

中国制造业行业碳排放： 行业差异与驱动因素分解

付华 李国平 朱婷¹

【摘要】：碳达峰与碳中和愿景目标的提出为中国制造业低碳发展明确了新方向，对加快制造业碳减排提出了新要求。采用 LMDI 方法通过分阶段及分行业分解，分析了 2000—2017 年中国制造业 28 个子行业的碳排放及影响因素，研究结果表明：近年来，中国制造业能源消费和碳排放增速趋缓，能源结构日趋优化；经济活动效应是制造业碳排放的首要驱动力，而能源强度效应是影响制造业子行业间碳排放差异的主要因素；提高黑色金属冶炼和压延加工业等高排放强度行业的能源效率，是未来制造业碳减排的关键所在。应在制造业重点行业和区域明确碳达峰的任务和路径，持续推动制造业结构升级，以科技创新促进高耗能行业降低能源强度，提高制造业能源使用效率，以助推实现碳达峰和碳中和。

【关键词】：制造业发展 碳排放 能源强度

【中图分类号】：F424 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1003-7543（2021）05-0038-15

2020 年 9 月，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，提出“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。这是中国首次向全球明确提出实现碳中和的时间点，充分展现出中国积极参与国际治理、为全球气候变化作出更大贡献的责任担当。2020 年 12 月召开的中央经济工作会议首次将“做好碳达峰、碳中和工作”列入新一年重点任务之一。这预示了在“十四五”期间及未来很长一段时期内，减排降碳、低碳发展都将是环境治理甚至国家治理、社会治理的一个重要主题。当前中国仍处于工业化进程中，工业作为中国经济的支柱，创造了 39% 的产出，消耗了全国 70% 的能源，贡献了全国 80% 的二氧化碳排放量，其中化石能源是二氧化碳排放的主要来源。在保持经济高质量发展的同时实现碳达峰和碳中和目标，制造业碳减排是重中之重。协调工业发展、能源消耗和减排目标，需要明确制造业碳排放的主要驱动因素，进而找寻制造业碳排放的有效减排路径。

一、相关文献综述

长期以来，经济发展与碳排放的关系作为发展经济学和环境经济学的研究重点，一直受到学者们的广泛关注。国内外学者利用各种定量分析方法，围绕中国碳排放的影响因素、减排潜力等开展了大量实证研究，相关研究表明，经济活动、能源强度、技术创新、产业结构等都是影响制造业碳排放的重要因素。

一直以来，国际社会都对中国的温室气体排放有所高估。关于碳排放量的测度会直接影响到何时实现碳达峰。在碳排放量计算中，常用做法是采用政府间气候变化专门委员会（IPCC）2006 年颁布的《IPCC 国家温室气体清单指南》中的碳排放计算方法，利用国家或地区的投入产出表进行计算。但据中国学者研究发现，由于未考虑中国的能源消费组合，按照 IPCC 方法计算，

¹**作者简介：**付华，北京大学政府管理学院博士后；
李国平（通信作者），北京大学政府管理学院教授、博士生导师；
朱婷，北京大学政府管理学院研究生。

基金项目：研究阐释党的十九届四中全会精神国家社会科学基金重大项目“优化资源配置提高中心城市和城市群综合承载能力研究”

中国的能源排放系数被大大高估。通过采取新的碳排放因子估算, 2000—2012 年中国水泥生产碳排放量比国际估计值要减少 45%^[1]。一些学者在 IPCC 推荐方法基础上改进能源分类体系以及碳排放计算方法, 更准确地计算出了碳排放量和能源碳排放效率^[2]。

关于碳排放影响机制, 学者们普遍认为, 经济发展与能源消费和碳排放之间存在双向的影响。有学者认为, 中国目前处于城镇化和工业化阶段, 能源消费的主要特征是消费需求增长快和能源需求呈现刚性。对大多数发展中国家而言, 由于成本和资源禀赋的约束, 只能选择以煤炭为主的能源结构, 这就必然导致严重的温室气体排放及环境污染等问题。中国的碳减排不能脱离阶段性社会发展规律, 但可以通过适当控制城镇化速度和提高能源效率来减少碳排放^[3]。根据环境库兹涅茨曲线 (EKC) 假说, 经济增长与环境压力和资源消耗呈倒 U 型关系, 当经济发展到一定阶段之后, 可以通过新技术和低碳政策实现较低的环境压力和资源消耗, 并实现可持续的经济快速增长。原焮、李国平进一步构建了区域碳排放受产业结构变迁影响的模型, 认为人口规模、技术水平、资本投入等要素都会影响经济发展, 而经济发展按照不同产业展开, 其能源消费量与其产出量、能源相关技术水平等紧密联系, 这些因素都受到经济总产出和产业结构的影响。不同的经济发展阶段具有不同的产业结构特征, 产业结构的优化能有效降低经济发展对环境带来的负外部性, 使区域碳排放趋于下降^[4]。

针对中国碳排放的影响因素, 近年来国内外学者多采用回归模型或者分解方法进行分析。相对于回归分析方法, 指数分解分析 (IDA) 能够量化碳排放总量变化背后的驱动因素, 如经济活动的结构变化和能源消耗的强度变化等, 可以直观地显示出影响二氧化碳排放的关键因素, 因此在能源消费和碳排放研究中具有独特优势。Kaya 恒等式的提出在二氧化碳排放与人口、经济发展水平、能源利用效率等因素之间建立了相应关系^[5], 在此基础上, 分解技术得到了快速发展。1995 年以后, Ang 等改进的对数平均迪氏指数 (LMDI) 分解法实现了完全分解, 并解决了零数值影响计算的问题, 此后, LMDI 方法被广泛使用在国家、区域、部门和行业级别研究中^[6]。李艳梅等研究发现, 中国碳排放受经济发展水平、人口规模、能源使用、技术进步等多种因素影响, 而在城镇化与工业化加速推进的阶段, 中国经济总量的增长是碳排放增加的重要原因^[7]。2015 年, Ang 等在对 30 个省份的制造业碳排放研究中, 将 LMDI 分解法由时间分解扩展到多区域空间分解^[8]。

