

中国碳排放影响因素的空间分解分析

李玉敏, 张友国

摘要: 采用 LMDI 方法对 30 个省区 2000—2012 年的碳排放变化进行空间分解分析。研究发现, 研究期间内全国碳排放量增长近 2 倍, 其中工业部门增量占比最高, 交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业占比快速上升。经济规模的迅速扩大是推动碳排放量增长的主导力量。2006 年之后, 能源强度尤其是工业能源强度的持续下降极大地抑制了全国碳排放。由于中、西部地区省份的经济增长较快, 全国经济的省区分布结构变化使得碳排放有所增加。随着工业部门产值份额的下降, 产业结构变化促进了碳减排。此外, 能源结构也导致碳排放略有上升。本文认为, 进一步提高能源使用效率以及优化产业结构和能源结构是未来控制碳排放的重点, 同时不同省区应根据自身实际情况落实碳减排任务。

关键词: LMDI; 碳排放; 空间分解分析; 能源强度; 能源结构; 产业结构

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2016)03-0073-13

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2016.03.025

一、引言

中国在应对全球气候变化上具有重要作用。2014 年 11 月, 在《中美气候变化联合声明》中, 中国表示计划 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰, 并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20% 左右。2015 年 7 月, 中国政府发布并提交给联合国气候变化框架公约秘书处的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》展现了中国作为发展中国家至 2030 年的低碳发展蓝图, 其中表明中国将推动经济低碳转型, 以世所罕见的速度大幅提高经济效益, 到 2030 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%。同时, 全社会新增节能投资、新增低碳能源投资到 2030 年将突破 41 万亿, 产业规模将达到 23 万亿, 对 GDP 的贡献率将超过 16%。这些行动声明将成为中国进一步制定全国及各省区碳排放政策, 落实碳减排任务的重要推动力量。然而, 中国各个地区在技术水平、产业结构、能源结构等多个方面都存在显著差异, 因此, 有必要在把握中国碳排放的历史特征、省区特征、行业特征的基础上, 从区域和产业两个维度考虑中国碳排放的影响因素, 并据此制定出科学合理的碳排放政策, 从而促进中国经济与环境协调发展并实现上述有关碳减排的国际承诺。

近些年来, 关于中国碳排放影响因素的研究增长迅速。现有研究中多数都是采用分解方法来考

基金项目: 中国社会科学院哲学社会科学创新工程项目“绿色发展战略与政策模拟研究”(JJ06_2015_SCX_00116); 国家社会科学基金青年项目“跨区域碳减排的技术经济优化路径及政策研究”(13CJY009)

作者简介: 李玉敏, 中国社会科学院研究生院硕士研究生(北京 102488); 张友国, 经济学博士, 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所研究员(北京 100732)

察各类因素对碳排放的影响力度,可根据研究方法将这些研究分为两类。一类是采用指数分解方法和年度数据展开的研究。例如,孙建卫等^[1]采用 Laspeyres 指数分解方法对 1995—2005 年中国的碳排放量和碳排放强度进行了分解,认为技术进步是碳排放量和碳排放强度变化的主导因素,工业部门是碳减排的关键。蒋金荷^[2]采用 LMDI 法定量分析了中国 1995—2007 年碳排放变化的影响因素和贡献率。另一类是基于投入产出结构分解方法的研究。例如张友国^[3]实证分析了经济发展方式的变化对中国碳排放强度的影响,结果表明,1987—2007 年经济发展方式的变化使中国 GDP 碳排放强度下降了 66.02%。此外,还有少数研究采用计量模型来研究碳排放的影响因素。例如,林伯强等^[4]认为中国应当把控制城市化速度和将城市化进程作为低碳经济发展的机会,通过降低能源强度和改善能源结构实现低碳转型。

除了国家层面的碳排放分析外,从区域研究中国碳排放的文献也日益增加。岳超等^[5]利用 Theil 系数分析了 1995—2007 年中国省区碳强度差异变化,并用逐步线性回归分析表明能源资源禀赋、产业结构和能源消费结构是省区碳强度的决定因素。王锋等^[6]采用 LMDI 方法测算了 30 个省区对全国碳强度下降的贡献。曾贤刚等^[7]对各省区 2000—2007 年的碳排放特征进行了对比分析。陈诗一^[8]构建了低碳转型进程的动态评估指数,对改革以来中国各省级地区的低碳经济转型进程进行评估和预测。还有众多学者^{[9][10][11][12]}对区域间的碳排放效率差异进行了实证分析。此外,还有学者^[13]对碳排放的空间转移进行了分析。

从产业的角度看,最近几年关于中国各细分产业的碳排放及影响因素的研究文献不断出现。钱明霞等^[14]基于投入产出技术,采用碳平均传播长度指标(APL)指标测算产业部门之间的碳距离,衡量了产业部门之间的碳波及效应。赵荣钦等^[15]采用 2007 年的数据对各省区不同产业空间碳排放强度和碳足迹进行了对比分析。朱永彬等^[16]通过构建分部门跨期优化模型,对消费偏好导向下的产业结构优化方向及碳排放趋势进行了模拟研究。涂正革^[17]基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析了中国碳减排路径与战略选择。

总的来看,现有文献多从单一角度分析中国的碳排放,很少有文献将区域和产业两个维度有机结合起来对中国的碳排放进行综合分析,而这正是本文试图解决的问题。本文建立了一个关于碳排放的空间分解模型,利用了 2000—2012 年 30 个省区六大产业的能源消耗数据,对中国的碳排放进行空间因素分解实证分析,并讨论了结果的政策含义。

二、研究方法 with 数据处理

(一) 全国碳排放的核算模型

碳排放量的核算是分析和研究碳排放的基础,不同核算方法的核算结果有一定的差别。化石能源燃烧是产生 CO₂ 的最主要来源。《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》介绍了不同种类化石能源燃烧的碳排放系数和核算方法,本研究主要借鉴其方法,并结合中国的实际情况对碳排放量进行核算。

第 i 省区 j 行业第 k 种能源的 CO₂ 的排放量可以用下式计算:

$$CO_{2(ijk)} = E_{ijk}^1 * AEF_k, \text{ 其中 } AEF_k = NVC_k * EF_k$$

其中, E_{ijk}^1 表示 i 省区 j 行业(或生活消费)第 k 种能源的实物消耗量, AEF_k 表示本文中所计算的第 k 种能源的 CO₂ 排放系数,其值等于平均低位发热量(NVC_k)与 IPCC 公布的缺省值(EF_k)的乘积。

由此,省区、行业、全国的碳排放量^①可以分别表示为:

① 本文中的碳排放量均指 CO₂ 排放量。

$$CO_{2(i)} = \sum_j \sum_k (CO_{2(ijk)}); CO_{2(j)} = \sum_i \sum_k (CO_{2(ijk)}); CO_2 = \sum_i \sum_j \sum_k (CO_{2(ijk)})$$

