

doi:10.3969/j.issn.1000-7695.2021.17.026

基于 STIRPAT 模型的工业研发投入对碳排放影响效应分析

贺 勇, 傅飞飞, 廖 诺

(广东工业大学管理学院, 广东广州 510520)

摘要: 以中国 35 个工业分行业作为研究对象, 运用 STIRPAT 模型和面板回归模型, 分别探讨研发投入对工业不同阶段和不同类别行业的碳排放效应。结果表明, 在各个阶段, 研发投入对促进碳减排均具有积极作用, 且在 2011—2017 年间更为显著; 对于不同行业, 对于重度和中度排放组, 研发投入对降低碳排放量均为显著影响, 其弹性分别为 -0.041 和 -0.018, 而对轻度排放组, 增加研发投入时, 碳排放呈现增加的趋势。另外, 劳动力规模是当前工业碳排放最明显的推动因素, 而提升能源效率和改善能源结构对碳排放的增长具有显著抑制作用。在不同类别行业之间, 各因素对碳排放的影响效应存在明显差异。

关键词: 研发投入; 碳排放; STIRPAT 模型; 面板回归模型; 工业

中图分类号: F424

文献标志码: A

文章编号: 1000-7695 (2021) 17-0206-07

Analysis on the Effect of R&D Investment on Carbon Emission in Industrial Sector Based on STIRPAT Model

He Yong, Fu Feifei, Liao Nuo

(School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Taking China's 35 industrial sub-sectors as the research object, using the STIRPAT model and the panel regression model, the effects of R&D investment on the carbon emissions of different industries and different types of industries are respectively explored. The results show that: at all stages, R&D investment has a positive effect on promoting carbon emission reduction, and it is more significant during 2011–2017. For different industries, for the heavy and moderate emission groups, R&D investment has a significant impact on reducing carbon emissions, and its elasticity is -0.041 and -0.018, respectively, while for the light emission group, carbon emissions show an increasing trend when R&D investment is increased. In addition, labor force scale is the most obvious driving factor of industrial carbon emissions at present, while improving energy efficiency and optimizing energy structure can significantly inhibit the growth of carbon emissions. The effects of various factors on carbon emissions are obviously different among different industries.

Key words: R&D investment; carbon emissions; STIRPAT models; panel regression models; industrial sector

近年来, 全球变暖与气候变化问题越来越受到各国政府的关注和重视, 化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放, 是全球变暖的重要原因。2014 年, 中国的 CO₂ 排放量首次超过 100 亿吨, 占全球 CO₂ 排放量的 30%^[1], 且自 2000 年以来, 工业部门占我国最终能源消费总量和产生的 CO₂ 排放量比重均超过 70%^[2]。因此, 工业部门节能减排工作刻不容缓,

对中国工业碳排放驱动力的深入研究对于控制 CO₂ 排放增长至关重要。现有研究关于碳排放的影响因素主要考虑了能源结构^[3-4], 能源效率^[5-6], 能源强度^[7], 产业结构等因素^[8-9]。然而, 这些因素可以解释宏观经济对 CO₂ 排放的影响^[10], 但未从微观层面解释 CO₂ 排放变化的原因。鉴于通过技术进步提高能源效率被认为是实现节能减排的基本途

收稿日期: 2020-12-28, 修回日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“碳排放约束下工业节能减排路径选择与控制策略: 能效提升视角”(71974038); 广东省基础与应用基础研究基金项目“碳减排驱动下考虑行业异质性的工业能效提升路径选择研究”(2019A1515011749); 广东省哲学社会科学规划基金资助项目“碳减排目标驱动下广东省工业能效提升潜力、路径与影响因素研究”(GD18CGL10)