作为国民经济的支柱产业, 制造业对能源消耗和二氧化碳排放贡献巨大, 因此, 应用 LMDI 方法探索制造业的二氧化碳排放越来越受到关注。一些学者对 1980 年以来中国能源消费的碳排放进行研究, 发现在诸多影响因素中, 经济快速发展带来的产出效应对碳排放的历史贡献率最大, 远大于能源强度和能源结构对碳排放的抑制作用^[9-10]。最近的研究成果认为, 随着中国经济的发展, 产业集聚程度提高, 集聚经济的溢出效应促进了技术进步, 降低了节能减排的成本, 促进了碳排放强度的下降^[11]。在制造业碳减排方面, 能源强度被普遍认为起到了重要作用, 但关于技术进步的影响则存在不同观点。一些研究认为, 能源强度降低是碳排放强度下降的决定性因素。能源结构及能源强度变化对中国的碳排放强度有重要影响^[12]。也有学者将能源强度分解为技术因素、中间投入量、行业产值结构等因素, 研究发现当前阶段技术变化对碳减排的作用并不明显^[13]。一些学者进一步构建综合分解框架, 研究技术进步对于中国能源强度下降的影响, 认为长期而言技术进步将是实现能源生产率可持续性增长的关键^[14]。

综上所述, 已有国内外文献从多个视角对碳排放变化的影响因素展开了研究, 大部分学者是从宏观经济层面关注整个行业或某一特定子行业的碳排放, 但对中国制造业子行业间碳排放差异的影响因素研究偏少。部分学者研究了近几十年来制造业碳排放的变化趋势, 但对较长时间跨度内各历史阶段的分析不足。同时, 大多数学者都将电力与供热行业作为工业的一个普通子行业进行研究, 而忽略了电力行业作为中国第一大碳排放行业为其他行业供能的特殊性。区别于以往研究, 本文的贡献在于: 一是在对制造业 28 个子行业进行分阶段 LMDI 分解基础上, 构建了一个分行业 LMDI 分解模型, 以此来揭示造成 28 个制造业子行业间碳排放差异的主要驱动力, 从而为研究制造业碳减排方案提供参考; 二是在分解时考虑了热电的碳排放因子, 根据各行业电热能源消耗计算相应碳排放, 将电力行业的碳排放量进行核减, 从而更真实地反映出各行业的实际用能及碳排放情况; 三是在数据使用上, 国内学者对于碳排放量多按照 IPCC 方法进行计算, 碳排放量数据存在明显高估, 本文采用中国碳核算数据库 (CEADs) 的碳排放清单和能源清单, 使用经修正后的中国碳排放因子, 计算的制造业及子行业碳排放量更接近实际。

二、研究方法和数据来源

（一）LMDI 分解方法

根据 Kaya 等式，与能源相关的制造业碳排放主要由五种动力驱动：碳排放系数、能源结构、能源强度、经济活动和行业规模，用公式可以表示为：

$$C_{ij} = \sum_j \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{E_i}{Y_i} \times \frac{Y_i}{P_i} \times P_i$$

式中，i 为制造业的二位数子行业，j 为原煤、天然气等 14 种能源之一， C_{ij} 为 i 行业第 j 种能源碳排放量， E_{ij} 为 i 行业第 j 种能源消耗量， Y_i 为 i 行业产值， P_i 为制造业 i 行业从业人数。

上式可进一步写为：

$$C = CE \times ES \times EI \times IG \times IP$$

其中，C 代表二氧化碳排放量；CE 代表碳排放系数，ES 代表能源结构；EI 代表能源强度；IG 代表人均工业产值，即经济活动；IP 代表行业就业人数，即行业规模。

由基期到 t 期，制造业碳排放的变化量为：

$$\Delta C = C - C^0 = \Delta CE + \Delta ES + \Delta EI + \Delta IG + \Delta IP$$

其中， ΔCE 代表碳排放系数效应， ΔES 代表能源结构效应， ΔEI 代表能源强度效应， ΔIG 代表经济活动效应， ΔIP 代表行业规模效应。

在 LMDI 的基础分解模型的基础上，本文使用分阶段和分行业两种方法进行扩展分析。首先根据本文的数据情况，对 2000—2017 年进行分阶段分解，横向分析制造业整体及子行业按时间趋势的碳排放变化的驱动因素，进而选取固定年份对 28 个子行业进行纵向分解，分析同时期造成行业间差异的特征原因。

1. 分阶段 LMDI 分解

根据 LMDI 分解模型，中国制造业各子行业在基准年和目标年 t 之间二氧化碳排放总量变化也可以分解为五种驱动力，如下式：

$$\begin{aligned} \Delta C_i^{(t-0)} &= C_i^t - C_i^0 = \Delta C_{i,CE}^{(t-0)} + \Delta C_{i,ES}^{(t-0)} + \Delta C_{i,EI}^{(t-0)} + \Delta C_{i,IG}^{(t-0)} \\ &\quad + \Delta C_{i,IP}^{(t-0)} \end{aligned}$$

具体计算如下：

$$\Delta CE = \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{CE_i^t}{CE_i^0}\right)$$

$$\Delta ES = \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{ES_i^t}{ES_i^0}\right)$$

$$\Delta EI = \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{EI_i^t}{EI_i^0}\right)$$

$$\Delta IG = \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{IG_i^t}{IG_i^0}\right)$$

$$\Delta IP = \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{IP_i^t}{IP_i^0}\right)$$

其中，

$$L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) = \begin{cases} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} (C_{ij}^t \neq C_{ij}^0) \\ C_{ij}^t & (C_{ij}^t = C_{ij}^0) \end{cases}$$

2. 分行业 LMDI 分解

参考 Ang 和 Shi 等的研究方法^[15]，我们采用分行业的 LMDI 模型对中国制造业 28 个子行业间的碳排放差异进行研究。在此框架下，子行业 Si 与基准 Sa 之间的二氧化碳排放差异可分为四种效应：能源结构效应、能源强度效应、经济活动效应和行业规模效应。基准 Sa 采用 28 个制造业子行业的算术平均进行计算，如下式所示：

$$\begin{aligned} \Delta C_i^{(Si-Sa)} = C_i^{Si} - C_i^{Sa} = & \Delta C_{i,ES}^{(Si-Sa)} + \Delta C_{i,EI}^{(Si-Sa)} + \Delta C_{i,IG}^{(Si-Sa)} \\ & + \Delta C_{i,IP}^{(Si-Sa)} \end{aligned}$$

