

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究

蒋晶晶¹, 叶斌², 计军平¹, 马晓明^{1,3*}

(1. 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, 深圳 518055; 2. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 3. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 现阶段碳强度约束性指标和总量控制碳排放权交易试点是中国温室气体减排的两种重要手段, 研究各行业及其相关因素对全国碳强度和碳排放变化的影响机制对制定行业碳强度减排政策和选择碳交易体系纳管行业具有重要意义. 运用 LMDI 模型对 1996~2010 年中国碳强度以及碳排放变化进行了行业贡献分解. 结果表明, 全国碳强度下降受各行业碳强度和增加值占比变化的影响, 前者贡献较大, 后者贡献较小; 全国碳排放增长受各行业碳强度和增加值变化的影响, 前者起到抑制效应, 后者发挥决定性的促进作用. 电力、热力的生产和供应业, 非金属矿物制品业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 交通运输、仓储及邮电通迅业, 化学原料及化学制品制造业等 5 个行业对全国碳强度下降和碳排放增长的贡献最大; 石油加工及炼焦业和建筑业对全国碳强度下降贡献较小, 但对碳排放增长贡献较大; 它们是我国碳强度约束和总量控制试点应当重点关注的减排领域. 第三产业对全国碳排放增长的贡献呈上升趋势, 尤其是交通运输、仓储及邮电通迅业和批发和零售贸易业、餐饮业, 应当逐步加强对其进行碳排放管控.

关键词: 碳强度; 碳排放; 行业贡献分解; LMDI; 碳减排

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4378-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.047

Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth

JIANG Jing-jing¹, YE Bin², JI Jun-ping¹, MA Xiao-ming^{1,3}

(1. Key Laboratory of Urban Environment, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. School of Environment Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The binding carbon intensity index and the pilot “cap-and-trade” emission trading scheme are two important approaches currently applied by China to mitigate its greenhouse gases emissions. It is of great significance to research the influence mechanism of related factors by industry on the dynamics of national carbon intensity and emission, not only for setting industry-specified intensity reduction target but also for setting industry coverage of the ETS. Two LMDI models were applied in this paper to decompose industry contributions to the changes of China's carbon intensity and carbon emission during the period of 1996-2010. Empirical results showed that: The decline of national carbon intensity was jointly determined by the changes of carbon intensities and the added value proportions of all industries, and the impact of industry carbon intensities was larger. The increase of national carbon emission was jointly determined by the changes of carbon intensities and the added value of all industries. The former had inhibitory effect whilst the latter had decisive promoting effect. The five industries making the largest contribution to the changes of national carbon emission and carbon intensity included industries of electricity, nonmetal mineral, ferrous metal, transportation service, chemical materials, which were followed by the industries of agriculture, coal mining and processing, petroleum and natural gas extraction. Petroleum refining and coking industry and construction industry made small contribution to the decline of national carbon intensity, but made large contribution to the growth of national carbon emission. The contributions of service industries to national carbon emission growth showed a rising trend, especially those of transportation service industry, wholesaling, retailing and catering service industry.

Key words: carbon intensity; carbon emission; industry contribution decomposition; LMDI; carbon emission abatement

过去 30 年, 中国经济发展取得了巨大成就, 但碳排放年均增速由 1990~2000 年的 3.3% 增长至 2000~2010 年的 9.2%^[1], 成为了世界上碳排放最大的国家. 截至 2013 年底, 中国碳排放在全球碳排放总量中所占比例攀升到 29%, 并且 2008 年以来 80% 的全球新增碳排放来自于中国^[2]. 中国面临日益严峻的碳减排压力, 作为一个负责任的发展中大国, 中国正努力探索一条符合现阶段国情和发展实

际的温室气体减排道路. 2009 年, 中国政府提出了“到 2020 年单位国内生产总值的 CO₂ 排放较 2005 年下降 40%~45%”的温室气体减排行动目标; 2011 年, 这一碳强度下降目标被纳入“十二五”发展

收稿日期: 2014-04-27; 修订日期: 2014-06-18

基金项目: 深圳市环境科研项目(4403012012000227)

作者简介: 蒋晶晶(1988~), 女, 博士, 主要研究方向为环境经济学、碳交易, E-mail: jiangpku66@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xmama@pku.edu.cn

规划,成为了我国经济社会发展的约束性指标.与此同时,中国政府启动了7省市“总量控制与配额交易”碳排放权交易试点工作,以区域为单元研究温室气体排放总量控制机制和排放权分配机制,推动逐步建立国内碳排放交易市场.总的来说,中国已经基本形成了以碳强度约束为主、以试点范围总量控制机制为辅的温室气体减排思路.在此背景下,研究国民经济不同部门或行业对中国碳强度和碳排放变化的影响机制具有重要意义,不仅能够为相关部门制定差异化的行业碳强度减排目标提供参考,而且对选择碳交易体系纳管行业具有指导作用.

现有文献主要集中于从宏观角度分析经济发展、生产方式、产业结构、能源效率等驱动因素对中国碳强度和碳排放变化的影响^[3~12],部分文献进一步从区域角度研究了不同省区相关驱动因素的贡献分解^[13~15],同时从部门或行业角度探析我国碳强度和碳排放变化影响机制的相关研究也日益增加^[16~23].虽然现有研究对揭示我国碳排放的行业特点具有重要参考价值,但仍旧存在一定局限性.其一,这些研究主要集中于工业行业,很少涉及第一产业、建筑业及其碳排放增长较为迅速的第三产业,未对国内生产总值碳排放形成完全的行业分解.其二,通常针对化石能源燃烧碳排放,忽略了工业生产过程碳排放.现有研究指出^[24],过程碳排放在中国碳排放总量中所占比重达到20%左右且呈现增长趋势;化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业等行业的过程碳排放占比更高,它们既是我国碳减排的重点行业,也是国际碳市场首先覆盖的行业,忽略过程碳排放可能会导致行业贡献分解结果出现较大偏差.有鉴于此,本研究尝试将国民经济所有行业以及化石燃料燃烧和生产过程碳排放统一纳入核算框架,系统地分析1996~2010年各行业及其相关变量对我国碳排放和碳强度变化的影响机制.

