通信电子产品、金属冶炼品、化工产品以及各类机械设备部门,城镇居民消费主要集中在电力、副食品、服务、交通出行以及医药和日用化学品等部门。

碳排放强度仍是2007年至2012年的主要减缓因素,但减排量仅为-459.6MtCO<sub>2</sub>,与其他时期相比其减排量大幅减少。电力业碳排放强度不降反升是造成这一结果的主要原因。电力业碳排放强度上升引起的碳排放增量为425.5MtCO<sub>2</sub>,占碳排放强度因素总减排量的-92.59%。其余绝大多数部门的碳排放强度持续下降,减排量达到-885.1MtCO<sub>2</sub>。

投入产出结构是仅次于碳排放强度的减缓因素,减排量为-271.8MtCO<sub>2</sub>。电力业及建筑业投入产出结构的大幅优化是2007年至2012年投入产出结构成为主要减缓因素的重要原因。与2002年至2007年相比,电力业和建筑业的排放增量合计减少了1413.3MtCO<sub>2</sub>。

最终需求结构的减排量较小,仅为-86.5MtCO<sub>2</sub>。固定资本形成总额及出口是导致最终需求结构因素碳排放变化的两类主要需求,引起的排放增量分别为635.4MtCO<sub>2</sub>及-600.3MtCO<sub>2</sub>。建筑业、交通运输设备制造业及通用、专用设备制造业是主要的碳排放增长行业,金属冶炼及制品、通讯电子设备、办公文化设备、纺织业及化学工业是主要的减排行业。

随着中国新型城镇化的深入推进,未来最终需求规模引起的碳排放仍将较快增长。在此背景下,控制建筑业固定资本形成总额的过快增长,减少盲目投资(如减少建筑“空城”的数量)是我国未来碳减排的重要方向。此外,提高发电效率,优化发电结构,尤其是增加核电、太阳能发电及风力发电等低碳电力的比重将显著地减缓碳排放增长。以此为抓手,推动各生产部门

降低碳排放强度。在此基础上,进一步提高各生产部门的投入产出效率,优化最终需求结构,促使经济发展方式向绿色、循环、低碳方向转变,使中国尽早实现碳排放峰值目标。

## 参考文献:

- [1] 顾阿伦,吕志强. 经济结构变动对中国碳排放影响——基于IO-SDA方法的分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(3): 37-45.
- [2] 郭朝先. 中国二氧化碳排放增长因素分析——基于SDA分解技术[J]. 中国工业经济, 2010, (12): 47-56.
- [3] 国家发展改革委应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 2011.
- [4] 国家发展改革委应对气候变化司. 2005中国温室气体清单研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2014.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴2015[M]. 北京:中国统计出版社, 2015.
- [6] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2014[M]. 北京:中国统计出版社, 2015.
- [7] 计军平,马晓明. 中国温室气体排放增长的结构分解分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2076-2082.
- [8] 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[J]. 系统工程, 2004, 22(9): 69-73.
- [9] 刘起运,彭志龙. 中国1992-2005年可比价投入产出序列列表及分析[M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [10] 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[J]. 经济研究, 2015, (1): 168-182.
- [11] Ang, B.W. Decomposition Methodology in Industrial Energy Demand Analysis[J]. Energy, 1995, 20(11): 1081-1095.
- [12] Ang, B.W. Decomposition Analysis for Policy Making in Energy: Which Is the Preferred Method?[J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [13] Ang, B.W. and F.Q. Zhang. A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies [J]. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176.
- [14] CAIT. Climate Data Explorer[EB/OL]. (2015-12-01)[2016-6-20]. <http://cait.wri.org>.
- [15] Chang, N. and M.L. Lahr. Changes in China's Production-source CO<sub>2</sub> Emissions: Insights from Structural Decomposition Analysis and Linkage Analysis[J]. Economic Systems Research, 2016, 28(2): 224-242.
- [16] Chen, G.Q. and B. Zhang. Greenhouse Gas Emissions in China 2007: Inventory and Input-output Analysis[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 6180-6193.
- [17] Dietzenbacher, E. and B. Los. Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity[J]. Economic Systems Research, 1998, 10(4): 307-324.
- [18] Ehrlich, P.R. and J.P. Holdren. Impact of Population Growth[J]. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [19] Guan, D.B., K. Hubacek, C.L. Weber, G.P. Peters, and D. Reiner. The Drivers of Chinese CO<sub>2</sub> Emissions from 1980 to 2030[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 626-634.
- [20] Hoekstra, R. and J.C.J.M. van den Bergh. Comparing Structural Decomposition Analysis and Index[J]. Energy Economics, 2003, 25(1): 39-64.
- [21] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [22] IPCC, OECD, and IEA. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. 1997.
- [23] Jacobsen, H.K. Energy Demand, Structural Change and Trade: A Decomposition Analysis of the Danish Manufacturing Industry[J]. Economic Systems Research, 2000, 12(3): 319-343.
- [24] Lei, Y., Q. Zhang, C.P. Nielsen, and K. He. An Inventory of Primary Air Pollutants and CO<sub>2</sub> Emissions from Ce-

ment Production in China 1990–2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(1): 147–154.