径^[11], 而研发投入带来的技术进步是实现节能减排和降低碳强度的关键^[12], 因此, 有必要探究微观层面的研发投入对工业碳排放的影响。

通过技术进步来提升能源效率是当前节能减排的重要手段, 而技术进步需要企业的持续研发投入来保证。一些学者开始将研发投入纳入到碳排放影响因素研究模型中, 然而, 关于研发投入对碳排放的影响存在争议。部分学者研究结果表明加大研发投入对降低碳排放具有显著作用, 如刘晓燕^[13]将研发强度纳入 STIRPAT 模型来研究江苏省工业能源消费碳排放的影响因素, 结果显示, 研发强度对碳排放规模和碳强度具有抑制作用。邵帅等^[14]利用 1994—2008 年上海工业分行业面板数据, 研究了工业碳排放的影响因素, 结果表明, 研发强度对上海工业碳排放表现出显著的限制作用。郑万吉等^[15]基于 2000—2013 年中国省份面板数据和半参数空间面板滞后模型, 发现增加研发强度有助于减缓碳排放增长。Xu 等^[16]采用向量自回归模型研究了中国钢铁行业 CO₂ 的驱动力, 结果发现, 研发投入是减少中国钢铁行业二氧化碳排放的重要因素。还有一部分学者则认为, 企业研发投入的目的更多用于促进产值增长, 从而对降低碳排放无明显作用, 如李小平等^[17]通过对中国 20 个工业分行业碳排放影响因素的探索, 发现研发强度和 CO₂ 排放量正相关。何小钢等^[18]基于 STIRPAT 模型研究了中国工业碳排放的影响因素, 结果表明, 研发变量与 CO₂ 排放量负相关, 但不显著, 且与碳强度正相关。此外, Churchill 等^[19]通过分析 G7 国家 1870—2014 年间研发强度和碳排放量的关系, 发现研发强度对碳排放的影响效应在不同阶段存在差异。王钊等^[20]基于 2004—2017 年中国 30 个省市区的的面板数据, 分别从全国层面和区域层面研究了 R&D 投入、产业结构升级与碳排放之间的相互关系, 结果发现, 无论在全国层面还是在区域层面, 增加研发投入提高了碳排放量。林伯强等^[21]探讨了研发投入对我国区域二氧化碳排放的非线性影响及其差异, 发现研发投入对中部地区碳排放呈“U”型非线性影响, 对西部地区碳排放呈倒“N”型非线性影响, 而对中部地区碳排放影响不显著。

通过梳理上述文献, 尽管已有研究针对单个行业或区域层面探讨了研发投入对碳排放的影响及其差异, 但是作为中国能源消耗和碳排放最大的工业部门, 尚未见同时从时间维度和工业分行业层面探讨研发投入对其碳排放的影响及其差异。鉴于以上研究不足, 本研究结合 STIRPAT 模型和面板回归模型, 分别从时间尺度和行业层面, 探索研发投入

对工业碳排放影响及其差异。本文的主要研究思路为: 首先, 通过对 35 个工业分行业 2001—2017 历年碳排放量进行核算, 并分析碳排放和碳强度趋势; 然后, 将时间按划分 2001—2005, 2006—2010 和 2011—2017 等三个阶段, 利用各阶段工业各行业面板数据进行回归, 分析不同阶段研发投入对工业碳排放的影响及其差异; 最后, 根据各行业碳排放量和碳强度大小将 35 个工业分行业划分为重度、中度和轻度排放组, 分别对三个排放组 2001—2017 年面板数据进行回归, 分析不同类别行业研发投入对工业碳排放的影响及其差异。

1 STIRPAT 扩展模型

Ehrlich 等^[22]将人口规模、人均财富、技术水平纳入环境压力的影响因素, 通过建立 IPAT 模型来检测人类活动对环境的影响。Dietz 等^[23]进一步提出了随机形式的 STIRPAT 模型:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times \varepsilon \quad (1)$$

其中, I 、 P 、 A 和 T 分别表示环境压力、人口规模、富裕程度和技术水平, a 为模型系数, b 、 c 和 d 均各影响因素的指数, ε 为模型误差。

将式 (1) 取对数, 得到下式:

$$\ln(I) = \ln(a) + b\ln(P) + c\ln(A) + d\ln(T) + \ln(\varepsilon) \quad (2)$$

为探讨研发投入对工业分行业碳排放影响效应, 本文基于 STIRPAT 模型, 结合实际情况替换并引入部分新的变量。

(1) 本文主要研究研发投入对工业行业碳排放的影响, 因此选择行业碳排放量 (EC) 作为环境压力。碳排放量通过对能源消耗实物量进行核算, 能源数据来源于历年《中国能源统计年鉴》。

(2) 人口规模采用劳动力规模来表征, 本文采用行业历年的平均从业人口数 (P) 来表示, 数据来自于历年《中国工业统计年鉴》。

(3) 富裕程度采用人均经济产出 (A) 来衡量, 即单位从业人口数的 GDP; 由于国家统计局只公布了总工业 GDP 值, 而未给出细分行业 GDP 值, 因此本文采用 (行业产值 / 工业总产值) \times 总工业 GDP 来表示分行业 GDP, 数据来自于历年《中国工业统计年鉴》; 同时为克服价格指数的影响, 本文将历年 GDP 值转换成 2000 年不变价。

(4) 对于技术水平的衡量, 参照何小刚等^[19]的做法, 将其分为投入性标量和产出性指标, 投入性指标包括研发强度 (RD), 即单位 GDP 的研发投资额, 以及知识资本 (K), 采用发明专利数表征; 产出性指标为能源效率 (EF), 即单位能源的 GDP