指数分解分析(index decomposition analysis, IDA)是一种研究特定因素对某一指标直接影响的方法,近年来被越来越多地应用于碳排放领域的相关研究^[3,6,7,14,25,26].IDA主要包括Laspeyres和Divisia两大类分解法,每类分解方法分别具有加法和乘法两种分解形式.其中,Ang等^[27]提出的对数平均Divisia指数分解法(logarithmic mean divisia index, LMDI)能够有效解决数据零负值问题和灵活适应因素变化,而且可以实现完全分解,因此适用性较高^[28~32].借鉴已有研究的结论,同时考虑不同行

业碳排放的显著差异和少数行业排放占比较低的事实,本研究采用LMDI分解法研究各行业及其相关驱动因素对中国碳强度和碳排放变化的影响.

1 模型因素选取和数据处理

1.1 模型因素选取

王锋等^[14]构建了碳强度的四因素分解模型和二因素分解模型,他们的研究指出:碳排放核算多数假设燃料排放因子不变,四因素模型实质只考察了3个因素的影响;而且由于对数平均函数只是权重函数的近似值,其取值次数越多可能导致的最终分解误差就越大,二因素模型分解的结果较为准确.本研究重点研究国民经济不同行业碳强度与全国碳强度和碳排放的关系,因此将行业碳强度作为一个单独驱动因素,分别构建中国碳强度和碳排放二因素分解模型.

1.1.1 碳强度两因素分解

碳强度二因素分解将全国碳强度分解为42个行业的2变量乘积之和.假设 I 、 C 、 Y 分别代表碳强度、碳排放和经济产出, i 代表第 i 个行业, t 表示年, $YS_i(t)$ 为 t 时刻 i 行业增加值占国内总产值的比例,全国碳强度可表示为式(1):

$$I(t) = \frac{C(t)}{Y(t)} = \sum_{i=1}^{42} \frac{I_i(t)Y_i(t)}{Y(t)} = \sum_{i=1}^{42} I_i(t)YS_i(t) \quad (1)$$

本研究借鉴已有研究的处理方法^[14,33]对式(1)进行推导,假设 $C_i(t^*)$ 和 $C(t^*)$ 分别为 C_i 和 C 在 t^* 时刻的取值且 $t^* \in [t-1, t]$,那么碳强度在 $[t-1, t]$ 时间段的变化可分解为式(2):

$$\ln \frac{I(t)}{I(t-1)} = \sum_{i=1}^{42} \frac{C_i(t^*)}{C(t^*)} \left[\ln \frac{I_i(t)}{I_i(t-1)} + \ln \frac{YS_i(t)}{YS_i(t-1)} \right] \quad (2)$$

依据公式(2)进行类推,可将 t 时刻全国碳强度相对于基期($t=0$)的变化分解为 t 个时间阶段内42个国民经济行业碳强度变化和产出占比变化的加权平均值,而各行业碳排在碳排放总量中的占比为其权数因子,具体见式(3):

$$\ln \frac{I(t)}{I(0)} = \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^{42} \frac{C_i(k^*)}{C(k^*)} \times \left[\ln \frac{I_i(k)}{I_i(k-1)} + \ln \frac{YS_i(k)}{YS_i(k-1)} \right] \quad (3)$$

本研究运用对数平均函数计算公式(3)中的权数因子 $C_i(k^*)/C(k^*)$,表示为式(4):

$$\frac{C_i(k^*)}{C(k^*)} = \frac{[C_i(k) - C_i(k-1)] / [\ln C_i(k) - \ln C_i(k-1)]}{[C(k) - C(k-1)] / [\ln C(k) - \ln C(k-1)]} \quad (4)$$

1.1.2 碳排放两因素分解

同样,碳排放二因素分解模型也将全国碳排放分解为 42 个行业的 2 变量乘积之和,但驱动变量与碳强度分解模型不同,具体如式(5):

$$C^t = I^t Y^t = \sum_{i=1}^{42} C_i^t = \sum_{i=1}^{42} I_i^t Y_i^t \quad (5)$$

运用与上文相同的推导方式,可得到式(6),可以看出: t 时刻全国碳排放相对于基期的变化可分解为 t 个时间阶段内 42 个国民经济行业的碳强度变化和产出水平变化的加权平均值,权数仍旧为行业碳排放占比。

$$\ln \frac{C(t)}{C(0)} = \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^{42} \frac{C_i(k^*)}{C(k^*)} \times \left[\ln \frac{I_i(k)}{I_i(k-1)} + \ln \frac{Y_i(k)}{Y_i(k-1)} \right] \quad (6)$$

1.2 数据处理

根据模型结构,1996~2010 年中国国民经济各行业的碳排放和增加值时间序列数据是研究中所需要的基础数据。

1.2.1 碳排放数据

本研究考虑能源活动碳排放和工业生产过程碳排放,前者指各个行业化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放,后者则指部分行业中生产过程产生的碳排放,例如化学原料及化学制品制造业中,合成氨、电石和纯碱的生产产生的过程碳排放;非金属矿物制品业中,水泥的生产产生的过程碳排放;黑色金属冶炼及压延加工业中,铬铁、结晶硅、其他铁的生产产生的过程碳排放等。行业碳排放由能源活动碳排放和生产过程碳排放加总获得。IPCC 指南^[34]给出了估算化石燃料碳排放的通用决策树,由于 IPCC 缺省排放系数难以准确体现中国碳排放现状且工厂级排放系数难以获取,本研究选择采用方法 2 以中国分部门排放系数估算化石燃料燃烧碳排放;工业生产过程碳排放根据相关行业产品产量和单位产品排放系数进行估算。

分行业碳排放估算过程需要排放活动数据和排放系数数据。前者包括化石燃料消耗量和工业产品产量,其中:分行业的能源消耗数据取自文献[35],并采用了最新修订数据。为避免重复计算,本研究

