

引用格式:孙艳芝,沈镭,钟帅,等. 中国碳排放变化的驱动力效应分析[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2265–2274. [Sun Y Z, Shen L, Zhong S, et al. Driving force analysis of carbon emission changes in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2265–2274.]
DOI: 10.18402/resci.2017.12.06

中国碳排放变化的驱动力效应分析

孙艳芝^{1,2}, 沈 镭^{1,2}, 钟 帅^{1,2}, 刘立涛^{1,2}, 武 娜^{1,2}, 李林朋³, 孔含笑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, 北京 100049;
3. 庆元县住房和城乡建设局, 庆元 323800; 4. 青岛国家高新技术产业开发区管理委员会, 青岛 266114)

摘 要:碳减排作为经济转型发展中的重要环节, 必须厘清导致碳排放变化的关键因素及其驱动效应和机理。本文基于投入产出(IOA)与结构分解(SDA)等分析方法, 探讨了1997—2012年间中国全行业碳排放变化的驱动力效应。研究表明:①中国行业碳排放总量不断增加, 从53.60亿t增加至158.20亿t, 碳排放强度从2.00 t CO₂/万元降至0.86 t CO₂/万元;②影响碳排放变化的因素主要包括五个方面, 技术进步有利于碳减排, 规模效应(经济规模和人口规模)持续推动碳排放的增加, 产业联系和经济结构对碳排放的影响导致其波动变化;③产业政策可分为宏观控制政策和产业自调整政策, 这些政策环境的变化越来越有利于碳减排。2002年之前, 中国宏观控制政策鼓励发展第二、三产业, 使得经济与人口规模不断扩张, 增加了碳排放;2002—2012年间, 中国产业自调整政策对碳减排的影响越来越大, 由于产业市场竞争不断加强, 促进能源大范围流动与产业重组, 大大提高了能源利用效率, 使得产业联系与经济结构在中国碳减排中起到了重要作用, 技术进步不再是唯一减少碳排放的因素, 碳减排方式趋于多元化。

关键词:行业碳排放; 碳减排; 投入产出; 结构分解; 驱动力; 产业政策; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.06

1 引言

IPCC第五次评估报告重点分析了人类活动和全球变暖之间的因果关系, 再次强调了减缓气候变化、减少温室气体排放的紧迫性^[1]。大气温室效应约60%来自CO₂^[2], 而人类经济生产活动带来的碳排放又是大气碳排放主要的贡献者^[3]。2006年, 中国碳排放已超过美国居世界首位, 占世界碳排放总量的20%, 到2013年增加至世界比重的29%。与此同时, 中国产业政策环境也在不断变化。1998年, 中共中央出台政策, 推进农业技术改革与结构优化; 2006—2010年, 中国“十一五”规划鼓励发展服务业; “十二五”期间强调以服务业结构升级为重点, 加快发展生产性服务业。除了五年规划这样的宏观政策外, 相关部门也不间断地制定一些贸易协

议、行业发展规划、价格体制改革等相对微观的政策。在1997—2012年间, 中国实施了一系列政策、规划来加速社会经济建设步伐。中国产业政策与能源碳排放密不可分, 很多政策的实施推动了经济增长、催生新的生产部门, 无疑会给中国的能源消费碳排放造成影响。摸清政策环境对碳排放变化的影响作用, 可为未来碳减排政策的制定提供参考价值。

面对严峻的碳减排问题, 较多学者致力于碳排放变化的影响因素研究, 孙建卫等人利用因素分解方法对中国碳排放量和碳排放强度变化的因素进行了时间序列分析^[4], 宋德勇等将中国CO₂排放相关影响因素分解为产出规模、能源结构、排放强度和能源强度四个方面, 揭示出有效控制和减少碳排

收稿日期: 2017-09-07; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFA0602802); 国家自然科学基金项目(41771566; 41501604; 41401644)。

作者简介: 孙艳芝, 女, 江苏徐州人, 博士生, 主要研究方向为资源经济与能源安全。E-mail: sunyz.15b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 沈镭, E-mail: shenl@igsrr.ac.cn

放的根本途径在于切实转变增长方式^[5]。在区域尺度上,杨骞等、Zhao 等对中国不同区域碳排放进行结构分解,并实证分析不同碳排放水平的影响因素^[6,7];朱聆等采用LMDI模型分析了上海碳排放强度变化的原因,指出产业部门能源强度、能源结构和产业结构的调整是碳排放强度下降的主要原因^[8]。在行业尺度上,刘红光等借助LMDI方法分析了中国工业燃烧能源导致碳排放的影响因素^[9];李波等通过Kaya恒等式对中国农业碳排放影响因素进行分解,结果表明,效率、结构和劳动力规模因素对碳排放量具有一定的抑制作用,并在此基础上提出减排的政策建议^[10]。

当前,虽然对中国碳排放影响因素的研究成果较为丰富,但多数研究集中在分解影响因素,并以此为据提出政策建议,将影响因素与政策环境变化结合起来探究碳排放变化深层次驱动原因的较少。中国产业政策环境影响碳排放变化趋势,在前人研究基础上,为进一步建立政策与碳排放之间的关系,本文利用投入产出(IOA)与结构分解(SDA)模型对具体问题进行了定量分析。首先,利用IOA衡量了中国的碳排放变化情况,投入产出分析是比较常用的一种自上而下评估碳排放的方法^[11],可以从宏观到微观全面评估政策环境对碳排放变化的影响。其次,通过SDA将中国碳排放变化驱动力分解为技术变化、产业联系、经济结构、经济规模和人口