(二) 碳排放影响因素分解模型

由 Ang^{[18][19][20]} 提出的对数平均 Divisia 指数结构分解模型 (简写 LMDI) 因为没有不能解释的残值而且计算公式统一简便, 被广泛应用于能源消耗和碳排放的研究。本文采用该方法对碳排量进行加法分解。

$$CO_2 = \sum_{ijk} Q \frac{Q_i}{Q} \frac{Q_j}{Q_i} \frac{E_{ij}}{Q_j} \frac{E_{ijk}^2}{E_{ij}} \frac{C_{ijk}}{E_{ijk}^2} = \sum_{ijk} QS_i P_{ij} I_{ij} M_{ijk} U_{ijk}$$

其中, $E_{ijk}^2 = E_{ijk}^1 * SCC_k$, 即 i 省 j 行业第 k 种能源消耗量等于 i 省 j 行业第 k 种能源实物消耗量乘以该能源品种的折标准煤系数; i 表示省区; j 表示行业; k 表示能源品种; Q 表示产值; S_i 表示省区结构, 等于 i 省区在特定年份的总产值占当年全国总产值的比重; P_{ij} 表示产业结构, 等于 i 省区内 j 行业在特定年份的产值占 i 省当年总产值的比重; I_{ij} 表示能源强度, 等于 i 省 j 行业的能源消耗总量与 i 省 j 行业的产值之比; E_{ij} 表示 i 省 j 行业的能源消耗总量, 其值等于 i 省 j 行业 k 种能源消耗量之和。 M_{ijk} 表示能源结构, 等于 i 省 j 行业第 k 种能源消耗量占 i 省 j 行业能源消耗总量的比重。 U_{ijk} 表示碳系数, 等于 i 省 j 行业第 k 种能源的碳排放量与 i 省 j 行业第 k 种能源的实物消耗量之比。

根据 LMDI 方法, CO_2 的变化量可以分解为: ΔC_{act} 、 ΔC_{str} 、 ΔC_{pst} 、 ΔC_{int} 、 ΔC_{mix} 、 ΔC_{enf} 。其中, ΔC_{act} 表示全国生产总值影响因子, ΔC_{str} 表示省区产值结构影响因子, ΔC_{pst} 表示产业结构变化影响因子, ΔC_{int} 表示能源强度变化影响因子, ΔC_{mix} 表示能源结构变化影响因子, ΔC_{enf} 表示碳系数变化影响因子。

$$\Delta CO_2 = \Delta C_{act} + \Delta C_{str} + \Delta C_{pst} + \Delta C_{int} + \Delta C_{mix}$$

$$\Delta C_{act} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{C_{ijk}^T - C_{ijk}^0}{\text{Ln}C_{ijk}^T - \text{Ln}C_{ijk}^0} \text{Ln}\left(\frac{Q^T}{Q^0}\right)$$

$$\Delta C_{str} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{C_{ijk}^T - C_{ijk}^0}{\text{Ln}C_{ijk}^T - \text{Ln}C_{ijk}^0} \text{Ln}\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right)$$

$$\Delta C_{pst} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{C_{ijk}^T - C_{ijk}^0}{\text{Ln}C_{ijk}^T - \text{Ln}C_{ijk}^0} \text{Ln}\left(\frac{P_{ij}^T}{P_{ij}^0}\right)$$

$$\Delta C_{mix} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{C_{ijk}^T - C_{ijk}^0}{\text{Ln}C_{ijk}^T - \text{Ln}C_{ijk}^0} \text{Ln}\left(\frac{M_{ijk}^T}{M_{ijk}^0}\right)$$

$$\Delta C_{int} = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{C_{ijk}^T - C_{ijk}^0}{\text{Ln}C_{ijk}^T - \text{Ln}C_{ijk}^0} \text{Ln}\left(\frac{I_{ij}^T}{I_{ij}^0}\right)$$

由于

$$U_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{E_{ijk}^2} = \frac{E_{ijk}^1 * AEF_k}{E_{ijk}^1 * SCC_k} = \frac{AEF_k}{SCC_k} = C_k (k = 1, 2, \dots, 8)$$

所以

$$\Delta C_{enf} = 0$$

对碳排放量进行结构分解时, 参考以往研究, 我们假定每种能源使用的碳系数 U_{ijk} 是一个固定值, 即该因素对碳排放量的变化没有影响。因此本文主要分析前五种因素的影响。全国生产总值的变化带来的碳排放量的增加我们称之为规模效应。生产活动是碳排放的重要基础和来源, 生产过程所伴随的大量能源消耗是碳排放最重要的来源, 生产规模的扩大是碳排放增加的直接因素, 因此规模效应是我们衡量碳排放的基础。省区产值结构衡量省区总产值占全国总产值比重的变化引起的碳排放的变化, 省区总产值占比提高, 其对全国碳排放量增加的促进作用增强, 省区总产值占比的下

降,其能够对全国碳减排作出贡献。通过比较省区产值占比变化与省区对碳排放量变化的影响,能够客观合理地反映省区碳减排贡献大小。产业结构代表各省区产业结构的变化对碳排放的影响,由于工业是能源强度最高的产业部门,第三产业能源强度相对很低,因此工业占比的下降、第三产业占比的提升能够促进碳减排。能源强度变化代表单位产值所消耗的能源,不同的技术水平可能会导致在生产同样的一单位产值的情况下,消耗的能源量不同,从而产生的碳排放量不同,因此提高技术水平、降低能源强度是碳减排的重要途径之一。此外,由于不同能源品种其碳排放系数不同,能源结构的变化也会影响碳排放量。综上所述,省区产值结构变化、产业结构变化、能源强度变化、能源结构变化是我们分析碳排放在不同省区、不同产业来源的变化及使用效率的重要渠道,对这些因子的分析有利于找到碳减排的突破口,是制定碳排放政策的重要依据。进一步,上述方法也可用于分析省际和产业层面的碳排放变化。

(三) 数据来源及处理

本文中,能源消耗量包含能源终端消费量和能源转换消费量。首先根据历年《中国能源统计年鉴》公布的30个省区^①的《地区能源平衡表》得到2000—2012年各省分行业的能源终端消耗实物量,包括农、林、牧、渔、水利业、工业、建筑业、交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业、其他非物质生产部门及生活消费的8种能源的能耗实物量,包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气。由于缺失2000—2002年的《宁夏能源平衡表》、2002年的《海南能源平衡表》,我们采用均值插补法补齐缺失数据。除能源终端消耗之外,能源加工转换过程也会产生大量的碳排放,因此为了更加准确地估计全国碳排放量,本研究把火力发电和发热消耗的能源数据核算到工业部门里。而其他的能源转换部门(如洗选煤、炼焦、炼油、制气、天然气液化、煤制品加工、回收能等)主要是物理转换过程,理论上假定不产生CO₂,忽略不计。对于能源消耗的“0”值数据,本研究均用“1E-50”这一极小值进行代替^{[21][22]}。

