

中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径

——广义迪氏指数分解和动态情景分析

邵 帅， 张 曦， 赵兴荣

[摘要] 制造业是中国的支柱产业和碳排放大户，其碳减排效果直接决定了中国总体碳减排目标能否顺利实现。本文以《中国制造 2025》和中国 2030 年减排目标为背景，首次使用广义迪氏指数分解法考察了 1995—2014 年制造业碳排放演变的驱动因素，并基于蒙特卡洛模拟对 2015—2030 年制造业碳排放的潜在演化趋势进行了动态情景分析，进而比较了碳排放达峰过程中相关因素的贡献差异。结果显示：投资规模是导致制造业碳排放增加的首要因素，而投资碳强度和产出碳强度则是引致碳排放减少的关键因素；重工业和轻工业因其不同发展特征而呈现出碳排放驱动因素的差异化影响；在基准情景和绿色发展情景下，制造业碳排放 2030 年之前均将持续增长，而在技术突破情景下，碳排放将有较大可能在 2024 年提早达峰；除绿色发展情景难以实现“中国制造 2025”目标外，其他两种情景设定下的制造业产出碳强度均可实现各阶段的预期下降目标；规模效应的减弱为碳排放达峰提供了有利条件，而投资碳强度和产出碳强度则为碳排放达峰提供了关键驱动力。政府需要进一步引导激励制造业企业增加以节能减排为目的的投资活动，在严格执行节能减排措施和大力发展低碳技术创新的条件下，制造业将具有可观的碳减排潜力。

[关键词] 中国制造 2025； 碳排放； 广义迪氏指数； 动态情景分析； 达峰路径
[中图分类号]F124 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2017)03-0044-20

一、问题提出

《巴黎协定》的签署开启了全球气候变化治理工作的新阶段。作为世界上最大的碳排放国，中国正在积极主动地承担减排责任。中国政府承诺到 2030 年将单位 GDP 碳排放在 2005 年基础上降低 60%—65%，并且碳排放总量在 2030 年左右达到峰值。近 30 年来，中国一直处于经济中高速发展阶段，碳排放主要来源于经济活动，尤其是制造业的生产过程。中国是世界公认的制造业大国。据联合国商品贸易统计数据，2013 年，中国制造业出口额已高达 22090 亿美元，占全球贸易总额的

[收稿日期] 2016-07-10

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目“能源依赖与中国区域经济发展效率的关联机制及其实证研究”(批准号 71373153)；上海市曙光计划项目“碳排放约束下的中国绿色经济发展绩效评估”(批准号 14SG32)。

[作者简介] 邵帅(1981—)，男，黑龙江七台河人，上海财经大学城市与区域科学学院副教授，博士生导师；张曦(1992—)，女，四川自贡人，中国石油大学(华东)化学工程学院硕士研究生；赵兴荣(1990—)，男，山东泰安人，中国石油大学(华东)化学工程学院硕士研究生。通讯作者：邵帅，电子邮箱：shaoshuai8188@126.com。感谢匿名审稿专家和编辑部的宝贵意见，文责自负。

11.7%。然而,中国制造业的“粗放式”繁荣也伴随着大量的能源消耗和碳排放。2000—2014年,中国制造业的能源消费量年均增长率为8.65%,碳排放年均增幅高达8.23%,为中国节能减排工作的开展带来了巨大的压力。

中国于2015年出台了制造强国战略第一个10年行动纲领《中国制造2025》,明确提出了到2025年将单位增加值碳排在2015年基础上降低40%的目标。作为碳排放大户,制造业的碳减排效果直接关系到中国的总体碳减排成效。因此,这一目标的提出不仅对于制造业本身的碳减排工作具有战略指导作用,而且也成为了中国2030年碳减排目标实现的重要保障。显然,准确识别制造业碳排放演变的基本驱动因素,并据此针对上述特定的碳减排目标选择合适的减排路径进而制定相应的减排政策,是中国制造业顺利实现低碳转型发展的必要条件。

尽管学术界已开展了大量关于中国碳排放变化影响因素的指数分解研究(陈诗一等,2010;鲁万波等,2013;Shao et al.,2016),但专门针对中国制造业碳排放驱动因素的研究较少。与其他指数分解方法相比,对数平均迪氏指数(LMDI)分解法因其独特的优势而在研究碳排放问题上得到了广泛的应用(Shao et al.,2016)。然而,随着学术界对指数分解法研究的不断深入,有学者发现LMDI法也并非完美的分解方法。Vaninsky(2014)指出,包括LMDI在内的现有指数分解方法均以Kaya恒等式为基础,将目标变量分解成多个因素相乘的形式,各因素之间存在着形式上的相互依赖性,而其分解结果也取决于影响因素的选取,使得基于Kaya恒等式的不同因素分解形式可能产生相悖的分解结论。此外,现有的指数分解法至多只能考察一个绝对量因素(如经济规模),而不能揭示其他绝对量因素(如能源消费)的变化对碳排放变动的的影响,并且对分解过程中隐含着的碳排放影响因素难以被充分考虑。针对这些缺陷, Vaninsky(2014)提出了一个新的指数分解框架,即广义迪氏指数分解法(Generalized Divisia Index Method, GDIM),克服了上述现有指数分解法的缺陷,能够更加全面准确地量化不同因素对碳排放演变的实际贡献。

对碳排放历史演变趋势进行分解分析有助于掌握过去不同因素对碳排放的影响情况,而情景分析则有助于探索不同政策及经济情景设定下各因素的潜在演变对未来碳排放走势的差异性影响,进而量化探索未来碳减排目标的实现路径。一些学者尝试结合因素分解与情景分析来探讨中国的碳排放问题(Guan et al.,2008;Lin and Ouyang,2014)。但是,现有文献中的情景分析均局限于各影响因素的固定变化率设定,而现实中变量的未来演化趋势通常具有不确定性,其潜在变化率理应为一个取值范围而非特定取值。蒙特卡洛模拟作为一种不确定性分析方法,因其全面性和灵活性而被广泛应用于不确定性事件的分析研究,但在中国碳减排路径研究中的应用还不多见。林伯强和刘希颖(2010)、董锋等(2015)是目前仅见的采用该方法预测中国碳排放未来变化情况的两篇文献,但其中各变量的取值均基于固定的离散概率分布设定,而离散值及其概率的选择在很大程度上依赖于研究者的主观判断,因而缺乏科学合理性。事实上,取值区间内的任意值对于目标变量而言均有可能出现,而非特定的少数取值。此外,蒙特卡洛模拟仅被作者用于预测碳排放,而尚未与情景分析方法有机地结合,使得研究结果难以为减排路径决策参考提供有效信息。尽管蒙特卡洛模拟可被视为预测碳排放走势的合理方法,但其结果无法揭示不同经济社会发展走势及能源环境政策导向所产生的不同环境影响效果之间的差异。如能将蒙特卡洛模拟与情景分析有机结合,则可以发挥出二者的互补优势,科学地预判不同政策导向下的碳排放演化趋势及其概率分布情况,以期识别出最优的减排路径。

有鉴于此,本文首先使用GDIM对中国制造业碳排放的历史演变进行经验分解,进而基于蒙特卡洛模拟对其潜在演变趋势进行动态情景分析,并进一步识别各驱动因素在碳排放达峰过程中的

贡献差异,以期掌握促使碳排放达峰的关键推动力。本文可能的贡献在于:①首次采用 GDIM 考察了中国制造业碳排放演变的驱动因素,特别考察了现有文献较少关注但不容忽视的三个投资因素,即投资碳强度、投资效率和投资规模;②利用蒙特卡洛模拟技术在考虑不确定性的条件下,首次对不同政策和技术发展情形下的碳排放潜在演变趋势进行了动态情景分析,进而通过分解分析,就相关因素对碳排放达峰的贡献差异进行了比较,实现了分解分析与情景分析的有机结合;③首次针对《中国制造 2025》减排目标及中国 2030 年减排目标开展了中国制造业碳减排路径讨论,为其未来碳减排政策的合理制定和实施提供了必要的参考依据。

二、制造业碳排放历史演变的经验分解

1. 因素影响机理、指数分解模型与变量数据说明

现有的碳排放指数分解研究通常以 Kaya 恒等式为基础,普遍聚焦于能源消费碳强度、能源强度和产出规模等传统因素。能源消费碳强度测度了单位能耗产生的碳排放量。通常情况下,燃料质量和燃烧效率在短时间范围内不会发生明显变化(Lin and Ouyang, 2014),因而相关文献常假设每种燃料的排放系数在其研究时段内保持不变(鲁万波等, 2013; Shao et al., 2016),这样能源消费碳强度的变化事实上就反映了能源消费结构的变动。能源强度测度了单位产出消耗的能源总量。在其他条件不变的情况下,能源强度下降意味着能源效率得到提升,则有利于促进碳排放减少。产出规模通常以经济活动水平(即增加值)表示。在经济增长尚难根本摆脱依赖化石能源消费的条件下,产出规模的扩张显然将引致碳排放的增加。

不难看出,现有指数分解研究对碳排放驱动因素的选取较为固定但不全面。首先,虽然产出规模和能源消费规模同是影响碳排放的绝对量因素,但现有研究只考察了产出规模对碳排放的影响。实际上,当能源消费碳强度保持不变时,能源消费规模变化必然导致碳排放变化,但此影响并未被现有研究加以考察。其次,产出碳强度已被一些研究(如 Guan et al., 2008; Minx et al., 2011)证明是碳排放的重要影响因素,尤其是在结构分解研究中常被关注,但在指数分解研究中被长期忽视。产出碳强度测度了单位产出的碳排放,是衡量低碳发展程度的重要指标。在其他条件不变的情况下,产出碳强度的下降将促使碳排放减少,从而表明经济发展的低碳程度越高。

此外,现有研究很少考虑投资因素对碳排放的影响,本文特别引入投资规模、投资效率、投资碳强度这三个与投资相关的因素,主要基于以下考虑:改革开放以来,大规模的固定资产投资成为中国经济快速增长的首要推动力。其中,相当一部分投资被用于基础设施建设,引致了大量以化石能源为主的能源消费和相应的碳排放激增,导致中国经济陷入了“产业投资—经济增长—能源消耗—碳排放”的低持续发展模式。虽然一些文献(董锋等, 2015)指出,经济规模扩张是中国碳排放的首要促增因素,但经济增长是投资等一系列因素综合作用的结果,而投资是其必要条件和基本动力,考察投资因素对碳排放的影响有助于从源头为碳减排引导政策的制定提供必要参考。正如陈诗一等(2010)所述,中国生产部门的资本规模对碳排放具有最大的促增效应,这与粗放型增长方式中仍在持续的资本深化现象紧密相关。此外,资本在污染密集型行业和高技术低碳行业间的流向无疑也会影响碳排放的变动。因此,本文除了考虑现有研究普遍关注的产出规模所引致的碳排放变化外,还专门考察了投资规模对中国制造业碳排放演变的影响。

