

高质量发展下中国工业企业碳减排路径选择

余红伟,林子祥,胡力元,赵晨瑞,张继宏
(武汉大学质量发展战略研究院,湖北 武汉 430072)

摘要:管理改进与技术创新是工业企业实现高质量减排的两大关键路径。运用 Shapley 值分解方法实证测度了技术创新与管理改进对工业企业碳减排技术进步效率的贡献作用。结果发现,整体上技术创新与管理改进的贡献率分别为 28.45% 和 71.55%,并且二者贡献率在不同类型特征企业之间存在明显差异。随着企业技术进步水平、雇佣规模和能耗水平的提升,技术创新的贡献率逐步递减,而管理创新的贡献率则呈现递增趋势。首次对企业管理改进与技术创新对碳排放效率的贡献进行测度,为优化“双碳”目标政策与指导企业减排行动提供有益参考。

关键词:碳减排路径;管理改进;技术创新;碳排放效率;工业企业

中图分类号:F124.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2024)01-0214-11

Carbon emission reduction paths for Chinese industrial enterprises under the background of high-quality development

YU Hongwei, LIN Zixiang, HU Liyuan, ZHAO Chenrui, ZHANG Jihong
(*Institute of Quality Development Strategy, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Management improvement and technological innovation are two important paths for high-quality emission reduction of industrial enterprises. This paper uses the Shapley value method to empirically measure the contribution of technological innovation and management improvement to the efficiency of carbon reduction in industrial enterprises. The results show that the contribution rates of technological innovation and management improvement to the efficiency of carbon emission are 28.45% and 71.55% respectively. The contributions vary from enterprises with different characteristics. With the increase of technological progress level, employment scale and energy consumption level of enterprises, the contribution rate of technological innovation gradually decreases, while the contribution rate of management innovation shows an increasing trend. This article measures the contribution of management improvement and technological innovation to the carbon emission efficiency for the first time, which will provide useful references for further optimizing the “dual carbon” target policies and guiding enterprise emission reduction actions.

Key words: carbon emission reduction paths; management improvement; technological innovation; carbon emission efficiency; industrial enterprise

收稿日期:2023-08-16 修回日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金青年项目(72004170);国家社会科学基金重大项目(19ZDA083);武汉大学自主科研项目(人文社会科学);中央高校基本科研业务经费专项资助。

作者简介:余红伟(1985—),男,湖北武汉人,武汉大学质量发展战略研究院副教授,博士,研究方向为环境与能源经济管理。

实现碳达峰碳中和是经济社会高质量发展的必然要求,也将是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。工业生产是中国产生碳排放的主要领域之一,约占据全国碳排放量的40%^[1],探讨当前中国工业企业碳减排有效路径,对于加快推动工业领域绿色低碳转型,促进“双碳”目标的实现具有重要的现实意义。

工业企业碳排放主要来源于生产活动中直接或间接的化石能源消耗。从工业生产过程来看,企业进行碳减排可能存在结构性减排、规模性减排、技术性减排、管理性减排以及市场性减排等不同方式。从能源投入端来看,工业企业可以选择使用更多清洁绿色能源来替代传统化石能源,通过优化能源结构来减少碳排放。同时,工业企业也可以考虑直接减少能源投入,通过降低能耗规模来控制碳排放,但代价往往是牺牲经济产出规模^[2]。从能源消耗过程来看,提升单位能源产出效率是促进碳减排的关键。一方面工业企业可以通过引入更多低碳技术来改进生产工艺流程等来促进能源生产率的提升;另一方面也可以通过改善与优化能源管理或实行精细化管控等来减少资源消耗,提高产出效率^[3]。在排放端,企业可以通过在碳交易市场购买碳排放配额等方式,来抵扣自身超额的碳排放量。同时,企业也可以采用碳捕捉、碳封存等技术来直接减少自身碳排放。虽然存在多种碳减排方式选择,但是能够驱动工业企业内生性减排的核心路径仍为技术性减排与管理性减排。结构性减排方式对区域自然资源禀赋和宏观能源体制政策等外部条件具有较强的依赖性^[4],当前企业还难以决定自身的生产用电到底是“绿电”还是“煤电”;规模性减排的选择无疑是强环保规制压力下“壮士断腕”的无奈选择,并不利于企业的可持续发展^[5];市场性减排的本质则是一种市场化的约束与激励机制,是通过经济成本的压力来激发企业采取其他相应的直接减排行动。因此,管理改善与技术创新才是企业进行高质量减排的关键路径。

对于中国工业企业而言,碳减排到底应该侧

重于生产过程中的技术创新还是管理改善,这是一个非常重要的现实问题。特别是在当前全球经济不确定性加剧的趋势背景下,中国企业高质量发展面临着更大压力,减碳方式若不能助力企业实现经济与生态效益的双赢,便难以能成为企业决策的理性选择^[6]。从当前政策文件来看,国家与地区“双碳”相关政策较为突出技术创新对促进企业碳减排的重要作用,如绿色技术创新、工艺流程改善、设备升级改造、绿色产品创新等。从发达国家历程来看,欧美等国家早在20世纪70年代就开始注重管理改善在节能减排中的作用,要求建立标准化的能源管理体系,并在工业领域广泛推行合同能源管理,通过信息化与数字化等手段构建精细化的能源管理系统,对企业能耗进行实时监控、分析与优化。从理论上讲,技术创新与管理改善均有助于促进企业的技术进步,实现更少的能源投入并产出更多的经济成果^[7],但是二者在不同企业之间的作用效果与潜力可能会存在一定差异。比如规模更大的企业可能有更多的资金与人员投入来开展减碳技术创新,并且具有承受创新失败风险的能力^[8];内资企业相比于外资企业而言生产管理水平和水平往往相对较差,通过管理改善来提升企业经营绩效可能存在更大潜力空间;出口型企业往往需要适应发达国家较高的环境壁垒而具有更高的环境友好度,其在绿色技术创新与组织管理方面也与非出口企业存在较大差异,等等。不同特征企业碳减排的占优路径往往存在差异,厘清不同特征企业在技术性减排与管理性减排之间的差异,准确定位其占优减排路径,对于促进中国工业企业碳减排至关重要^[9]。本文将探讨高质量发展背景下中国工业企业碳减排的占优路径选择问题,旨在助力工业领域绿色低碳转型提供有益借鉴。