2000—2012年30个省区的六大产业的生产总值数据来自历年的《中国统计年鉴》,并采用GDP指数缩减法,将各省的产业产值数据换算成2000年价格。8种能源的折标准煤系数以及平均低位发热量数据来自《2013年中国能源统计年鉴》。

三、实证分析

(一) 全国碳排放量变化趋势分析

伴随着GDP的增长,全国碳排放总量由2000年的32.36亿吨增长至2012年的96.37亿吨,增长量接近2倍,年均增长率16.49%。分产业来看,各产业排放量占比基本稳定,工业占比各年均保持在80%以上,是碳排放的主要来源。交通运输仓储邮政业是碳排放的第二大来源,排放量由2000年的15.17亿吨增长至2012年的63.06亿吨,占总排放量的比重由4.69%上升至6.54%。批发零售和住宿餐饮业的碳排放量增长较快,碳排放量由0.36亿吨增长至1.81亿吨,年均增长率33.0%,占比由2000年的1.13%增长至1.88%。第一产业(农、林、牧、渔、水利业)的碳排放量由2000年的0.86亿吨,增长至2012年的1.42亿吨,增加排放量5530万吨。但从占比的角度看,第一产业碳排放量占总排放量的比重呈下降趋势,2000年占比2.67%,2012年降至1.47%。其他非物质生产部门与第一产业的变化趋势基本一致,碳排放量从2000年的0.63亿吨增长至2012年的1.66亿吨,占比从2000年的1.94%下降至1.72%。在各产业中,建筑业碳排量最小,碳排放量由2000年的2934万吨上升至2012年的6446万吨,占比从2000年的0.91%下降至2012年的

^① 不包括西藏自治区和港澳台地区。

0.67%。生活消费碳排放量相对增长较慢, 碳排放量占比大幅下滑, 2000年碳排放量2.29亿吨, 占比7.08%, 2012年碳排放量4.04亿吨, 占比降至4.19%。综合来看, 2000年至2012年全国碳排放量快速增长, 工业占比最高, 交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业占比快速上升, 而第一产业、建筑业、其他非物质生产部门和生活消费碳排放占比有所下降(如表1所示)。

表1 2000—2012年全国碳排放总量(10⁴tc)

年份	合计	农、林、牧、 渔、水利业	工业	建筑业	交通运输和 仓储邮政业	批发零售和 住宿餐饮业	非物质 生产部门 ^①	生活消费
2000	323 560	8 644	263 962	2 934	15 168	3 649	6 292	22 911
2001	341 396	9 040	279 089	3 147	17 638	3 790	5 783	22 909
2002	371 109	9 274	306 511	3 382	19 531	4 105	6 177	22 129
2003	425 263	8 571	356 082	3 005	23 116	4 459	5 459	24 570
2004	484 953	9 050	408 282	3 134	26 575	5 511	6 446	25 954
2005	574 999	11 793	480 421	3 674	35 572	7 760	6 749	29 030
2006	626 891	12 042	528 057	3 997	39 246	8 356	6 818	28 375
2007	697 373	12 051	592 757	4 170	43 720	8 905	7 689	28 081
2008	738 264	11 726	622 751	5 176	47 879	11 427	10 761	28 545
2009	774 405	11 558	651 084	5 128	50 797	13 432	12 112	30 293
2010	842 280	12 151	706 119	6 081	55 223	14 513	12 715	35 479
2011	938 144	13 100	790 559	6 258	59 838	15 946	13 562	38 881
2012	963 675	14 175	804 887	6 446	63 058	18 097	16 603	40 409

(二) 碳排放量的空间因素分解分析

1. 全国碳排放量的影响因素分解。全国生产总值规模效应是拉动碳排放量上升的最主要驱动因素。2000—2012年全国的生产总值从9.7万亿增长至32.4万亿(按可比价计算), 增长了近3倍。2001年规模效应带来的碳排放增加量为3.02亿吨, 远超过实际碳排放增量1.78亿吨。2012年, 由规模效应带来的碳排放增量上升至9.27亿吨, 相比2001年增长2.07, 而实际碳排放增量由1.78亿吨上升至2.55亿吨, 仅增长0.43倍(如表2所示)。这表明研究期间内, 全国产值规模的迅速扩大是推动碳排放量增长的主导力量, 若其他条件不变, 仅是产值规模变化, 理论上碳排放量将远远高于实际观测水平。

表2 2000—2012年中国碳排放量变化的结构分解(10⁴tc)

阶段	合计 (ΔCO_2)	规模效应 (ΔC_{act})	省区结构 (ΔC_{str})	产业结构 (ΔC_{pst})	能源强度 (ΔC_{int})	能源结构 (ΔC_{mix})
00—01	17 835.94	30 183.02	-202.98	-4 781.83	-7 030.96	-331.31
01—02	29 713.08	36 442.20	-281.41	-593.70	-5 857.99	3.99
02—03	54 154.08	44 875.58	-311.97	6 851.87	1 908.72	829.89
03—04	59 690.29	57 562.63	179.86	10 067.25	-8 612.05	492.59
04—05	90 046.14	65 071.41	1 354.48	-9 924.28	32 012.14	1 532.39
05—06	51 891.96	77 239.69	129.23	12 298.01	-36 610.04	-1 164.91
06—07	70 481.74	89 667.06	427.97	3 137.76	-23 468.82	717.77
07—08	40 891.07	78 454.61	1 937.20	8 991.55	-50 766.47	2 274.19
08—09	36 141.11	85 863.73	-197.74	-39 768.20	-8 774.19	-982.48
09—10	67 875.40	99 422.95	1 131.47	14 571.83	-46 877.98	-372.87
10—11	95 864.01	98 847.74	3 630.53	-353.34	-7 445.07	1 184.15
11—12	25 530.09	92 709.92	3 040.17	-23 458.02	-45 248.68	-1 513.29
00—12	640 114.91	856 340.54	10 836.81	-22 961.10	-206 771.39	2 670.11

① 文中的非物质生产部门指除交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业以外的第三产业。

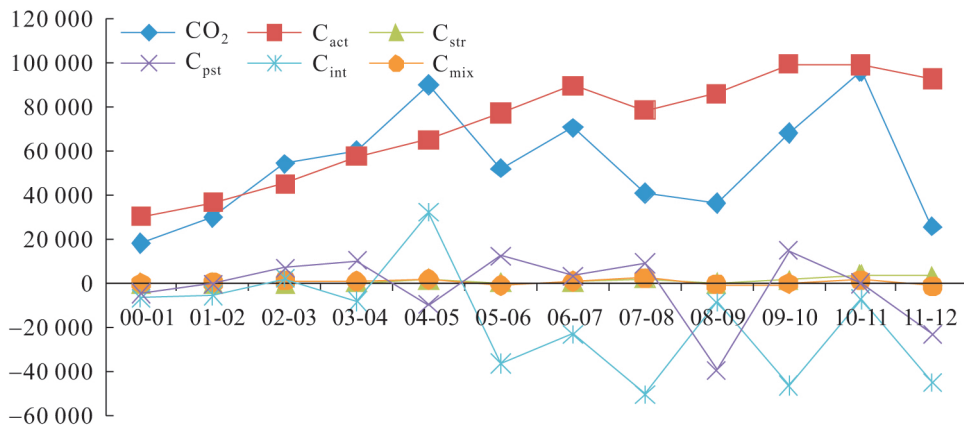


图 1 2000—2012 年中国碳排放量变化的结构分解走势 (10⁴tc)