具体计算如下：

$$\begin{aligned}\Delta ES &= \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{ES_i^t}{ES_i^0}\right) \\ \Delta EI &= \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{EI_i^t}{EI_i^0}\right) \\ \Delta IG &= \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{IG_i^t}{IG_i^0}\right) \\ \Delta IP &= \sum_{ij} L(C_{ij}^t, C_{ij}^0) \ln\left(\frac{IP_i^t}{IP_i^0}\right)\end{aligned}$$

其中，

$$L(C_{ij}^{S_i}, C_{ij}^{S_a}) = \begin{cases} \frac{C_{ij}^{S_i} - C_{ij}^{S_a}}{\ln C_{ij}^{S_i} - \ln C_{ij}^{S_a}} (C_{ij}^{S_i} \neq C_{ij}^{S_a}) \\ C_{ij}^{S_i} (C_{ij}^{S_i} = C_{ij}^{S_a}) \end{cases}$$

（二）数据来源

依据国家统计局 2017 年发布的国民经济活动的产业分类（GB/T4754-2017），制造业分为 31 个子行业。由于 2000—2017 年废弃资源综合利用业（C42）及金属制品、机械和设备修理业（C43）数据不连续，因此未将这两个行业纳入研究范围。根据数据统计口径变化将铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业（C37）并入汽车制造业（C36），最终，本文的研究共涵盖制造业 28 个子行业。在数据来源上，制造业子部门的产值及就业人口数据来源于《中国工业统计年鉴》（2001—2018），产值以 2000 年不变价格计算。制造业的能源消耗和二氧化碳排放量数据均来自 CEADs 的碳排放清单和能源清单。该清单根据 Liu 等发表在 Nature 上的修订的中国碳排放因子，采用《中国能源统计年鉴》数据进行编制，被国内外学者广泛使用。考虑到制造业的二氧化碳排放既包括化石燃料的直接碳排放，又包括二次能源电、热消耗的间接碳排放，在此根据《中国能源统计年鉴》中的能源平衡表对间接排放量进行计算，计算方法如下：

$$CO_{2j}^i = \frac{E_j^i \times \sum_k CO_{2k}^i}{E_{fos}^i + E_{cle}^i + E_{rec}^i}$$

其中， CO_{2j}^i 为 i 行业消耗的电热能源在生产过程中的碳排放， E_j^i 为 i 行业的电热能源消耗量， $\sum_k CO_{2k}^i$ 为电力和供热行业的二氧化碳排放， E_{fos}^i 、 E_{cle}^i 、 E_{rec}^i 分别为电力和供热行业的化石能源、清洁能源（水、核、风）发电及回收能的能源消耗。

三、中国制造业碳排放状况分析

（一）能源消费和碳排放的关系

21 世纪以来，随着制造业产值的增长，制造业能源消费和碳排放也呈增长态势。2000 年制造业 28 个子行业消耗能源 6 亿吨标准煤，到 2017 年增长到 19.8 亿吨标准煤，18 年间增长了 2.3 倍。同期，二氧化碳排放量由 13.7 亿吨增加到 46.1 亿吨，增长了 2.4 倍。由图 1 可以看出，能源消费与碳排放之间存在正相关关系。2000—2017 年制造业碳排放与能源消费大致可分为四个阶段：2000—2005 年，能源消费与碳排放增速从不到 9%激增到 20%左右；2006—2010 年增速基本控制在 10%以内，2008 年最低增速为 4%；2011—2014 年增速均在 5%以内，2012 年能源消费最低增速为 0.85%；2015 年后能源消费与碳排放均为负增长。其中，2005 年和 2014 年是两个关键年份，2005 年后碳排放由快速增长开始增速放缓，2014 年后碳排放和能源消费总量开始出现双下降。另外，2008 年和 2012 年能源消费和碳排放增速也明显降低，考虑到 2008 年北京奥运会举办和 2011 年 9 月发布的《“十二五”节能减排综合性工作方案》明确提出在电力、钢铁、造纸、印染四大行业中推行总量控制政策，环保标准更加严格，因此环保政策也是影响碳排放的一个重要因素。

（二）不同能源的碳排放比重

煤炭一直是中国制造业消费的主要能源，也是二氧化碳排放的最大来源。2000 年以来中国煤炭占总能源的碳排放比重一直维持在 45.2%至 53.2%之间。2002 年后趋于上升，2005—2010 年维持在 51%以上的高位。从图 2 可以看出，2002 年以后碳排放的增长主要是由于煤的大量使用导致的。2010 年后煤占总能源的碳排放比重不断下降，2012 年开始低于 50%。CEADs 能源清单中导致碳排放的能源共有 18 种，可分为六大类，分别为原煤类（原煤、精煤、其他精煤）和煤制品类（焦炭、焦炉煤气、其他煤气和其他焦化产品），以及油类（原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、其他石油产品）、天然气（天然气、液化石油气、炼厂气）、电能和热能、生产过程（指生产过程或生产工艺中的碳排放）六大类。可以看出，原煤类能源的碳排放量比重在 2004 年达到最高峰（占比达 28.8%），2005 年后逐渐下降，2017 年降至 16%，同期煤制品类的碳排放量比重呈上升趋势，从 2000 年的 20.6%增长到 2017 年的 29.3%。煤炭的能源结构趋于优化。