一、理论分析

(一)企业碳减排路径

如前所述,企业碳减排的路径可以分为结构性减排、规模性减排、技术性减排、管理性减排、市场化减排等方式。

结构性减排是企业通过调整与优化用能结构,选择可再生清洁能源替代传统化石能源,从而减少碳排放^[10]。学者们指出中国“双碳”问题本质上就是能源结构的问题^[11-12],结构性减排也被认为是企业实现碳中和的优选路径^[13]。然而,结构性减排会受到清洁能源供给的物理性与经济性双重约束。当前中国能源体系赋予工业企业选择能源消费结构的自主权限较小^[2]。用电企业往往并不清楚其所用电量到底是有排放的“煤电”还是无排放的“绿电”^[14];即使面对传统化石能源,企业受限于地区资源禀赋、能源政策、自身生产设备、能源装置等因素,进行用能调整的成本相当高,短期内难以改变用能结构^[15]。因此,即使结构性减排被认为是工业企业碳减排的重要路径,但其较大程度上依赖于外部政策与资源条件,是外生于企业的自主选择的一种路径。

规模性减排是指企业通过缩减生产规模,减少物资与能源消耗,以达到减碳目标。从短期来看,规模性减排可以起到明显效果,但其代价却是牺牲短期经济利益甚至是长远发展机会。企业理性市场主体,往往没有激励去主动缩减生产规模来实现碳减排。如果这种行为存在,可能更多是来自外部规制政策的压力。实际上在 2021 年,一些地方过度追求短期减碳目标,盲目限制火电输出,发生了大面积“拉闸限电”现象,迫使大量企业减产甚至停产,对经济社会造成了不良影响。因此,规模性减排的短期性效应容易被地方政府所捕获与利用,它也被认为是导致“运动式”和“一刀切式”减碳的重要原因。碳减排是一项长期的系统性工程,以牺牲经济增长或人民福利为代价的减碳方式是不可持续和不可取的。

市场化减排是控排企业通过在碳交易市场上购买碳配额,以冲抵其超出限额排放的部分,从而实现履约周期内的减排目标。市场化减排能够充分地调动企业节能减排的积极性,使稀缺的碳排放资源在各生产部门之间进行优化配置,实现经济与环境综合福利的最大化^[16]。碳交易市场被认为是推动经济体实现减碳的重要手段,在世界范

围得到广泛应用^[13]。然而,从理论上来看,虽然市场化减排能够帮助企业通过购买配额来实现自身减排目标,但是其本身并没有实现直接的碳排放量减少,只是以成本形式将自身超出的碳排放量通过市场交易的方式转移到了其他企业^[12]。市场化减排会对企业碳排放形成有效约束,但是并不必然会推动企业采取实际减排行动,只有当减排行动(如能源管理、流程改造等)的成本低于市场购买碳配额的成本时,企业才会主动行动,而此时直接促成企业减排的就不再是市场化路径,而是其他技术或管理等方面的行动策略。

可以看出,结构性减排路径较强依赖于外部政策与资源禀赋,规模性减排方式则会对企业生产造成显著的消极影响,而交易性减排策略的实质是碳排放量在企业间的转移,是外在减排压力而不是具体减排行动。本文认为只有内生于企业生产过程中的技术性减排与管理性减排才是推动企业有效减排的关键路径。

(二)技术创新与企业碳减排

技术创新是工业企业碳减排的关键动力。技术性减排是通过研发低碳技术、改造生产工艺流程、引入低碳环保设施设备或开发绿色低碳产品等,降低生产各环节中的碳排放。从生产的过程来看,企业技术性减排主要包括生产过程中的技术、方法与流程等工艺创新以及面向绿色低碳的产品创新等。

低碳生产技术与方法是促进企业绿色生产的关键。绿色低碳生产技术与方法的应用能够在一段时间内通过构建新的生产组合,降低能源消费,直接提升碳排放效率。不少专家学者验证了技术创新促进能源效率提升的直接关系^[3,17]。企业内部绿色技术创新能够和外部制度协同发挥作用,增加企业的碳减排投资,提升碳减排效果。同时,技术创新也是推动生产工艺流程迈向绿色高效转型升级的重要来源。研究发现,技术创新能够显著促进企业的流程创新,当给定数量的产出(商品、服务)可以用较少的投入生产出来,流程创新也就随之产生了。企业可以通过技术创新,改

进产品生产方法和内部流程。具体包括优化产品设计、原材料、包装、工艺、设备及回收处理,来提高资源利用率,降低能源强度,减少生产活动对生态环境造成更多的污染和威胁。

技术创新可能是企业实现碳减排与绩效增长双赢目标的一种占优选择。许多研究均表明,企业面向生态环保的技术创新投入。一方面,能减少生产过程中的资源消耗,降低污染排放水平^[18-19];另一方面,能显著降低企业生产成本,提升生产效率,促进企业绩效增长^[1]。然而,技术创新在当期通常是较大的成本投入,其未来的收益往往也具有不确定性,这对企业的资源条件与抗风险能力提出了较高的要求。实际上,许多生产企业并不一定有足够的能力进行技术创新,同时技术创新的路径也并非适应于所有企业的发展。研究表明,技术创新存在一定的风险性与门槛效应,技术创新较多地发生在重污染、技术密集型行业的大型国有企业中,而对于中小型的非国有的企业,技术创新往往会给企业带来过高的资金与运营等风险。同样地,对于技术性碳减排的路径而言,其适用性可能在不同特征企业中存在差异。准确定位与匹配适用于技术性碳排放的企业类别,是推动技术性减排路径实施的关键。