产出，数据来自于历年《中国工业统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

(5) 考虑到本文中的碳排放量来自能源消耗产生的 CO₂，因此，能源结构 (ES) 是一个不可缺少的因素，本文将非化石能源消耗占总能耗的比例作为能源结构并引入模型。

通过对式 (2) 进行改进，得到如式 (3) 的扩展模型：

$$Ln(EC) = L(a) + \alpha_1 Ln(P) + \alpha_2 Ln(A) + \alpha_3 Ln(EF) + \alpha_4 Ln(ES) + \alpha_5 Ln(RD) + \alpha_6 Ln(K) + Ln(\varepsilon)$$

(3)

2 实证研究

2.1 工业碳排放核算及趋势分析

本文主要核算了来自能源消耗产生的 CO₂ 排放，为了得到更精确的结果，本文考虑了统计年鉴中共

计 23 种化石能源。采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》提供的计算方法，具体计算如式 (4) 所示：

$$CE = \sum_{i=1}^{23} CE_i = \sum_{i=1}^{23} E_i \times NCV_i \times CC_i \times COF_i \times 44/12$$

(4)

其中，EC 表示能源消耗产生的碳排放，E 表示能源消耗实物量，能源消耗数据来自历年《中国能源统计年鉴》；NCV 表示平均低位发热量，参照《中国能源统计年鉴 2016》；CC 表示单位热值含碳量，数据来自 IPCC；COF 表示碳氧化率，取自《中国温室气体清单研究》；44 和 12 分别为 CO₂ 和 C 的相对分子质量。

根据 (4) 式的计算，得到 35 个工业分行业 2001—2017 历年碳排放核算值 (见表 1)。

表 1 工业分行业碳排放量 (万吨 CO₂)

行业	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017
S1	5 155	6 450	5 627	7 491	12 239	13 364	14 592	8 564	6 804
S2	4 395	4 711	3 754	4 518	4 569	4 450	4 688	4 663	4 025
S3	345	504	955	1 164	1 327	1 895	2 033	1 608	1 003
S4	295	365	571	556	497	605	554	460	317
S5	856	996	1 150	1 464	1 569	1 375	1 429	1 214	815
S6	2 107	2 016	3 855	4 917	5 340	5 374	4 938	4 474	3 683
S7	1 374	1 240	1 958	2 248	2 605	2 568	2 551	2 112	2 188
S8	1 198	1 215	2 289	2 614	2 729	2 725	2 557	2 035	1 657
S9	394	390	266	212	162	221	149	108	55
S10	2 935	3 182	4 817	5 010	4 806	4 612	3 736	2 782	2 210
S11	349	386	630	757	743	673	593	490	363
S12	212	227	336	508	466	360	359	299	204
S13	479	579	1 000	1 097	1 272	1 204	1 064	883	389
S14	116	131	102	191	210	191	168	155	90
S15	2 613	2 765	4 125	4 461	5 389	5 350	4 167	2 948	2 750
S16	172	189	146	214	212	169	184	217	165
S17	95	101	119	168	162	112	282	307	297
S18	7 102	8 779	11 283	13 355	15 645	18 001	18 676	20 028	19 838
S19	16 070	20 443	32 358	39 383	40 984	48 595	49 820	54 603	45 011
S20	1 002	1 053	1 504	1 959	1 891	2 172	2 182	2 092	1 562
S21	1 324	1 067	1 380	1 247	1 035	1 110	1 141	1 055	979
S22	1 135	1 171	1 793	2 213	2 259	2 068	1 784	1 538	1 107
S23	20 013	26 217	39 838	45 833	50 241	58 636	56 149	52 888	42 704
S24	43 587	57 670	89 306	116 248	141 649	165 958	181 898	175 236	175 600
S25	2 531	3 096	4 548	6 427	7 112	7 113	7 099	7 097	6 729
S26	1 123	1 065	1 130	1 649	1 669	1 382	1 934	1 577	1 495
S27	1 504	1 652	2 736	3 647	4 199	5 538	2 994	2 801	1 984
S28	1 015	1 101	1 170	1 448	1 549	1 504	1 223	1 066	867
S29	1 399	1 311	1 661	2 036	2 223	2 399	2 448	1 925	1 769
S30	545	573	916	1 202	1 179	1 095	994	697	518
S31	379	451	529	735	679	483	410	410	489
S32	116	164	130	156	150	121	117	87	65
S33	5 584	6 610	4 202	3 703	4 633	5 350	4 053	2 192	2 044
S34	741	726	618	620	299	197	274	256	177
S35	79	74	75	70	66	64	61	49	48