规模五个因素,探讨了在产业政策环境下各个方面对碳排放的影响。SDA是通过将历史变化分解为经济、环境、资源抑或其他社会经济指标,来分析研究对象影响因素的有效方法^[12,13]。在文章最后,分析了政策环境对碳排放的作用规律,在源头上分析判断了碳排放的来龙去脉,为未来相关政策的制定提供科学的理论基础。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

本文将投入产出和分解分析模型相结合,从经济社会各个方面对碳排放变化进行驱动力分解,对国家到行业层面的碳排放进行了评估。两种方法的结合体现了自上而下的特点,可全面揭示政策环境变化对碳排放带来的影响。

投入产出分析涉及到总投入、产出和中间投入、产出^[11],不仅考虑了直接的资源利用,还包含了间接的资源利用,刻画了整个经济系统的资源需求,有利于在宏观层面解决经济与资源利用问题^[14]。为了便于分析与探讨,本文将中国投入产出表中42个行业进行了合并分类^[11],归为28个行业,并对其进行了编号(表1)。

结构分解分析可从时间尺度和部门尺度上来刻画碳排放变化的驱动力,其基本原理是将研究对象分解为主要的影响因素相乘,而后对其进行影响效应分析。由于政策环境因素体现在经济社会的

表1 投入产出表的28部门分类

Table 1 28 sectors in input-output table

编号	行业	编号	行业
1	农林牧渔业	15	金属制品业
2	煤炭开采和洗选业	16	通用、专用设备制造业
3	石油和天然气开采业	17	交通运输设备制造业
4	金属矿采选业	18	电气机械及器材制造业
5	非金属矿及其他矿采选业	19	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
6	食品制造及烟草加工业	20	仪器仪表及文化办公用机械制造业
7	纺织业	21	工艺品及其他制造业
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	22	电力、热力的生产和供应业
9	木材加工及家具制造业	23	燃气生产和供应业
10	造纸印刷及文教体育用品制造业	24	水的生产和供应业
11	石油加工、炼焦及核燃料加工业	25	建筑业
12	化学工业	26	交通运输仓储邮电通信业
13	非金属矿物制品业	27	批发和零售贸易餐饮业
14	金属冶炼及压延加工业	28	其他行业

2017年12月

各个方面,包括技术改革、产业转型、规模扩张等,因此本文将碳排放变化的驱动力分解为技术进步、产业联系、经济结构、经济规模和人口规模。结构分解主要用到的方法,有两极分解、中点权分解以及加权平均分解法,本文采用较常用的两极分解来分析相关问题^[15,16]。

根据研究目标,结合投入产出表,通过SDA将碳排放变化驱动力分解为五部分:

$$\begin{aligned} C_j &= DCI_j \times B \times Y_j \\ &= DCI_j \times b_{ij} \times \frac{Y_j}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P \\ &= t_j \times b_{ij} \times s_j \times e \times p \end{aligned} \quad (1)$$

式中 C_j 为部门 j 的碳排放; DCI_j 为部门 j 的直接碳排放强度; B 为投入产出表中列昂惕夫逆矩阵, b_{ij} 为其系数,表示部门 j 每提供一单位最终使用时,对第 i 部门产品的完全需要量,刻画产业部门之间的联系; Y_j 为部门 j 的最终需求, Y 为总需求; t_j 为部门 j 的直接碳排放强度,代表行业技术水平; s_j 为经济结构,用各个部门的最终需求除以总需求来衡量; e 为经济规模,以人均最终需求计算; p 为总人口; i, j 分别代表投入产出表中的行、列,两者均在 1~28 之间。

那么,碳排放的变动将由五部分构成,即:

$$\Delta C = \Delta t + \Delta b + \Delta s + \Delta e + \Delta p \quad (2)$$

通过SDA对 ΔC 进行分解,具体的分解步骤参考相关文献^[15,16],最终分解结果为(角标1代表计算期,0为基准期):

$$\Delta t = \frac{1}{2} \left[(t_{j1} - t_{j0}) \times b_{i0} \times s_{j0} \times e_0 \times p_0 + (t_{j1} - t_{j0}) \times b_{i1} \times s_{j1} \times e_1 \times p_1 \right] \quad (3)$$

$$\Delta b = \frac{1}{2} \left[t_{j1} \times (b_{i1} - b_{i0}) \times s_{j0} \times e_0 \times p_0 + t_{j0} \times (b_{i1} - b_{i0}) \times s_{j1} \times e_1 \times p_1 \right] \quad (4)$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} \left[t_{j1} \times b_{i1} \times (s_{j1} - s_{j0}) \times e_0 \times p_0 + t_{j0} \times b_{i0} \times (s_{j1} - s_{j0}) \times e_1 \times p_1 \right] \quad (5)$$

$$\Delta e = \frac{1}{2} \left[t_{j1} \times b_{i1} \times s_{j1} \times (e_1 - e_0) \times p_0 + t_{j0} \times b_{i0} \times s_{j0} \times (e_1 - e_0) \times p_1 \right] \quad (6)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \left[t_{j1} \times b_{i1} \times s_{j1} \times e_1 \times (p_1 - p_0) + t_{j0} \times b_{i0} \times s_{j0} \times e_0 \times (p_1 - p_0) \right] \quad (7)$$