(三)管理改进与企业碳减排

管理改进也是企业碳减排的重要手段。管理减排是通过完善与强化管理措施,促进企业组织、生产及运营等方面管理效能不断改进,以提升资源使用效率并达到碳减排目的。

企业能源管理与碳减排可能最为直接相关^[13]。企业能源管理是对生产过程中的能源使用进行科学的计划、组织、控制、检查以及监督等全方位的管理,包括引入先进的能源管理体系与标准、制定能源使用计划与节能目标、加强能源设备管理与引入能源控制系统、核算能源有效消耗及对工艺性损耗等指标并进行动态监测、实施能源定额管理,并通过责任奖惩制层层将能耗目标落实等具体内容^[8]。能源合同管理作为一种专业化的能源管理模式,以签订能源绩效合同的方式,能

为客户提供一整套节能技术改造、能源优化利用等服务,从而实现节能减排。当前中国也正在积极推广能源合同管理的应用。除了能源管理外,企业精益化管理水平也会对碳排放产生重要影响。精益管理意味着要持续识别用来生产商品和服务的废物和资源^[1],并在生产、采购、库存和供应商的关系等方面重新设计流程以减少这些资源的消耗和废物的排放^[20]。精益管理“零浪费”的理念能够降低生产、包装等周期的碳排放,朝着高效率、低耗能、绿色的方向发展,从而能够有效应对可持续发展的挑战。

管理改进是企业生产效率提升的内在技术进步因素之一。同技术创新的减排路径一样,管理改进也被认为是能够实现企业减碳与绩效目标双赢的一种较优选择^[21]。然而不同的是,技术创新路径可能存在明显的门槛效应,即规模更大与效益更好的企业才有能力来通过技术创新来实现减排^[22]。而管理改进却恰好相反,规模越小的企业,管理方式改进的成本越小,风险也越低,而且改进的收效也越发明显。管理改进与技术创新两种减排路径对不同企业的减排作用似乎存在一定程度的互补,因而更有必要厘清两种路径在不同类型企业中的贡献作用,为企业碳减排提供更为准确的参考路径。

二、研究方法

(一)模型与策略

柯布—道格拉斯(C-D)生产函数被广泛应用于分析经济要素投入对产出的贡献程度。本文则假设企业技术进步因素包括技术创新 T 与管理改进 M 两类变量,并且两类变量可通过一定方法进行测度,那么基于C-D生产函数,本文可拓展设定如下生产函数:

$$Y_{qrs} = c_0 + c_1 K_{qrs} + c_2 L_{qrs} + c_3 E_{qrs} + X_{qrs} + \gamma_q + \mu_r + \varepsilon(T, M) \quad (1)$$

式(1)中, Y_{qrs} 为 q 城市 r 行业的第 s 家企业的碳排放效率, K_{qrs} 、 L_{qrs} 、 E_{qrs} 分别代表企业生产中资本、劳动力以及能源要素的投入,通过控制这些因素可以剥离由于规模性减排(K_{qrs} 和 L_{qrs})和结构性

减排(E_{iqrs})等路径的影响;同时,进一步控制企业层面的特征性变量 X_{qrs} ,包括企业年限、企业所有制、出口类型等。此外,还考虑控制城市固定效应 γ_q 和行业固定效应 μ_r 。 $\varepsilon(T, M)$ 为残差项,即为估计方程(2)的“索罗余值”,可以表示除去了规模效应(K_{qrs} 和 L_{qrs})和结构效应(E_{iqrs})等有形要素投入之外包含技术创新 T 和管理改进 M 在内的碳排放技术进步效率。

在方程(1)基础上进一步考察可观测的企业技术创新因素和管理改进因素对碳排放技术进步效率 $\varepsilon(T, M)$ 的影响效应,本文构建的估计模型为:

$$\varepsilon(T, M) = \lambda_0 + \lambda_1 \sum_{i=1}^n T_i + \lambda_2 \sum_{j=1}^m M_j + \varphi \tag{2}$$

式(2)中, T_i 和 M_j 分别代表了一组可观测的技术创新与管理改进变量, φ 为误差项。

本文假定企业碳排放的技术进步效率可以由可观测的技术创新 T_i 和管理改进 M_j 两组因素变量共同作用而成,运用数学上测算多因素共同贡献度的 Shapley 值分解方法,即可获得各类技术创新因素与管理改进因素对企业碳排放技术进步效率的贡献比率,并依此进一步确定企业碳减排的占优路径。

(二)数据

本文的研究数据来源于 2018 年中国企业与劳动力匹配问卷调查。调查获取了广东、湖北、江苏、四川和吉林等 5 个省份 60 个地级市城市 100 个区/县调查单元的 2 335 家工业企业数据,所属行业类型分布如见表 1 所示。问卷涵盖了企业管理、生产、技术创新、销售与出口、发展环境、人力资源以及财务绩效等方面的情况,获取了企业各类能源与资源的消耗情况,包括水、电、天然气、汽柴油、煤炭等,能够支持本文进行碳排放效率的测算;同时还包括企业管理状况(如生产过程中的能源管理与精益管理等)以及企业技术创新情况(如生产方法、生产流程等生产工艺的创新,以及新产品创新等),也能支持本文从管理改进和技术创新两方面来比较企业碳排放技术进步效率提升的占优路径。