注：(1) 表第 1 列为行业代码；(2) 由于篇幅有限，仅列出了奇数年份碳排放量。

根据 35 个行业碳排放量和碳强度的数据统计，得到如表 2 所示的描述性分析。由表 2 可知，年均碳排放最小为 67 万吨，其所在行业为水的生产和供

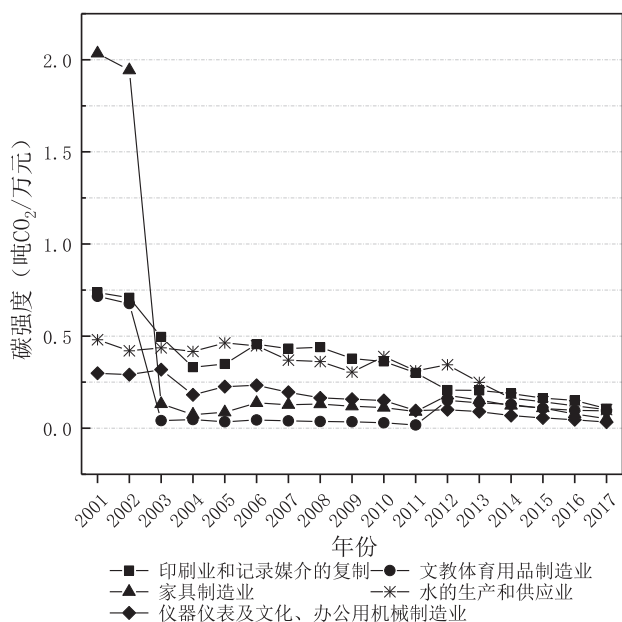
应业，而年均碳排放最大为 127 260.4 万吨，其所在为黑色金属冶炼及压延加工业，均值为 8 113 万吨；年均碳强度最小值为 0.09 吨 CO₂/万元，其所在行业

为烟草制品业,而年均碳强度最大17.17吨 CO₂/万元,其所在行业为黑色金属冶炼及压延加工业,中位数为1.26吨 CO₂/万元;可见,工业各分行业碳排放和碳强度存在异质性。

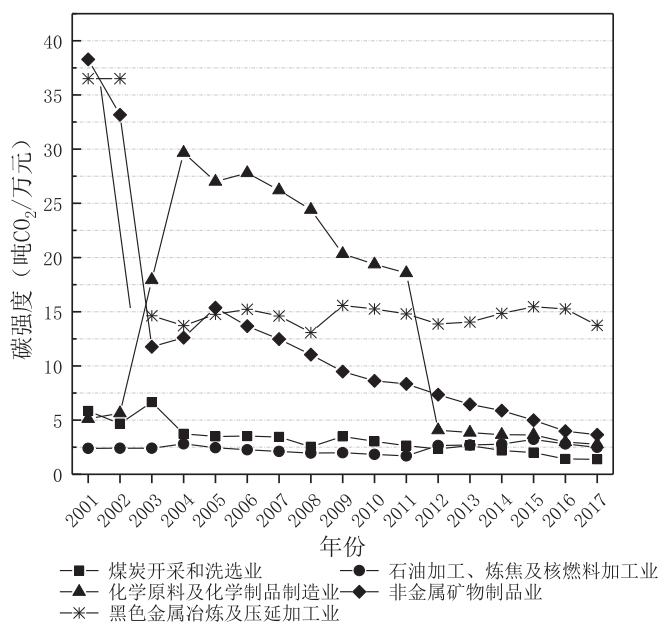
表2 描述性分析

统计量	单位	均值	中位数	最小值	最大值
CO ₂ 排放	万吨	8 113	1 474	67	127 260.4
碳强度	吨 CO ₂ /万元	2.45	1.26	0.09	17.17
能源消耗	万吨标准煤	4 674	1 168	139	49 545

此外,对行业年均碳排放量大小排序,通过计



(a) 碳排放最低5个行业碳强度



(b) 碳排放最高5个行业碳强度

图1 碳排放最低(a)和最高(b)各5个行业碳强度趋势

2.2 不同阶段研发投入对工业行业碳排放影响分析

首先,为探究不同阶段研发投入对工业碳排放影响效应,本文将时间划分为2001—2005、2006—2010和2011—2017等三个阶段。然后,参照李园等^[24]的做法,在各阶段通过F检验和Hausman等^[25]检验来选择合适的面板回归模型,F检验和Hausman检验的结果如表3所示,F检验统计量均通过了1%的显著性检验,在混合效应和固定效应模型之间应该选择固定效应模型;Hausman检验统计量的均通过了5%的显著性检验,因此,最终采用个体固定效应回归模型。