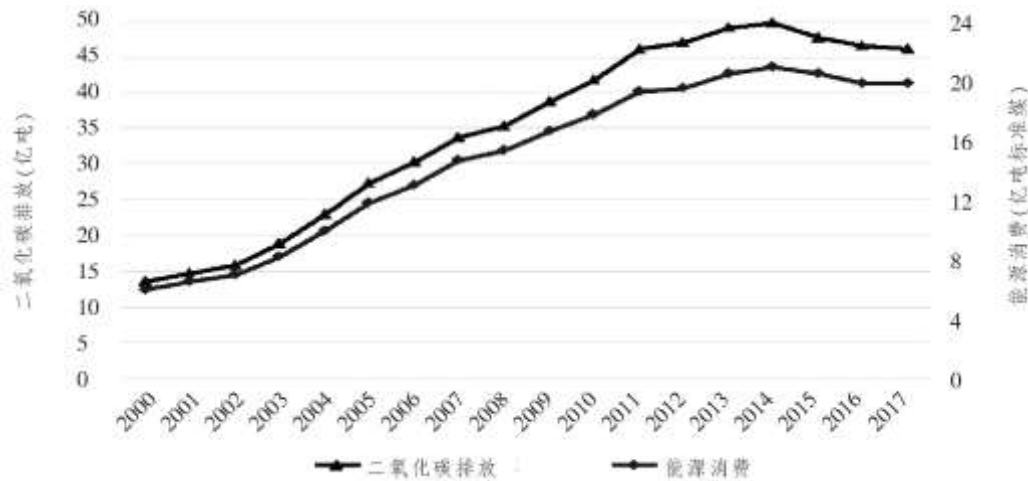


图 1 2000—2017 年制造业二氧化碳排放与能源消费情况

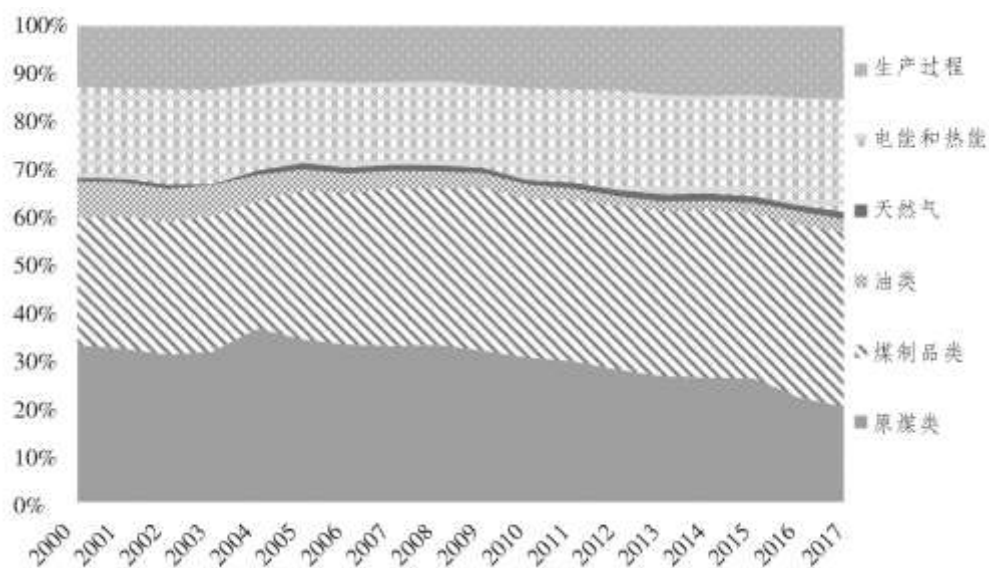


图 2 2000—2017 年制造业能源消费情况

（三）制造业子行业碳排放的差异

显示了 2017 年中国制造业 28 个子行业的碳排放强度。碳排放强度最高的行业为黑色金属冶炼和压延加工业(4.47 吨/万元)，其碳排放强度是计算机、通信和其他电子设备制造业(0.04 吨/万元)的 111.8 倍。制造业 28 个子行业的碳排放强度存在巨大差异。我们可根据碳排放强度将 28 个子行业分为三类：高排放强度行业、中排放强度行业和低排放强度行业。我们参考 2010 年国民经济和社会发展统计公报中明确列出的六大高耗能行业，将碳排放强度前 5 位的行业划归为高排放强度行业，包括黑色金属冶炼和压延加工业，非金属矿物制品业，石油、煤炭及其他燃料加工业，化学原料和化学制品制造业，有色金属冶炼和压延加工业¹，这五大行业 2000—2017 年累积碳排放量均高于 1 亿吨，仅这五大行业碳排放总量就占到 28 个子行业总排放量的 82%。低排放强度行业则主要为轻工业及计算机、通信和其他电子设备制造业等高新技术产业。其他为中排放强度行业，主要包括造纸和纸制品业、纺织业、化学纤维制造业等能耗偏高的八个传统产业。其中，高排放强度产业的平均排放强度为 1.99 吨/万元，是中排放强度行业(0.34 吨/万元)的 5.9 倍、低排放强度行业(0.10 吨/万元)的 19.9 倍。因此，中国制造业减排的重点主要在高、中排放强度行业上。

四、实证结果分析

（一）时间趋势特征分析

根据前文分析的 2000—2017 年中国制造业碳排放趋势和关键年份，本文将其划分为四个阶段，即 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2014 年、2014—2017 年，采用 LMDI 分解方法对这四个阶段进行分解，研究在整个时间跨度内制造业及其子行业碳排放的影响因素的演化趋势。

1. 分阶段整体分析

从整体来看，经济活动效应和能源强度效应分别是导致二氧化碳排放量增加、减少的最主要驱动力。2000—2017 年，经济活动效应和行业规模效应分别贡献了 79.05 亿吨、16.13 亿吨二氧化碳，分别占制造业二氧化碳排放量变化的 231.5%和 47.3%。这说明 2000 年以来中国制造业碳排放量之所以大幅增加，主要是因为工业化和城镇化推动制造业规模不断扩张，尤其是水泥、

钢铁等高耗能高污染行业的发展，导致了能源消耗增加及相关二氧化碳排放。2000—2017 年，受节能减排政策和技术进步的影响，能源强度效应为碳减排贡献 58.28 亿吨，在一定程度上减缓了碳排放增长的趋势。