2.2 数据来源

本文的数据来源及应用如表2所列。利用投入产出模型来分析1997—2012年间碳排放变化情况,需要消除价格变动带来的影响,因此,本文通过价格指数将多年的投入产出数据转换成以1997年为基期的可比价数据,以便年际间的比较。

本研究中,碳排放的计算是根据各类能源消耗量和各类能源碳排放系数(表3)相乘得到,纳入碳排放系统的能源共8种即:煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气。

3 结果及分析

3.1 碳排放强度和碳排放总量

(1)中国全行业碳排放强度出现逐渐降低之势。碳排放强度反映了单位产出的排放量,中国各行业碳排放强度在1997—2012年间整体呈现降低的趋势,从2.00 t CO₂/万元降至0.86 t CO₂/万元,下降了57%(图1a)。工业碳排放强度远远高于其他行业,其中主要能源行业(电力热力和燃气的生产与供应业、煤炭开采和洗选业等)的碳排放强度最高,其次是金属冶炼及压延加工业。从变化率分析,能源行业碳排放强度变化较小,年均降低1.20%,碳排放强度一直维持很高的水平;第三产业碳排放强度变化幅度较大,年均减少7.00%,减少趋势明显。

(2)中国行业碳排放量仍不断增加。1997—

表2 主要数据及来源

Table 2 Data sources and application

	主要内容	数据用途	数据来源	时间跨度
能源数据	8种能源消耗量	计算行业直接碳排放强度和碳排放量	《中国能源统计年鉴》 ^[17]	1997—2012年
碳排放系数数据	各类能源碳排放系数	计算各类能源碳排放	见表3	
投入产出表	1997年、2002年、2007年和2012年投入产出表	计算行业碳排放并用于分解分析	《中国统计年鉴》 ^[18]	1997—2012年
价格指数数据	工业产品生产者价格、居民消费价格	将各投入产出表转化为1997年可比价投入产出表	《中国统计年鉴》 ^[18]	1997—2012年

表3 各类能源碳排放系数计算参数统计

Table 3 Calculation parameter of the carbon emission coefficient of various energy sources					
能源类型	平均低位发热量 /(kJ/kg)	折标准煤系数 /(kgec/kg)	单位热值含碳量 /(tC/TJ)	碳氧 化率	CO ₂ 排放系数 /(kgCO ₂ /kg)
原煤	20 91	0.71	26.40	0.94	1.90
焦炭	28 44	0.97	29.50	0.93	2.86
原油	41 82	1.43	20.10	0.98	3.02
汽油	43 07	1.47	18.90	0.98	2.93
煤油	43 07	1.47	19.50	0.98	3.02
柴油	42 65	1.45	20.20	0.98	3.10
燃料油	41 82	1.43	21.10	0.98	3.17
天然气	38 93 kJ/m ³	1.33(kgec/m ³)	15.30	0.99	2.16(kgCO ₂ /m ³)

注:①低(位)发热量等于29 307kJ的燃料,称为1 kgec;②前两列数据来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008)^[19];③后两列数据来源于《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)^[20];④“CO₂排放系数”计算方法:以“原煤”为例,计算过程为1.900 3=20 908×0.000 000 001×26.37×0.94×1 000×3.666 67。

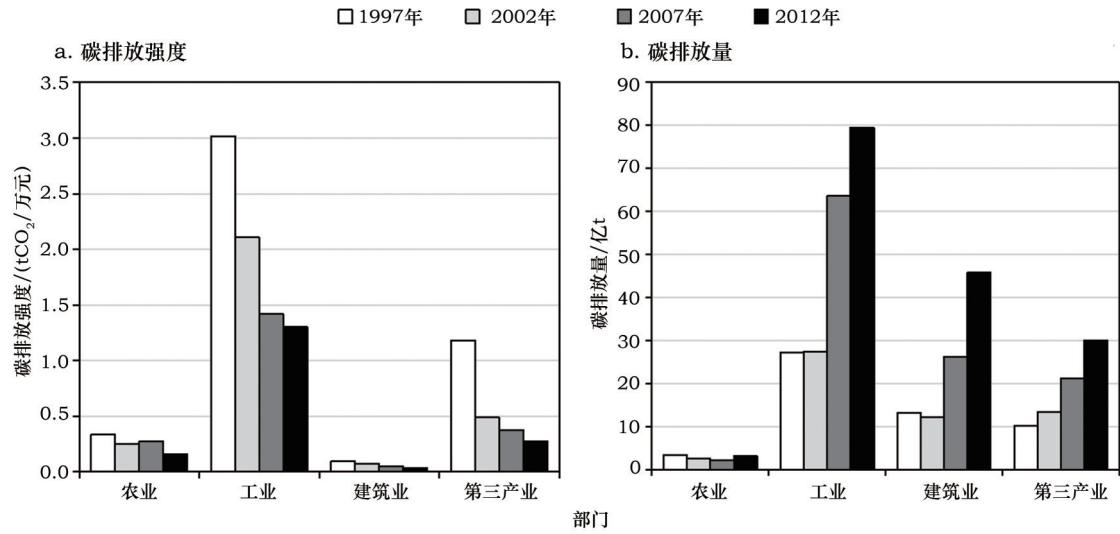


图1 1997-2012年各行业碳排放强度与碳排放量对比

Figure 1 Carbon emission intensity and carbon emission in each sector from 1997 to 2012