说明：“00—01”表示 2000 年至 2001 年，其他缩写依次类推。纵轴表示对应时间段由不同影响因子带来的碳排放变化量。

说明：“00—01”表示 2000 至 2001 年，其他缩写依次类推。能源强度是影响全国碳排放增量变化趋势的重要因素，它有效地抑制了经济总量带来的碳排放增长。从图 1 可以看出，全国 CO₂ 排放增量的变化趋势与能源强度的变化趋势具有很高的相关性。能源强度对碳排放的影响大致可以分为两个阶段：2005 年前对碳排放的影响较小，甚至个别年份导致碳排放增加；2006 年起，能源强度变化的影响力较大且一直有助于降低全国碳排放量。同时可以看到，2006 年也是实际碳排放量低于生产规模效应对碳排放量的拉升量的转折点。2002—2005 年实际的碳排放量基本高于生产的扩大带来的规模效应对碳排放量的拉升，而 2006 年之后，由于能源强度对碳排放的抑制作用大大超过了规模效应对碳排放的拉升，实际的碳排放量增加降低至规模效应的拉升量之下。这表明 2006 年至 2012 年能源强度的降低极大地抑制了全国碳排放量的增加，对碳减排做出了卓越的贡献。从表 3 可以看出，

表 3 2000—2012 年中国各产业能源强度和产值占比 (万吨标准煤/亿元,%)

年份	合计		农、林、牧、渔、水利业		工业		建筑业		交通运输和仓储邮政业		批发零售和住宿餐饮业		非物质生产部门	
	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比	能源强度	产值占比
2000	1.25	1.00	0.24	0.15	2.45	0.41	0.19	0.06	0.94	0.08	0.15	0.10	0.13	0.20
2001	1.20	1.00	0.24	0.15	2.39	0.40	0.18	0.07	0.96	0.08	0.15	0.10	0.11	0.21
2002	1.18	1.00	0.24	0.14	2.35	0.40	0.17	0.07	0.97	0.08	0.14	0.10	0.10	0.21
2003	1.20	1.00	0.36	0.13	2.30	0.42	0.14	0.07	1.07	0.08	0.15	0.10	0.08	0.21
2004	1.21	1.00	0.20	0.13	2.28	0.43	0.12	0.07	1.11	0.07	0.17	0.09	0.09	0.20
2005	1.26	1.00	0.24	0.12	2.37	0.43	0.16	0.06	1.72	0.06	0.18	0.11	0.07	0.23
2006	1.21	1.00	0.24	0.11	2.23	0.44	0.16	0.06	1.65	0.06	0.18	0.10	0.07	0.23
2007	1.17	1.00	0.22	0.11	2.16	0.45	0.15	0.05	1.68	0.05	0.17	0.10	0.06	0.24
2008	1.12	1.00	0.20	0.10	2.00	0.46	0.17	0.05	1.71	0.05	0.19	0.10	0.08	0.23
2009	1.04	1.00	0.18	0.10	1.97	0.43	0.13	0.06	1.69	0.05	0.18	0.11	0.07	0.25
2010	1.01	1.00	0.17	0.09	1.84	0.44	0.14	0.06	1.67	0.05	0.17	0.11	0.07	0.24
2011	1.00	1.00	0.17	0.09	1.83	0.45	0.13	0.06	1.67	0.05	0.17	0.11	0.07	0.24
2012	0.93	1.00	0.17	0.09	1.73	0.44	0.12	0.06	1.47	0.05	0.18	0.12	0.09	0.25

2000—2005 年全国能源强度基本高于 1.20 万吨标煤/亿元, 但 2006 年能源强度从 2005 年的峰值 1.26 万吨标煤/亿元降至 1.21 万吨标煤/亿元, 此后一直下降, 2012 年降至 0.93 吨标煤/亿元, 这与以上分析恰好吻合。全国能源强度的下降主要得益于工业、建筑业和第一产业能源强度的下降, 这些产业部门能源使用效率的提高使得单位产值的能源消耗量大幅下滑, 因而在碳排放系数保持不变的情况下碳排放量大幅下降。

产业结构的变化对碳排放量增长的影响在研究期间内相对稳定, 但在 2009 年和 2012 年出现大幅下滑, 影响因子分别是 -3.98 亿吨和 -2.35 亿吨, 这与 2009 年和 2012 年经济不景气, 工业产值增速下滑有密切关系。由表 3 可以看出, 2009 年和 2012 年工业产值占总产值的比重分别为 43.28%、43.54%, 均低于 2008 年的 45.60%, 2010 年的 44.43%, 2011 年的 44.66%。与此相对应, 2009 年和 2012 年非物质生产部门占比分别是 24.72%和 24.70%, 均高于 2008 年的 23.17%, 2010 年的 23.95%、2011 年的 23.91%, 同时 2009 年和 2012 年建筑业的产值比重也高于相邻年份。这表明在 2009 年和 2012 年工业产值占总产值的比重下降, 与之相反, 非物质生产部门和建筑业的产值占比有所上升, 由于工业是能源强度最高的产业部门, 而非物质生产部门和建筑业能源强度相对较低, 因此上述产业结构的变化有利于减少碳排放量。

2000—2012 年省区产值结构和能源结构对碳排放的影响很小且变化不大。2000 年东部十省区的产值规模占全国总产值的 52.54%, 高于中西部之和, 而 2012 年东部十省区产值占比 52.26%, 仅仅下降了 0.28 个百分点, 全国总的产值格局基本未发生变化。同样, 煤炭消耗量在本研究中统计的八种能源的比重在 2000 是为 72.38%, 2012 年降至 69.49%, 以煤炭为主的能源结构变化不大。这意味着进入新千年以来, 中国的能源结构和区域发展结构未产生明显改观, 并未对碳排放量产生明显抑制作用。

2. 省区层面的碳排放量的影响因素分解。2000—2012 年全国的碳排放量增加 64.0 亿吨, 分地区来看, 山东、内蒙古、江苏、河北、河南位居全国前五位, 占全国碳排放总增加量的 39.5%, 其中山东省碳排放增加量最大, 达 7.0 亿吨。此外, 山西、广东、辽宁、浙江、湖北、陕西的碳排放增加量均超过 2 亿吨。而碳排放增加量最低的五个省份分别是上海、天津、北京、青海、海南。其碳排放增加量均在 1 亿吨之下。规模效应、省区结构因子、产业结构因子、能源强度因子、能源结构因子对省区碳排放量的影响各有不同 (如表 4 所示)。