以投资效率为代表的要素配置效率也对碳排放具有重要影响。由于中国资本市场起步较晚,相关配套体系还不完善,粗放式的投资拉动型发展方式使得固定资产投资长期以来持续高速增长,导致资本边际生产率逐渐降低,造成大量效率流失(Qin and Song, 2009)。投资效率低下势必会引起

大量相应的碳排放增加,尤其对于资本密集型行业而言,其投资效率较劳动密集型行业明显偏低,但其能源消耗和碳排放却明显更高(岳书敬,2011)。如果投资效率得以提升、资本配置效率得到改善,那么将有助于碳减排。

投资碳强度直接反映了投资的低碳程度。作为企业硬件(生产设备)投入的固定资产投资对碳排放的影响具有双重效应。一方面,如果投资更多被用于更新改造节能减排设备,那么设备更新所带来的能源效率和碳排放效率的改善将有利于碳减排;另一方面,如果企业的投资活动是以提高生产率和扩大生产规模(如扩建厂房和生产设备再投资)为目标,那么根据回弹效应理论可知,技术进步所带来的能源效率提升将引致生产者额外使用更多的能源而增加碳排放(邵帅等,2013)。因此,投资碳强度可以在一定程度上反映投资活动的“绿色”程度,以节能减排为目标的投资增加将促进投资碳强度降低从而促使碳排放减少,但以生产技术改善和要素生产率提升以及生产规模扩张为目的的投资增加,则会使投资碳强度上升而导致碳排放增加。但在大量的 LMDI 分解文献中,由于 Kaya 恒等式的特点,研究者只能分解出能源消费碳强度,而无法再分解出投资碳强度和产出碳强度。这也是 LMDI 法存在的缺陷之一,即难以反映变量之间的间接联系,如产出和碳排放的联系(即产出碳强度因素)、投资和碳排放的联系(即投资碳强度因素)。在经济体制、政治体制和社会保障体制等诸多因素制约下,资本存量结构具有很强的刚性,调整难度较大;相反,资本增量结构的可塑性更大(林毅夫等,1999)。因此,节能减排的投资更新更大程度体现在资本增量上,而不是存量上,从而增量意义上的固定资产投资对碳排放而言具有更加直接的影响。综上,以固定资产投资为代表的增量投资活动对于制造业的碳排放具有不可忽视的重要影响,考察其相关因素对碳排放的影响方向和影响程度,有助于为有效制定制造业部门的碳减排政策提供重要的决策依据。图 1 展示了各因素对碳排放演变的影响机理和作用路径。

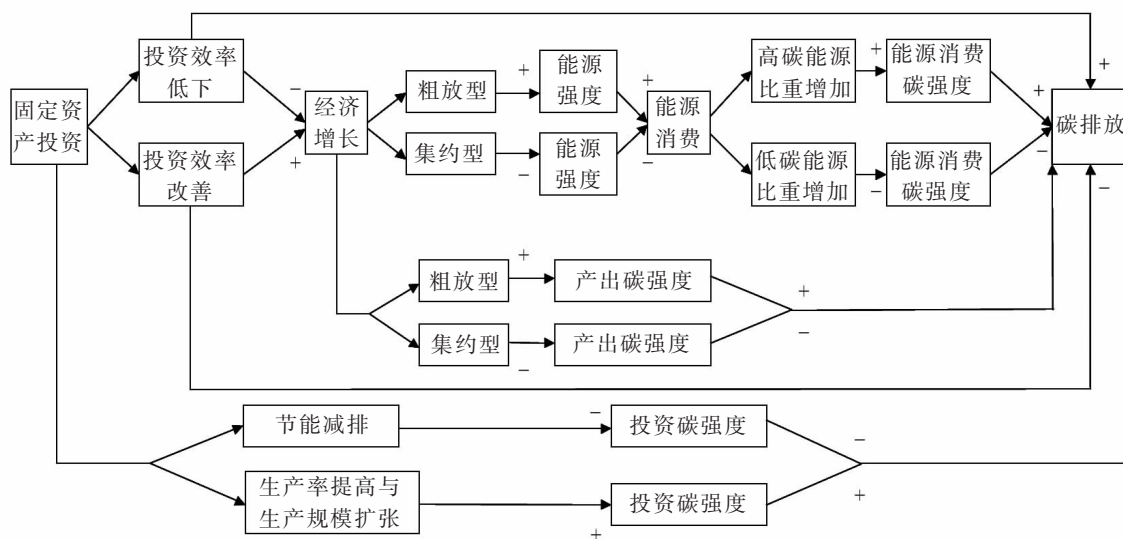


图 1 各因素对碳排放演变的影响机理和作用路径

注：“+”表示具有正向的促进作用，“-”表示具有反向的抑制作用。

资料来源：作者绘制。

为将上述有待重点考察的碳排放演变驱动因素纳入分析框架,并考虑到 LMDI 方法的局限,本文采用 Vaninsky(2014)提出的广义迪氏指数分解法(GDIM)开展研究。GDIM 通过对 Kaya 恒等式的变形,构建可以揭示环境变量变化动因的多维因素分解模型(包括多个绝对量因素和相对量因素)。

该方法弥补了现有指数分解模型中因素选取相互依赖的缺点，并能够对其中隐含的环境影响因素予以考察，而且其分解结果已对所有因素的关联性予以区分，不会产生重复计算的问题。基于上述机理分析和 GDIM 的基本原理，可以将制造业碳排放及相关因素表达为如下形式：

$$CE=GV \cdot (CE/GV)=E \cdot (CE/E)=I \cdot (CE/I) \quad (1)$$

$$E/GV=(CE/GV)/(CE/E) \quad (2)$$

$$GV/I=(CE/I)/(CE/GV) \quad (3)$$

其中， CE 为碳排放， E 为能源消费总量， GV 为增加值， I 为固定资产投资； $ECI=CE/E$ ，表示能源消费碳强度； $GCI=CE/GV$ ，表示产出碳强度； $ICI=CE/I$ ，表示投资碳强度； $EI=E/GV$ ，表示能源强度； $IE=GV/I$ ，表示投资效率^①。

进一步地，可将式(1)—(3)变换成以下形式：

$$CE=GV \cdot GCI \quad (4)$$

$$GV \cdot GCI - E \cdot ECI = 0 \quad (5)$$

$$GV \cdot GCI - I \cdot ICI = 0 \quad (6)$$

$$GV - I \cdot IE = 0 \quad (7)$$

$$E - GV \cdot EI = 0 \quad (8)$$

令因素 X 对碳排放变化的贡献表示为函数 $CE(X)$ ，由式(4)—(8)可以构造一个由相关因素所组成的雅可比矩阵 Φ_X ：

$$\Phi_X = \begin{pmatrix} GCI & GV & -ECI & -E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ GCI & GV & 0 & 0 & -ICI & -I & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -IE & 0 & -I & 0 \\ -EI & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -GV \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

根据 GDIM 的原理，碳排放的变化量 ΔCE 可以分解成以下各因素贡献加总的形式：

$$\Delta CE[X|\Phi] = \int_L \nabla CE^T (\mathbf{I} - \Phi_X \Phi_X^+) dX \quad (10)$$

其中， L 表示时间跨度； $\nabla CE = (GCI \quad GV \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$ ； \mathbf{I} 表示单位矩阵；“+”表示广义逆矩阵；如果雅可比矩阵 Φ_X 中的列为线性无关，那么 $\Phi_X^+ = (\Phi_X^T \Phi_X)^{-1} \Phi_X^T$ 。

碳排放的变化可被分解为 8 种效应之和： ΔCE_{GV} 、 ΔCE_{GCI} 、 ΔCE_E 、 ΔCE_{ECI} 、 ΔCE_I 、 ΔCE_{ICI} 、 ΔCE_{IE} 、 ΔCE_{EI} 。其中， ΔCE_{GV} 、 ΔCE_E 和 ΔCE_I 三个绝对量因素分别反映产出规模变化、能耗规模变化和投资规模变化对碳排放变化的影响。在相对量因素中， ΔCE_{GCI} 反映制造业发展的低碳程度（表现为碳生产率）变化对碳排放变化的影响； ΔCE_{ECI} 反映能源使用的低碳程度变化及各种能源间的相互替代程度调整（表现为能源结构变化）对碳排放变化的综合影响； ΔCE_{ICI} 反映固定资产投资的低碳程度变化对碳排放变化的影响； ΔCE_{IE} 反映资本生产率变化对碳排放变化的影响； ΔCE_{EI} 反映生产过程对能源的依赖程度变化对碳排放变化的影响。

基于数据的最大可得性，本文选择 1995—2014 年中国制造业整体数据作为研究样本，各变量数据由 28 个制造业分行业（重工业 11 个、轻工业 17 个）相应数据加总而得。相关数据主要来源于《中国工业经济统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》。制造业的增加值参考陈诗一（2011）的方法进行构造，碳排放的估算说明详见《中国工业经济》网站附录。为保证数据的可比性，增加值和固定资产投资均平减为 2000 年不变价格。