2012年,中国碳排放量从53.60亿t增加至158.20亿t,年均增加13%。工业、建筑业一直是碳排放的主要来源,两个行业多年平均碳排放分别占总量的51.60%和24.60%;农业碳排放量最少,占总量的3.60%(图1b)。中国在2011—2013年间使用的水泥为66亿t,超过美国在1901—2000年总计100年45亿t的使用量^[21],可见中国建筑业的快速发展带来的巨大物质消耗,碳排放量很高也属正常现象。1997—2007年,农业碳排放减少,到2012年有所增加。农业生产中,碳排放主要来源于农业的运输、灌溉、翻耕、农药化肥以及农膜等^[10]。1985—2011年间,农业碳排放来源中能源和化学品引起的碳排放比重已由28.02%增至43.66%,能源和化学品逐

渐成为农业碳排放主要来源^[22]。

3.2 中国全行业碳排放变化的驱动力效应

分析模型结果表明,技术进步、产业联系和经济结构的变化对碳排放的变化都会起到负效应,即起到减少碳排放的效应;经济规模与人口规模的变化带来明显的碳排放增加效应,年均增加11.66亿t,对碳排放变化的贡献率从50.28%上升至70.98%(图2)。

(1)技术进步效应。技术变化对碳排放起到了很重要的负效应作用,除2007—2012年建筑业外,技术进步对其他行业碳排放都带来了负增长效应。技术进步效应在五个影响因素中,是唯一一直对碳排放总量变化起负作用的因素,但其负效应在

2017年12月

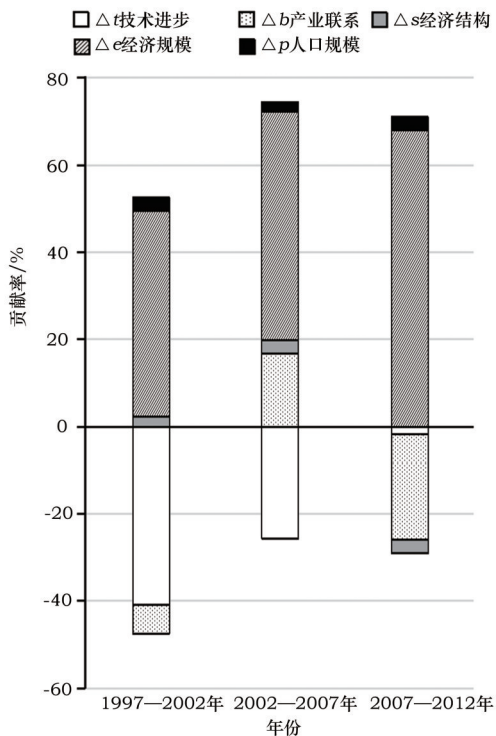


图2 1997—2012年中国碳排放变化的驱动力贡献率

Figure 2 Percentage of driving factors' contribution to carbon emission in China from 1997 to 2012

不断的减小(图3),从1997—2002年间的40.80%降低至2007—2012年间的1.90%。

(2)产业联系效应。1997—2002年和2007—2012年间,产业联系对碳排放总量的变化起到负作用,在2002—2007年间促进了碳排放的增加;其中,农业从2002年至今都是受到产业联系的正向作用。各行业中,产业联系对碳排放量变化的影响主要体现在建筑业、制造业以及主要的第三产业中(图3)。

(3)经济结构效应。经济结构反映了国民经济的组成与构造,主要受到社会对最终产品需求的影响,经济结构合理就能充分发挥经济优势,有利于国民经济各部门的协调发展。经济结构对中国碳排放总量变化的贡献率相对较小并有上升趋势,年均贡献率为2.70%;在2007年之前是正效应,2007—2012年为负效应且效应贡献率上升至3.10%(图3)。针对各个行业,经济结构带来的碳排放变化波动很大,不同阶段,正负效应也不一样。对工业来讲,1997—2002年和2007—2012年