表 1 样本行业分布情况

行业类型	样本量	占比/%	行业类型	样本量	占比/%
非金属矿物制品业	221	9.9	医药制造业	72	3.2
通用设备制造业	167	7.5	皮革皮毛及其制品和制鞋业	67	3.0
专用设备制造业	165	7.4	印刷和记录媒介复制业	63	2.8
电气机械制造业	163	7.3	酒饮料和茶制造业	58	2.6
汽车制造业	147	6.6	文教、工美、体育用品等制造业	56	2.5
纺织服装服饰业	127	5.7	木材加工制造业	47	2.1
纺织业	112	5.0	家具制造业	38	1.7
计算机、通信电子设备制造业	105	4.7	铁路、船舶等其他运输设备制造业	32	1.4
企业成立年限金融制品业	98	4.4	黑色金属冶炼和压延加工业	29	1.3
农副产品加工业	96	4.3	造纸和纸制品业	29	1.3
化学原料和化学制品业	94	4.2	有色金属冶炼和压延加工业	29	1.3
橡胶和塑料制品业	85	3.8	仪器仪表制造业	20	0.9
食品制造业	78	3.5	其他制造业	34	1.5

(三)变量

1. 碳排放效率

本文核心被解释变量为企业的碳排放效率。一般认为碳排放效率是一定碳排放量下的经济产出价值^[23]。与单一碳排放量指标相比,碳排放效率指标同时兼顾了经济效率与生态效率,更能体现“双碳”目标下减碳与增长的高质量发展要求。本文通过将企业电力、天然气、柴油、煤炭等能源资源的使用量折算为碳排放量,并进一步计算单位碳排放量下企业营业总收入,从而得到企业碳排放效率。

2. 管理改进

本文将选择从精益管理和能源管理两个方面来测度工业企业生产过程中与碳排放相关的管理改进。精益管理方面,问卷中要求企业回答是否在生产工具与机器设备、原材料和库存、生产流程及生产环境四个方面实施精益管理。每个问题均设置“是”和“否”选项,并根据企业对以上 4 个问题回答“是”的数量,从低到高进行 0~1 分的等距赋值,合成获得每个企业的精益管理水平。在能源管理方面,问卷从能源管理体系、能源管理目标、能源目标分解、能源目标评审、能源数据收集五个方面刻画企业能源管理的情况。根据每个答项由低到高进行 0~1 分的等距赋值,并按算术平均值合成 0~1 分的能源管理水平。

3. 技术创新

本文从工艺创新与产品创新两个方面来衡量企业技术创新。本文研究的工艺创新包括在生产方法、流程和其他方面的创新^[25],被访企业须回答“是”或“否”,赋值为0~1。加总3个问题之后,根据回答“是”的数量,由低到高进行0~1分的等距赋值。在产品创新方面,本文主要选取新产品销售额占全部销售额的比例,代表企业产品创新的水平。

4. 控制变量

本文还考虑企业层面的控制变量,主要包括雇佣规模、总资产、用能结构、成立年限、出口及注册类型。企业雇佣规模是反映企业劳动力投入的关键变量,本文运用企业总人数来进行衡量,同时进一步按照规模将企业划分为小型企业、中型企业和大型企业,并对应生成分类变量。企业总资产包括流动资产和非流动资产。用能结构代表了企业使用各类能源的情况,如电力、天然气、汽柴油、煤炭,此处定义为电气化结构,即企业用电占所有能源消耗的比例。企业成立年限为调查当年扣除企业成立年份。企业注册类型分为私营企业、国有企业和外资企业,取值为1、2、3作为分类变量。为了使估计结果具有可比性,本文进一步对各变量(除注册类型)进行归一化处理,描述性统计如表2所示。

表2 变量描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
企业碳排放效率	2 297	0.201 2	0.178 6	0	1
工艺创新	2 303	0.589 2	0.426 5	0	1
产品创新	2 278	0.285 5	0.308 0	0	1
精益管理	2 271	0.587 9	0.461 7	0	1
能源管理	2 249	0.196 6	0.206 6	0	1
企业规模	2 267	0.435 6	0.211 7	0	1
企业资产	2 260	0.482 7	0.269 2	0	1
用能结构	2 265	0.778 0	0.343 7	0	1
企业成立年限	2 272	0.566 3	0.140 0	0	1
企业注册类型	2 299	1.952 8	0.476 9	1	3
企业出口	2 290	0.367 0	0.482 1	0	1

三、实证结果

(一) 基于回归估计的效应分析

首先在模型(1)基础上运用索罗余值法估计获取企业碳排放技术进步效率,然后运用模型(2)来估计技术创新和管理改进对碳排放技术进步效率的影响作用,结果如表3所示。

表3中第(1)列是对总体样本进行OLS回归估计的结果。各类技术创新变量与管理改进变量的估计系数均显著为正,表明技术创新与管理改进均是促进碳排放技术进步的重要路径。通过比较各类变量系数值的大小^①可以发现,两类管理改进路径变量的系数整体较技术创新路径变量更大,说明管理改进对企业碳排放技术进步效率的影响作用更大。进一步地,管理改进的两类路径变量中,能源管理的估计系数最大,其对企业碳排放效率的影响程度最为显著;技术创新的两个变量中,工艺创新的估计系数较大,其对碳排放效率的影响作用也更为显著。

表3 OLS回归和分位数回归估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	OLS	10%	25%	50%	75%	90%
工艺创新	0.128 ** (0.053)	0.039 (0.028)	0.063 ** (0.026)	0.080 * (0.043)	0.189 ** (0.089)	0.423 ** (0.181)
产品创新	0.058 * (0.031)	0.015 *** (0.005)	0.023 *** (0.005)	0.008 (0.008)	-0.005 (0.015)	-0.040 (0.054)
精益管理	0.154 *** (0.052)	0.079 *** (0.030)	0.128 *** (0.042)	0.188 *** (0.062)	0.250 *** (0.088)	0.419 ** (0.177)
能源管理	0.222 *** (0.060)	0.065 ** (0.029)	0.093 * (0.049)	0.433 *** (0.071)	0.493 *** (0.101)	0.454 ** (0.205)
样本量	2 148	2 148	2 148	2 148	2 148	2 148
R ²	0.673	—	—	—	—	—