表3 各阶段F检验和Hausman检验结果

检验类别	不同阶段		
	2001—2005	2006—2010	2011—2017
F 检验	3.495***	3.712***	3.593***
Hausman 检验值	59.3***	21.8**	30.3***
结论	FE	FE	FE

注:(1)***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平。(2)FE指个体固定效应模型。

算依次得到各分行业碳强度趋势特点,图1描绘了碳排放量最高和最低各5个行业的碳强度轨迹图;可以看出,总体上各行业碳强度呈下降的趋势,特别是排放量较小的轻工业;而部分重工业出现波动现象,如化学原料及化学制品制造业,从2002—2004年急剧上升,这与我国2003年工业领域再度重型化相关^[18],近年来,我国对化学污染品的大量禁用可能是造成其从2004年逐年下降的重要原因;石油加工行业呈现稳定状态,表明经济增长仍离不开石油等重要工业燃料的消耗。

表4 工业行业各阶段固定效应模型回归结果

解释变量	2001—2005	2006—2010	2011—2017
Ln(P)	0.948 5*** (0.024 9)	0.995 3*** (0.041 2)	1.193 4*** (0.088 7)
Ln(A)	0.978 9*** (0.030 9)	0.986 6*** (0.062 7)	0.855 8*** (0.095 0)
Ln(EF)	-1.054 7*** (0.031 9)	-0.804 2*** (0.061 9)	-1.094 8*** (0.096 0)
Ln(ES)	-0.177 3*** (0.038 9)	-0.469 8*** (0.044 1)	-0.375 9*** (0.074 5)
Ln(RD)	-0.075 5** (0.015 6)	-0.028 3** (0.013 5)	-0.171 5*** (0.048 6)
Ln(K)	-0.018 9** (0.005 9)	-0.004 4 (0.006 5)	-0.110 5** (0.041 2)
R ²	0.99	0.99	0.99
F 检验值	4 400.3***	13 751.1***	1 385.7***

注:(1)***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平;(2)括号内为标准误。

结合个体固定效应模型,通过对式(3)进行回归,得到回归结果如表4所示,各阶段研发投入对工业碳排放影响分析如下:首先,在2001—2005年期间,研发强度对降低碳排放量具有显著的积极作用,其

弹性为 -0.075 5，意味着每增加 1% 研发强度，碳排放将会下降 0.075 5%。此阶段，中国工业部门注重技术发展，工业年均研发投入占 GDP 比例为 1.3%，从事研发活动不仅能对工业经济增长有利，而且能够提高创新能力，促进技术进步，从而能够降低碳排放。由于由研发投入带来的“节能减排效应”比“产出效应”更明显，所以研发投入对此阶段碳排放增长表现出抑制作用。

然后，在 2006—2010 年阶段，研发强度对降低碳排放的效果相比上个阶段有所下降，其弹性由 -0.075 5 变为 -0.028 3。由于研发活动具有双重作用，一方面，可以通过促进研发节能减排和清洁生产来降低能源消耗和碳排放；另一方面，研发投入作为一种生产要素，提高研发投入可以极大促进生产效率，此时必然会导致能效消耗的增加，同时产生更多的碳排放；该阶段受 2008 年金融危机影响，研发和科技创新的目的更多是用来促进经济复苏，拉动经济增长。

最后，在 2011—2017 年期间，各因素均通过了显著性检验，回归效果显著。研发强度对降低碳排放的积极效应显著上升，其弹性由上阶段的 -0.028 3 变为 -0.171 5。此阶段，国家对节能减排工作加大力度，2015 年习近平总书记首次提出“创新，协调，绿色，开放，共享”五大发展理念，推动绿色技术发展成为各行各业共同和整体利益。在此发展理念下，此阶段年平均研发强度较 2006—2010 年增加 57%，通过加大科研力度来促进能源效率提升、优化生产工艺流程和持续探索节能方案，成为促进节能减排的重要手段。

整体而言，研发强度在各时期对降低碳排放具有显著的积极作用，但在各阶段间存在差异，具体表现为，对碳排放增长的抑制效果为先下降后上升。尽管能源效率提升仍为抑制碳排放增长的首要因素，但是近阶段研发强度对抑制碳排放增长的效果明显上升，这意味着加大研发力度可作为节能减排的重要手段。此外，其他变量对碳排放效应在各时期也具有明显差异，经济增长对碳排放增长的促进效应有下降的趋势，这是由于中国由求“量”转变为保“质”增长，从高速增长进入中高速增长模式；劳动力规模成为当前碳排放增长最明显的促进因素，统计年鉴数据显示，行业平均就业人口数在 2011—2017 阶段比 2006—2010 阶段增加 8.4%；能源结构相比前期，对抑制碳排放增长的效应上升，随着国家对清洁能源和技术的支持，由改善能源结构产生的节能减排效应开始显露；知识资本对碳排放增长在 2001—2005