① 限于篇幅，以上变量的相关信息未列示，可登陆《中国工业经济》网站 (<http://www.ciejjournal.org>) 下载。

2. 分解结果与讨论

本文使用 R 语言对制造业碳排放驱动因素进行广义迪氏指数分解。基于中国每 5 年制定实施一个社会经济发展规划的事实, 本文将考察时间段 1995—2014 年划分为 4 个子阶段: 1995—2000 年(“九五”时期)、2000—2005 年(“十五”时期)、2005—2010 年(“十一五”时期)、2010—2014 年(“十二五”初期), 由式(6)、式(10)可以计算得到驱动因素分解结果, 见图 2。可以看到, 在所考察的 8 个因素中, 投资规模(I)、产出规模(GV)和能源消费规模(E)对碳排放一直保持促增效应, 而投资碳强度(ICI)、产出碳强度(GCI)、能源强度(EI)和投资效率(IE)一直保持促降效应, 能源消费碳强度(ECI)的促增效应和促降效应均有出现。这说明随着社会经济的快速发展, 更多的生产投资被用于创造社会财富, 因此, 制造业产出规模的扩张引致了大量的能源消耗及相应的碳排放。在技术效率和能源结构保持不变的情况下, 生产规模的扩大(包括投资规模、产出规模、能源消费规模)将导致碳排放增加, 即存在明显的“规模效应”。而强度效应(包括投资碳强度、产出碳强度、能源强度和能源消费碳强度)和效率效应(即投资效率)(除“十一五”时期的能源消费碳强度外)的分解结果则意味着节能减排技术的研发和利用, 促使碳生产率和碳排放效率得到了一定程度的提升, 发挥了促进碳减排的作用。

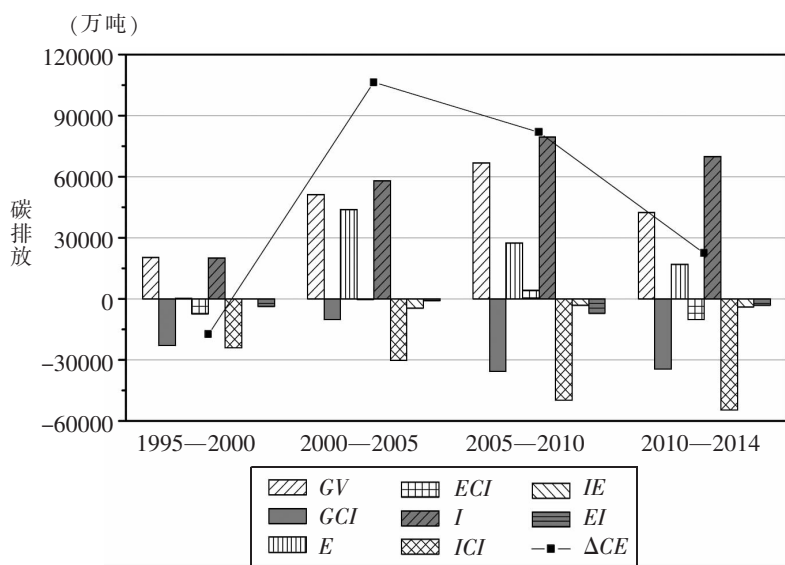


图 2 制造业碳排放演变的分阶段因素分解结果

资料来源:作者绘制。

在各规模因素中, 投资规模(I)的促增效应先增强后减弱, “十五”时期、“十一五”时期和“十二五”初期均是对碳排放增加贡献最大的因素, 分别引致了 5.79 亿吨、7.94 亿吨和 6.98 亿吨的碳排放。这一结果与中国再次步入重化工业阶段持续高速增长的固定资产投资和与之相关的经济粗放增长模式存在密切联系。产出规模(GV)的促增效应也呈先增强后减弱趋势, “十一五”时期达到最大值, 为 6.67 亿吨。投资规模(I)和产出规模(GV)的促增效应呈十分相近的趋势, 表明固定资产投资和经济增长具有联动作用, 在中国改革开放以来投资拉动型经济增长模式的背景下, 投资规模与产出规模对碳排放具有关键的促进效应。能源消费规模(E)促增效应的演变趋势与上述两者略有差异, “十五”时期达到最大值, 为 4.38 亿吨, 接近投资规模效应和产出规模效应。这是因为这一时期中国加入了 WTO 而引致了出口急剧增加, 带动中国迅速成为“世界工厂”, 导致能源消费和相应的

碳排放明显增加。

在各促降因素中,投资碳强度(ICI)的促降效应从“九五”时期的 2.41 亿吨逐步增加到“十二五”初期的 5.47 亿吨,表明制造业用于节能减排设备的投资逐渐增加,尤其是“十一五”规划以来,中央和各地方政府更加重视生产过程的节能减排,提出了一系列节能减排约束性指标,引导制造业的节能减排投资比重有所提升,促使其投资碳强度(ICI)明显下降。产出碳强度(GCI)对碳排放的促降效应呈现出较大波动性,从“九五”时期的 2.29 亿吨下降到“十五”时期的 1.04 亿吨,然后增加到“十一五”时期的 3.59 亿吨,最后下降到“十二五”初期的 3.45 亿吨。这说明制造业在“十五”期间表现为更加粗放式的发展模式,这与该期间中国再次出现重工业化倾向以及节能减排政策不及“九五”时期执行严格有关(Chen and Santos-Paulino, 2013)。而“十一五”时期,中国首次在五年发展规划中提出节能约束性指标及碳减排约束性指标,引导制造业开启了低碳经济发展模式,因此,碳生产率的有效提升(即产出碳强度的明显下降)促使其碳排放也显著减少。投资效率(IE)的促降效应从“十五”时期开始明显增强,此后保持在 0.3 亿—0.5 亿吨。这说明近年来制造业的投资效率开始改善,过热投资逐渐被抑制,产能过剩情况得到一定程度的缓解(Qin and Song, 2009),资本生产率的提高对能源要素产生了一定程度的替代效应而使得碳排放有所减少。能源强度(EI)对碳排放的抑制作用在“十五”时期较微弱,为 0.08 亿吨,“十一五”时期达到最大值,为 0.7 亿吨。而“十一五”时期能源强度效应尤其显著,这可归因于中国政府首次将能源强度约束指标纳入“十一五”规划,并于 2009 年做出承诺,到 2020 年产出碳强度比 2005 年降低 40%—45%。因此,随着能源效率的逐渐提升,可以预期能源强度的降低在未来一段时间内将持续促进制造业的碳减排。能源消费碳强度(ECI)仅在“十一五”时期促使碳排放增加了 0.40 亿吨,而其在“九五”时期和“十二五”初期的促降效应较为明显,分别为 0.73 亿吨和 1.03 亿吨。中国的能源结构在“十二五”期间开始表现出明显的低碳化调整,这一时期中国提出煤炭占比从 70% 下降到 63% 的目标和天然气占比从 3.9% 上升到 8.3% 的目标。因此,“十二五”初期能源消费碳强度的大幅下降对制造业的碳减排产生了重要贡献。

为更加清楚地反映各因素在 1995—2014 年对碳排放演变的动态影响,本文将 1995 年设定为基期,将各因素对碳排放的贡献值逐年累加计算出各因素的累积效应值,见图 3。可以看出,1995—2014 年,制造业的碳排放累计增加了 19.29 亿吨,而 2002 年之后的累计增长量为 19.60 吨。这可归因于 2002 年起中国城市化进入全面推进阶段,以城市建设、小城镇发展和建立经济开发区为主要动力的城市化进程(林伯强和刘希颖, 2010),对钢铁、水泥、化工材料等重工业的依赖程度逐渐增大,同时 WTO 的加入在短期内促使中国迅速成为“世界工厂”,轻工业同样随之繁荣发展。这些因素共同推动了制造业的蓬勃发展而产生了大量的能源消耗,引致制造业碳排放在 2002—2014 年年均增长了 8.48%。

由图 3 可知,投资规模(I)是碳排放增加的首要因素,其引致的碳排放从 1996 年的 0.17 亿吨上升到 2014 年的 28.54 亿吨,年均增长率为 32.93%。产出规模(GV)也是促使碳排放增加的重要因素,但其促增效应在 1999 年被投资规模效应超越,1995—2014 年共增加了 17.09 亿吨碳排放。能源规模(E)效应在 2003 年后逐渐显现,其增长幅度较为平缓,2003—2014 年,其年均增长率为 17.33%,到 2014 年其累计引致了 7.51 亿吨碳排放。投资碳强度(ICI)和产出碳强度(GCI)是促进碳排放减少的主要因素。其中,投资碳强度的促降效应以年均 29.69% 的速率保持高速增长,于 2001 年超越产出碳强度效应,2004—2014 年,其促降贡献保持在产出碳强度的 2 倍左右,2014 年累计达到 20.56 亿吨。能源消费碳强度(ECI)、投资效率(IE)和能源强度(EI)对碳排放的促降效应相对较弱,至 2014 年分别累计减少了 1.13 亿吨、1.06 亿吨、0.55 亿吨碳排放。以上结果表明,中国大力倡

导的能源强度和能源结构调整还远未达到促进碳减排的预期程度,仍然具有很大的改善空间。由于以减缓投资和经济增长速度为代价的碳减排策略并不符合以发展为第一要务的发展中国家的可持续发展诉求,因此,从上述结果看,未来中国制造业的碳减排政策应主要围绕提高能源效率、促进能源结构清洁化和低碳化,以及改善资本生产率的策略予以优化实施。

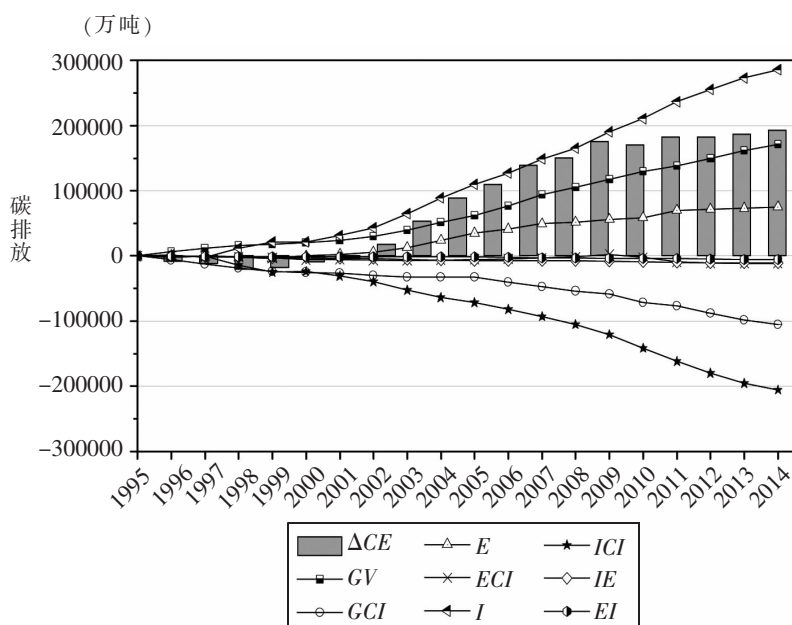


图3 制造业碳排放变化驱动因素的累积贡献(1995—2014)