仅考虑各行业的一次化石能源消耗,不考虑电力消耗;同时去除非燃烧的化石燃料消耗量,以获得用于燃烧的化石燃料消耗量。对于存在生产过程碳排放的行业,行业产品产量数据来源于文献[36]。后者则包括单位化石燃料燃烧碳排放量和单位工业产品产量碳排放量,其中:化石燃料燃烧排放系数的选择借鉴国家发改委省级温室气体清单编制指南^[37]和部分学者的研究成果^[38,39],采用比较接近我国实际情况的中国分部门排放系数;工业生产过程排放系数中,非金属矿物制品业水泥排放系数取自 Lei 等^[39]的研究,其他行业排放系数取自 IPCC 指南^[34]给出的参考值。

本研究根据上述思路估算中国分行业碳排放量,然后将其加总以获得全国碳排放总量,并与国内外权威研究机构公布数据进行比较。本研究估算的 2004 年碳排放与国家发展和改革委员会公布数据(国家发改委碳排放核算中包括化石燃料使用排放以及水泥、石灰及电石生产排放)的偏差在 3% 左右,同时 1996~2010 年估算碳排放与美国橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心(CDIAC)公布数据(CDIAC 碳排放核算中包含化石燃料使用排放和水泥生产排放)均较为接近。总体来看,可以认为本研究碳排放估算结果具有一定可靠性。

1.2.2 增加值数据

本研究以 1990 年为基期计算我国国民经济分行业可比价增加值。利用第一产业和第三产业增加值指数分别将农林牧渔水利业和服务业行业现价增加值转换为可比价增加值,同时借鉴文献[40]采取价格指数缩减法对工业分行业现价增加值进行处理,从而获得 1996~2010 年分行业可比价增加值时间序列。

现价增加值以及相应指数数据来源于文献[36,41,42]。1996~2007 年,中国国家统计局年鉴直接给出了我国工业分行业的现价增加值数据,可利用工业品出厂价格指数构建工业分行业价格平减指数,从而直接计算工业分行业的可比价增加值指标。2008 年以后,国家统计局年鉴不再公布工业分行业年度增加值和增加值率数据,本研究假设 2009~2010 年各工业行业增加值率维持在 2006~2008 年期间的平均水平,根据 2009~2010 年可比价工业产值(以价格指数缩减法获得)估算工业分行业可比价增加值。获得分行业可比价增加值后,本研究将行业数据进行加总以获得可比价国内生产总值时间序列。

1.2.3 碳强度数据

为了使碳排放行业划分具有时间连续性并且能

够与我国国民经济行业划分相一致,根据《国民经济行业分类与代码》(GB/T 4754-2011)将“其他采矿业”、“工艺品及其他制造业”、“废弃资源和废旧材料回收加工业”合并成为“其他工业行业”,调整后为44个碳排放行业、42个国民经济行业。虽然城镇居民生活消费和农村居民生活消费是碳排放部门,但不是国民经济行业,因此全国分解模型中这两个部门不予考虑,只针对42个国民经济行业。

对分行业基础数据进行相应调整,获得42个行业碳排放和可比价增加值,进而计算各行业可比价碳强度。全国碳排放为42个国民经济行业碳排放

总和,而全国可比价总产值为其可比价增加值之和,前者除以后者可得到全国可比价碳强度。

2 结果与分析

本研究分别构建二因素分解模型对2010年全国碳强度和碳排放相对于1996年的变化进行行业贡献分解,并运用Matlab 2012b编程实现了模型的计算过程,具体结果详见表1和表2。

2.1 碳强度行业贡献分解

表1给出了1996~2010年我国碳强度下降的行业贡献分解结果。可以看出,1996~2010年中国

表1 1996~2010年中国碳强度下降的行业贡献分解/%

Table 1 Decomposition of industry contribution to China's carbon intensity reduction/%