和 2011—2017 两个阶段为抑制作用，而由于 2006—2010 阶段受金融危机影响，知识资本用来促进生产，故而对碳排放增长表现为促进作用。

2.3 不同类别行业研发投入对工业碳排放影响分析

由前文可知，尽管大部分行业碳强度呈现下降趋势，但是重工业和轻工业碳排放量与碳强度相差较大，因此，为探索不同类行业研发投入对工业碳排放效应，本文将 35 个分行业分成三组：将行业年均碳排放量大于均值且年均碳强度大于中位数的行业归为重度排放组，将行业年均碳排放量小于均值且年均碳强度小于中位数的行业归为轻度排放组，其余的归为中度排放组；具体分组情况如表 5 所示。

表 5 行业类别划分

类别	行业
重度排放组	S1、S18、S19、S23、S24
中度排放组	S2、S3、S5、S6、S7、S8、S10、S13、S15、S20、S21、S25、S34
轻度排放组	S4、S9、S11、S12、S14、S16、S17、S22、S26、S27、S28、S29、S30、S31、S32、S33、S35、

注：表第 2 列为行业代码。

基于上面的分类，首先对三个排放组分别进行了 F 检验和 Hausman 检验，表 6 为检验的结果。从表 6 可以看出，各排放组均通过了 F 检验，而除了重度排放组外，其余两个组都通过了 Hausman 检验；由于重度排放组个体数小于变量数，无法进行 Hausman 检验，因此采用似然比检验，其统计量结果为 290.5，也通过了 0.01 显著性检验；综上，三个组均采用个体固定效应模型。

表 6 工业各类别回归 F 检验和 Hausman 检验结果

检验类型	类别		
	重度排放组	中度排放组	轻度排放组
F 检验	14.838***	7.711***	11.426***
Hausman 检验值	—	39.5***	40.7***
结论	FE	FE	FE

注：(1)***，**，* 分别表示 1%，5%，10% 的显著性水平；(2) FE 指个体固定效应模型。

结合式 (3)，对各排放组的面板数据分别进行回归，得到结果如表 7 所示。由表 7 可知，除了轻度排放组研发强度的回归系数外，三个排放组回归系数均通过了显著性为 0.01 的 t 检验，且 R² 接近 1，说明回归结果具有统计学意义；从不同组来看，劳动力规模和人均经济产出是促进碳排放增长的重要因素，而能源效率是抑制碳排放增长的重要因素；研发强度在不同组的效应差异明显。接下来将分析不同类别行业研发投入对工业碳排放影响。

表 7 三组行业固定效应模型分析结果

解释变量	重度排放组	中度排放组	轻度排放组
Ln(P)	1.052 3*** (0.026 2)	1.021 4*** (0.005 5)	0.788 0*** (0.067 6)
Ln(A)	1.067 9*** (0.034 1)	0.897 3*** (0.008 7)	0.593 6*** (0.080 9)
Ln(EF)	-1.157 1*** (0.031 9)	-0.935 4*** (0.008 1)	-0.575 0*** (0.089 9)
Ln(ES)	-0.045 9** (0.019 7)	-0.397 9*** (0.008 0)	-0.592 8*** (0.096 7)
Ln(RD)	-0.041 2*** (0.013 5)	-0.018 2*** (0.003 5)	0.085 6** (0.034 1)
Ln(K)	0.035 4*** (0.013 3)	-0.008 2*** (0.002 2)	-0.085 5*** (0.019 5)
R ²	0.99	0.99	0.98
F 检验值	4 939.9***	12 192.26***	484.5***

注：(1)***, **, * 分别表示 1%, 5%, 10% 的显著性水平；(2) 括号内为标准误。

第一，研发投入对重度组降低碳排放具有显著的积极效应，弹性为 -0.041，意味着每增加 1% 研发强度，可减少 0.041% 碳排放，说明增加对重度组的研发投入对节能减排来说是可行且高效的。由于重度排放组由煤炭开采和洗选业，石油加工、炼焦及核燃料加工业，化学原料及化学制品制造业，非金属矿物制品和黑色金属冶炼及压延加工业等 5 个分行业组成，这些行业具有能耗大、碳排放大及能源效率低下的特征，因而节能减排的首要对象也是这些行业，持续增加对这些行业研发投入，促进节能减排技术升级是必不可缺的。