注:***、**、*分别表示在 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 与 $p < 0.1$ 时有统计学意义。

本文进一步运用分位数回归方法来展开分析。选取第10、25、50、75和90个百分位进行回归,回归结果分别如表3中第(2)列至第(6)列所示。从管理改进方面来看,精益管理与能源管理在各分位上的估计系数均显著为正,表明这两类管理改进路径对各技术进步水平下企业的碳排放效率均存在显著的促进作用。同时,从估计系数大小来看,随着分位数的升高,各估计系数主要呈现不断增大的趋势,表明越是技术进步水平高的企业,精益管理与能源管理对其碳排放效率提升

① 6类技术创新与管理改进变量均已经进行了归一化处理,因此本文认为其估计系数的比较是有意义的。

的作用越发明显。从技术创新方面来看,产品创新在较低分位时结果显著为正,但是在分位数 50% 及以上时,结果变为不显著。而工艺创新的估计系数除了在 10% 的低分位水平时不显著外,在其他分位数上均显著为正,且随着分位数的升高,估计系数的绝对值也不断增大,这表明产品创新的碳减排路径对碳排放技术进步效率较低的企业更为有效,而工艺创新路径则对技术进步效率更高的企业作用更为明显。

(二) 基于 Shapley 值分解的效应分析

整体 OLS 和分位数回归估计的系数是在假定各技术创新和管理改进变量不相关的基础上,各变量单独对碳减排技术进步效率的影响作用。实际情况中减排路径变量可能互相影响与作用(如精益管理可以促进能源管理等,能源管理也可能促进工艺、产品创新等),因而单凭估计系数大小的比较无法准确得到各路径对碳排放技术进步效率的真实贡献程度。本文选择运用 Shapley 值法,基于整体 OLS 和分位数回归的结果,进一步对各类路径变量的平均边际贡献程度进行分解,结果如表 4 所示。

总体来看,技术创新和管理改进对企业碳排放技术进步效率的贡献程度分别为 28.45% 和 71.55%,表明管理改进方式的碳减排贡献程度更大。这意味着当前中国工业企业通过管理改进来进行碳减排是一种相较技术创新更加有效的选择。进一步分析管理改进的具体路径可以发现,能源管理的贡献程度最大占比 41.76%,其次是精益管理,表明通过提升能源管理与精益管理水平来促进碳排放应当成为目前中国工业企业减排的关键路径。在技术创新方面,工艺创新的贡献比例为 21.33%,而产品创新占比相对较小仅为 7.12%,说明工艺创新是推动工业企业技术性减排的重要路径。

为了观察不同分位数的分解结果,本文在分

位数回归的基础上,根据不同碳排放技术进步效率水平区间进行 Shapley 值分解,结果如表 4 所示。可以发现,技术创新的贡献率在较低分位数水平时占比较大,在 10% ~ 25% 分位和 25% ~ 50% 分位的贡献率分别为 71.45% 和 67.97%;而在较高分位数水平时其贡献占比则明显偏小,在 50% ~ 75% 分位区间的贡献占比为 37.11%,而在 75% ~ 95% 分位区间比例则仅为 16.48%。然而与此相反,管理改进的贡献情况则是在较低分位区间占比较低,而在较高分位区间内占比则高达 60% 甚至 80% 以上。从分位数回归的结果来看,即企业碳减排效率可能存在着“技术—技术递减”与“技术—管理递增”^②的规律,即企业技术创新方式的碳减排效率呈现一定的技术进步递减效应,而管理改善则呈现出相应的技术进步递增效应。这表明,对于碳排放技术进步效率处于较低水平的工业企业,技术创新是占优的减排选择,而对于碳排放技术进步效率处于较高水平的工业企业而言,管理改进则是更优选择。

表 4 基于总体 OLS 和分位数回归的 Shapley 值分解结果

变量	OLS		10% ~ 25%		25% ~ 50%		50% ~ 75%		75% ~ 90%	
	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名
技术创新	28.45	—	71.45	—	67.97	—	37.11	—	16.48	—
工艺创新	21.33	3	31.01	2	41.42	1	23.50	2	9.90	3
产品创新	7.12	4	40.44	1	26.55	2	13.61	4	6.58	4
管理改进	71.55	—	28.55	—	32.03	—	62.89	—	83.52	—
精益管理	29.78	2	10.52	4	17.41	3	23.49	3	42.97	2
能源管理	41.76	1	18.03	3	14.63	4	39.40	1	40.56	1

将表 4 中 Shapley 值分解的贡献率结果与表 3 中的估计系数大小排名进行对比分析可以发现,Shapley 值分解的结果与回归估计值大体一致,表明本文结论具有较好稳健性,也证明本文所采取的 Shapley 值分解方法的合理有效性。

四、行业异质性

(一) 不同行业特征企业的比较分析

根据企业雇佣规模(大、中、小^③)、注册类型(私营、外资和国企)、出口类型(出口与非出口)以

② “技术—技术递减”中前一个“技术”指碳排放技术进步效率,后一个“技术”则指企业技术性减排方式。同样地,“技术—管理递增”中前者“技术”也指碳排放技术进步效率,后者“管理”指企业管理性减排方式。
③ 根据国家统计局《统计上大中小微型企业划分办法(2017)》中工业企业从业人员的标准划分,将微型企业纳入小型企业一并考虑。