碳强度两因素分解	1996 ~ 2010 年				1996 ~ 2005 年			2006 ~ 2010 年		
	碳强度实际变化率	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化
全国	-61.98	-61.94	-57.96	-3.99	-39.03	-37.42	-1.61	-22.90	-20.88	-2.03
电力、热力的生产和供应业	-56.61	-23.72	-22.70	-1.02	-13.61	-15.15	1.54	-9.59	-7.87	-1.72
非金属矿物制品业	-60.96	-9.12	-8.98	-0.14	-6.44	-3.51	-2.92	-2.95	-4.65	1.69
黑色金属冶炼及压延加工业	-62.44	-5.92	-8.42	2.50	-1.61	-5.10	3.49	-3.50	-3.24	-0.26
化学原料及化学制品制造业	-81.91	-5.21	-5.77	0.56	-4.20	-4.43	0.23	-1.36	-1.64	0.28
交通运输、仓储及邮电通讯业	-27.21	-3.94	-1.30	-2.65	-2.48	-1.20	-1.28	-1.46	-0.24	-1.21
其他服务业 ¹⁾	-59.15	-1.60	-1.10	-0.50	-1.27	-0.98	-0.30	-0.43	-0.23	-0.20
农、林、牧、渔、水利业	2.96	-1.04	0.04	-1.08	-0.58	0.24	-0.82	-0.43	-0.11	-0.31
纺织业	-84.96	-0.99	-0.94	-0.05	-0.80	-0.80	0.00	-0.26	-0.22	-0.04
煤炭采选业	-48.49	-0.89	-0.64	-0.25	-0.41	-0.10	-0.31	-0.42	-0.42	0.00
批发和零售贸易业、餐饮业	-64.93	-0.81	-0.60	-0.21	-0.63	-0.40	-0.23	-0.22	-0.21	-0.02
石油和天然气开采业	22.91	-0.73	0.19	-0.91	-0.57	0.17	-0.73	-0.20	0.04	-0.24
造纸及纸制品业	-81.40	-0.70	-0.77	0.07	-0.52	-0.61	0.09	-0.21	-0.20	0.00
有色金属冶炼及压延加工业	-82.39	-0.61	-0.94	0.33	-0.40	-0.69	0.29	-0.21	-0.29	0.07
农副食品加工业	-84.55	-0.60	-0.63	0.03	-0.54	-0.56	0.02	-0.13	-0.14	0.01
通用设备制造业	-88.08	-0.60	-0.71	0.11	-0.58	-0.63	0.06	-0.10	-0.15	0.05
石油加工及炼焦业	72.28	-0.58	0.60	-1.18	-0.06	0.83	-0.89	-0.41	-0.06	-0.35
建筑业	-19.68	-0.47	-0.12	-0.36	-0.43	-0.08	-0.34	-0.10	-0.04	-0.06
食品制造业	-89.25	-0.44	-0.53	0.09	-0.41	-0.50	0.09	-0.08	-0.09	0.01
其他工业部门	-92.74	-0.43	-0.34	-0.09	-0.46	-0.33	-0.13	-0.04	-0.06	0.01
饮料制造业	-85.34	-0.39	-0.38	-0.02	-0.34	-0.30	-0.04	-0.09	-0.10	0.01
金属制品业	-86.58	-0.34	-0.34	0.00	-0.32	-0.29	-0.03	-0.06	-0.08	0.01
交通运输设备制造业	-88.71	-0.34	-0.54	0.21	-0.27	-0.42	0.14	-0.09	-0.15	0.07
专用设备制造业	-88.33	-0.31	-0.38	0.07	-0.29	-0.30	0.01	-0.06	-0.10	0.04
医药制造业	-92.62	-0.30	-0.44	0.14	-0.28	-0.44	0.16	-0.06	-0.07	0.01
化学纤维制造业	-88.79	-0.24	-0.21	-0.03	-0.24	-0.21	-0.03	-0.03	-0.03	-0.01
橡胶制品业	-85.38	-0.21	-0.22	0.01	-0.18	-0.20	0.02	-0.05	-0.04	0.00
非金属矿采选业	-61.04	-0.18	-0.09	-0.09	-0.13	0.01	-0.14	-0.06	-0.08	0.02
电气机械及器材制造业	-90.59	-0.18	-0.25	0.07	-0.18	-0.24	0.07	-0.03	-0.04	0.01
燃气生产和供应业	-98.72	-0.17	-0.37	0.19	-0.12	-0.32	0.20	-0.05	-0.08	0.03
木材加工及竹、藤、棕、草制品业	-86.88	-0.13	-0.18	0.05	-0.08	-0.11	0.03	-0.05	-0.07	0.02
烟草加工业	-90.94	-0.11	-0.09	-0.02	-0.11	-0.08	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
塑料制品业	-84.49	-0.11	-0.13	0.02	-0.10	-0.11	0.02	-0.02	-0.03	0.01
有色金属矿采选业	-85.89	-0.11	-0.09	-0.01	-0.10	-0.09	-0.01	-0.02	-0.02	0.00
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	-93.33	-0.08	-0.21	0.13	-0.05	-0.21	0.16	-0.03	-0.03	0.00
黑色金属矿采选业	-84.52	-0.08	-0.13	0.05	-0.06	-0.07	0.01	-0.02	-0.05	0.03
服装及其他纤维制品制造业	-68.82	-0.08	-0.07	-0.01	-0.04	-0.03	-0.01	-0.03	-0.03	0.00
皮革、毛皮、羽绒及其制品业	-80.86	-0.06	-0.05	-0.01	-0.04	-0.03	-0.01	-0.02	-0.02	0.00
印刷业、记录媒介的复制	-88.89	-0.04	-0.05	0.01	-0.04	-0.05	0.01	-0.01	-0.01	0.00
仪器仪表、文化办公用机械制造业	-89.51	-0.03	-0.04	0.01	-0.04	-0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
家具制造业	-85.17	-0.03	-0.03	0.00	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
文教体育用品制造业	-78.48	-0.02	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00
水的生产和供应业	-23.34	-0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00

1) “其他服务业”代表交通运输、仓储及邮电通讯业,批发和零售贸易业、餐饮业之外的服务业,非单一行业,下同

碳强度实际下降 61.98%,二因素分解合计影响为 -61.94% (负号表示促进全国碳强度或碳排放下降,以下同),分解影响接近于实际变化表示该模型分解结果较为准确. 全国碳强度的变化受各行业碳强度变化和增加值占比变化的影响,前者贡献为 -57.96%,后者为 -3.99%,因此各行业碳强度变化是驱动全国碳强度下降的主要因素.

分行业来看,42 个行业对全国碳强度下降均起推动作用. 电力、热力的生产和供应业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼及压延加工业,化学原料及化学制品制造业,交通运输、仓储及邮电通迅业是对全国碳强度下降贡献最大的 5 个行业,影响作用分别为 -23.72%、-9.12%、-5.92%、-5.21% 和 -3.94%,合计贡献达 -47.92%;其次是农、林、牧、渔、水利业,纺织业,煤炭采选业,批发和零售贸易业、餐饮业,石油和天然气开采业等 5 个行业,合计贡献约为 -4.44%;上述 10 个行业的合计贡献已达 -52.36%,构成了我国碳强度下降的主要行业贡献. 比较表 1 中第 2 列和第 3 列可以看出,医药制造业、燃气生产和供应业、通信设备、计算机及其他电子设备制造业 2010 年碳强度较 1996 年分别下降了 92.62%、98.73%、93.33%,行业实际碳强度下降十分迅速;与之相比,电力、热力的生产和供应业、非金属矿物制品业等行业碳强度绝对下降率较低,但对全国碳强度下降的贡献更加显著,主要原因在于这些行业碳排放量在全国碳排放总量中所占比例较高,因而行业贡献的权数因子更大. 鉴于此,中国节能减排在推动产业结构转型的同时,还应重点关注高碳排放行业. 另外,农、林、牧、渔、水利业,石油和天然气开采业和石油加工及炼焦业的碳排放强度呈绝对增长,研究期间内的增长率分别为 2.96%、22.91% 和 72.28%;但由于增加值占比下降,它们仍对全国碳强度下降起推动作用. 分部门来看,第一产业、重工业、轻工业、建筑业和第三产业对全国碳强度下降的贡献分别是 -1.04%、-49.65%、-4.43%、-0.47% 和 -6.35%. 可见重工业在全国碳强度下降中作用最大,其次是第三产业和轻工业,它们是中国实现温室气体减排行动目标的关键.