资料来源:作者绘制。

由于制造业中重工业和轻工业的发展特征具有明显差异,碳减排策略也应根据其特征差异而有所侧重。因此,本文进一步对重工业和轻工业的碳排放演变进行了因素分解分析^①。重工业的碳排放走势与制造业相似,均呈现出先缓慢下降后上升(其增速由慢到快再慢)的“倒S”形走势。重工业碳排放的促增效应来源于产出规模(GV)、投资规模(I)和能源消费规模(E)。2007年以前,产出规模(GV)和投资规模(I)是重工业碳排放最主要的促增因素,这与1995—2007年重工业的高速发展状态紧密相关,这一时期中国政府非常重视基础产业和基础设施的建设,引致固定资产投资不断增加,这无疑带动了重工业内部一系列产业的发展,尤其是钢铁、水泥等基础性产业。重工业固定资产投资从1995年的1319.71亿元大幅增长到2007年的20367.47亿元,年均增长约25.61%,由此带来的累计碳排放为6.12亿吨。与此同时,重工业增加值从1995年的8693.84亿元快速上升到2007年的57618.29亿元,年均增长约17.07%,由此带来的累计碳排放为8.27亿吨。随着重工业的蓬勃发展,粗放型的发展方式导致能源高消耗以及环境高污染,能源消费总量在1995—2007年年均增长率为8.49%,累计产生了8.76亿吨碳排放。

2007年之后,重工业发展方式开始转变,投资过热问题引起了政府的重视,中央和各地方政府开始注意控制其投资规模的增长,更加注重投资效率的提高。2007—2014年,重工业固定资产投资年均增速约21.04%。虽然投资规模保持增长状态,但增长率呈下降趋势,由2006—2007年的33.33%逐步下降到2013—2014年的10.96%,从而说明制造业的过度投资得到了一定程度的抑制,

① 限于篇幅,分析结果图未列示,可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejournal.org>)下载。

由此也带来了明显的碳减排效果。分解结果显示,2007—2014年投资规模(I)对碳排放的促增效应不再增强,而是呈现小幅减弱趋势,2014年其引致的碳排放为5.94亿吨,比2007年其引致的碳排放减少0.18亿吨。同时,重工业增加值增速也开始放缓,2007—2014年,其年均增长率降低为12.91%,由此带来的碳排放量为1.26亿吨。然而,这一阶段重工业发展存在能源消耗量大的问题,能源消费规模(E)成为促使其碳排放增加的最主要因素,其引致的碳排放量在2007—2014年增长了7.61亿吨。因此,未来重工业碳减排政策应着眼于淘汰和限制高能耗的落后生产力。

在重工业碳排放的促降因素中,产出碳强度(GCI)和投资碳强度(ICI)的贡献最大,1995—2014年分别引致碳排放累计减少5.14亿吨和3.89亿吨。这说明重工业的低碳经济发展程度得到了一定程度的提升,并且投资的低碳程度也有所改善,其重工业产出碳强度和投资碳强度实现了大幅下降,下降程度分别为80.89%和94.96%。能源消费碳强度(ECI)的促降效应从2009年起逐渐增强,1995—2009年其减少了6521.34万吨碳排放,而2009—2014年却促使碳排放大幅下降了19221.46万吨。这说明重工业积极响应了中国的能源调整战略计划,在生产过程中注意降低高碳能源的使用比重,更多地使用清洁、低碳能源。能源强度(EI)和投资效率(IE)的碳排放促降效应较弱,至2014年碳排放分别减少了7699.56万吨和2070.55万吨。随着节能减排技术的进步,重工业能源效率得到了提升,1995—2014年其增幅为76.82%。此外,虽然投资效率从1998年开始逐年下降,但其下降幅度在减小,说明投资效率在一定程度上得到了改善,从而促进了碳减排。从促降程度看,能源强度和投资效率效应的贡献较弱,未来应注重进一步降低重工业的能源强度并改善其投资效率,使其能源消费规模也能得到有效控制,从而释放出更大的碳减排空间。与重工业不同,轻工业碳排放的演变呈现先下降后上升再下降的“倒N”形走势,限于篇幅,这里不展开分析,可参见《中国工业经济》网站附录。

三、制造业碳排放潜在演变的动态情景分析

1. 情景设定与模拟思路

由因素分解结果可知,制造业碳排放演变的最主要促增因素和促降因素分别是投资规模(I)和投资碳强度(ICI),而投资效率(IE)、能源强度(EI)和能源消费碳强度(ECI)具有很大驱动减排空间,未来的碳减排政策应该主要围绕这三方面因素制定实施。因此,本文构建以下含有相关因素的表达式用于进一步的情景分析:

$$CE = I \times \frac{CE}{I} = I \times \frac{GV}{I} \times \frac{E}{GV} \times \frac{CE}{E} \quad (11)$$

如果投资规模(I)、投资效率(IE)、能源强度(EI)和能源消费碳强度(ECI)的变化率分别为 α 、 β 、 δ 、 ϕ ,那么, $I_{t+1} = I_t \times (1 + \alpha)$, $IE_{t+1} = IE_t \times (1 + \beta)$, $EI_{t+1} = EI_t \times (1 + \delta)$, $ECI_{t+1} = ECI_t \times (1 + \phi)$,因此,存在如下关系:

$$\begin{aligned} CE_{t+1} &= I_{t+1} \times IE_{t+1} \times EI_{t+1} \times ECI_{t+1} \\ &= I_t \times (1 + \alpha) \times IE_t \times (1 + \beta) \times EI_t \times (1 + \delta) \times ECI_t \times (1 + \phi) \end{aligned} \quad (12)$$

碳排放的变化率可表示为:

$$\omega = (1 + \alpha) \times (1 + \beta) \times (1 + \delta) \times (1 + \phi) - 1 \quad (13)$$

可以看出,制造业碳排放的演变与投资规模(I)、投资效率(IE)、能源强度(EI)和能源消费碳强度(ECI)的演化趋势密切相关。为预判制造业碳排放未来可能的演化趋势以识别合理的减排路径,本文基于各因素过去的演化趋势、现有政策实施的有效性以及潜在减排空间构建了三种情景:基准情景、绿色发展情景、技术突破情景。

(1) 基准情景。基准情景是以制造业过去发展特征为基础,假定当前经济环境和技术水平保持

不变,不采取新的减排措施,根据制造业发展的惯性趋势外推而得到的可能情景。换句话说,在基准情景的模拟中,预期制造业将继续过去资本迅速扩张、资本生产率较低、能源效率有所提升、能源结构向低碳能源缓慢调整的特征。现有研究已表明,经济因素的变化通常具有较为明显的路径依赖“惯性”特征,而在中国过去的发展轨迹中,通常越近的周期情况对未来的影响越大,反之,越远的周期情况对未来的影响越小(郑石明,2016)。为尽可能地全面反映各因素的惯性演变趋势及其潜在可能性,本文参考 Lin and Ouyang(2014)对基准情景的惯性趋势分析,并充分考虑中国五年发展规划等周期性调整特征(郑石明,2016),来设定制造业相关因素未来的潜在变化情况。基于上述基本逻辑和现实规律,2016—2030年各因素潜在年均变化率的最大值、中间值及最小值,参考其在1995—2014年、2000—2014年、2005—2014年、2010—2014年的年均变化率设定。具体而言,各因素潜在变化率的最大值和最小值对应选取其在上述四个时期中的最大值和最小值,对于介于中间的两个年均变化率,本文考虑到不同周期远近对未来的差异化影响程度,只保留一个距离现在更近时期的年均变化率作为潜在变化率的中间值。

这种基于不同时期的历史变化趋势设定未来的演变趋势区间的情景设定思路,也是出于开展蒙特卡洛模拟的需要。蒙特卡洛模拟是按照一定的概率对基准变量进行随机取值及随机组合后对目标变量加以运算的一种方法,其主要的优势就在于能够根据相关因素的经验演变情况在考虑不确定性的条件下对其未来变化趋势提供科学合理的预判,给出相关变量不同演化路径的概率分布,从而识别出其最可能的演化路径。而本文中各因素的潜在变化率就是蒙特卡洛模拟中的基准变量。根据蒙特卡洛模拟的基本原理,其接受的基准变量需要给出一个取值区间而非特定的单一取值,从而根据各变量的可能取值范围在充分考虑不确定性的条件下对其未来演化趋势进行更加合理的“分布式”模拟。如果简单沿袭大多数现有文献中的做法,仅以过去整个考察时期(本文为1995—2014年)的年均变化率来设定各因素未来的演变趋势,是无法满足蒙特卡洛模拟对输入变量数据的基本要求的。

综上,本文的情景设定思路兼顾了中国经济发展中的五年规划周期性调整特征和蒙特卡洛模拟技术对变量数据的基本要求,不但能够体现现有相关文献中常见的基于相关因素既往演化趋势而进行未来演变推断的“惯性”逻辑,而且还对能够将经济变量演化的不确定性予以考虑的蒙特卡洛模拟技术加以运用,使情景设定的基本逻辑与科学方法得到了有机的结合。由表1可以看出,在主要参考历史情形惯性趋势的基准情景设定下,未来的投资规模增长率水平较高,在不采取任何碳减排措施的情况下,基准情景将可能延续过去20多年固定资产投资较快增长的趋势,以及投资生产率低下的特征,使得投资效率呈现较为明显的下降趋势。此外,由于中国能源效率水平与世界先进水平相比明显偏低而具有较大改善空间,因此,基准情形下能源强度将延续过去较快的下降速度;而由于中国的能源结构调整一直较为困难,因此,能源消费碳强度的下降速度较小。

尽管2015年制造业的碳排放现实中已经发生,但限于数据的可得性,目前尚无法对其具体数据进行准确估算^①,因此,本文只能根据官方已经发布的相关文件和数据对其进行推算。《2015年国民经济和社会发展统计公报》显示,2015年制造业固定资产投资额比上年增长8.1%,扣除价格因素,固定资产投资实际增长10.08%,增加值比上年增长7.0%,据此可知其2015年投资效率(IE)变化率为-2.80%。《工业绿色发展规划(2016—2020年)》显示,“十二五”时期单位工业增加值能耗累计下降28%,由于整个工业部门的能源强度和制造业具有非常相近的走势^②,可以类推