分阶段来看，2000 年以来碳排放增速趋于放缓，经济活动效应呈现倒 U 型趋势（见图 3）。在前两个阶段，碳排放量的上升主要是受中国经济快速发展的影响。随着 2001 年中国加入 WTO，中国货物出口量快速增长，2005 年中国的外贸依存度由 2000 年的接近 40%迅速上升到超过 60%，出口增长带动制造业规模迅速扩大。2008 年为应对金融危机，中国出台大规模财政刺激政策，涉及铁路、交通、能源等多个领域，大规模基础建设投资拉动了钢铁、水泥等资源型行业的新一轮扩张。为解决工业快速发展导致的产能过剩问题 and 环境问题，“十二五”期间，中国出台了《工业转型升级规划（2011—2015 年）》《“十二五”战略性新兴产业发展规划》等一系列产业规划，限制、引导产能过剩行业发展，同时，鼓励支持战略性新兴产业发展和自主创新，能源消耗强度逐步降低，推动碳排放量增速放缓。到第四阶段，受经济活动效应大幅降低的影响，制造业碳排放首次同比下降 2.71 亿吨，行业规模效应首次由正转负。这一变化的主要原因是“十三五”时期经济进入新常态，产业结构加速升级，服务业占 GDP 比重持续提升，制造业比重不断降低，导致制造业碳排放也相应降低。随着新一代信息技术的发展，生产自动化、智能化水平提高，制造业行业吸纳的就业人数减少，导致行业规模效应下降。值得注意的是，随着近年来能源结构中化石能源占比的下降，能源结构效应的碳排放贡献虽然总体趋于降低，但对碳减排贡献仍不突出，仅在第二阶段实现由正转负。这说明，虽然原煤在能源消费结构中占比不断降低，但煤炭占比过高的能源结构仍未发生实质性转变。同时，在工业生产中，新能源发电由于一些制度限制以及技术原因，目前仍无法有效替代煤电。

2. 分阶段子行业差异分析

在整体研究基础上，这里对制造业 28 个子行业进行因素分解，以探求影响具体行业碳排放变化的主要驱动力。子行业碳排放分解结果表明，2000—2017 年，经济活动效应和能源强度效应仍分别是导致二氧化碳排放增加、减少的主要驱动力，但具体子行业碳排放影响因素的绝对变化和累积贡献存在显著不同。如图 4（下页）所示，高、中、低排放强度行业在碳排放因素效应上呈现不同特点。

经济活动效应是造成高排放强度行业巨大碳排放量的关键因素。随着中国城镇化进程的加快，基础设施建设对原材料的需求不断增加，导致中国高排放强度行业快速发展。与经济规模的快速扩张相比，生产技术进步和工艺流程改进则相对缓慢，因此，主要受技术进步推动的能源强度效应所实现的二氧化碳减排效果相对有限。能源强度效应对黑色金属冶炼和压延加工业（C31）等行业贡献较低，主要原因是，在去产能环境下国家严格控制钢铁新增产能，钢铁行业集中度偏低，创新能力不足，导致能源消耗强度偏高。碳排放系数效应对碳排放也具有抑制作用，但效用偏小。能源结构效应对黑色金属冶炼和压延加工业的碳排放有负面影响，对其他高排放强度行业的影响为正，但影响均不显著。

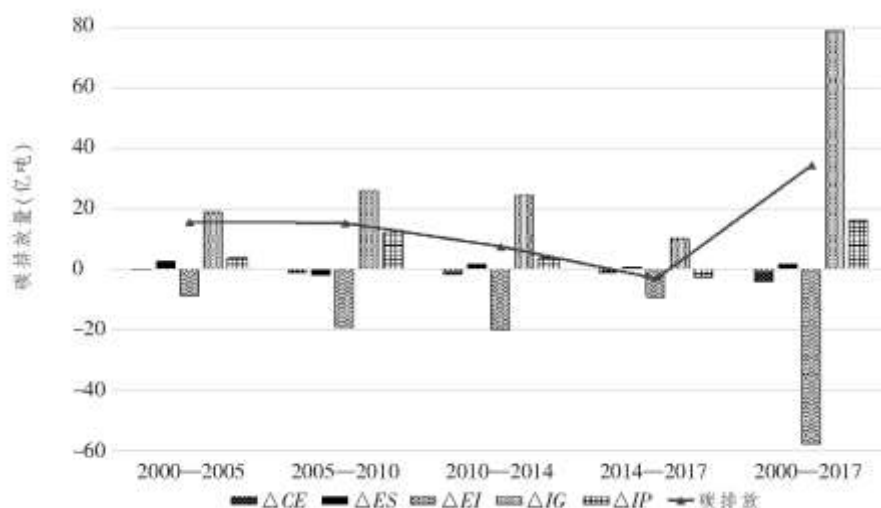


图 3 制造业碳排放分阶段分解

对于中排放强度行业，经济活动效应和能源强度效应依然是影响碳排放的关键因素。2000—2017 年，纺织业的二氧化碳排放量累计变化达 8841 万吨，位居中排放强度行业第一位，其碳排放主要来源于经济活动效应。中国加入 WTO 以来，迅速发展成为世界上最大的纺织品出口国，生产规模的扩张导致能耗、碳排放相应增大。近年来，随着生产趋于自动化和智能化，纺织业就业人数不断缩减，对碳减排作出了一定贡献。农副食品加工业和食品制造业等劳动密集型产业的就业人数趋于增长，行业规模效应对碳排放的贡献更为突出。受益于电力等清洁能源的使用，碳排放系数效应对碳减排产生了积极影响，尤其是对纺织业、金属制品业、造纸和纸制品业等行业较为显著。

对于低排放强度行业，各因素作用效应则有所分化。2000—2017 年，计算机、通信和其他电子设备制造业，通用设备制造业，电气机械和器材制造业等制造业部门的碳排放绝对值总量均超过 3000 万吨，但由于这些行业产值高，碳排放强度相对较低。低排放强度行业中 60% 的行业能源强度效应贡献较大，能够抵消行业经济活动的碳排放影响。2000—2017 年，专用设备制造业和汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业的工业规模大幅增长，导致能源消耗和相关二氧化碳排放量增长。