[25] Leontief, W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input–output Approach[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(3): 262–271.

[26] Leontief, W. and D. Ford. Air Pollution and the Economic Structure: Empirical Results of Input–output Computations[M]//Brody, A., A. P. Carter. *Input–output Techniques*. Amsterdam–London: North–Holland Publishing Company, 1972: 9–30.

[27] Li, H. N. and M. Wei. Is It Possible for China to Reduce Its Total CO<sub>2</sub> Emissions?[J]. *Energy*, 2015, 83(02): 438–446.

[28] Li, J. A Decomposition Method of Structural Decomposition Analysis[J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2005, 18(2): 210–218.

[29] Liu, Z., D. B. Guan, W. Wei, S. J. Davis, P. Ciaia, J. Bai, S. S. Peng, and Q. Zhang. Reduced Carbon Emission Estimates from Fossil Fuel Combustion and Cement Production in China[J]. *Nature*, 2015, 524(7565): 335–338.

[30] Miller, R. E. and P. D. Blair. *Input–output Analysis: Foundations and Extensions*, Second Edition[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.

[31] Minx, J. C., G. Baiocchi, G. P. Peters, C. L. Weber, D. B. Guan, and K. Hubacek. A "Carbonizing Dragon": China's Fast Growing CO<sub>2</sub> Emissions Revisited[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9144–9153.

[32] Peters, G. P., C. L. Weber, and J. Liu. Construction of Chinese Energy and Emissions Inventory[R]. 2006.

[33] Peters, G. P., C. L. Weber, D. B. 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.

[34] Rose, A. and C. Y. Chen. Sources of Change in Energy Use in the U.S. Economy 1972–1982: A Structural Decomposition Analysis[J]. *Resources and Energy*, 1991, 13(1): 1–21.

[35] Rose, A. and S. Casler. Input–output Structural Decomposition Analysis: A Critical Appraisal[J]. *Economic Systems Research*, 1996, 8(1): 33–62.

[36] Su, B. and B. W. Ang. Structural Decomposition Analysis Applied to Energy and Emissions: Some Methodological Developments[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 177–188.

[37] Su, B. and B. W. Ang. Input–output Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions Embodied in Trade: Competitive Versus Non–competitive Imports[J]. *Energy Policy*, 2013, 56(01): 83–87.

[38] Su, B. and B. W. Ang. Multiplicative Decomposition of Aggregate Carbon Intensity Change Using Input–output Analysis[J]. *Applied Energy*, 2015, 154(04): 13–20.

[39] Weber, C. L., G. P. Peters, D. B. Guan, and K. Hubacek. The Contribution of Chinese Exports to Climate Change[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3572–3577.

[40] Xu, X. Y. and B. W. Ang. Index Decomposition Analysis Applied to CO<sub>2</sub> Emission Studies[J]. *Ecological Economics*, 2013, 93(06): 313–329.

[41] Zhang, Y. Supply–side Structural Effect on Carbon Emissions in China[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 186–193.

# Sectoral Decomposition of China's CO<sub>2</sub> Emission Growth Drivers: An Analysis Based on Input–output Model of Non–competitive Imports

Ji Junping<sup>a,b</sup>, Hu Guangxiao<sup>a</sup> and Ma Xiaoming<sup>a,b</sup>

(a: Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy,

Peking University Shenzhen Graduate School;

b: College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University)

**Abstract:** Identifying the main drivers and sectors of China's CO<sub>2</sub> emission growth is of great significance to develop mitigation plans and to achieve China's emissions peak target. In this paper, we investigate the primary drivers and sectors for China's production–emission growth based on an input–output model of non–competitive imports and a sector–based method of structural decomposition analysis. The results show that final demand level, dominated by gross fixed capital formation, exports, and urban household consumption, is the only emission–growth driver. Construction and manufacturing sectors contribute the most of the demand–driven emissions. CO<sub>2</sub> emission intensity remains the top mitigation driver. However, its emission reduction is much lower than reductions in other phases, because of the increase in the emission intensity of power sector. Input–output structure emerges as the second major driver for emission reduction from 2007 to 2012. The main reason is the optimization of the supply chain of construction and electricity production in this period. To help China achieve mitigation goals, we suggest that China should curb over–construction of gross fixed capital formation, decrease the emission intensities of production sectors by improving the efficiency, and optimizing the structure of power generation and increase productivity.

**Keywords:** Environmentally Extended Input–output Analysis; Structural Decomposition Analysis; Sectoral Decomposition; CO<sub>2</sub> Emissions

**JEL Classification:** Q54, Q56

(责任编辑:朱静静)