① 本文估算碳排放所需的能源消费种类具体数据来源于《中国能源统计年鉴》,而目前该年鉴发布的最新版本为2015年版,即其公布的最新数据年份为2014年。

② 由于篇幅所限,此处不具体展开分析,可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejournal.org>)下载。

2010—2015年制造业的能源强度也下降了28%，进一步由2010—2014年制造业的能源强度变化幅度可以推算出其在2015年的变化率为-5.97%。《2015年国民经济和社会发展统计公报》显示，2015年中国能源消费总量中煤炭、石油、天然气和非化石能源消费量占比分别为64%、18.1%、5.9%和12%，结合2014年的能源结构数据可以得到2015年的能源消费碳强度变化率。由于中国总体能源消费碳强度和制造业部门具有非常接近的走势^①，可以类推2015年制造业能源消费碳强度的变化率为-1.34%。本文将上述分析得到的2015年各因素变化率同时作为基准情景、绿色发展情景和技术突破情景的起始数据，即令3种情景在2015年处于同样的状态水平。

(2)绿色发展情景。中共十八届五中全会进一步明确了加强生态文明建设的可持续发展观，以坚持节约资源和保护环境为基本国策，构建绿色制造体系，逐步走向绿色发展之路。本文据此构建如下绿色发展情景：政府加强对气候变化的干预措施，促使能源结构进一步优化、节能技术水平有所提升、资本生产率有所增强、固定资产投资增长进入平稳的中速阶段。各因素潜在年均变化率的情景设定如表2所示。

表1 基准情景下各因素的潜在年均变化率 单位：%

	2015	2016—2030		
		最小值	中间值	最大值
<i>I</i>	10.08	19.93	23.13	30.50
<i>IE</i>	-2.80	-11.15	-7.60	-7.31
<i>EI</i>	-5.97	-7.86	-6.30	-6.03
<i>ECI</i>	-1.34	-2.18	-0.56	-0.39

资料来源：作者整理。

表2 绿色发展情景下各因素的潜在年均变化率 单位：%

	2015	2016—2020			2021—2025			2026—2030		
		最小值	中间值	最大值	最小值	中间值	最大值	最小值	中间值	最大值
<i>I</i>	10.08	9.00	10.00	11.00	7.00	8.00	9.00	5.00	6.00	7.00
<i>IE</i>	-2.80	-3.90	-2.90	-1.90	-2.67	-1.67	-0.67	-1.47	-0.47	0.53
<i>EI</i>	-5.97	-4.29	-3.89	-3.49	-3.83	-3.43	-3.03	-3.83	-3.43	-3.03
<i>ECI</i>	-1.34	-1.35	-1.15	-0.95	-0.80	-0.60	-0.40	-0.81	-0.61	-0.41

资料来源：作者整理。

中国“十三五”规划和《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》均指出将继续降低煤和石油的比重，提高天然气比重，后者具体提出了2020年煤、石油、天然气在一次能源消费结构中的比重将分别达到62%、13%、10%的目标。据此可以算出2020年的能源消费碳强度指标，并将其与2015年该指标值进行比较，得到2016—2020年能源消费碳强度年均变化率为-1.15%，将此结果作为该因素潜在变化率的中间值。根据《中美气候变化联合声明》，中国预期非化石能源在一次能源消费结构中的比重将在2030年上升至20%。假定2030年煤、石油、天然气三者比例与2020年水平一致，非化石能源占能源消费总量的比重从2020年的15%匀速增加到2030年的20%，则可以得到2021—2025年和2026—2030年的能源消费碳强度的年均变化率分别为-0.60%和-0.61%，同样以此作为其潜在变化率的中间值。考虑到政策实施的有效性和不确定性，潜在变化率的最小值和最大

^① 由于篇幅所限，此处不具体展开分析，可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejjournal.org>)下载。

值分别在中间值基础上向下和向上调整 0.2 个百分点^①。

2015 年,国务院印发了《中国制造 2025》,提出 2020 年和 2025 年制造业的能源强度将在 2015 年的基础上分别下降 18%和 34%的目标。本文可以据此算出能源强度预期年均变化率为-3.89% (2016—2020 年)和-3.43%(2021—2025 年),并将其作为能源强度潜在变化率的中间值。本文进一步假定 2026—2030 年将延续上一个五年计划的节能政策,则其能源强度年均变化率也为-3.43%,同样以此作为其潜在变化率的中间值。参考林伯强和刘希颖(2010),本文设定能源强度潜在年均变化率的最小值和最大值分别基于中间值下降和上升 0.4 个百分点。

国务院发展研究中心发布的《绿色发展的源起与内涵》一文指出,“绿色发展具有高效化的特征,要求提高生产效率、经济效率、资源环境利用率,绿色发展是效率最大化的发展”。同时,中国环境与发展国际合作委员会相关课题组研究表明,由于过度投资和产能严重过剩,造成资本生产率低,是中国绿色转型需要克服的主要困难之一。可以预期的是,如果不大力采取绿色转型措施,保持投资效率在过去 20 年持续低下的趋势特征,那么制造业的碳减排目标,尤其是峰值目标将很难被有效实现。因此,在绿色发展情景中,预期中国制造业将采取抑制过度投资和提高资本生产率等有效减排措施,使得过度投资得到一定抑制,从而推动投资效率得到明显改善,引致制造业由资本驱动的粗放型增长模式逐渐向更加可持续的集约型增长模式转变。投资效率变化率可以通过制造业增加值和固定资产投资的变化率计算得到。“十三五”时期,中国经济步入由高速增长转向中高速增长的新常态阶段,制造业的增长速度也将相应放缓。结合李善同等(2005)、林伯强和刘希颖(2010)的研究,本文将 2016—2020 年制造业增加值的预期增长速度设定为 6.8%左右。考虑到中国将逐步步入工业化中后期阶段,制造业产出增长将在 2021—2025 年和 2026—2030 年逐步放缓,中国长期以来以工业发展带动 GDP 增长的局面将逐步改变,第三产业占 GDP 的比重将逐渐提高,而以制造业为主的工业发展将减速(黄永春等,2013)。基于上述判断,本文在 2016—2020 年基础上设定 2021—2025 年和 2026—2030 年制造业增加值年均增长率分别为 6.2%和 5.5%。中国制造业现已出现严重产能过剩,政府采取了一系列措施抑制某些行业的投资规模,“十三五”时期制造业的投资增长速度势必会受此影响。根据国务院发展研究中心测算,2016—2020 年制造业投资增速将保持在每年 10%左右,之后将进入保持 10%以下增速的常态。综上,本文预期制造业投资的年均增长率为 10%(2016—2020 年)、8%(2021—2025 年)、6%(2026—2030 年),将此作为投资规模潜在变化率的中间值。结合前文对制造业增加值和投资潜在年均增长率的预判,进而可以推算出制造业投资效率的年均变化率为-2.90%(2015—2020 年)、-1.67%(2021—2025 年)和-0.47%(2026—2030 年),将此作为投资效率潜在变化率的中间值。进一步地,在投资规模和投资效率潜在变化率中间值的基础上,分别上下浮动 1 个百分点,得到投资规模和投资效率潜在变化率的最大值和最小值。

(3)技术突破情景。技术创新是节能减排的必要途径,尤其在能效提升和低碳能源利用方面,生产和储能技术的重大突破尤为关键。本文在绿色发展情景的基础上,对投资效率、能源强度、能源消费碳强度的预期变化率参数进行强化,进而得到在能源技术实现突破情形下的强化低碳情景,称之为技术突破情景。由于未来技术发展的较大不确定性,投资效率、能源强度、能源消费碳强度的演变也都具有多种可能性,因此,本文设定的技术突破情景旨在提供一条加大绿色技术创新、促使能源强度和能源消费碳强度下降并进一步推动碳减排的可行思路,并非涵盖所有可能的技术突破情景。

^① 参考林伯强和刘希颖(2010)的设定,能源消费碳强度潜在变化率的变动幅度为 0.2 个百分点,能源强度潜在变化率的变动幅度为 0.3—0.5 个百分点,本文取其中间值,即 0.4 个百分点,投资效率和投资规模潜在变化率的变动幅度参考该研究中经济增长率的变动幅度,为 1 个百分点。

鉴于基准情景是基于制造业以往发展的惯性趋势的“外推”,而绿色发展情景是以中国制定的与绿色发展转型相关目标为参考的可能情景,本文对技术突破情景的考察则在更大程度上凸显了节能减排投资增加,以及由其带来的能源技术突破能否实现中国碳减排目标的思考。

随着中国环境保护政策日益严苛,节能减排技术的研发活动也将日渐活跃,从而将引致相关投资较快增长。相比绿色发展情景,技术突破情景中将有更多的投资用于节能减排设备更新与升级,因此用于简单重复性扩大生产规模的投资比重相对减少。本文假定在技术突破情景中,投资规模的增长率保持绿色发展情景中的水平不变,由于用于生产规模扩张的投资相对减少,则产出水平也将随之下降,即短期内节能减排技术的研发对于企业的产出增长具有不利影响,会引致投资效率下降。结合 Chen et al.(2013)对强化低碳情景中经济增速的研究,本文假设技术突破情景中的投资效率较绿色发展情景降低 1 个百分点,据此得到其潜在年均变化率分别为-3.90%(2016—2020 年)、-2.67%(2021—2025 年)和-1.47%(2026—2030 年),在此基础上分别向上和向下调整 1 个百分点得到其潜在变化率的最大值和最小值。随着全球能源结构转型的推进,中国的能源结构也在持续改进。煤炭作为中国能源消费的主导燃料,其比重有很大下降空间。2015 年,中国煤炭在一次能源消费总量中占比为 64%,创造历史最低值,并且其产量下降 2.0%,这是 1998 年以来中国煤炭产量第二次出现下降。同时天然气和非化石能源的比重近年来增速较快,尤其在一些可再生能源领域,中国的水力装机容量和太阳能利用面积及制造能力均居世界领先地位。2005—2015 年,中国的煤、石油、天然气在化石能源消费中所占比重的变化率分别为-5.46%、1.35%、4.11%。通常来讲,随着低碳能源消费比重的提高,能源应用的技术难度和边际成本均将上升,从而导致该比重的提升速度放缓(林伯强和刘希颖,2010)。但是,如果低碳能源技术水平能够得到突破式的提升,那么低碳能源消费比重的增长速度将有望持续增加。假设 2016—2020 年制造业开始增加在能源技术发展方面的研发投入,由于研发投入与获得实际效果之间往往存在一定的时滞性,本文假定这期间此情景中能源消费碳强度的潜在年均变化率与绿色发展情景中一致,为-1.15%。而研发所引致的能源结构改善效果在 2021—2030 年开始凸显,假定技术上的突破促使 2020—2030 年化石能源结构的优化效果与 2005—2015 年的一致,即化石能源消费中煤比重降低 5.46%,石油和天然气比重分别上升 1.35%和 4.11%。进而可以得出能源消费碳强度的潜在年均变化率为-0.81%(2021—2025 年)和-0.83%(2026—2030 年),将其作为中间值,在此基础上分别向上和向下调整 0.2 个百分点得到其潜在变化率最大值和最小值。