考虑到碳减排任务主要集中于高、中排放强度行业，我们进行分阶段分解分析，重点分析高排放强度行业 2000—2017 年碳排放的变化趋势及背后的驱动因素。

分阶段来看，伴随着制造业碳排放在 2014 年达到顶峰，经济活动效应的碳排放贡献也呈先增后减的趋势，能源强度效应的影响总体呈上升趋势，这对于高排放强度行业的影响尤为显著（见图 5，下页）。主要原因是，2005—2014 年正是中国的“十一五”和“十二五”时期，中国处于快速城镇化阶段，2011 年中国城镇化率首次超过 50%，农民大量进城务工推动了城市基础设施建设的快速发展。“十一五”期间，中国 GDP 年均增速达 11.2%，城镇化和国内经济繁荣共同推动了制造业的快速发展，也造成能源消耗激增、行业吸纳就业增加及相应的碳排放。“十二五”时期，政府出台了一系列节能减排政策。“十二五”后期至“十三五”时期，政策效果开始显现，尤其是随着去产能的推进，六大高耗能行业新增产能受限，就业人数缩减，相应碳排放也随之降低。能源强度效应增大主要受益于近年来中国在气候变化领域科研投入的持续加大，从“十五”时期的 25 亿元增加到“十二五”时期的 150 亿元，大大推动了绿色技术、节能环保技术、清洁能源技术的发展。这也同样可以解释非金属矿物制品业（C30）、化学原料和化学制品制造业（C26）等行业的碳排放变化。

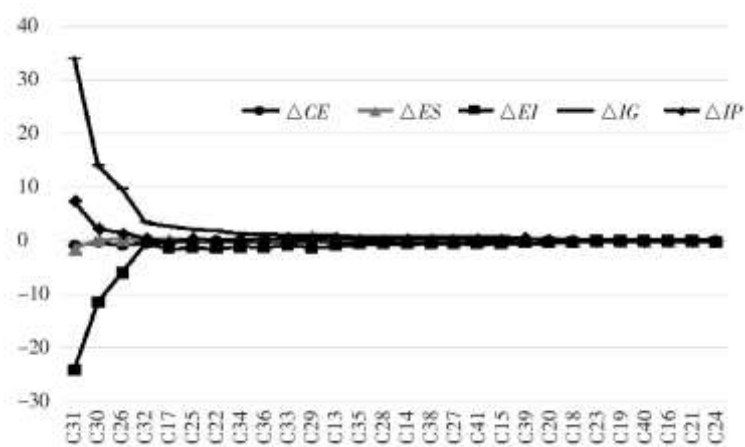


图4 2000—2017年中国制造业碳排放整体分解（单位：亿吨）

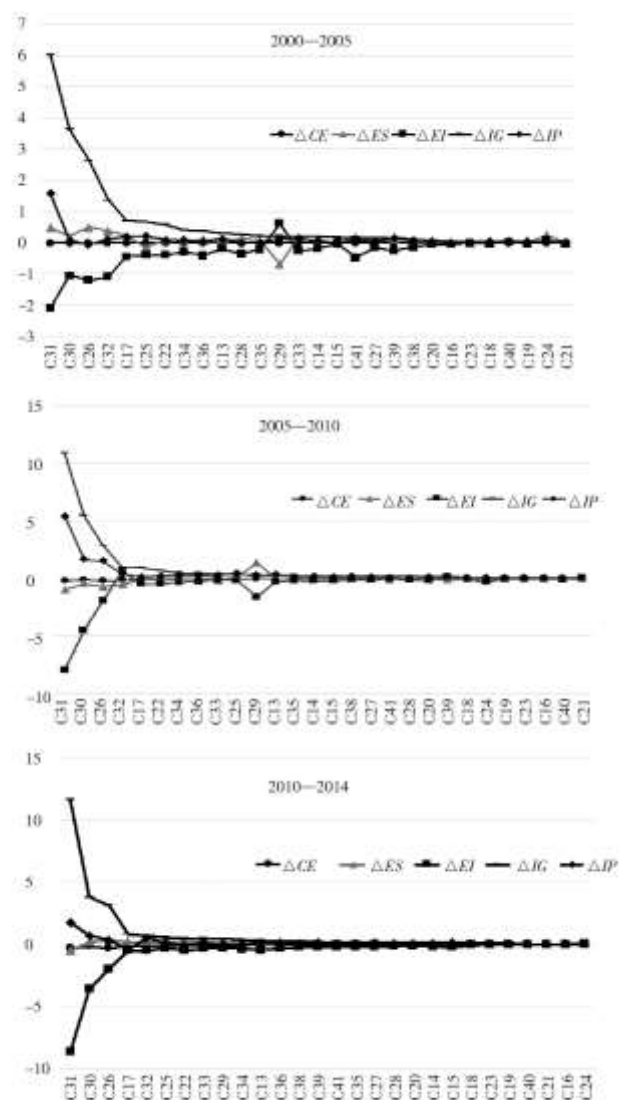


图 5 制造业子行业碳排放分阶段分解（单位：亿吨）

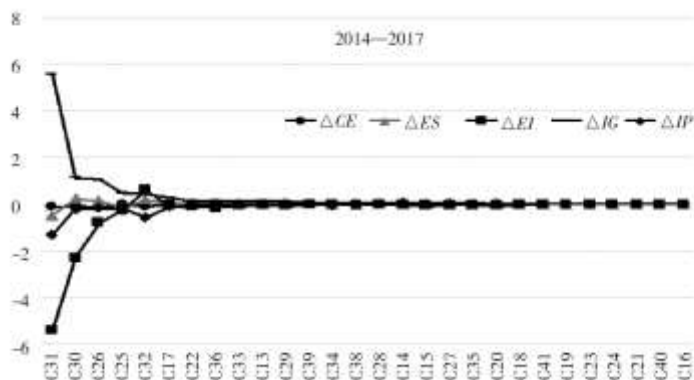


图 5 制造业子行业碳排放分阶段分解（单位：亿吨）

在其他驱动因素中，行业规模效应也呈显著的先增后减趋势，能源结构效应的碳排放贡献趋于下降。2005—2010 年，专用设备制造业、化学纤维制造业等行业的行业规模效应的碳排放贡献大幅增加，而计算机、通信和其他电子设备制造业及纺织服装、服饰业等行业则表现相反。可能原因是，智能化生产线的使用减少了用工需求。2014 年后，除医药制造业等少数行业就业人数持续增加外，主要行业的行业规模效应均显著为负。这与近年来中国制造业就业人数的下降趋势是一致的。能源结构效应除 2005—2010 年多数行业为负外，在其他阶段的主要行业均为正值，且对碳排放的贡献趋于下降。但有色金属冶炼和压延加工业的能源结构效应自 2005 年后保持负值，主要原因是随着煤开发利用技术的进步，国家推进“煤制气”及钢铁工业燃煤锅炉综合节能环保促进项目等一系列环保项目，使得能源结构逐步优化。