第二，研发投入对中度排放组降低碳排放也具有积极作用，其弹性为 -0.018；不同于重度排放组，中度排放组由 13 个分行业组成，且主要为加工制造业，如农副产品加工业，食品制造业和医药制造业等，其明显的特点是严重依赖能源且能源效率较低，因而，研发投入主要是作为开发新产品和绿色工艺流程的驱动力，使得行业的能源消耗过程尽可能多来源，可循环和可持续。因此，需要继续增加中度排放组的研发投入，降低煤炭、石油等能源的消耗比例，并鼓励使用清洁能源来代替传统化石能源。

第三，研发投入对轻度排放组的碳排放增长具有促进作用，但影响不显著。轻度排放组主要由高新技术行业和轻工业组成，如通信设备、计算机及其他电子设备制造业、电气机械及器材制造业和纺织服装、鞋、帽制造业等，由于高新技术行业具有较高的技术壁垒，企业研发活动的目的往往是加强尖端技术创新，提升生产效率，进而稳固自身核心竞争力；因而，由研发投入引起的“产出效应”超过了“节能减排效应”，这类行业并非不注重节能减排工作，而是研发投入用于节能减排相比用于尖端科技技术的研究产生的效果不明显。其次，对轻工业而言，其能源效率已经处于较高水平，其研发

的目的在于扩大企业规模，形成规模效应，降低企业生产成本，所以，研发投入对碳排放的影响不显著。故而，对轻度排放组而言，可采取引进节能技术和建立奖惩体系，对积极实施绿色生产技术的企业给与补贴政策，对达不到要求的企业给予严厉的惩罚，分配较少的碳配额等措施。

除此之外，其他变量对三个排放组碳排放的影响也存在差异。具体表现为，劳动力规模对三个排放组碳排放增长均为促进效应，特别是重度组和中度排放组，这主要由于重度和中度排放组绝大部分为能源开采业和化工行业等能耗大且劳动力密集行业；人均经济产出对碳排放弹性在重度、中度和轻度排放组分别为 1.067 9、0.897 3 和 0.593 6，意味着同等经济产出，重度排放行业需要比轻度排放行业产生更多的 CO₂ 排放；能源效率提升对三个排放组碳减排均表现为显著积极作用，尤其是在重度排放组；能源结构同样对三组碳排放增长表现显著的抑制作用，且由于轻度排放行业能源组成呈现着清洁且可循环的特点，故而持续优化这些行业能源结构能够明显降低碳排放。

3 结论和建议

本文首先对 2001—2017 年中国工业 35 个行业的碳排放和碳强度进行了核算；然后，从时间尺度上，分析 2001—2005、2006—2010 和 2011—2017 年等各阶段研发投入对工业碳排放影响效应；最后，根据碳排放量和碳强度大小将 35 个工业分行业划分为重度，中度和轻度排放组，分析不同类别行业研发投入对工业碳排放影响效应。主要研究结论如下：

(1) 工业各分行业碳排放和碳强度存在明显差异，年均碳排放量最高行业为黑色金属冶炼及压延加工业，而年均碳排放量最低行业为水的生产和供应业，其年均碳排放值分别为 127 260.4 万吨和 67 万吨；年均碳强度最大行业为黑色金属冶炼及压延加工业，而年均碳强度最小行业为烟草制品业，其年平均碳强度分别 17.17 吨 CO₂/万元，0.09 吨 CO₂/万元；各行业碳强度呈下降的趋势，特别是排放量较小的轻工业，而部分重工业出现波动现象，石油加工行业则呈现稳定状态。

(2) 研发投入对碳排放效应在时间维度和行业层面存在差异，在不同阶段，研发投入对降低工业碳排放均表现积极作用，且在 2011—2017 期间更为显著；在不同类行业，研发投入对重度和中度排放组的碳排放增长表现出抑制作用，弹性分别为 -0.041 和 -0.018，而对轻度组为促进作用，但影响不显著。

(3) 在不同阶段或不同类行业，劳动力规模

和人均经济产出始终是促进二氧化碳增长的重要因素;提升能源效率和改善能源结构对于减少二氧化碳具有明显作用,且提升能源效率对降低重度排放组 CO₂ 的作用尤为显著。

基于上述研究结果,得到以下政策建议:

(1) 调整工业产业结构,推动高碳产业低碳化。中国工业行业间碳排放差异巨大,重工业碳强度仍然较大,工业部门必须摒弃高排放与高污染的发展方式;政府部门可按照碳排放量和碳强度大小等对各个行业在未来各阶段严格设定减排目标,同时对低碳及碳强度下降较快的行业给予较多的碳配额和激励政策,以实现工业向低碳经济增长转变。

(2) 对于整个工业行业层面,政府应引导其持续加大研发投入力度。引进专业人才和先进技术,加强产学研结合,促进自主技术创新;在加大研发投入的同时,合理安排研发投入结构,在减排技术方面的研发投入比例需要适当增加,相反限制用于扩大企业规模的研发活动。