及耗能情况(高耗能行业与低耗能行业^④)等特征进行异质性分析,基于总体 OLS 回归得到 Shapley 值分解结果,如表 5 所示。

从企业规模来看,小型企业中技术创新对碳排放技术进步效率的贡献作用最大,而大型企业则是管理改进的影响作用更为显著,中型企业的技术创新与管理改进的作用则较为相当。进一步来看两种减排方式下的具体路径,可以发现小型企业占优的路径选择为产品创新和工艺创新;中型企业最佳占优路径为工艺创新,同时能源管理也是影响其碳排放技术进步效率的重要路径;大型企业的占优路径则为能源管理与精益管理。从企业雇用规模来看,技术创新方式的碳减排效率呈现一定的规模递减效应,而管理改善则呈现出相应的规模递增效应,即“规模—技术递减”与“规模—管理递增”^⑤的规律。这意味着小规模企业技术创新减排的潜力更大,而大企业则是管理改善的减排潜力更大。实际中,技术创新对于小企业而言往往存在较高的门槛效应,而管理改善对于大企业而言其边际成本与投入也会更大。如何帮助企业有效克服技术创新与管理改善在规模效应上的短板,成为未来促进企业碳减排的关键。

从所有制性质来看,私营企业采取技术创新方式更有利于碳减排效率提升,而国有企业与外资企业则应采用管理改进方式进行碳减排。从具体减排路径来看,工艺创新是私营企业提升碳排放技术进步效率的绝对占优路径;国有企业与外资企业的占优路径较为相似,能源管理路径对其碳排放技术进步效率的贡献作用最大。与分位数回归及规模异质性分析的结果比较,私营企业较国有企业而言普遍规模偏小,也基本符合前述碳减排技术进步效率的“规模—技术递减”与“规模—管理递增”的规律。同样地,相较外资企业而言私营企业的技术进步效率水平通常较低,因而

也基本符合前述“技术—技术递减”与“技术—管理递增”的规律。

从出口类型来看,出口企业与非出口企业表现出了较为相似的特征。管理改进方式对其碳排放技术进步效率的贡献更为显著。从具体的路径来看,能源管理是占优路径,同时工艺创新也会对出口与非出口企业的碳排放效率产生较大影响。从耗能特征来看,在高耗能行业与低耗能行业中技术创新与管理改进对企业碳排放技术进步效率的影响作用差异较大。在高耗能行业中,管理改进对碳排放技术进步效率的贡献占据主导地位;在低耗能行业中技术创新的促进作用更为显著。这种显著性差异表明企业碳减排技术进步可能存在“能耗—技术递减”与“能耗—管理递增”的规律,即技术创新方式的碳减排效率呈现一定的能耗递减效应,而管理改善则呈现出相应的能耗递增效应。进一步分析技术性减排与管理性减排的具体路径可以发现,能源管理对促进高耗能行业的碳减排的作用显著更为显著,而产品创新较工艺创新而言对低耗能行业的碳减排效率影响作用更大。

表 5 行业异质性分析结果

变量	小型企业		中型企业		大型企业		私营企业		国有企业	
	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名
技术创新	65.70	—	48.64	—	16.78	—	68.88	—	19.59	—
工艺创新	32.37	2	37.04	1	10.29	3	48.78	1	17.20	3
产品创新	33.33	1	11.60	4	6.49	4	20.09	4	2.39	4
管理改进	34.30	—	51.36	—	83.22	—	31.12	—	80.41	—
精益管理	12.66	4	19.12	3	38.98	2	13.55	3	33.23	2
能源管理	21.63	3	32.24	2	44.24	1	17.57	2	47.19	1
变量	外资企业		出口企业		非出口企业		高耗能行业		低耗能行业	
	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名
技术创新	30.72	—	28.29	—	37.68	—	18.71	—	68.86	—
工艺创新	21.16	2	22.92	2	25.76	2	13.45	3	29.31	2
产品创新	9.56	4	5.37	4	11.92	4	5.26	4	39.55	1
管理改进	69.28	—	71.71	—	62.32	—	81.29	—	31.14	—
精益管理	11.48	3	10.51	3	16.67	3	36.07	2	16.41	3
能源管理	57.80	1	61.20	1	45.66	1	45.22	1	14.73	4

(二)对高耗能行业的异质性分析

对高耗能行业企业在雇佣规模、注册类型以及出口等特征进行异质性分析,具体 Shapley 值分解结果如表 6 所示。从企业规模来看,不论在哪个

④ 根据《2010 年国民经济和社会发展统计报告》,样本企业涉及的高耗能行业分别为:石油、煤炭及其他燃料加工业、化学原料和化学制品制造业、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,其他企业则为低耗能行业。

⑤ 前者“规模”指企业规模特征,后者“技术”“管理”则分别指企业的技术创新减排与管理改进减排方式。

规模类型的企业中,管理改进对碳排放技术进步效率的贡献作用均占据主导地位;不同的是管理改进对中型企业的贡献作用最为显著,而在小型企业中相对减弱,这意味着技术创新对高耗能行业小型企业的碳减排作用也非常关键。进一步分析小型企业中具体的技术创新和管理改进路径,可以发现工艺创新是小型企业提升碳排放技术进步效率最为重要的路径。而实际情况是,对于小型企业而言,其进行技术创新往往存在着一定的门槛效应,因此如何帮助小型企业越过技术创新的门槛,激励其开展更多的工艺创新,成为其实现碳减排的关键^[26]。对于中型高耗能企业而言,能源管理、精益管理对其碳排放技术进步效率的贡献作用均较显著,管理改进是其碳减排的最佳路径。对于大型高耗能企业而言,精益管理对其碳排放技术进步效率的贡献最大,这可能是由于大型高耗能行业往往会被政府纳入重点用能单位进行管理,已经开展了较为有效的能源管理,因而进一步通过提升能源管理来促进碳排放效率的边际贡献作用并不明显。因此,大型高耗能企业应当在能源管理的基础上进一步通过精益管理等方式来系统优化各生产用能环节中的用能问题来实现碳减排目标。