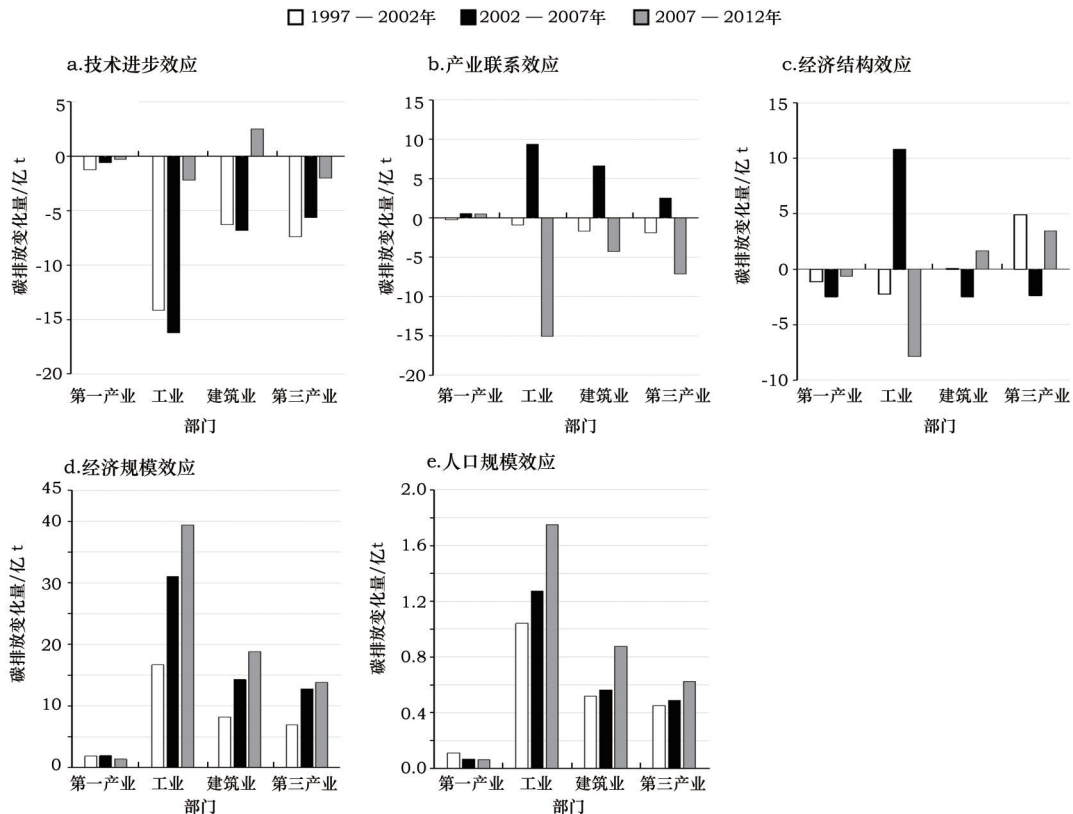


图3 1997—2012年中国行业碳排放驱动力效应分析

Figure 3 Contribution of driving factors to industrial carbon emission changes in China from 1997 to 2012

两个时期内经济结构都促进了碳减排,但在2002—2007年间,碳排放受其影响反而增加;建筑业和第三产业的情况与工业相反。

(4)经济规模效应。经济规模对中国行业碳排放起到极大的促进作用,其贡献率日益增加,从1997—2002年间的47.30%增加至2007—2012年的67.90%,增加幅度较大,在总效应中也是最主要的组成部分(图3)。对于各个行业而言,经济规模效应也在逐年增加,其中建筑、通用专用设备制造、电气通信设备制造、仪器仪表制造以及第三产业等主要行业的碳排放受到经济规模的影响较大,且均为促进作用;能源行业受其影响较小。

(5)人口规模效应。人口规模对行业碳排放带来的一直是正效应,贡献率相对较小,变化幅度不大,年均均为2.70%(图3)。各行业受影响变化情况与上文经济规模效应基本一致,工业和建筑业受影响最大,年均分别增加0.27亿t和0.13亿t,农业相对小,年均增加0.02亿t。

通过分析中国碳排放五个影响因素的贡献率,总结出主要的四条规律:

(1)1997—2012年间,受驱动力影响较大的产业逐渐由第一产业转至二、三产业。

(2)技术因素对碳排放变化一直是负效应,产业联系和经济结构对碳排放变化影响波动较大,规模效应(经济规模、人口规模)均为正效应。

(3)经济结构对碳排放总量变化的贡献率很小,但是对每个行业碳排放变化的影响较大。

(4)建筑业碳排放受到各个因素影响变化最大,能源行业基本稳定无变化。

3.3 行业尺度的碳排放变化驱动力效应

1997—2007年间,除了煤炭采选业(图4),技术进步促进了其他所有行业碳排放的减少;经济规模是这一时期各行业排放增加的主要驱动力。2007—2012年间,影响各行业碳排放变化的主要因素发生了改变,产业联系和经济结构效应成为多数行业碳减排的驱动因素(图4)。

3.4 产业政策环境变化对碳排放的影响

本文将引言中所提到的中国产业政策分为宏观控制政策和产业自调整政策,随着社会发展,政策环境变化不断有利于碳减排。宏观控制政

策通过直接影响人口规模、经济规模与经济结构来影响碳排放变化,中国的五年规划等属于宏观控制政策。产业自调整政策主要影响产业之间的联系,产业之间的贸易、产业规划、价格体制改革等等都属于产业自调整政策。宏观控制政策促进了产业结构转型,经济规模大幅增加,给碳减排带来巨大压力。相反,产业自调整政策激励行业、企业不断引进新技术,并且自发进行企业内部结构调整,淘汰落后产能,在降低企业生产成本的同时也能促进节能减排。

3.4.1 宏观政策环境对碳排放变化的影响

1997—2007年间,政策环境变化促进产业结构转型,节能减排空间发生改变。中国主要行业中,受驱动力影响大的行业发生了变化,逐渐从农业转变为第二、三产业;同时也反映出中国未来的能源节约空间很大程度依赖于二、三产业。这些变化主要跟国家加快工业化进程、扶持服务业发展的政策有关。

(1)宏观控制分析。追溯中国产业政策变化过程,其中表现最为突出的特征是:国家一直鼓励发展第二、三产业,实现从以农业为主的产业结构到以信息服务业为主的产业结构的转型。1998年,中共中央出台政策,加大推进农业技术改革与结构优化;2006—2010年,中国“十一五”规划强调重点发展信息、金融、财政、法律以及其他现代服务业;“十二五”期间强调以服务业结构升级为重点,加快发展生产性服务业。纵观1997—2007年间,宏观控制政策一直助力中国产业结构的转型,大大促进了第三产业的发展,增加了第三产业的能源消费和碳排放量;同时也加剧了第三产业受到外部因素影响的可能性。政策的执行对碳排放变化驱动力中的三个变量(产业联系、经济结构和经济规模)都产生了影响,促进行业碳排放的增加。