分阶段来看,行业碳强度和行业增加值占比变化在 1996~2005 年对全国碳强度下降的综合影响为 -39.03%,年均综合影响为 -6.30%;在 2006~2010 年的综合影响为 -22.90%,年均综合影响为 -7.39%;后一阶段的年均综合影响大于前一阶

段,表明行业碳强度和增加值占比变化对全国碳强度下降的年均贡献增大,全国碳强度下降速度加快. 主要原因在于,“十一五”期间我国将能源强度作为约束性指标,这一约束抑制了化石能源消耗产生的温室气体排放,进而加速了行业和全国碳强度下降. 除此之外,1996~2005 年期间行业碳强度变化对全国碳强度下降的影响为 -37.42%,行业增加值占比变化的影响为 -1.61%,后者在综合影响中占比 4.14%;2006~2010 年行业碳强度变化的影响为 -20.88%,行业增加值占比变化的影响为 -2.03%,后者在综合影响中占比 8.85%. 行业增加值占比变化的影响在因素综合影响中所占比例上升,表明随着行业碳强度的下降,产业结构调整和工业结构转变将在全国碳强度下降中发挥着日益重要的贡献.

2.2 碳排放行业贡献分解

表 2 给出了 1996~2010 年我国碳排放增长的行业贡献分解结果. 可以看出,1996~2010 年中国碳排放实际增长了 156.10%,年均增长率为 3.23%. 全国碳排放增长受各行业碳强度和增加值变化的共同作用,其中行业碳强度变化的贡献为 -150.08%,行业增加值变化的贡献为 306.12%,二者的综合影响为 156.04%,基本实现了对全国碳排放实际增长的完全分解. 其中,行业碳强度变化对全国碳排放起抑制作用,但行业增加值变化发挥了更大的推动作用,最终导致中国碳排放呈现稳步增长. 总体上,单位 GDP 碳排放强度的下降有效减缓了我国由产出规模扩张驱动的碳排放增长,未来我国应当继续大力推动低碳经济发展,促进碳排放与 GDP 彻底脱钩.

分行业来看,2010 年电力、热力的生产和供应业,黑色金属冶炼及压延加工业,非金属矿物制品业,交通运输、仓储及邮电通迅业以及石油加工及炼焦业碳排放分别较 1996 年增长了 184.37%、248.14%、162.29%、154.45% 和 338.17%,行业实际碳排放幅度较大;同时这 5 个行业对全国碳排放增长的贡献最大,分别为 75.72%、28.79%、23.88%、9.78% 和 4.34%,合计贡献达到 142.50%,是我国碳排放增长的主要行业来源. 与之相反,医药制造业、纺织业、有色金属矿采选业、饮料制造业、通用设备制造业、化学纤维制造业、烟草加工业等行业在全国碳排放增长中发挥抑制作用,但合计影响仅为 -1% 左右. 其中,医药制造业和通用设备制造业 2010 年碳排放量较 2005 年呈绝

表 2 1996 ~ 2010 年中国碳排放增长的行业贡献分解/%

Table 2 Decomposition of industry contribution to China's carbon emission growth/%