表 4 2000—2012 年省区碳排放量变化的结构分解 (10⁴tc)

省区	合计 (ΔCO_2)	规模效应 (ΔC_{act})	省区结构 (ΔC_{str})	产业结构 (ΔC_{pst})	能源强度 (ΔC_{int})	能源结构 (ΔC_{mix})
山东	69 973.34	58 871.07	1 748.62	-154.18	5 123.58	4 384.26
内蒙古	56 293.36	43 309.12	14 299.12	7 557.15	-9 586.65	714.62
江苏	46 620.97	51 434.90	2 111.25	-1 653.06	-7 132.68	1 860.56
河北	46 140.01	58 835.00	-4 302.97	-1 431.88	-9 139.15	2 179.00
河南	33 564.33	43 213.54	-971.51	2 546.82	-11 829.69	605.17
山西	32 612.46	39 761.58	-284.15	962.70	-9 021.45	1 193.78
广东	29 837.73	41 599.00	-26.54	-3 580.05	-9 872.21	1 717.53
辽宁	25 747.33	43 642.20	228.87	-1 106.01	-17 682.50	664.75
浙江	23 380.35	29 728.28	-1 028.10	-2 923.36	-3 212.66	816.18
湖北	22 974.67	31 936.03	-276.92	-2 497.61	-6 666.71	479.88
陕西	21 459.28	19 203.77	1 636.19	2 309.54	-2 692.08	1 001.87
四川	19 509.06	26 454.58	862.97	235.85	-8 394.85	350.52
安徽	19 291.39	27 803.40	-422.75	3 611.15	-12 091.89	391.47
湖南	19 136.83	20 333.05	-135.13	592.87	-2 122.90	468.94

续表 4

省区	合计 (ΔC_{CO_2})	规模效应 (ΔC_{act})	省区结构 (ΔC_{str})	产业结构 (ΔC_{pst})	能源强度 (ΔC_{int})	能源结构 (ΔC_{mix})
新疆	19 000.61	18 659.54	-2397.28	708.71	1 065.43	964.22
福建	17 067.57	15 883.31	-35.98	539.47	82.30	598.48
贵州	15 567.19	21 380.82	-461.03	-1 906.37	-3 615.60	169.37
吉林	14 955.49	21 013.99	876.15	2 498.81	-9 592.07	158.61
云南	14 887.28	15 647.56	-1 690.06	-2 431.71	3 047.84	313.65
黑龙江	14 464.69	24 959.36	-1 866.60	-4 655.66	-6 124.50	2 152.09
广西	12 689.66	14 398.72	11.39	1 839.76	-3 752.87	192.65
宁夏	11 884.39	10 267.04	-317.39	271.83	1 260.38	402.53
江西	10 328.18	12 860.28	52.65	3 125.99	-5 835.13	124.38
甘肃	9 604.33	13 329.47	-1 042.84	-449.10	-2 320.17	86.95
重庆	9 017.94	14 954.34	1 168.32	1 128.99	-8 751.49	517.77
上海	7 908.92	19 647.20	-1 979.39	-3 739.84	-5 744.43	-274.61
天津	6 344.70	15 268.94	3 307.24	-800.00	-11 051.08	-380.41
北京	3 678.14	10 888.43	-968.60	-4 076.83	-1 148.20	-1 016.65
青海	3 117.05	3 224.05	98.02	403.85	-636.95	28.08
海南	3 057.67	2 655.98	-146.69	201.06	259.38	87.95
合计	640 114.92	771 164.56	8 046.89	-2 871.12	-157 178.99	20 953.58

规模效应来自全国的生产产值规模的扩大，是促使碳排放增加的最主要和最直接因素。这一变化产生的规模效应使各省区的碳排放量都有所增加。北京、上海、天津、黑龙江、辽宁的由规模效应产生的碳排放增加量分别是其实际碳排放量的 2.96 倍、2.48 倍、2.41 倍、1.73 倍、1.70 倍，位居全国前五位。而内蒙古、山东、宁夏、海南、陕西、福建、新疆的由规模效应产生的碳排放增加量低于实际的碳排放增加量，表明这七个省区的碳排放增加量的增长速度超过了全国生产规模的增长速度。从图 2 可以看出，规模效应对各省的碳排放增加量的影响基本保持一致的趋势。

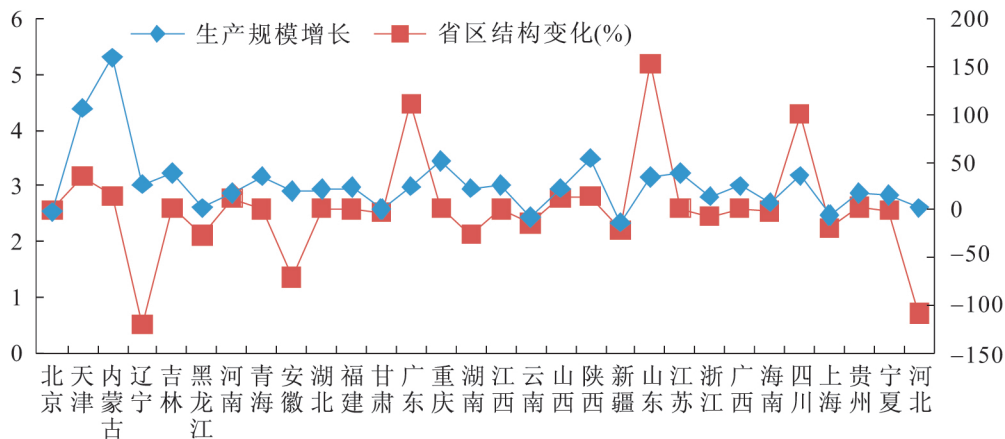


图 2 2000—2012 年各省区生产总值变化和省区结构变化

说明：生产规模增长表示各省区 2012 年生产总值相比 2000 年的增长倍数。省区结构变化表示 2012 年各省区生产总值占全国的比重相比 2000 年的百分点变化。

不同省区的不同产值增长速度影响着各省区碳排放量的增减，促使碳排放格局发生变化。2000—2012 年包括河北、新疆、上海、黑龙江、云南、甘肃、浙江、北京在内的 18 个省区的省区产值结构变化有助于减少碳排放量。从绝对数值看，河北省的省区结构效应最高，达 -4 243.70 万吨，从占比看，省区结构变化对北京市碳排放的贡献最大，由其带来的碳排放减少量占实际碳排放

增量的-26.3%, 其次是上海市(-25.0%)、黑龙江(-12.90%)、云南(-12.62%)、甘肃(-10.86%)、河北(-9.33%)。包括天津、重庆、内蒙古、陕西、吉林、江苏、四川在内的12个省区的省区结构效应为正值, 表明这些省区的产值占全国产值的比重大幅增加, 加速了其碳排放量增长, 其中内蒙古最高, 2000—2012年省区产值结构变化促使碳排放量增加1.43亿吨, 占实际碳排放增量的25.4%。从时间趋势看, 2001—2012年省区结构变化对各省区碳排放量的影响趋势基本一致, 但在2009年金融危机的情况下, 省区结构因素对各省的影响有所变化, 其中山西、广东、河北、上海等省区的产值结构变化对碳排放量的抑制作用增强, 而内蒙古、江苏、重庆、湖北的产值结构变化促使了碳排放量的更快增长(如图3所示)。