中国的能源效率虽然在过去几十年得到了很大的提升,但与世界平均水平相比还存在一定差距。随着节能减排研发活动和设备投资的增加,节能技术水平将得到提升,能源效率也将随之获得较大的改进空间。《中国制造 2025》提出 2016—2020 年制造业能源强度下降 18%的目标,如果能源利用技术有所突破,2021—2025 年和 2026—2030 年能源强度的下降幅度仍将有望维持在 18%。据此,可以得到能源强度在这三个五年阶段中的潜在年均变化率均为-3.89%,同样将其作为中间值,在此基础上分别向上和向下调整 0.4 个百分点得到其潜在变化率的最大值和最小值。技术突破情景中各因素的潜在年均变化率如表 3 所示。

基于上述三种情景中各因素潜在变化率的设定,根据其各自的发生概率,采用蒙特卡洛模拟技术分别对其进行随机取值,然后通过(13)式可计算得到碳排放的潜在变化率,进而计算得到制造业未来的潜在碳排放、产出碳强度及碳减排潜力。在进行蒙特卡洛模拟之前,需要确定模型变量(即本文里各因素的潜在变化率)的概率分布。当已知变量最可能出现的结果以及取值区间但概率分布形状未知时,三角形分布最适用于变量的随机选取(Ramírez et al.,2008)。本文中各因素最可能出现

表3 技术突破情景下各因素的潜在年均变化率 单位:%

	2015	2016—2020			2021—2025			2026—2030		
		最小值	中间值	最大值	最小值	中间值	最大值	最小值	中间值	最大值
<i>I</i>	10.08	9.00	10.00	11.00	7.00	8.00	9.00	5.00	6.00	7.00
<i>IE</i>	-2.80	-4.90	-3.90	-2.90	-3.67	-2.67	-1.67	-2.47	-1.47	-0.47
<i>EI</i>	-5.97	-4.29	-3.89	-3.49	-4.29	-3.89	-3.49	-4.29	-3.89	-3.49
<i>ECI</i>	-1.34	-1.35	-1.15	-0.95	-1.01	-0.81	-0.61	-1.03	-0.83	-0.63

资料来源:作者整理。

的潜在变化率为表1—表3中的中间值,而采用三角形分布可以建立中间值、最小值和最大值之间的概率分布关系,因此,模拟时变量的随机选取可能为取值区间中的任意值,而非特定的几个值,使得模拟结果更接近于真实情况。本文使用 Matlab 软件对基准情景、绿色发展情景、技术突破情景中的碳排放、产出碳强度下降幅度及碳减排潜力分别进行了 10 万次模拟,并以概率分布的形式展现所有可能的结果及相应概率密度。

2. 演变路径分析

本文绘制了三种不同情景下制造业碳排放演化趋势图^①。在基准情景中,即不实施新政策的条件下,制造业碳排放将极有可能在 2016—2030 年持续大幅度增长。2016 年碳排放范围为 30.46 亿—35.05 亿吨,而概率最大的排放值约为 33 亿吨。到 2030 年,碳排放在 50 亿—62 亿吨发生的概率最大,与 2016 年相比可知,碳排放未来的年均增长率约为 3.01%—4.61%。这一结果意味着如果保持过去的减排措施和经济发展趋势而不加大减排力度,制造业产生的碳排放将会持续增加。这种以牺牲环境为代价换取的高速经济增长从长期来看并不可取,因此,政府有必要在现有相关政策的基础上,进一步采取一系列更加严格的节能减排政策来转变制造业过去长期以来的粗放式增长模式。

在绿色发展情景下,制造业碳排放的增长速度明显放缓(如图 4 所示)。2016 年碳排放出现概率最大的范围为 30.99 亿—32.37 亿吨,而 2020 年和 2030 年分别为 32.13 亿—35.47 亿吨和 36.25 亿—42.15 亿吨。2016—2030 年,碳排放年均增长率范围为 0.81%—2.22%。可见,在政府采取积极的气候变化应对措施和宏观调控政策后,制造业碳排放的快速增长可以得到有效抑制。但是,从图 4 中展现的碳排放分布演化趋势看,碳排放由上升到下降的拐点尚未出现。这说明中国制造业的绿色发展规划对于 2030 年以前实现碳排放的达峰目标还显得力度不够。

而在技术突破情景下,分布中概率密度最大处的碳排放在 2024 年之后出现了明显的下降趋势。2024 年碳排放在 32.13 亿吨出现的概率较大,2030 年则下降到 31.72 亿吨,与 2016 年碳排放最可能出现的值(31.67 亿吨)十分相近。2016—2024 年,制造业碳排放最有可能出现的年均增幅约为 0.18%,而 2024—2030 年,其年均下降率约为 0.21%。由此可见,低碳技术创新甚至突破可以促使制造业超额完成国家制定的能源结构调整和能源效率提升等战略性规划,从而推动制造业碳排放提前实现达峰目标。因此,政府加强对制造业生产过程节能减排相关研发投资的宏观调控,是促使制造业大力推动低碳技术创新从而有效进行碳减排的必要途径。

除碳排放总量外,产出碳强度(以下简称碳强度)也是中国政府制定的一个重要政策指标。本文绘制了不同情景下 2005—2020 年、2015—2025 年和 2005—2030 年制造业碳强度的下降幅度图^②。2005—2020 年基准情景下碳强度的下降幅度最大,为 69.72%—74.72%,而绿色发展情景和技术突破情景下的碳强度下降幅度非常接近,分别为 66.34%—68.28%和 66.35%—68.30%(这两种情景下

^① 限于篇幅,仅展示绿色发展情景下的演化趋势,其他情景可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejjournal.org>)下载。

^② 限于篇幅,未列示下降幅度变化图,可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejjournal.org>)下载。

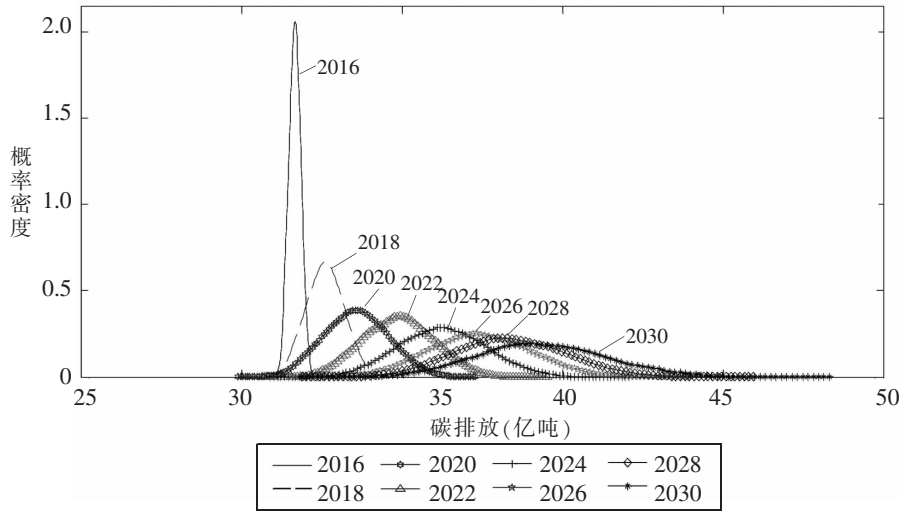


图4 绿色发展情景下制造业碳排放分布演化趋势(2016—2030)

资料来源:作者绘制。

的碳强度下降幅度分布曲线基本重合)。由此可知,三种情景都能超额完成2020年碳强度较2005年下降40%—45%的目标。虽然基准情景中的碳排放增速最快,但是由于基准情景中制造业产出保持过去二十年的高速增长,因此,其碳强度下降幅度高于其他两种情景。2016—2020年,技术突破情景中更多的投资用于节能减排领域,但是由于技术突破是一个逐渐积累的过程,能源结构和能源效率在这五年里相对于绿色发展情景并未获得非常明显的改善,因此,技术突破情景中的碳强度下降程度与绿色发展情景接近。限于篇幅,2015—2025年、2005—2030年不再展开分析,可参见《中国工业经济》网站附录。

可以看出,虽然只有技术突破情景能提前实现2030年碳峰值目标,但三种情景均可能实现2020年、2025年(除绿色发展情景)和2030年碳强度下降目标。这说明碳峰值目标较碳强度下降目标实现难度更大,需要中国政府出台实施更加强化的减排政策和更加严格的规制措施。从现有政策实施力度看,目前中国实施的与节能减排相关的能源结构调整、能源效率提升、抑制过度投资、提高投资效率等政策,虽然有助于促进碳强度下降、减缓碳排放总量增速,但对于实现碳排放的峰值目标还显得力度不够,还有必要出台实施针对能源消费总量(尤其是煤炭消费总量)和碳排放总量控制的更加严格有效的减排政策措施,以确保中国碳排放的达峰承诺如期甚至提前实现。

制造业碳减排潜力会受到其产业发展速度及节能减排政策的影响。①制造业是国民经济的支柱,为整个国民经济的运行提供必要的原材料及生产设备,在中国经济保持中高速增长的“新常态”预期下,制造业也将持续保持一定的增长势头,如前文分解分析所述,投资规模和产出规模将一直充当制造业碳排放增加的首要驱动力;②如果中国制造业粗放式的发展方式不发生根本转变,其发展过程将无法实现与能源消费及碳排放的有效“脱钩”,而在煤炭行业趋势性衰退、煤炭价格持续低迷的情况下,煤炭仍可能是大部分制造业行业能源消费种类的优先选择,因而由煤主导的能源消费结构在短期内难以通过市场性选择得到根本改变;③尽管中国碳减排承诺的提出将促进非化石能源的利用、节能减排技术的创新及能源效率的提升,但相关政策的实施效果和有效程度尚不明朗。有鉴于此,这里进一步在前文所构建的三种情景基础上估算制造业的碳减排潜力。考虑到不同的政策实施力度,本文计算了两种不同程度的碳减排潜力(如图5所示):一是碳排放从基准情景降低到