碳强度两因素分解	1996 ~ 2010 年				1996 ~ 2005 年			2006 ~ 2010 年		
	碳强度实际变化率	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化	两因素综合	碳强度变化	增加值占比变化
合计	156.10	156.04	-150.08	306.12	82.38	-65.05	147.43	73.66	-93.31	166.96
电力、热力的生产和供应业	184.37	75.72	-58.79	134.50	40.40	-26.34	66.73	35.07	-35.20	70.27
黑色金属冶炼及压延加工业	248.14	28.79	-21.81	50.59	15.90	-8.86	24.75	12.49	-14.50	26.98
非金属矿物制品业	162.29	23.88	-23.26	47.14	11.63	-6.11	17.74	12.81	-20.76	33.57
交通运输、仓储及邮电通讯业	154.45	9.78	-3.36	13.14	5.23	-2.08	7.31	4.51	-1.09	5.60
石油加工及炼焦业	338.17	4.34	1.55	2.79	2.75	1.44	1.31	1.32	-0.26	1.58
化学原料及化学品制造业	47.50	2.64	-14.93	17.57	0.82	-7.70	8.52	2.15	-7.33	9.48
煤炭采选业	163.77	2.35	-1.66	4.00	1.44	-0.17	1.61	0.80	-1.89	2.69
建筑业	224.43	2.13	-0.30	2.43	0.90	-0.15	1.05	1.36	-0.16	1.52
其他服务业	72.78	1.60	-2.85	4.45	0.79	-1.70	2.49	0.84	-1.04	1.87
石油和天然气开采业	105.24	1.29	0.49	0.80	0.79	0.29	0.51	0.43	0.18	0.25
农、林、牧、渔、水利业	75.59	1.20	0.11	1.09	0.98	0.41	0.57	0.01	-0.51	0.52
有色金属冶炼及压延加工业	117.27	1.07	-2.43	3.50	0.59	-1.20	1.80	0.46	-1.28	1.73
批发和零售贸易业、餐饮业	61.94	0.62	-1.55	2.17	0.31	-0.70	1.01	0.32	-0.92	1.24
造纸及纸制品业	44.98	0.43	-1.99	2.42	0.28	-1.06	1.34	0.12	-0.92	1.03
交通运输设备制造业	76.99	0.33	-1.40	1.74	0.15	-0.72	0.87	0.20	-0.69	0.89
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	121.47	0.16	-0.54	0.70	0.10	-0.36	0.46	0.05	-0.14	0.18
黑色金属矿采选业	122.26	0.13	-0.33	0.46	0.04	-0.13	0.17	0.10	-0.23	0.33
非金属矿采选业	44.81	0.12	-0.24	0.37	0.09	0.02	0.07	0.01	-0.36	0.37
木材加工及竹、藤、棕、草制品业	56.62	0.11	-0.47	0.58	0.09	-0.19	0.28	0.01	-0.31	0.32
服装及其他纤维制品制造业	86.93	0.10	-0.17	0.28	0.08	-0.06	0.13	0.01	-0.14	0.15
农副食品加工业	16.81	0.09	-1.64	1.74	0.00	-0.97	0.97	0.12	-0.62	0.74
专用设备制造业	33.80	0.017	-0.98	1.05	-0.04	-0.53	0.49	0.14	-0.45	0.59
塑料制品业	36.66	0.03	-0.34	0.37	0.00	-0.19	0.20	0.04	-0.13	0.17
皮鞋、毛皮、羽绒及其制品业	9.61	0.02	-0.13	0.15	0.03	-0.06	0.08	-0.01	-0.08	0.06
电气机械及器材制造业	24.45	0.01	-0.64	0.66	-0.04	-0.42	0.38	0.08	-0.17	0.26
水的生产和供应业	43.52	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01
文教体育用品制造业	29.07	0.01	-0.06	0.07	0.00	-0.04	0.04	0.01	-0.02	0.03
家具制造业	20.32	0.00	-0.08	0.08	0.00	-0.05	0.05	0.01	-0.02	0.03
印刷业、记录媒介的复制	1.92	0.00	-0.14	0.14	0.00	-0.09	0.09	0.01	-0.03	0.04
仪器仪表、文化办公用机械制造业	8.28	0.00	-0.11	0.11	-0.01	-0.08	0.07	0.02	-0.02	0.03
橡胶制品业	7.14	0.00	-0.56	0.56	-0.01	-0.34	0.33	0.02	-0.19	0.21
医药制造业	2.36	-0.02	-1.15	1.13	-0.04	-0.76	0.72	0.05	-0.30	0.34
燃气生产和供应业	-33.38	-0.02	-0.95	0.93	0.04	-0.55	0.59	-0.09	-0.36	0.28
金属制品业	-5.10	-0.05	-0.87	0.82	-0.08	-0.51	0.43	0.05	-0.34	0.39
烟草加工业	-56.35	-0.06	-0.24	0.18	-0.03	-0.14	0.12	-0.03	-0.08	0.05
化学纤维制造业	-44.38	-0.06	-0.54	0.47	-0.04	-0.36	0.33	-0.02	-0.12	0.10
通用设备制造业	24.62	-0.06	-1.83	1.77	-0.25	-1.10	0.85	0.31	-0.66	0.97
饮料制造业	6.88	-0.06	-0.97	0.91	-0.04	-0.51	0.47	-0.01	-0.46	0.44
有色金属矿采选业	-28.21	-0.07	-0.24	0.17	-0.06	-0.16	0.10	0.01	-0.07	0.08
食品制造业	-0.47	-0.10	-1.36	1.27	-0.12	-0.87	0.75	0.07	-0.40	0.47
纺织业	-10.36	-0.13	-2.43	2.29	-0.02	-1.39	1.36	-0.14	-0.98	0.84
其他工业部门	-59.04	-0.36	-0.87	0.51	-0.29	-0.57	0.28	-0.01	-0.25	0.23

对增长,但由于行业碳强度下降幅度较大,它们对全国碳排放增长仍旧起抑制作用;纺织业、食品制造业、有色金属矿采选业、化学纤维制造业、烟草加工业等行业碳排放量绝对下降,同时抑制全国碳排放增长。分部门来看,第一产业、重工业、轻工业、建筑业和第三产业的贡献分别为 1.20%、

140.83%、-0.13%、2.13%、12.00%,重工业是对全国碳排放增长贡献最大的部门,其次是第三产业,轻工业则对全国碳排放增长起抑制作用,但由于权数较小其影响作用较弱。鉴于此,我国应当加大对传统能源密集型重工业行业的节能减排力度,尝试将这些行业首先纳入“总量控制与配额交易”碳

排放交易体系管控范围,同时加快我国工业结构的转型升级。

分阶段来看,1996~2005年行业碳强度和增加值变化对全国碳排放增长的综合影响为82.38%,年均综合影响为8.24%,其中行业碳强度下降的年均贡献为-6.51%,行业增加值增长的年均贡献为14.74%;2006~2010年期间年均综合影响增长至14.73%,行业碳强度和增加值变化的年均贡献分别为-18.66%和33.39%。行业碳强度下降的年均贡献由-6.51%上升至-18.66%,同时行业增加值增长的年均贡献由14.74%上升至33.39%,说明“十一五”期间虽然碳强度下降对我国碳排放增长的抑制作用增强,但产出规模的迅速扩张对碳排放增长的促进作用更加显著,最终导致我国碳排放年均增长速度加快。电力、热力的生产和供应业,黑色金属冶炼及压延加工业等5个行业在全国碳排放增长中的贡献比例呈下降趋势,由1996~2005年的92.15%下降至2006~2010年的89.87%;机械设备制造、食品饮料加工制造、塑料橡胶制品、建筑及批发零售贸易、餐饮等行业的贡献比例则呈现上升趋势。总体上,第一产业和重工业对全国碳排放增长的驱动作用减弱,但轻工业、建筑业和第三产业的驱动作用日益增强。这意味着,在我国产业结构转型和工业结构优化升级过程中,碳排放结构及其增长驱动因素同时发生着动态变化,因此碳强度指标分解和碳交易相关政策的制定也应当根据实际情况及时进行动态调整。