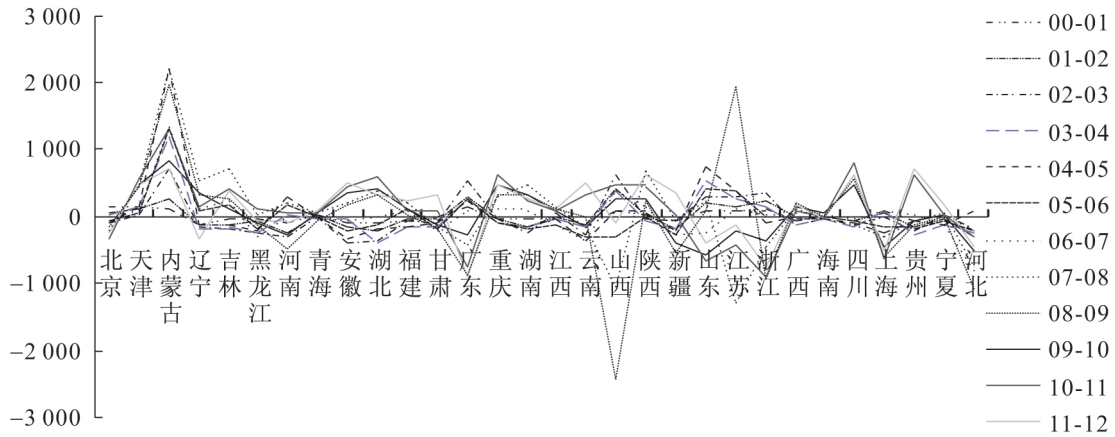


图3 2000—2012年各省区省区结构变化对碳排放的影响(10⁴tc)

说明:“00—01”表示2000年至2001年,其他缩写依次类推。纵轴表示对应时间段由不同影响因素带来的碳排放变化量。

2000年至2012年,产业结构的变化对各省区碳排放量有着不同的影响。由于工业是能源强度最高的产业部门,第三产业能源强度相对很低,因此工业占比的下降与第三产业占比的提升能够促进碳减排。从图4可以看出,研究期间不同省区产业结构产生了不同的变化,从而对碳排放产生了

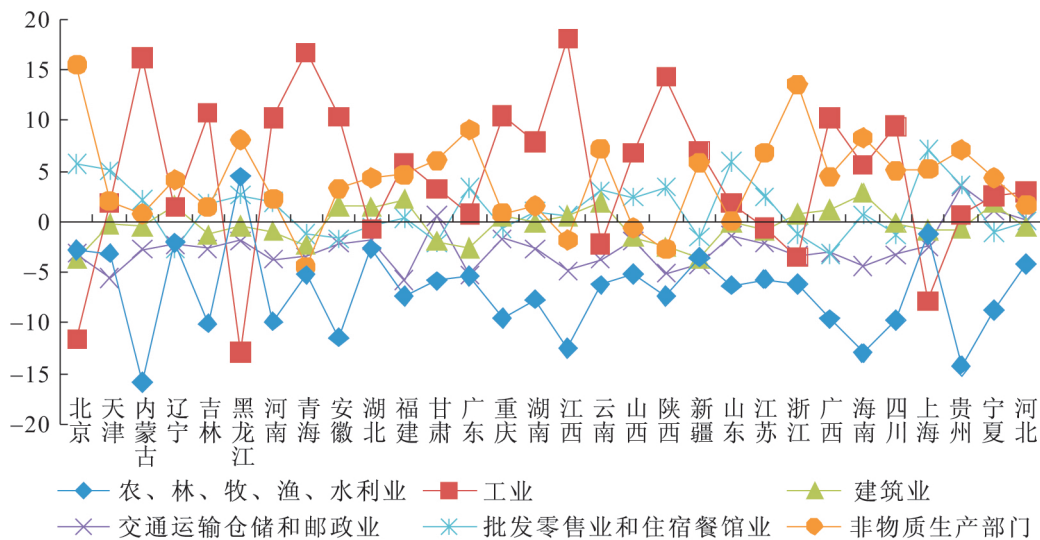


图4 2000—2012年各省区产业结构变化(%)

说明:图中数值为2012年省区内各产业产值比重相比2000年的变化。

不同的影响。黑龙江、北京、上海、广东、浙江、云南、湖北、贵州、江苏、辽宁、天津、甘肃 14 个省区，由产业结构调整带来的碳排放量影响为负值，表明这些省份的产业结构变化有利于碳减排。而内蒙古、河南、安徽、江西等 16 个省区的产业结构变化促使了碳排放量增加，不利于碳减排目标的实现。

北京市、上海市和江苏省仅有批发零售和住宿餐饮业、非物质生产部门对碳排放量增加产生了促进作用，这符合其第三产业占比提高的发展趋势。广东省的工业、批发零售和住宿餐饮业、非物质生产部门促进了碳排放量增长，但交通运输和仓储邮政业的调整对碳减排做出了卓越贡献。2000—2012 年由广东省交通运输和仓储邮政业带来的碳减排影响为 -2 851.95 万吨，位居全国第一。黑龙江省工业占比大幅下滑，对碳排放的影响为 -4 458.29 万吨，其工业结构调整对碳排放的抑制作用位居全国第一。浙江省和湖北省仅有建筑业和非物质生产部门促进了碳排放量增长，但其作用远小于工业、交通运输和仓储邮政业、生活消费的调整对碳排放的抑制作用。内蒙古、河南、重庆、江西、山西、陕西、新疆、山东、广西、四川的产业结构对碳排放量增加起了拉升作用，其主要原因在于这些省份的工业产值占比上升，促进了碳排放量快速增长，尤其以内蒙古最为明显，其工业产值占比的变化促使碳排放量增加 1.08 亿吨，其次是河南、安徽、江西、陕西、四川等。

从能源强度看，大部分省区能源强度的下降对碳减排起到了举足轻重的作用，在 30 个省区中，仅云南、山东、宁夏、海南、新疆 5 个省份的能源强度对碳排放量增长起到了促进作用，其余省份能源强度的变化均抑制了碳排放量增加。能源强度主要取决于生产过程所采用的技术状况，不同的技术条件通常决定了能源的消耗强度。由于不同省区发展水平、技术状况不一，造成了不同省区的能源强度有一定差别。此外，省区总的能源强度也与其产业结构相关，工业、交通运输等高耗能产业占比较高的省份的能源强度也会相对较高。从本文分析结果看，工业能源强度下降是绝大部分省份总能源强度下降的最重要原因，其中辽宁、内蒙古、河南、广东等省份工业能源强度下降对碳排放的抑制作用最为明显。此外，北京、天津、福建、浙江等 21 个省区的非物质生产部门，黑龙江、广东、山东、陕西等 21 个省区的第一产业，山东、安徽、山西等 18 省区的建筑业能源强度变化抑制了碳排放量的增长。然而，绝大部分省区交通运输仓储和邮政业的能源强度促进了碳排放量增加，以山东、广东、内蒙古、云南最为明显；仅有天津、黑龙江、甘肃、福建、贵州 5 个省区的交通运输和仓储邮政业的能源强度对碳排放量起了抑制作用（如图 5 所示）。