（二）行业间特征差异分析

这里进一步对重点年份制造业按行业进行分解，分析在同一年份不同子行业碳排放呈现差异的主要原因。在此选取 2005 年和 2015 年这两个制造业碳排放变化的重要拐点年份，利用分行业 LMDI 模型，将制造业子行业的碳排放差异分解为能源强度效应（EI）、能源结构效应（ES）、经济活动效应（IG）和行业规模效应（IP）。这四种效应的正负值具有不同含义。例如，能源强度效应的负值表明某一子行业的能源利用效率高于制造业平均水平，而经济活动效应的正值代表该子行业的人均工业产出高于制造业平均水平。

从图 6 可以看出，能源强度效应是导致制造业子行业碳排放量差异悬殊的主要因素。高排放强度行业的能源强度效应显著为正，而中、低排放强度行业的能源强度效应为负。与 2005 年相比，2015 年高、低能源强度行业的能源强度效应差距进一步拉大，这反映出高、中、低排放强度行业在能源利用效率方面存在显著差距。其中，黑色金属冶炼和压延加工业的正向影响最大。

2015 年，黑色金属冶炼和压延加工业的能源强度达 27.59 千克/万元，远高于制造业平均水平（2.48 千克/万元）。如果能将高耗能行业的能源强度降低到制造业平均水平，仅黑色金属冶炼和压延加工业的二氧化碳排放量就可减少 15.71 亿吨。相对而言，汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业的能源强度分别仅为 0.20 千克/万元和 0.05 千克/万元，为高科技行业碳减排作出了重要贡献。

行业规模效应和经济活动效应也会对不同行业的碳排放产生一定影响。2005—2015 年，高端装备制造业和电子信息产业得到快速发展，汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业，电气机械和器材制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业的就业人数分别从 352 万、367 万、440 万增长至 663 万、630 万和 909 万，导致其行业规模效应为正，行业碳排放

相较于制造业平均水平显著增加。而纺织业就业人数由 591 万降至 464 万，行业规模效应的碳排放贡献显著降低。2005—2015 年，有色金属冶炼和压延加工业的经济活动效应影响加大，表明该行业的人均工业产出水平有所提高。不同行业受能源结构效应的影响差异相对较小，尤其是非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业等高耗能行业仍然依赖煤炭等传统化石能源，能源结构有待优化。

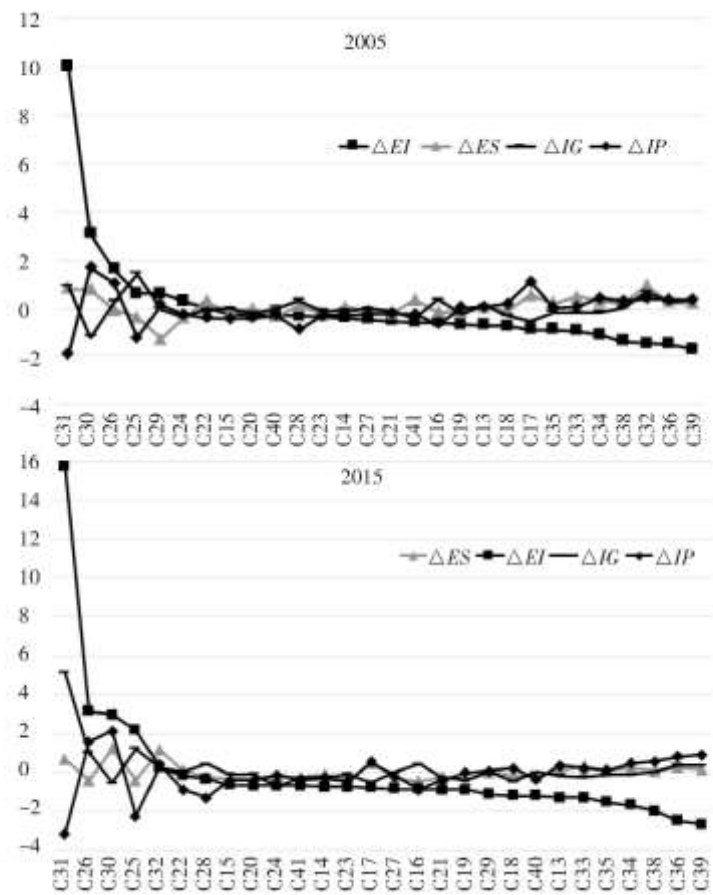


图 6 重点年份制造业子行业碳排放分行业分解（单位：亿吨）

五、结论与政策建议

这里采用分阶段及分行业 LMDI 分解方法，研究了 2000—2017 年中国制造业及其子行业二氧化碳排放量的变化情况以及造成子行业碳排放差异的主要影响因素，得到如下结论：

第一，制造业不同子行业的碳排放量及碳排放强度存在显著差异。制造业各子行业中，5 个高碳排放强度行业贡献了制造业总产出的 29%及二氧化碳排放总量的近 80%。其中，黑色金属冶炼和压延加工业的二氧化碳排放量最大。相比之下，汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业，计算机、通信和其他电子设备制造业等高科技行业则在低能源消耗、低碳排放下实现了更大的产出。

第二，经济活动效应是制造业碳排放的最主要驱动因素。尤其是以黑色金属冶炼和压延加工业为代表的高排放强度行业，经济活动效应的碳排放贡献最为显著。受 2000 年以后中国快速城镇化及经济高速发展的共同影响，基础设施建设对钢材、有色金属等原材料需求猛增，导致这些产业产能严重过剩，相应碳排放随之增加。

第三，能源强度效应是碳减排的最主要驱动力，也是造成制造业子行业间碳排放差异的最重要的影响因素。虽然近年来制造业产业规模和产值持续扩张，但得益于技术进步推动的能源强度下降，制造业碳排放量在 2014 年后就趋于下降。黑色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、化学原料和化学制品制造业等高排放强度行业的能源强度效应显著为正，而中、低排放强度行业的能源强度效应为负。高、低能源强度行业的能源强度效应差距在进一步拉大，以黑色金属冶炼和压延加工业为代表的高排放强度行业在能源利用效率方面还有很大提升空间。