3 讨论

全国碳强度和碳排放变化的影响机制研究对于我国制定行业碳强度减排目标和选择碳交易体系纳管行业具有重要意义。王栋等^[20]研究认为产业能源消耗强度下降是我国碳减排的主要贡献因素,降低各产业、尤其是能源工业与重制造业的能耗强度是抑制我国碳排放增长的重要途径。曹孜等^[17]认为重工业和采掘业碳排放与产值之间的相关关系较强,建议我国的低碳经济建设应当限制高耗能产业的发展。肖宏伟等^[19]研究指出,促使工业碳强度的下降需要加大对电力、热力的生产和供应业,石油加工、炼焦及核燃料加工业,黑色金属冶炼及压延加工业,有色金属冶炼及压延加工业,非金属矿物制品业等行业节能减排的监控力度。

本研究利用LMDI方法对中国碳强度和碳排放变化进行了行业贡献分解。1996~2010年期间我国

碳强度实际下降了61.98%,碳排放实际增长了156.10%;全国碳强度下降由各行业碳强度和增加值占比变化共同决定,其中行业碳强度变化贡献较大,产业结构变化贡献较小;而全国碳排放增长主要受各行业碳强度和增加值变化的影响,前者一定程度上抑制了碳排放增长,但产出规模扩张则发挥着决定性的促进效应。应当注意的是,随着行业碳强度的持续下降,产业结构调整 and 工业结构优化升级将在全国碳强度和碳排放变化中发挥日益重要的作用。电力、热力的生产和供应业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼及压延加工业,交通运输、仓储及邮电通讯业,化学原料及化学制品制造业等5个行业是对我国碳强度下降以及碳排放增长贡献作用最大的行业,同时也是碳排放量占比最高和行业贡献权数因子最大的行业。因此,它们既是相关部门制定行业碳强度减排政策时应当重点关注的行业,也是试点地区和未来全国碳交易体系应当首先考虑纳入管控范围的行业。其次是农、林、牧、渔、水利业,煤炭采选业和石油和天然气开采业,上述3个行业在全国碳强度和碳排放变化中的影响也较为显著。石油加工及炼焦业是我国碳强度和碳排放增长幅度最大的行业,二者分别增长了72.28%和338.17%,对全国碳排放上涨做出了4.34%的贡献;因此,对该行业排放强度的约束应当更加严格,同时加强该行业的排放总量控制。与之相似,建筑业碳强度虽然较基期下降,但行业碳排放增长了224.43%;其对全国碳排放增长的贡献为2.13%,而对碳强度下降的贡献仅为-0.47%,对建筑业排放总量的控制也应当加强。另外,第三产业(服务业)碳强度下降了46.05%,碳排放增长了124.83%,对全国碳强度下降和碳排放增长的贡献分别为-6.35%和12.00%,影响较为显著;与1996~2005年相比较,2006~2010年第三产业对全国碳强度下降的贡献降低,但对全国碳排放增长的贡献上升,因此第三产业碳排放总量的增长应当受到越来越多的关注,尤其是交通运输、仓储及邮电通讯业和批发和零售贸易业、餐饮业。

4 结论与建议

(1) 1996~2010年期间,中国碳强度下降了61.98%。42个行业在全国碳强度下降中均发挥推动作用,其中电力、热力的生产和供应业(-23.72%),非金属矿物制品业(-9.12%),黑色金属冶炼及压延加工业(-5.92%),化学原料及化

品制造业(-5.21%),交通运输、仓储及邮电通迅业(-3.94%)是贡献最大的5个行业;其次是农、林、牧、渔、水利业,纺织业,煤炭采选业,批发和零售贸易业、餐饮业,石油和天然气开采业等5个行业;上述10个行业是推动我国碳强度下降的主要行业,合计贡献达-52.36%。为实现我国温室气体减排行动目标,它们应当承担较大的碳强度减排责任。

(2)全国碳强度下降受各行业碳强度和增加值占比变化的影响,前者贡献较大,后者贡献较小;可见行业碳强度下降是我国碳强度减排的主要驱动因素,在一定程度上减缓了我国碳排放的增长。纵向来看,行业增加值占比变化在全国碳强度下降中的影响作用呈上升趋势;随着行业碳强度的持续下降,单个行业碳强度减排的潜力和空间减小,产业结构调整 and 工业结构优化升级将在全国碳强度下降中发挥着日益重要的贡献,

(3)研究区间内中国碳排放增长了156.10%,其中电力、热力的生产和供应业(75.72%),黑色金属冶炼及压延加工业(28.79%),非金属矿物制品业(23.88%),交通运输、仓储及邮电通迅业(9.78%)以及石油加工及炼焦业(4.34%)对全国碳排放增长的贡献最大,5个行业合计贡献为142.50%,是我国碳排放增长的主要驱动行业;医药制造业、纺织业、有色金属矿采选业、饮料制造业、通用设备制造业、化学纤维制造业、烟草加工业等行业则对我国碳排放增长起抑制作用,但合计影响仅为-1%左右。

(4)各行业碳强度和增加值变化共同决定全国碳排放变化,前者发挥抑制作用,而后者则发挥更加显著的促进作用,最终导致中国碳排放呈现稳步增长。纵向来看,“十一五”期间我国行业碳强度下降对全国碳排放增长的抑制效应增强,但国民经济产出规模的迅速扩张仍然使得我国碳排放年均增长速度加快。未来,我国应当继续大力推动经济低碳发展,促进碳排放与GDP彻底脱钩。

(5)行业碳排放量在全国碳排放总量中所占比例决定行业相关驱动因素对全国碳强度或碳排放变化贡献的权重因子。某一行业碳排放占比越高,其相关驱动因素的单位变化对全国的影响也越大,因此碳减排政策的制定应当重点关注碳排放量及其占比较高的行业。

(6)电力、热力的生产和供应业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼及压延加工业,交通运输仓储及

邮电通迅业,化学原料及化学制品制造业等5个行业是对我国碳强度下降及碳排放增长贡献最大的行业,它们既是相关部门制定行业碳强度减排政策时需要重点关注的行业,也是碳交易试点地区和未来全国碳交易体系应当首先考虑纳入管控范围的行业。