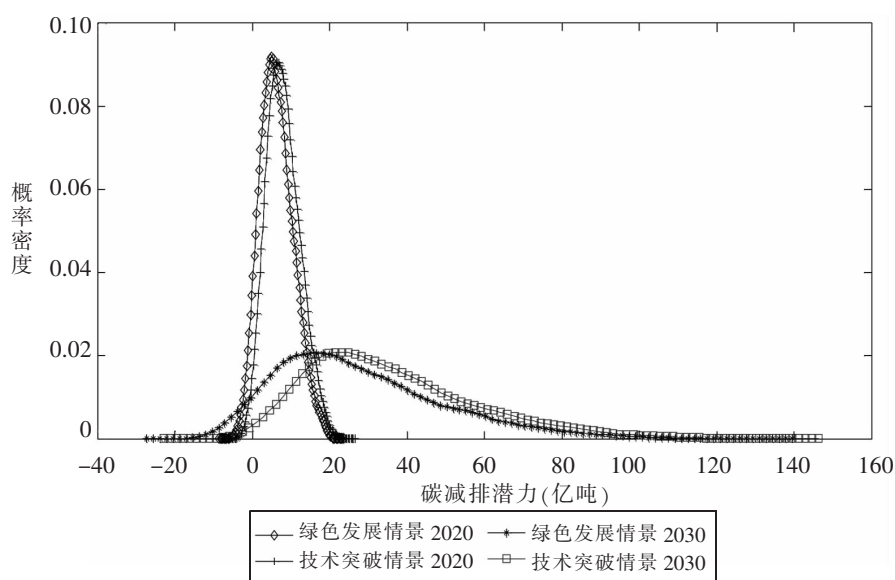


图5 2020年和2030年制造业碳减排潜力

资料来源:作者绘制。

绿色发展情景(即绿色发展情景的碳减排潜力);二是碳排放从基准情景降低到技术突破情景(即技术突破情景的碳减排潜力)。由图5可知,2020年技术突破情景的碳减排潜力略大于绿色发展情景,前者为-3.37亿—23.32亿吨(其中负值表示该情景超出基准情景中的碳排放,而正值表示该情景可在基准情景基础上减少的碳排放),其中概率最高的值为8.35亿吨,而后者为-5.42亿—21.10亿吨,其中概率最高的潜力值为6.56亿吨。2030年两个情景的碳减排潜力差别更加明显,技术突破情景可在基准情景基础上减少的碳排放约为-6.56亿—138.09亿吨,其中概率最高的潜力值为24.73亿吨,约为2013年全球碳排放的6.94%。而绿色发展情景最有可能出现的碳减排潜力为18.52亿吨,约为2013年全球碳排放的5.20%^①。可见,在执行严格的节能减排措施和低碳发展行动的条件下,制造业将具有可观的碳减排空间。

四、制造业碳排放达峰的因素贡献分解

情景模拟分析显示,技术突破情景能在2030年前实现制造业的碳排放峰值目标,并且其碳减排效果比绿色发展情景更好,为掌握其背后的驱动因素及其贡献差异,这里进一步利用广义迪氏指数分解模型对2015—2030年绿色发展情景和技术突破情景下的制造业碳排放演变进行了因素分解及比较分析。由于设定的各相关因素的变化率是一个取值区间,本文以其中间值(最可能出现的情况)为例进行了指数分解,如图6所示。虽然各因素在这两种情景下对碳排放的影响方向完全一致,但是在影响程度上存在明显的差异。在绿色发展情景中,投资规模(I)、产出规模(GV)和能源消费规模(E)对碳排放具有促增效应,其中投资规模(I)对碳排放增长的贡献最大,为11.24亿吨,而产出规模(GV)产生的碳排放为10.51亿吨,能源消费规模(E)的促增效应最小,为4.79亿吨;在碳排放的促降因素中,投资碳强度(ICI)、产出碳强度(GCI)、能源碳强度(ECI)的碳减排效果最为明显,分别为8.11亿吨、7.07亿吨、1.86亿吨,能源强度(EI)和投资效率(IE)的促降效应较弱,分别为1.11亿吨和0.24亿吨。而在技术突破情景中,投资规模(I)、产出规模(GV)和能源消费规模(E)对碳排放

① 2013年碳排放比较数据均来源于二氧化碳信息分析中心(Carbon Dioxide Information Analysis Center)。

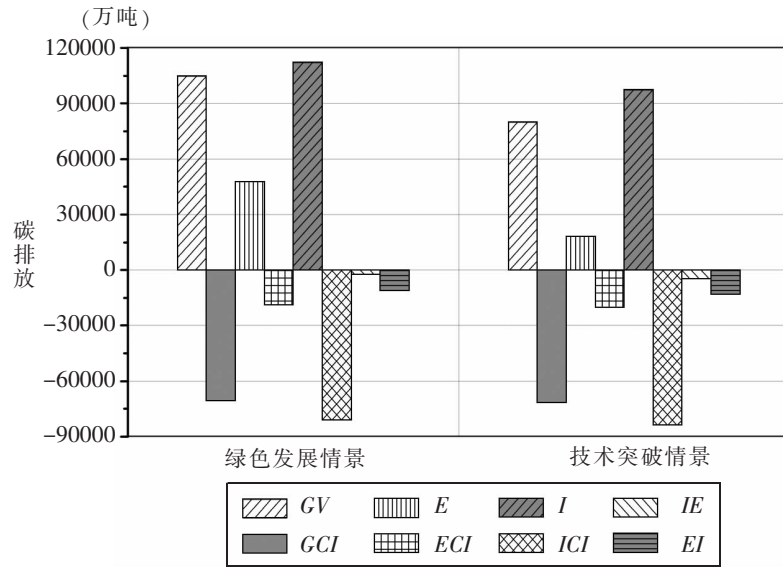


图6 制造业未来碳排放演变的驱动因素分解(2015-2030)

资料来源:作者绘制。

的促增效应均比绿色发展情景明显减弱,下降幅度分别为13.11%、23.72%、62.25%。所有促降因素产生的促降效应也较绿色发展情景有所增强,其中投资效率(IE)效应的增强幅度最大,为97.83%;能源强度(EI)效应的增强幅度位居第二,为18.34%;能源碳强度(ECI)、投资碳强度(ICI)、产出碳强度(GCI)效应的增强幅度分别为7.90%、3.03%、1.12%。这一结果再次表明节能减排技术的突破可以促进能源效率提升,从而使得在产出增长保持不变的条件下能源消费增速显著降低,并且推动能源消费总量中的清洁能源得到更多的有效利用,同时也会引致投资的绿色程度和投资效率均有所提升,从而使得这些碳排放的抑制因素发挥出更加有效的促降效应,可以在更大程度上保证碳排放强度下降和达峰双重目标的成功实现。

以上分析表明,技术突破情景中2015—2030年各因素的变化均更有利于碳减排,此种情景能够实现制造业碳排放的峰值目标,但这只是基于对未来总体减排路径分析而得到的基本结论,为制造业碳排放达峰路径的实现提供更加细致科学的政策依据,还需要从历史维度和动态视野对碳排放达峰演变过程中相关因素的具体贡献及其变化情况予以掌握。为此,本文进一步利用GDIM模型对1995—2030年技术突破情景下制造业的碳排放演变进行了逐年分解^①。可以看到,规模效应,尤其是投资规模(I),在2011年之后的碳排放促增效应明显减弱,从而为碳排放达峰提供了有利条件。过去几十年,中国经济经历了粗放型增长模式,固定资产投资、能源消费增长过快,导致碳排放持续快速增加。而“十二五”规划和“十三五”规划制定的应对气候变化的有力干预措施在一定程度上抑制了规模因素对碳排放的促增效应,规模效应(投资规模、产出规模和能源消费规模的总和)引致的碳排放预期从2011年的4.61亿吨降低到2020年的1.78亿吨。在继续保持类似干预措施并在能源结构和能源效率方面取得技术突破的条件下,规模效应引致的碳排放将在2030年减少到1.12亿吨。在各促降因素中,投资碳强度(ICI)和产出碳强度(GCI)在2006年之后一直扮演着碳减排关键驱动力的角色,二者在2006—2030年碳排放年均分别减少了1.06亿吨和0.64亿吨,共同成为了促使碳排放达峰的关键因素。由于投资碳强度的下降速度较快,预期该因素在2020年之后下降的

^① 限于篇幅,该结果未展示,可登陆《中国工业经济》网站(<http://www.ciejournal.org>)下载。

空间将明显缩小,从而对碳排放的促降效应将有所减弱。但绿色固定资产投资的增加仍将推动能源结构优化、能源效率及投资效率改善而取得技术突破性成果,推动碳排放持续下降。能源消费碳强度(*ECI*)、能源强度(*EI*)、投资效率(*IE*)三者总计带来的碳排放促降效应在2011年达到最大值,为0.83亿吨,2015—2030年保持在0.1亿—0.2亿吨,协助推动了制造业碳排放的提早达峰。