宏观政策环境的变化也为碳减排创造了机会。“十五”期间,国家重点推行洁净煤技术,大力发展“气代油”、“煤气化”、“煤变油”等技术^[23];“十一五”发展规划中提出要加强可再生能源、生物质能源的发展,能源技术取得实质进步,加快燃煤工业锅(窑)炉改造、区域热电联产和余热余压利用以及电价改革等。通过这些政策的推行与实施,推进技

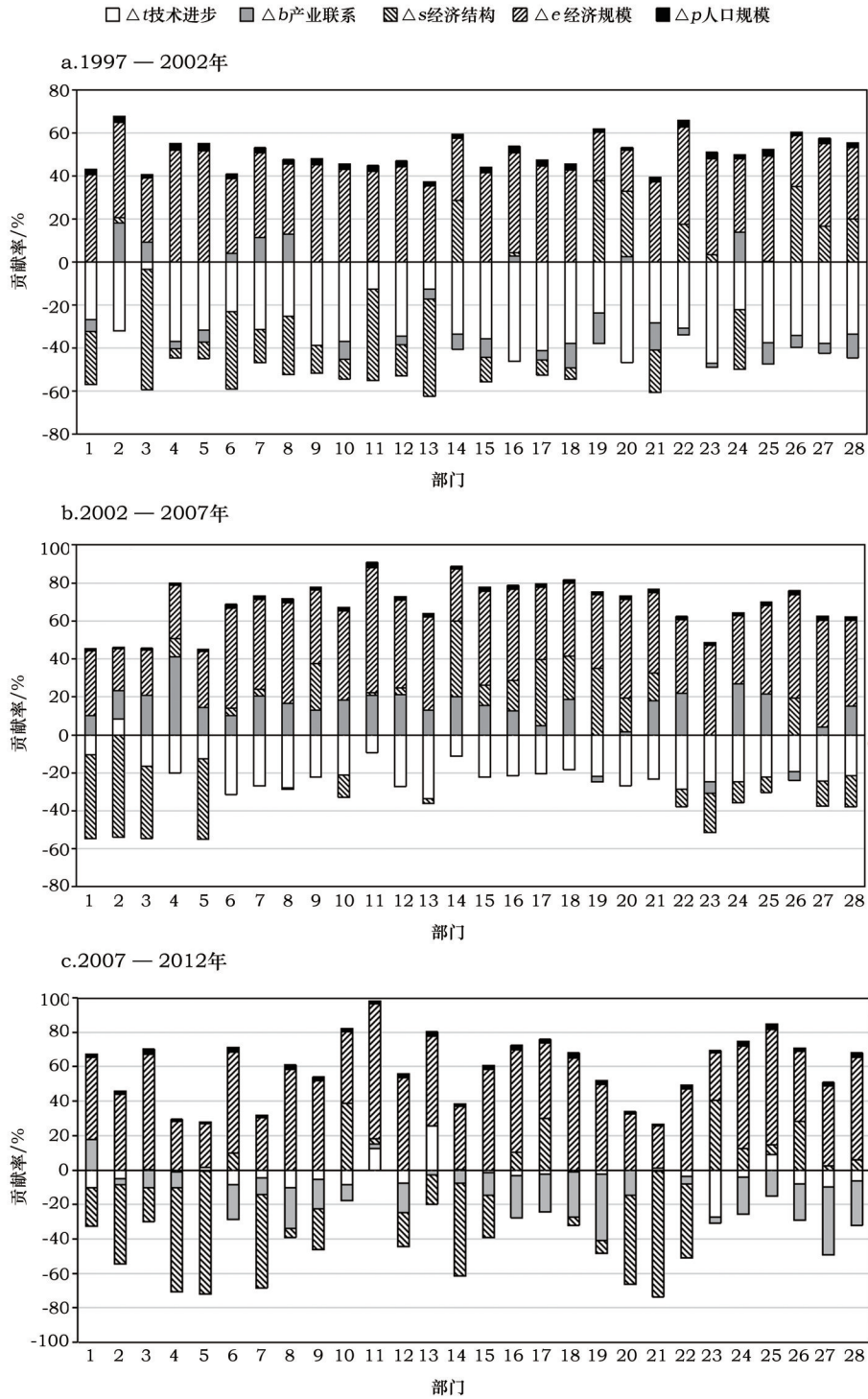


图4 1997—2012年中国各行业碳排放变化的驱动力贡献率

Figure 4 Percentage of driving factors' contribution to carbon emission at the sector level in China from 1997 to 2012

注:横坐标数字为部门编号,具体见表1。

术进步,在一定程度上缓解了碳排放的增加。在结构分解结果中,技术变化因素一直是碳减排主要的推动力,跟国家节能减排政策的推行很吻合(图3)。

(2)微观行为分析。在微观层面上,宏观政策通过个体行为来影响碳排放。在1997—2012年,中国人均收入从5160元增加至40 007元,结合中国居

民的恩格尔系数变化趋势分析,由于国民收入增加,我国的食物费用比例降低,人们对于服务型产品的消费增加,从而带来第三产业能源消费碳排放的增加。1997—2012年间,各个驱动力中,经济规模效应对第三产业碳排放增加的贡献最高。为了抵消经济发展对碳排放带来的增加,相关的服务业节能技术也应大力推广,相关部门应制定配套推广政策措施,推动服务业节能技术的发展与应用。