(3) 针对不同行业,政府应分门别类制定不同的低碳研发激励措施。对于重度和中度排放行业,特别是能源密集型行业,需要进一步加强研发活动,促进能源效率提升,如鼓励这类企业引进国外先进绿色技术和设施并进行补贴,加强“末端治理”和清洁生产技术研发,建立行业间减排技术共研共享机制等;而对于轻度排放行业,需要持续优化能源结构,推广零碳能源使用及加强配套设备研发,对积极实施绿色生产技术的企业给予税收优惠政策,对达不到要求的企业给予严厉的惩罚,分配较少的碳配额等措施。

参考文献:

- [1] XU B, LIN B Q. Can expanding natural gas consumption reduce China's CO₂ emissions? [J]. Energy Economics, 2019,81:393-407.
- [2] WANG K, WEI Y M. China's regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs [J]. Applied Energy, 2014, 130: 617-631.
- [3] 王锋,冯根福.优化能源结构对实现中国碳强度目标的贡献潜力评估[J].中国工业经济,2011(4):127-137.
- [4] 王迪,聂锐,李强.江苏省能耗结构优化及其节能与减排效应分析[J].中国人口·资源与环境,2011,21(3):48-53.
- [5] WANG F, SUN X Y, REINER D M, et al. Changing trends of the elasticity of China's carbon emission intensity to industry structure and energy efficiency [J]. Energy Economics, 2020,86:104679.
- [6] AKRAM R, CHEN F Z, KHALID F, et al. Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions: evidence from developing countries [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,247:119122.
- [7] PAPPAS D, CHALVATZIS K J, GUAN D B, et al. Energy and carbon

- intensity: A study on the cross-country industrial shift from China to India and SE Asia [J]. Applied Energy, 2018,255:183-194.
- [8] CHANG N. Changing industrial structure to reduce carbon dioxide emissions: a chinese application [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,103:40-48.
- [9] MI Z F, PAN S Y, YU H, et al. Potential impacts of industrial structure on energy consumption and CO₂ emission: a case study of Beijing [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 455-462.
- [10] SHAO S, YANG L L, GAN C H, et al. Using an extended LMDI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO₂ emission changes [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 516-536.
- [11] ROHDIN P, THOLLANDER P. Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden [J]. Energy, 2006, 31: 1836-1844.
- [12] 张伟,朱启贵,李汉文.能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率[J].经济研究,2013,48(10):138-150.
- [13] 刘晓燕.基于 STIRPAT 模型的工业能源消费碳排放影响因素分析[J].生态经济,2019,35(03):27-31.
- [14] 邵帅,杨莉莉,曹建华.工业能源消费碳排放影响因素研究:基于 STIRPAT 模型的上海分行业动态面板数据实证分析[J].财经研究,2010,36(11):16-27.
- [15] 郑万吉,叶阿忠.空间视角下财政分权的碳排放效应研究:基于半参数空间面板滞后模型[J].软科学,2017,31(1):72-75+94.
- [16] XU B, LIN B Q. "Assessing CO₂ emissions in China's iron and steel industry: a dynamic vector auto-regression model" [J]. Applied Energy, 2016, 161: 375-386.
- [17] 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(01):15-26.
- [18] 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(01):26-35.
- [19] CHURCHILL S A, INEKWE J, SMYTH R, et al. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870-2014 [J]. Energy Economics, 2019, 80: 30-37.
- [20] 王钊,王良虎.R&D 投入、产业结构升级与碳排放关系研究[J].工业技术经济,2019, 38(5):62-70.
- [21] 林伯强,徐斌.研发投入、碳强度与区域二氧化碳排放[J].厦门大学学报(哲学社会科学版),2020(4):70-84.
- [22] EHRLICH P R, HOLDREN J P. Impact of Population Growth [J]. Science, 1971,171(3977): 1212-1217.
- [23] DIETZ T, ROSA E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and Technology [J]. Human Ecology Review, 1994,1(2): 277-300.
- [24] 李园,张传平,谢晓慧.中国二氧化碳排放差异及影响因素分析:基于工业分行业的实证分析[J].工业技术经济,2012,31(8):39-45.
- [25] HAUSMAN J, ACEMOGLU D. Specification Tests in Econometrics [J]. Econometrics, 1978, 46(6): 1251-1271.

作者简介:贺勇(1982—),男,湖北天门人,副院长,教授,博士,主要研究方向为能源经济与管理、资源管理工程;傅飞飞(1996—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为能源经济与管理;廖诺(1981—),通信作者,女,贵州赤水人,教授,博士,主要研究方向为低碳供应链、能源经济与管理,