从企业所有制性质来看,管理改进路径对于促进私营企业的碳减排更为有效,技术创新路径则对外资企业碳减排的作用更加显著,而两者在国有企业中的贡献程度则较为相当。进一步来看,能源管理对私营企业的减排贡献最为显著,说明当前高耗能行业私营企业碳减排最重要的路径选择就是提升企业的能源管理水平;能源管理同样对国有企业的碳排放起到重要作用,同时产品创新也是国有企业进行有效碳减排的重要路径。而工艺创新则是高耗能外资企业进行碳减排的首选路径。

在出口企业 and 非出口企业中,技术创新和管理改进的贡献比率显现较大差异,出口企业中管理改进占主导地位,而非出口企业中两者贡献率较为接近。这可能是由于高耗能的出口企业技术创新程度相对较高^[27],进一步通过技术创新来提升碳排放效率的边际作用更小,通过管理改进方式将更容易获得更为显著的减排效果。从出口企业管理改进方式下各具个路径变量的贡献率可以看出,两类管理路径的促进作用均在 20% 以上,因此出口型的高耗能企业应当选择通过提升企业精益管理、数据管理以及能源管理水平来实现减排。对非出口型高耗能企业而言,技术创新与管理改进的贡献作用相当。

表 6 高耗能行业企业的异质性分析结果

变量	小型企业		中型企业		大型企业		私营企业		国有企业		外资企业		出口企业		非出口企业	
	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名	贡献率 /%	排名
技术创新	46.63	—	27.23	—	32.15	—	18.71	—	49.20	—	85.40	—	28.61	—	51.10	—
工艺创新	37.54	1	16.73	3	18.49	3	14.45	3	9.96	4	56.16	1	21.72%	3	28.48	1
产品创新	9.09	4	10.50	4	12.66	4	4.26	4	39.24%	2	29.24	2	6.89	4	22.62	3
管理改进	53.37	—	72.77	—	67.85	—	81.29	—	50.80	—	14.60	—	71.39	—	48.90	—
精益管理	17.01	3	35.31	2	45.99%	1	16.07	2	18.76	3	6.21	4	36.73	1	22.45	4
能源管理	36.36	2	37.46	1	21.86	2	65.22	1	32.04	1	8.39	3	34.66	2	26.45	2

(三)对低耗能行业的异质性分析

同样依据企业规模、所有制性质以出口类型等特征,对低耗能行业展开进一步的异质性分析,Shapley 值分解的结果如表 7 所示。从规模来看,小型企业与中型企业中技术创新对碳排放技术进步效率的贡献度明显大于管理改进。这与高耗能行业存在显著性差异,可能是因为低耗能行业生产过程中涉及能源管理的环节相对较少,因而通

过管理方式来进行减碳并不如技术创新更加有效。进一步分析可以发现,产品创新在小型企业与中型企业中对碳减排贡献程度最大,其次为工艺创新,这表明对于低耗能行业的小型与中型企业而言,通过更多的绿色产品创新与生产工艺流程是实现有效碳减排的优选路径。同样地,对于规模越小的企业而言,技术创新的门槛效应作用越发突出,中小企业如何越过产品创新与工艺创

新的门槛成为其有效减排的关键,这与高耗能行业的结论较为一致。对于低耗能的大型企业而言,管理改进的作用贡献较大,表明低耗能的大型企业应当通过有效的精益化管理并优化能源管理来促进企业的碳排放效率提升。

从所有制性质来看,对于国有、私营和外资3种类型而言,技术创新的贡献率均大于管理改进,这一结果与高耗能企业存在显著差异。进一步分析可以发现,产品创新是私营和外资企业进行有效减排的最优选择,而对于国有企业,管理改

进是占优的碳减排策略,通过通过制定能源管理目标进行有效的能源流程管理,强化生产运营全流程的精益管理是其实现有效碳减排的重要路径。

对于低耗能行业中的出口型企业与非出口型企业,技术创新方式依然占据主导地位。其中,出口企业以工艺创新为占优路径,而非出口企业则是以产品创新为占优。此外,能源管理路径对于两类企业的贡献率分别占到了18.67%和17.19%,也是两类企业提升碳排放效率的重要路径。

表7 低耗能行业企业的异质性分析结果

变量	小型企业		中型企业		大型企业		私营企业		国有企业		外资企业		出口企业		非出口企业	
	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名	贡献率/%	排名
技术创新	85.77	—	62.09	—	38.56	—	63.76	—	35.49	—	67.08	—	71.07	—	73.59	—
工艺创新	31.77	2	28.18	2	27.38	3	17.56	3	24.39	3	12.70	4	11.34	3	19.20	2
产品创新	54.00	1	33.91	1	11.18	4	46.19	1	11.10	4	54.38	1	59.73	1	54.39	1
管理改进	14.23	—	37.91	—	61.44	—	36.24	—	64.51	—	32.92	—	28.93	—	26.41	—
精益管理	9.05	3	11.32	4	28.52	2	14.55	4	36.45	1	18.98	2	11.26	4	9.22	4
能源管理	5.18	4	26.59	3	33.92	1	21.69	2	28.06	2	13.94	3	18.67	2	17.19	3

六、结论与政策建议

研究表明,在当前中国工业企业中,技术创新和管理改进两种路径对企业碳排放技术进步效率的贡献程度分别为28.45%和71.55%,即整体上生产过程中的管理改进将更有利于促进工业企业碳排放技术进步效率的提升。进一步分析发现,随着企业碳排放技术效率、雇佣规模以及能耗水平的提升,管理改进与技术创新分别呈现“技术—技术递减”与“技术—管理递增”“规模—技术递减”与“规模—管理递增”“能耗—技术递减”与“能耗—管理递增”的规律。同时,不同减排路径对不同所有制与出口特征企业的碳排放技术进步效率也呈现出差异性的结果。研究结论对于促进当前中国工业企业的减排具有较强的指导借鉴意义。