(7)石油加工及炼焦业是碳强度和碳排放增长幅度最大的行业,对全国碳排放增长的贡献为4.34%,但对全国碳强度下降的贡献仅为-0.58%;建筑业碳排放增长幅度也较大,对全国碳排放和碳强度变化的贡献分别为2.13%和-0.47%。这两个行业自身排放增速较高,而且对全国碳排放增长的促进作用明显高于对全国碳强度下降的抑制作用,应当对它们制定更严格的碳强度约束目标并考虑将其纳入碳交易体系总量管控范围。

(8)第三产业对全国碳强度下降的贡献为-6.35%,对全国碳排放增长的贡献为12.00%,仅次于重工业部门。与“十五”、“十一五”时期相比,“十一五”期间第三产业在我国碳强度下降中的贡献降低,但在全国碳排放增长中的贡献上升。随着产值规模的快速扩张和碳排放量的迅速增长,第三产业的温室气体减排工作应当受到越来越多的关注,尤其是交通运输、仓储及邮电通迅业和批发和零售贸易业、餐饮业。

参考文献:

- [1] Marland G, Boden T A, Andres R J. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions [EB/OL]. <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview.html>.
- [2] Liu Z, Guan D B, Crawford-Brown D, et al. A low-carbon road map for China [J]. *Nature*, 2013, **500**(7461): 143-145.
- [3] Fan Y, Liu L C, Wu G, et al. Changes in carbon intensity in China: empirical findings from 1980-2003 [J]. *Ecological Economics*, 2007, **62**(3-4): 683-691.
- [4] 魏一鸣,刘兰翠,范英,等.中国能源报告2008:碳排放研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [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.
- [6] Zhang M, Mu H L, Ning Y D, et al. Decomposition of energy-related CO₂ emission over 1991-2006 in China [J]. *Ecological Economics*, 2009, **68**(7): 2122-2128.
- [7] Ang J B. CO₂ emissions, research and technology transfer in China [J]. *Ecological Economics*, 2009, **68**(10): 2658-2665.
- [8] 李小平,卢现祥.国际贸易、污染产业转移和中国工业CO₂排放[J].*经济研究*, 2010, **45**(1): 15-26.
- [9] Zhang Y G. Supply-side structural effect on carbon emissions in China [J]. *Energy Economics*, 2010, **32**(1): 186-193.
- [10] 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, **45**(4): 120-133.

- [11] 陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011, **34**(4): 124-143.
- [12] 范丹. 中国能源消费碳排放变化的驱动因素研究——基于 LMDI-PDA 分解法[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1705-1713.
- [13] Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F, *et al.* Regional differences in the factors that influence China's energy-related carbon emissions, and potential mitigation strategies[J]. Energy Policy, 2011, **39**(12): 7712-7718.
- [14] 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): 143-154.
- [15] 金乐琴, 吴慧颖. 中国碳排放的区域异质性及减排对策[J]. 经济与管理, 2013, **27**(11): 83-87.
- [16] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究, 2010, (2): 123-136.
- [17] 曹孜, 彭怀生, 鲁芳. 工业碳排放状况及减排途径分析[J]. 生态经济, 2011, (9): 40-45.
- [18] 何小钢, 张耀辉. 行业特征、环境规制与工业 CO₂ 排放——基于中国工业 36 个行业的实证考察[J]. 经济管理, 2011, **33**(11): 17-25.
- [19] 肖宏伟, 易丹辉, 周明勇. 中国工业碳强度变化的行业影响研究[J]. 现代管理科学, 2012, (9): 3-6.
- [20] 王栋, 潘文卿, 刘庆, 等. 中国产业 CO₂ 排放的因素分解: 基于 LMDI 模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, **32**(6): 1193-1203.
- [21] 何小钢, 张耀辉. 中国工业碳排放影响因素与 CKC 重组效应——基于 STIRPAT 模型的分行业动态面板数据实证研究[J]. 中国工业经济, 2012, (1): 26-35.
- [22] 卢愿清, 史军. 中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2528-2532.
- [23] Chen L, Yang Z F, Chen B. Decomposition analysis of energy-related industrial CO₂ emissions in China[J]. Energies, 2013, **6**(5): 2319-2337.
- [24] 计军平. 基于投入产出模型的中国碳排放增长驱动因素研究[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [25] Xu X Y, Ang B W. Analysing residential energy consumption using index decomposition analysis[J]. Applied Energy, 2014, **113**: 342-351.
- [26] Xu X Y, Ang B W. Multilevel index decomposition analysis: approaches and application[J]. Energy Economics, 2014, **44**: 375-382.
- [27] Ang B W, Choi K H. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method [J]. Energy, 1997, **18**(3): 59-74.
- [28] Ang B W, Liu F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation [J]. Energy, 2001, **26**(6): 537-548.
- [29] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, **32**(9): 1131-1139.
- [30] Liu N, Ang B W. Factors shaping aggregate energy intensity trend for industry: energy intensity versus product mix [J]. Energy Economics, 2007, **29**(4): 609-635.
- [31] Ang B W, Huang H C, Mu A R. Properties and linkages of some index decomposition analysis methods [J]. Energy Policy, 2009, **37**(11): 4624-4632.
- [32] Xu X Y, Ang B W. Index decomposition analysis applied to CO₂ emission studies [J]. Ecological Economics, 2013, **93**: 313-329.
- [33] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide[J]. Energy Policy, 2005, **33**(7): 867-871.
- [34] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [35] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [36] 国家统计局. 中国工业经济统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [37] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2011.
- [38] Chen G Q, Zhang B. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis [J]. Energy Policy, 2010, **38**(10): 6180-6193.
- [39] Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China: 1990-2020[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(1): 147-154.
- [40] 陈诗一. 中国工业分行业统计数据估算: 1980-2008[J]. 经济学(季刊), 2011, **10**(3): 735-776.
- [41] 国家统计局. 中国统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [42] 国家统计局. 中国城市(镇)生活与价格年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行