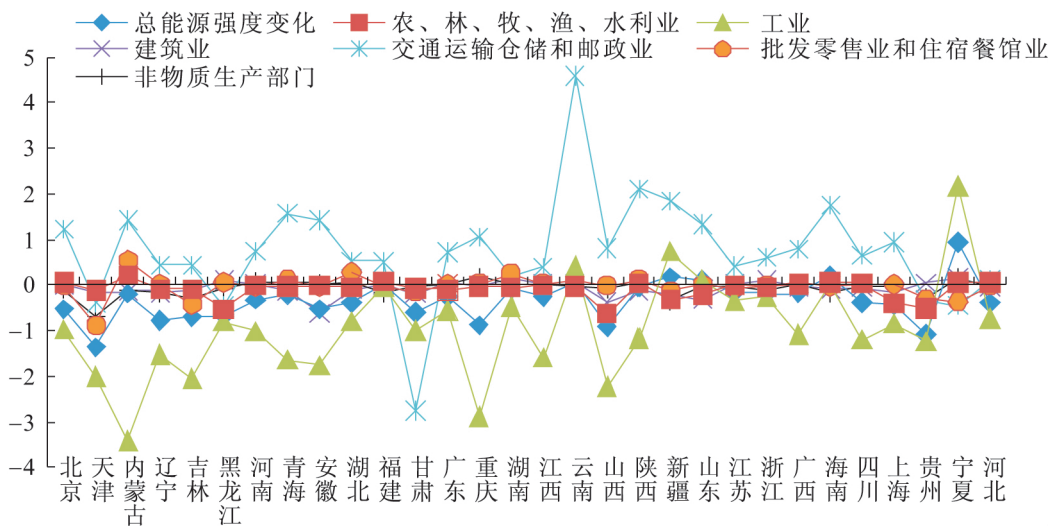


图 5 2000—2012 年各省区各产业能源强度变化（万吨标准煤/亿元）

说明：图中数值为 2012 年省区内各产业能源强度相比 2000 年的变化。

从能源结构看, 绝大多数的省区以煤炭为主的能源消费结构没有改变, 不利于碳减排目标的实现。2000年至2012年, 山东、黑龙江、河北、广东、山西由能源结构变化带来的碳排放增加量分别是4384.26万吨、2152.09万吨、2179.00万吨、1717.53万吨、1193.78万吨, 位居全国前五位。其中, 河北省和广东省主要产生在工业部门, 山东省除工业部门外、交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业、非物质生产部门、生活消费因能源结构变化产生的碳排放增量也占有一定的比重, 其约和工业部门相当。黑龙江省工业部门因能源结构变化产生的碳排放增量占比相对较低, 批发零售住宿和餐饮业、非物质生产部门、生活消费因能源结构变化产生的碳排放量占有很大比重。山西省交通运输和仓储邮政业因能源结构变化产生的碳排放增量为878.55万吨, 占比73.6%, 这表明山西省应该着力调整交通运输和仓储邮政业能源结构, 抑制碳排放的增加。能源结构调整对碳减排做出突出贡献的省份主要有北京、天津、上海, 这三个省区因能源结构调整对碳排放的影响分别为-1016.65万吨、-380.41万吨和-274.61万吨。其余省区的能源结构调整都从一定程度上促进了碳排放量增加。

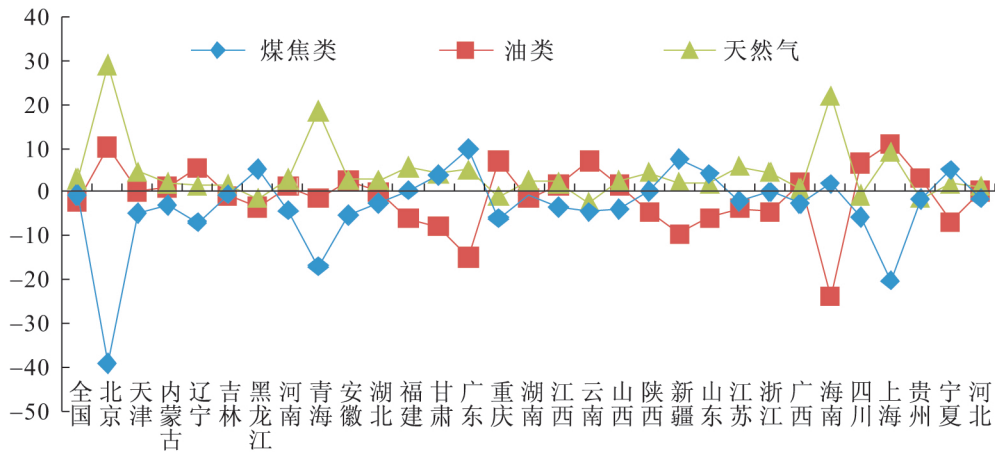


图6 2000—2012年各省区能源结构变化 (%)

说明: 图中数值为2012年省区内能源消耗份额相比2000年的变化。

四、结论与建议

本文从国家、区域和产业三个层面对2000—2012年中国碳排放的变化及其影响因素进行了空间分解分析, 本文主要得出以下结论和建议。

第一, 2000年至2012年全国碳排放量增长近2倍, 其中工业部门占比最高, 交通运输和仓储邮政业、批发零售和住宿餐饮业占比快速上升, 而第一产业、建筑业、其他非物质生产部门和生活消费碳排放占比有所下降。全国产值规模的迅速扩大是推动碳排放量增长的主导力量, 若其他条件不变, 仅是产值规模变化, 理论上碳排放量将远远高于观测水平。协调经济增长与减少碳排放是中国现在及未来发展面临的重要议题。

第二, 能源强度是影响碳排放增量变化趋势的重要因素。能源强度的变化基本上决定了碳排放总量增减的变化方向。2006年之后, 能源强度尤其是工业能源强度的持续下降极大地抑制了全国碳排放量的增加, 对碳减排做出了卓越的贡献。此外, 第一产业、建筑业、非物质生产部门的能源强度下降也从一定程度抑制了碳排放。然而, 交通运输和仓储邮政业的能源强度却在2005年之后出现上升, 大大提高了碳排放增加量。尽管交通运输和仓储邮政业的产值占比在2005年之后开始下降, 产业结构调整抑制着该部门的碳排放量增加, 但该部门能源强度的提升几乎抵消了这一有利