五、结论与政策含义

制造业作为中国的支柱产业和碳排放大户,应该率先为中国碳减排目标的实现承担必要的努力。能否为中国制造业部门探寻出合理有效的碳减排路径,在很大程度上决定着中国低碳经济发展目标能否顺利实现。本文首先采用GDIM对1995—2014年制造业的碳排放演变进行了驱动因素分解,进而基于蒙特卡洛模拟对2015—2030年其碳排放潜在演变路径进行了动态情景分析,并进一步比较了碳排放达峰过程中各相关因素的贡献差异,得到如下主要发现:①对于制造业整体而言,投资规模是导致碳排放增加的首要因素,投资碳强度和产出碳强度是引致碳排放减少的两个关键因素;在其他因素中,产出规模和能源消费规模对碳排放具有促增效应,而能源消费碳强度、投资效率和能源强度则对碳排放具有促降效应。②各驱动因素对重工业和轻工业碳排放的影响程度具有明显的差异:对于重工业而言,能源消费规模在2007年之后超越产出规模和投资规模成为最主要的碳排放促增因素,产出碳强度和投资碳强度对碳排放的促降效应最大,而能源消费碳强度在2009年之后开始呈现出较为明显的促降效应,但能源强度和投资效率的促降效应较弱;对于轻工业而言,产出规模和投资规模一直是最主要的碳排放促增因素,能源消费规模对碳排放的影响波动较大,从2002年起由促降效应转变为日益明显的促增效应,而产出碳强度、投资碳强度和能源消费碳强度是主要的碳排放促降因素,与重工业相似的是,能源强度和投资效率的促降效应较弱。③不同情景设定下的碳排放潜在演变路径存在明显的差异,在基准情景和绿色发展情景下,制造业碳排放预计在2030年之前均将持续增长,2016—2030年碳排放潜在年均增长率范围分别为3.94%—7.09%和0.81%—2.22%;在技术突破情景下,制造业碳排放有很大可能在2024年达到32.13亿吨的峰值。三种情景下的制造业产出碳强度均可实现2020年下降40%—45%的目标和2030年下降60%—65%的目标,但是绿色发展情景难以实现“中国制造2025”提出下降40%的目标,如果低碳技术有所突破,制造业将有可能实现这一目标,在严格执行节能减排措施和大力发展低碳技术创新的条件下,制造业将具有可观的碳减排潜力。④技术突破情景中各促增因素的效应均小于绿色发展情景。而各促降因素的效应均大于绿色发展情景,因此,技术突破情景的碳减排潜力大于绿色发展情景。规模效应的减弱为碳排放达峰提供了有利条件,而投资碳强度和产出碳强度则为碳排放达峰提供了关键驱动力。

基于上述研究结果,本文得到如下政策含义:①如果延续现有减排政策和执行力度,制造业在2030年实现碳排放达峰目标存在不小困难,而投资碳强度和产出碳强度是影响制造业碳排放变化的主要因素,因此,在发展为第一要务的前提下,政府应该进一步引导激励制造业企业增加以节能减排为目的的固定资产投资以实现生产模式的绿色升级。制造业企业以往通常倾向于以提高基本要素生产率及扩大生产规模为目的而增加投资,从而未能将节能减排纳入其生产目标函数。因此,政府应采取适当政策干预,通过财政税收政策和相应激励及监管措施,如清洁生产企业税收优惠、“绿色”低息贷款、实行碳标签制度及强化碳审计,促使企业更加注重节能减排技术的研发和应用及生产设备的“绿色”升级。②目前制造业能源效率的提升和能源结构的调整程度对碳减排的促进作用还无法令人满意,能源效率和能源结构仍具有很大优化空间。与优化能源结构相比,提高能源效

率是短期内促进制造业碳减排更加行之有效的选择。为此,应采取适当的政策措施引导企业减少高能耗产品的生产,加速淘汰落后产能,关闭或限制生产能力落后、能效水平偏低的企业,并推行合同能源管理等新型的市场化节能机制,同时通过推进化石能源定价机制的市场化改革而有效限制能源改进过程中的潜在回弹效应(邵帅等,2013)。长期看,促进能源结构逐步向非化石能源过渡可以预期发挥出更大的碳减排效应。限于中国的能源禀赋特征,短期内以煤为主的能源结构不易改变,企业缺乏优化能源结构的能动性,只有当化石能源价格能够真正反映其环境外部性成本时,企业才会主动减少对化石能源的依赖,转而使用风能、太阳能等绿色能源。因此,加速推进能源定价机制市场化改革、将能源消费的环境外部性成本在其价格中予以反映,可以成为促进碳减排的长效之策。

③投资过度、资本效率低下一直是中国长期以来存在的现实问题,大规模低效的固定资产投资同时也产生了大量碳排放,未来必须要改善这种粗放型经济增长模式。政府应加强对固定资产投资的宏观调控,改善固定资产投资结构,降低高能耗重污染产业投资比重、有效抑制其投资过快增长,进而使其能源消费规模近年来的过高增速也能够得到控制。同时,应建立完善的激励机制引导投资者选择技术密集型的低碳产业进行投资,以提高制造业整体的绿色投资效率。

④优化制造业内部的产业结构,传统重工业的大规模、高速度发展虽然在特定时期为我国经济的快速发展提供了必要支撑,但随着中国工业化逐步完成和减排压力日益凸显,重工业优先发展战略已经无法满足时代发展需要,技术密集型、知识密集型、低能耗和高附加值现代制造业的优先发展应该成为未来制造业产业结构调整明确方向。

⑤注重碳减排的“胡萝卜”与“大棒”政策的有机结合,即不但要对节能减排效果显著的企业给予税收抵免、津贴、拨款等奖励,以引导企业积极减排外,还应该采取一系列的惩罚措施,对违反能源环境政策法规的企业实施一定力度的处罚,以促使企业主动承担起社会责任,将节能减排纳入其决策规划,惟此,才可能有效实现中国经济发展的低碳转型。

[参考文献]

- [1]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,(3):735-776.
- [2]陈诗一,严法善,吴若沉. 资本深化、生产率提高与中国二氧化碳排放变化[J]. 财贸经济, 2010,(12):111-119.
- [3]董锋,杨庆亮,龙如银. 中国碳排放分解与动态模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2015,(4):1-8.
- [4]黄永春,郑江淮,杨以文,祝吕静. 中国“去工业化”与美国“再工业化”冲突之谜解析[J]. 中国工业经济, 2013,(3):7-19.
- [5]李善同,侯永志,刘云中,何建武. 中国经济增长潜力与经济增长前景分析[J]. 管理世界, 2005,(9):7-19.
- [6]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,(1):66-78.
- [7]林毅夫,蔡昉,李周. 中国的奇迹:发展战略与经济改革[M]. 上海:上海人民出版社, 1999.
- [8]鲁万波,仇婷婷,杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究[J]. 经济研究, 2013,(4):106-118.
- [9]邵帅,杨莉莉,黄涛. 能源回弹效应的理论模型与中国经验[J]. 经济研究, 2013,(2):96-109.
- [10]岳书敬. 基于低碳经济视角的资本配置效率研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2011,(4):110-123.
- [11]郑石明. 政治周期、五年规划与环境污染——以工业二氧化硫排放为例[J]. 政治学研究, 2016,(2):80-94.
- [12]Chen, S., and A. U. Santos-Paulino. Energy Consumption Restricted Productivity Re-estimates and Industrial Sustainability Analysis in Post-reform China[J]. Energy Policy, 2013,(57):52-60.
- [13]Chen, L., Z. Yang, and B. Chen. Scenario Analysis and Path Selection of Low-carbon Transformation in China Based on a Modified IPAT Model[J]. Plos One, 2013, 8(10):677-699.
- [14]Guan, D., K. Hubacek, C. L. Weber, G. P. Peters, and D. M. Reiner. The Drivers of Chinese CO₂ Emissions from 1980 to 2030[J]. Global Environmental Change, 2008,18(4):626-634.
- [15]Lin, B., and X. Ouyang. Analysis of Energy-related CO₂ (Carbon Dioxide) Emissions and Reduction Potential in the Chinese Non-metallic Mineral Products Industry[J]. Energy, 2014,(68):688-697.

- [16]Minx, J. C., G. Baiocchi, G. P. Peters, C. L. Weber, D. Guan, and K. Hubacek. A “Carbonizing Dragon”: China’s Fast Growing CO₂ Emissions Revisited [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011,45 (21):9144–9153.
- [17]Qin, D., and H. Song. Sources of Investment Inefficiency: The Case of Fixed-asset Investment in China[J]. *Journal of Development Economics*, 2009,90(1):94–105.
- [18]Ramírez, A., C. de Keizer, J. P. Van der Sluijs, J. Olivier, and L. Brandes. Monte Carlo Analysis of Uncertainties in the Netherlands Greenhouse Gas Emission Inventory for 1990–2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(35):8263–8272.
- [19]Shao, S., L. Yang, C. Gan, J. Cao, Y. Geng, and D. Guan. Using an Extended LMDI Model to Explore Techno-economic Drivers of Energy-related Industrial CO₂ Emission Changes: A Case Study for Shanghai (China)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,(55):516–536.
- [20]Vaninsky, A. Factorial Decomposition of CO₂ Emissions: A Generalized Divisia Index Approach [J]. *Energy Economics*, 2014,(45):389–400.

Empirical Decomposition and Peaking Pathway of Carbon Dioxide Emissions of China’s Manufacturing Sector——Generalized Divisia Index Method and Dynamic Scenario Analysis

SHAO Shuai¹, ZHANG Xi², ZHAO Xing-rong²

- (1. School of Urban and Region Science, SUFE, Shanghai 200433, China;
2. School of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Manufacturing sector plays a significant role in China’s economic growth and carbon dioxide (CO₂) emissions, and thus its emission-reduction performance has a crucial effect on whether China’s emission-reduction targets would be realized. Under the background of “Made in China 2025” and China’s 2030 emission-reduction targets, this paper first employs the generalized Divisia index method to investigate determinants of CO₂ emission changes of manufacturing sector during 1995–2014, and then adopts the Monte Carlo simulation to conduct a dynamic scenario analysis on potential trajectories of CO₂ emissions of manufacturing sector during 2015–2030. Furthermore, we explore contributions of various drivers peaking CO₂ emissions. The results show that investment scale is the primary driver for the increase in CO₂ emissions, while investment carbon intensity and output carbon intensity are leading contributors to the reduction in CO₂ emissions. Heavy industry and light industry present different effects of drivers on CO₂ emissions due to their different development characteristics. CO₂ emissions will consistently increase by 2030 under the business-as-usual scenario and green-development scenario. In contrast, CO₂ emissions are very likely to hit the peak in 2024 under the technological-break through scenario. All the scenarios will achieve intensity-reduction targets, except the green-development scenario for “Made in China 2025” target. The weakening scale effect provides a prerequisite for peaking CO₂ emissions, while investment carbon intensity and output carbon intensity play a key role in peaking CO₂ emissions. The government should further encourage manufacturing enterprises to increase investment activity aimed at energy-saving and emission-reduction. Under the condition of strict energy-saving and emission-reduction measures and vigorous development of low-carbon technology innovation, manufacturing sector will have substantial CO₂ mitigation potentials.

Key Words: Made in China 2025; carbon dioxide emissions; generalized Divisia index method; dynamic scenario analysis; peaking pathway

JEL Classification: L60 O13 Q54

[责任编辑:马丽梅]