3.4.2 产业自调整政策环境对碳排放变化的影响

2007—2012年间,政策环境变化推动产业融合与重组,产业自调整政策在产业发展中发挥的作用日益增强,有利于节能减排。根据上文的研究结果,产业联系因素也在碳减排方面起到了积极作用,且未来存在较大的节能潜力。然而在2002—2007年间,产业联系对碳排放的影响出现了突变(图2),几乎促进所有行业碳排放的增加(图4),在2007—2012年间又减少了碳排放。

解释上述现象,需从政策方面入手。自2001年中国加入世界贸易组织(WTO)以来,中国产业面临更具竞争性的国内外市场,贸易与投资都大幅增加^[24]。为了占据更大的国内外市场,各行业都加大了生产。2002—2005年间,中国大部分行业的产出速率提高了73.5%^[11]。行业大规模的生产与贸易,造成巨大能源消耗,2002—2007年间,产业联系变化增加了碳排放,市场竞争对碳减排带来了消极影响。

2007—2012年间,随着中国市场机制的发展与逐渐完善,中国政府转变了高速的经济发展模式,向平稳、社会和谐的方向发展。由于市场化、国际化步伐加快,基础设施不断改善,产业配套能力较强,行业之间的竞争日益增强,导致产业之间自发的结构重新调整不断出现^[11]。产业重组有利于提高生产要素的利用效率,从而降低成本;同时,生产原料、燃料投入的减少也节约了能源利用量,减少碳排放。因此,在2007—2012年间,产业联系对碳减排起到了很大的积极作用(图2)。

通过对中国产业政策环境的分析发现,政策环境逐渐向有利于碳减排的方向发展。市场因素在未来产业政策中发挥的作用将会更大,应充分利用其优势,进一步促进产业调整与融合,优化能源配置与利用,提高能源利用效率,促进碳减排。

4 结论

本文综合运用了投入产出模型和结构分解模型,量化分析了碳排放变化的驱动力效应;同时结合中国产业政策历史变化过程,重点讨论了碳排放变化深层次的政策推动力。基于上述研究,本文主要得出以下三点结论:

(1)1997—2012年间,中国行业碳排放总量不断增加,碳排放强度降低。前者从53.60亿t增加至158.20亿t,后者从2.00tCO₂/万元降至0.86tCO₂/万元,其变化过程受技术进步、产业联系、经济结构、经济规模与人口规模等五个方面的驱动影响。

(2)在中国碳排放的五个驱动力因素中,技术进步因素对碳排放起到负作用,是碳排放减少的最主要原因,产业联系和经济结构具有较高的减排潜力,经济规模和人口规模是中国碳排放增加的主要驱动力。

(3)中国碳排放变化的驱动力效应展现了中国产业政策环境的特点。中国产业政策可分为宏观控制政策和产业自调整政策,总体来看,2002年以前,宏观控制政策很大程度促进了经济与人口规模的扩张,增加了碳排放;同时这一时期政策大力推进农业技术革新,技术进步是该时期碳减排的主要驱动力。2002—2012年间,随着中国市场机制的发展与逐渐完善,经济发展逐渐平稳,宏观控制作用日益减弱,产业自调整政策对碳减排的影响越来越大。由于产业市场竞争不断加强,促进能源大范围流动与产业重组,大大提高了能源利用效率,使得产业联系与经济结构在碳减排中起到越来越大的作用,技术进步不再是唯一减少碳排放的因素,碳减排方式趋于多元化。

参考文献(References):

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883. [Qin D H. Climate change science and sustainable development[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.]
- [2] Ozturk I, Acaravci A. CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in Turkey[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 3220-3225.
- [3] 张利, 雷军, 张小雷. 1952年-2008年新疆能源消费的碳排放变