根据研究结论,本文提出如下政策建议。

(1) 强化工业企业管理减排的宏观政策指引。当前政策注重强调通过技术创新来促进工业企业碳减排,实践中企业也形成了通过绿色技术与产品创新来减少碳排放的普遍认知,技术性减排已

然成为工业减碳的主旋律。然而,本文研究结果显示当前中国工业企业通过管理改善进行碳减排的潜力大于技术创新方式。因此,本文建议适时调整当前工业企业减排政策导向,进一步强化通过能源管理体系、精准化管理、产业能源规制等管理改进策略来促进企业减碳的政策指引,充分激发工业企业管理减排的潜力。

(2) 适度扩大重点用能单位节能管理政策的应用范围。中国一直在通过《重点用能单位节能管理办法》政策对用能大户进行能源节约与能源提升的管理。但是这项政策的适用范围主要针对“年综合能源消费量一万吨标准煤及以上”等的重点用能单位,未能涵盖更为广泛的高耗能企业。本文建议适度地调低重点用能单位的判定标准,扩大应用范围,在高耗能行业更为广泛地推行标准化的能源管理,促进更多工业企业节能降碳。

当然本文也存在一定不足。将企业生产过程中管理改进和技术创新划分为能源管理、精益管理和产品创新和工艺创新可能存在代表性与准确性等问题,也未能更进一步识别出与碳排放更加

相关的绿色创新。同时,对于两种路径为何在不同类型特征企业的碳排放技术进步效率中呈现不同作用也未能作深入解释。未来可针对这些问题进行进一步探讨。

参考文献:

- [1] 史丹. 绿色发展与全球工业化的新阶段:中国的进展与比较[J]. 中国工业经济,2018(10):5-18.
- [2] 邵帅,范美婷,杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展:基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界,2022,38(2):46-69, 4-10.
- [3] 孙传旺,占妍泓,林伯强. 新能源企业增值税政策的规模效应与创新效应[J]. 经济研究,2022,57(9):46-64.
- [4] 杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战:基于技术进步的视角[J]. 经济研究,2019,54(11):118-132.
- [5] 靳玮,王弟海,张林. 碳中和背景下的中国经济低碳转型:特征事实与机制分析[J]. 经济研究,2022,57(12):87-103.
- [6] 李娅楠,林军,钱艳俊. 环境规制下企业绿色生产决策及技术学习因素影响研究[J]. 管理学报,2019,16(5):721-727.
- [7] 李永武,王宝玲,王雅实,等. 能源转型的宏观经济效应:基于 DSGE 和面板模型的双重检验[J/OL]. 系统工程理论与实践, 2023,43(11):3069-3093.
- [8] 张三峰,魏下海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗:来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济,2019(2):155-173.
- [9] LAGOMARSINO, E. Estimating elasticities of substitution with nested CES production functions: where do we stand? [J]. Energy economics, 2020(88): 10.
- [10] 刘华军,石印,雷名雨. 碳源视角下中国碳排放的地区差距及其结构分解[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(8):87-93.
- [11] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究,2022,57(1):56-71.
- [12] 刘燕华,李宇航,王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(9):1-5.
- [13] 张希良,黄晓丹,张达,等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界,2022,38(1):35-66.
- [14] 张增凯,彭彬彬,解伟,等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. 管理科学学报,2021,24(8):147-153.
- [15] 柳亚琴,孙薇,朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径[J]. 中国环境科学,2022,42(9):4369-4379.
- [16] 王梅,周鹏. 碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究[J]. 管理科学学报,2020,23(12):1-11.
- [17] 齐绍洲,徐珍珍,谭秀杰,等. 中国碳市场产能过剩行业的碳排放配额如何分配是有效的? [J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(9):73-85.
- [18] 何建坤,卢兰兰,王海林. 经济增长与二氧化碳减排的双赢路径分析[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):9-17.
- [19] XIE X M, HUO J G, ZOU H L. Green process innovation, green product innovation, and corporate financial performance: a content analysis method [J]. Journal of business research, 2019(101): 697-706.
- [20] 刘自敏,邓明艳,杨丹,等. 降低企业用能成本可以提高能源效率与社会福利吗:基于交叉补贴视角的分析[J]. 中国工业经济,2020(3):100-118.
- [21] SHOKRI A, LI G. Green implementation of Lean Six Sigma projects in the manufacturing sector [J]. International journal of Lean Six Sigma, 2020, 11(4): 711-729.
- [22] 刘淑春,闫津臣,张思雪,等. 企业管理数字化变革能提升投入产出效率吗[J]. 管理世界,2021,37(5):170-190, 13.
- [23] 胡剑波,闫烁,韩君. 中国产业部门隐含碳排放效率研究:基于三阶段 DEA 模型与非竞争型 I-O 模型的实证分析[J]. 统计研究,2021,38(6):30-43.
- [24] 陈钊,陈乔伊. 中国企业能源利用效率:异质性、影响因素及政策含义[J]. 中国工业经济,2019(12):78-95.
- [25] 王东,李金叶. 环境规制、技术进步与能源碳排放效率[J]. 技术经济与管理研究,2022(7):31-36.
- [26] 陈剑,黄朔,刘运辉. 从赋能到使能:数字化环境下的企业运营管理[J]. 管理世界,2020,36(2):117-128,222.
- [27] 崔静波,张学立,庄子银,等. 企业出口与创新驱动:来自中关村企业自主创新数据的证据[J]. 管理世界,2021,37(1):76-87, 6.

(本文责编:辛 城)