影响。因此,降低交通运输和仓储邮政业的能源强度迫在眉睫,发展绿色交通十分必要。

从省区看,大部分省份工业能源强度的下降对碳减排起到了举足轻重的作用,在30个省区中,仅云南、山东、宁夏、海南、新疆5个省区的工业能源强度对碳排放量增长起了促进作用,其余省区能源强度的变化均抑制了碳排放量增长。广东、上海、内蒙古、北京等省区的交通运输和仓储邮政业的能源强度对碳排放量增长起到了拉升作用。从未来的发展看,中、西部地区的工业进程将继续加快,因此将成为能源强度监测的重点区域。在中、西部地区的工业发展过程中需要采用新设备、新工艺,实施重点节能工程,将能源效率指标作为工业发展的重要考核指标。

第三,不同省区应根据自身实际情况落实碳减排任务。2000年至2012年,山东、内蒙古、江苏、河北、河南碳排放增加量位居全国前五位,占全国碳排放总增加量的39.5%,这五个省份是碳排放量大省,都是碳减排的重点监测对象。但导致这五省碳排放量增加的因素却各不相同,需要区别对待。对江苏省而言,其产业结构调整 and 能源强度下降均对抑制碳排放做出了卓越贡献,其碳排放量的增加是由其产值规模的扩大引致,若要进一步控制碳排放,需要着力改善能源结构,大力发展清洁能源。产业结构调整对山东省碳排放起到了少许抑制作用,但能源强度和能源结构均在促使碳排放量增加,因此,山东省碳减排任务十分艰巨,需要提高能源使用效率与调整能源结构双管齐下。内蒙古能源强度大幅下滑,但高耗能工业占比过高促使其碳排放量快速增长,因此其碳减排的关键在于调整产业结构。河北省产值占比的下降、能源结构和能源强度的下降均对碳减排做出了贡献,其进一步碳减排的着力点依然在能源结构调整上。其他省区尽管碳减排着力点不同,但调整产业结构、能源结构,提高能源使用效率始终是三个重要的方向。

第四,加快产业结构优化调整。本文发现工业部门产值占比是重要的指示指标,在经济不景气、工业产值占比下降的年份,产业结构因子显示均有利于碳减排。由于工业和交通运输仓储业的能源强度远远高于其他产业,因此降低工业和交通运输仓储邮政业占比,大力发展第三产业,提高低碳产业比重,十分有利于控制碳排放量的增长。从省区看,2000—2012年超过半数的省区由产业结构调整带来的碳排放量影响为负值,有利于碳减排。广东、黑龙江、浙江工业或者交通运输和仓储邮政业的产值占比下降,为碳减排做出了卓越的贡献。北京市、上海市和江苏省产业结构调整明显,第三产业的快速发展,产值占比逐步提高,仅有批发零售和住宿餐饮业、非物质生产部门产业结构变化促进了碳排放量增长。由此可见,各省区应根据自身的比较优势,有重点地培育支持第三产业发展,淘汰高耗能工业的落后产能,从而落实碳减排任务。

第五,进入新千年以来,中国的能源结构和省区产值结构并未发生明显改观,致使省区产值结构和能源结构对碳排放的影响很小。绝大多数的省区的能源结构总效应为正值,不利于碳减排目标的实现。山东、黑龙江、河北、广东、山西的能源结构变化带来的碳排放增加量位居全国前五位,但不同省份的产业部门分布不一致,因此不同省区能源结构调整重点应有所不同。例如,山西省交通运输和仓储邮政业因能源结构变化产生的碳排放增量占比该影响因子影响总量的73.6%,这表明山西省应着力调整交通运输和仓储邮政业能源结构,抑制碳排放的增加。能源结构调整对碳减排做出突出贡献的省份主要有北京、天津、上海,其余省区的能源结构调整均促进了碳排放量增长,不利于碳减排。从未来发展看,大力发展清洁能源、减少对传统化石能源的使用依然是长久之策。此外,调整省际发展的平衡性也是未来控制碳排放量的关注点,内蒙古、山东、陕西等高耗能工业占比较高,产值结构也在提高的省区应适度控制其工业占比的提高,大力发展服务业和战略新兴产业。而河北、黑龙江等产值结构下降的省份,也应通过发展低碳产业提高经济发展活力。

需要指出的是,本文还有进一步拓展的空间。首先,囿于数据的可获得性,本文关于产业的分类目前只能比较粗略。如果能获得各大产业内部特别是工业部门内各细分行业的能耗数据,这将有助于提高本文研究结果的精确度,并进一步深化本文的相关分析。其次,本文没有考虑区域间及产

业间的相互影响,这也可在未来的研究中加以深化。

参考文献

- [1] 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,(8).
- [2] 蒋金荷. 中国碳排放量测算及影响因素分析[J]. 资源科学,2011,(4).
- [3] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J]. 经济研究,2010,(4).
- [4] 林伯强,刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略[J]. 经济研究,2010,(8).
- [5] 岳超,胡雪洋,贺灿飞,等. 1995—2007年我国省区碳排放及碳强度的分析——碳排放与社会发展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2010,(4).
- [6] 王锋,冯根福,吴丽华. 中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解[J]. 经济研究,2013,(8).
- [7] 曾贤刚,庞含霜. 我国各省区CO₂排放状况、趋势及其减排对策[J]. 中国软科学,2009,(S).
- [8] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 经济研究,2012,(8).
- [9] 张金灿,仲伟周. 基于随机前沿的我国省域碳排放效率和全要素生产率研究[J]. 软科学,2015,(6).
- [10] 潘家华,张丽峰. 我国碳生产率区域差异性研究[J]. 中国工业经济,2011,(5).
- [11] 周五七,聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究,2012,(9).
- [12] 刘亦文,胡宗义. 中国碳排放效率区域差异性研究——基于三阶段DEA模型和超效率DEA模型的分析[J]. 山西财经大学学报,2015,(2).
- [13] 石敏俊,王妍,张卓颖. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报,2012,(10).
- [14] 钱明霞,路正南,王健. 产业部门碳排放波及效应分析[J]. 中国人口·资源与环境,2014,(12).
- [15] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报,2010,(9).
- [16] 朱永彬,王铮. 中国产业结构优化路径与碳排放趋势预测[J]. 地理科学进展,2014,(12).
- [17] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学,2012,(3).
- [18] Ang, B. W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide[J]. *Energy Policy*, 2005, (7).
- [19] Xu, X. Y., B. W. Ang. Index decomposition analysis applied to CO₂ emission studies[J]. *Ecological Economics*, 2013, (5).
- [20] Ang, B. W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? [J]. *Energy Policy*, 2004, (9).
- [21] Ang, B. W., F. L. Liu, E. P. Chew. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis [J]. *Energy Policy*, 2003, (14).
- [22] Zhang, F. Q., B. W. Ang. Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environmental indicators[J]. *Energy Economics*, 2001, (2).

(责任编辑 朱 蓓)