2017年12月

- 化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 42-49. [Zhang L, Lei J, Zhang X L. Variations and influential factors of carbon emissions of primary energy consumption in Xinjiang during the Period 1952-2008[J]. *Resources Science*, 2012, 34(1): 42-49.]
- [4] 孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 等. 1995-2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1284-1295. [Sun J W, Zhao R X, Huang X J, *et al.* Research on carbon emission estimation and factor decomposition of China from 1995 to 2005[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1284-1295.]
- [5] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(3): 18-24. [Song D Y, Lu Z B. The factor decomposition and periodic fluctuations of carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19(3): 18-24.]
- [6] 杨骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素-基于1995-2009年省际面板数据的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, (5): 36-49. [Yang J, Liu H J. Regional difference decomposition and influence factors of China's carbon dioxide emission[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, (5): 36-49.]
- [7] Zhao X T, Burnett J, Fletcher W, *et al.* Spatial analysis of China province-level CO₂ emission intensity[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 1-10.
- [8] 朱聆, 张真. 上海市碳排放强度的影响因素解析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 20-26. [Zhu L, Zhang Z. Decomposition analysis of carbon emission intensity in Shanghai City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(1): 20-26.]
- [9] 刘红光, 刘卫东. 中国工业燃烧能源导致碳排放的因素分解[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 285-292. [Liu H G, Liu W D. Decomposition of energy-induced CO₂ emissions in industry of China[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 285-292.]
- [10] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86. [Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.]
- [11] Wang X, Huang K, Yu Y, *et al.* An input-output structural decomposition analysis of changes in sectoral water footprint in China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 26-34.
- [12] Zhang Y J, Da Y B. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1255-1266.
- [13] Cansino J M, Sánchez-Braz A, Rodríguez-Arévalo M L. Driving forces of Spain's CO₂ emissions: A LMDI decomposition approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48: 749-759.
- [14] Zhang C, Anadon L D, Mo H, *et al.* Water-carbon trade-off in China's coal power industry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(19): 11082-11089.
- [15] 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. [Li J H. A weighted average decomposition method of SDA model and its application in Chinese tertiary industry development[J]. *Systems Engineering*, 2004, 22(9): 69-73.]
- [16] 李艳梅, 杨涛. 中国CO₂排放强度下降的结构分解-基于1997年-2007年的投入产出分析[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 605-611. [Li Y M, Yang T. Structural decomposition analysis of decline in CO₂ emissions intensity in China: input-output analysis based on the 1997 to 2007[J]. *Resources Science*, 2011, 33(4): 605-611.]
- [17] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴1998, 2003, 2008, 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998, 2003, 2008, 2013. [Compiled by Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistical Yearbook* 1998, 2003, 2008, 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998, 2003, 2008, 2013.]
- [18] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴1998, 2003, 2008, 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998, 2003, 2008, 2013. [Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* 1998, 2003, 2008, 2013 [M]. Beijing: China Statistics Press, 1998, 2003, 2008, 2013.]
- [19] 胡秀莲, 李爱仙, 陈海红, 等. 综合能耗计算通则(GB/T 2589-2008)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [Hu X L, Li A X, Chen H H, *et al.* General principles for calculation of the comprehensive energy consumption (GB/T 2589-2008)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [20] 国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南(发改办气候[2011]1041号)[EB/OL]. (2011-05)[2017-11-01]. <https://wenku.baidu.com/view/c28d051b52d380eb62946df5.html>. [National Development and Reform Commission. Guidelines for the Compilation of Provincial GHG Inventories ([2011]1041) [EB/OL]. (2011-05)[2017-11-01]. <https://wenku.baidu.com/view/c28d051b52d380eb62946df5.html>.]
- [21] USGS. Cement Statistics 1900-2012[EB/OL]. (2017-10-30)[2017-11-24]. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2012-cemen.pdf>.
- [22] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. 农业经济问题, 2014, 35(7): 18-26. [Zhang G S, Wang S S. China's agricultural carbon emission: structure, efficiency and its determinants[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 18-26.]

- [23] 郭廷杰. 贯彻“十五”能源政策大力推广洁净煤技术代油的探讨[J]. 山西能源与节能, 2002, (1): 9-10. [Gu T J. Discussion on carrying out "fifteen" energy policy and vigorously popularizing clean coal technology instead of oil[J]. *Shanxi Energy and Conservation*, 2002, (1): 9-10.]
- [24] Agarwal J, Wu T. China's entry to WTO: global marketing issues, impact, and implications for China[J]. *Int Mark Rev*, 21 (3): 279-300.

Driving force analysis of carbon emission changes in China

SUN Yanzhi^{1,2}, SHEN Lei^{1,2}, ZHONG Shuai^{1,2}, LIU Litao^{1,2}, WU Na^{1,2}, LI Linpeng³, KONG Hanxiao⁴

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Bureau of Housing and Urban-Rural Development of Qingyuan County, Qingyuan 323800, China;

4. Qingdao National High-tech Industrial Development Zone, Qingdao 266114, China)

Abstract: As an important part of economic development, it is essential for carbon emission reduction to clarify factors affecting carbon emission changes in China. Based on input-output analysis (IOA) and structural decomposition analysis (SDA), we demonstrate detailed insights into how diverse driving factors affect carbon emissions. The results indicate that the total carbon emission is increasing from 5.36 to 15.82 billion tons, and carbon emission intensity is reducing from 2.00 to 0.86 t CO₂/10000 CNY. The driving factors of these carbon emission changes are decomposed into technology, sectoral connection, economic structure, gross economic scale and population. Technology effect always offsets the carbon emission increase. On the contrary, gross economic scale and population have significant positive effects on carbon emissions. It is noteworthy that sectoral connection effects abruptly change from negative to positive because of industrial policy. In China, industrial policies are mainly divided into macro-control policies and industrial self-adjustment policies. Research shows that policy evolution is conducive to carbon emission reduction: before 2002, macro control policies plays a major role in the change in carbon emissions, and the expansion of economic and population scales increase carbon emissions. Technological progress is the major driving force of carbon emission reduction in this period. from 2002 to 2012, industrial self-adjustment policy has the larger impact on carbon emission reduction. Owing to strengthening industry market competition, energy flow and industrial restructuring are promoted. Energy efficiency is improving, and industrial linkage and economic structure play a more important role in reducing carbon emissions. In the future, technological progress is no longer the only driving force in decreasing carbon emissions, and pathways to carbon emission reduction are diversified.

Key words: carbon emission; carbon emission reduction; input-output analysis (IOA); Structural decomposition analysis (SDA); driving factors; industrial policy; China