第四，分阶段来看，经济活动效应和行业规模效应的碳排放贡献呈先增后减的趋势，能源强度效应的影响总体呈上升趋势。2005—2010 年，受快速城镇化、基础建设投资和出口拉动，第二产业生产规模快速扩大、就业人数迅速增加，制造业尤其是高排放强度行业经济活动效应的碳排放贡献几乎是 2000—2005 年和 2014—2017 年的 2 倍。随着中国经济逐步转向高质量发展，政府出台了一系列节能减排政策，鼓励企业发展绿色、循环经济，大力推动高耗能行业去产能，除黑色金属冶炼和压延加工业外，四大高耗能行业的能源强度效应的碳减排影响均呈上升趋势。

基于以上分析，提出如下政策建议：

第一，明确重点行业碳达峰任务，支持重点行业和企业率先实现碳达峰。2020—2030 年是实现碳达峰目标的关键 10 年，应将黑色金属冶炼和压延加工业等碳排放总量高、碳排放强度大的行业作为碳达峰工作的重中之重。对这些重点行业明确碳达峰任务，研究制定政策文件，形成行业碳排放标准，实行更严格的门槛准入和环评政策，引导企业通过加强自主研发和转型升级提升能源利用效率，降低碳排放强度。

第二，结合不同区域特点，制定碳达峰与碳中和行动方案。在全国碳交易市场建设中，应根据各区域省市产业结构特点，逐步建立和完善全国性碳交易市场^[16]。各地在发展规划中，也应纳入 2030 年碳达峰目标和 2060 年碳中和远景目标，积极探索碳达峰与碳中和的实现路径。其中，东部地区经济发达，产业集聚度高，是能源消耗和碳排放的重点区域，应该大力鼓励通过采用新技术、新工艺实现绿色发展。中部地区包括山西等煤炭资源大省，应鼓励改进煤电技术，避免新增煤电装机，减少煤炭能源开采，优化能源结构。西部地区的新疆、青海、云南等省份可充分发展光伏、风力、水力等绿色能源，发展智能电网，通过西电东输，减少火力发电，尽早实现能源脱碳。

第三，推动产业结构优化升级，加快发展高端制造业。由于高科技行业可以在更低碳排放下实现更高产出，因而应鼓励支持高新技术产业发展，加快推动制造业内部结构优化升级，大力发展以技术密集型与资本密集型为主的高端制造业，持续提升计算机、通信和其他电子设备制造业以及汽车制造业与铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业的产业份额，鼓励低消耗、低排放、高产出部门发展，降低制造业部门的碳排放强度。

第四，加快节能技术研发及应用，提升能源利用效率。应增大财政支出中科技投入的比例，加快推进能源重大技术研发、重大示范工程建设，在化石能源清洁高效转化、零碳能源技术、可再生能源高效开发利用、先进高效节能等领域，推进技术装备研发与技术转化，提高能源科技自主创新能力。尤其要重视相关技术在高排放强度行业的应用推广，提高能效环保标准，推进钢铁、化工等行业的节能减排改造。

第五，深化能源体制改革，促进能源结构优化升级。着力改变以煤炭为主的能源结构。推动煤炭深加工，鼓励发展煤转电、煤转气、煤转油技术，并通过技术创新和政策支持大力提升清洁能源产能，推动分布式能源、太阳能新材料等技术商业化应用，优化能源供给结构。实现碳中和目标，应在制造业全行业推广使用零碳能源技术与工艺流程，实现能源结构从碳密集型化石能源向清洁能源转变。

参考文献：

-
- [1]LIU Z, GUAN D, WEI W.Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J].Nature, 2015, 524(7565):335-338.
- [2]CAI B, GUO H, CAO L, et al.Local strategies for China's carbon mitigation:An investigation of Chinese city-level CO₂emissions[J].Journal of Cleaner Production, 2018 (178):890-902.
- [3]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):66-78.
- [4]原娜, 李国平. 产业内部结构升级对碳排放的影响——基于 OECD 主要成员国面板数据的实证分析[J]. 气候变化研究进展, 2016(4):332-340.
- [5]KAYA Y.Impact of carbon dioxide emission on GNP growth:Interpretation of proposed scenarios, presentation to the energy and industry subgroup[Z].Response Strategies Working Group, IPCC, 1989:Paris.
- [6]ANG B W.Decomposition analysis for policymaking in energy:Which is the preferred method?[J].Energy Policy, 2004(32):1131-1139.
- [7]李艳梅, 张雷, 程晓凌. 中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010(2):218-222.
- [8]ANG B W, XU X Y, SU B.Multi-country comparisons of energy performance:the index decomposition analysis approach [J].Energy Economics, 2015(47):68-76.
- [9]徐盈之, 徐康宁, 胡永舜. 中国制造业碳排放的驱动因素及脱钩效应[J]. 统计研究, 2011(7):55-61.
- [10]陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009(4):41-55.
- [11]田华征, 马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J]. 自然资源学报, 2020(3):639-653.
- [12]邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019(1):36-60.
- [13]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(2):285-292.
- [14]林伯强, 杜克锐. 我国能源生产率增长的动力何在——基于距离函数的分解[J]. 金融研究, 2013(9):84-96.
- [15]SHI Y, HAN B, ZAFAR M W.Uncovering the driving forces of carbon dioxide emissions in Chinese manufacturing industry:An intersectoral analysis[J].Environment Science and Pollution Research, 2019(26):31 434-31 448.
- [16]平新乔, 郑梦圆, 曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化[J]. 改革, 2020(11):37-52.

注释:

1 在 2010 年国民经济和社会发展统计公报中明确列出了六大高耗能行业, 分别为: 化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业、石油加工炼焦及核燃料加工业、电力热力的生产和供应业。

这是国家层面对于高耗能行业首次比较明确的界定。由于电力热力的生产和供应业不属于制造业子行业,其他五大高耗能行业与分析结果吻合,因此,此处高排放强度行业只选取五个行业。