

重点行业/领域碳达峰成本测算及社会经济影响评估

张 静^{1,2}, 薛英岚^{1,2,3}, 赵 静^{1,2}, 何 捷⁴, 李 冰⁵, 张鸿宇^{1,2}, 袁闪闪⁶,
李 勃^{1,2}, 黄志辉⁷, 翁 慧⁸, 邵朱强⁹, 曹 东^{1,2*}, 张 伟^{1,2}, 蒋洪强^{1,2}

1. 生态环境部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012
2. 生态环境部环境规划院京津冀区域生态环境研究中心, 北京 100012
3. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190
4. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024
5. 冶金工业规划研究院, 北京 100013
6. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013
7. 中国环境科学研究院, 国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室, 北京 100012
8. 中国石油和化学工业联合会产业发展部, 北京 100723
9. 中国有色金属工业协会, 北京 100814

摘要: 实现重点行业碳减排需要国家、地方乃至企业投入巨大成本, 如何核算重点排放行业和领域资金规模以及选取最为经济有效的碳减排措施, 是我国碳达峰路径需要考虑的关键因素。采用自下而上的降碳技术综合成本评估模型, 以我国六大行业 (电力、钢铁、水泥、铝冶炼、炼油和石化、煤化工) 和两大领域的 59 项降碳措施为对象, 测算了 2021—2035 年投资成本并模拟了上述投资可能带来的潜在宏观经济影响。结果表明: ①2021—2035 年全国重点行业/领域实现碳达峰累计投入成本为 34.0×10^{12} 元, 其中, 2030 年前碳达峰累计投入成本为 20.8×10^{12} 元, 年均投入 2.1×10^{12} 元, 约占全国年均 GDP 的 1.5%。②实现 2030 年前碳达峰预计需对电力行业、重点工业行业、交通领域和建筑领域分别投资 10.7×10^{12} 、 1.3×10^{12} 、 5.2×10^{12} 、 3.6×10^{12} 元。铝冶炼行业单位减碳成本最低 [624 元/t (以 CO_2 计)], 交通领域单位减碳成本最高 [47 869 元/t (以 CO_2 计)]。③碳达峰将通过促进新能源产业发展、重点工业行业节能、交通领域绿色升级和绿色基础设施建设等刺激经济高质量增长, 2030 年前碳达峰投资累计带动 GDP 增长约 26.2×10^{12} 元, 每年新增就业岗位约 677×10^4 个。研究显示, 工业是碳减排经济性最高的领域, 交通领域实现碳减排需要付出较大的投资成本, 碳达峰投资将有效促进产业绿色低碳转型。

关键词: 碳达峰; 经济成本; 宏观经济影响; 重点行业/领域

中图分类号: X196

文章编号: 1001-6929(2022)02-0414-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.07

Evaluation of Cost and Economic Impact of China's Carbon Peak Pathway on Key Industries

ZHANG Jing^{1,2}, XUE Yinglan^{1,2,3}, ZHAO Jing^{1,2}, HE Jie⁴, LI Bing⁵, ZHANG Hongyu^{1,2}, YUAN Shanshan⁶,
LI Bo^{1,2}, HUANG Zhihui⁷, WENG Hui⁸, SHAO Zhuqiang⁹, CAO Dong^{1,2*}, ZHANG Wei^{1,2},
JIANG Hongqiang^{1,2}

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China
2. Center for Beijing-Tianjin-Hebei Regional Environment and Ecology, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China
3. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
4. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China
5. China Metallurgical Industry Planning and Research Institute, Beijing 100013, China

收稿日期: 2021-09-08 修订日期: 2021-11-05

作者简介: 张静 (1986-), 女, 山东巨野县人, 副研究员, 博士, 主要从事能源环境战略模拟研究, zhangjing@caep.org.cn.

* 责任作者, 曹东 (1968-), 男, 山西隰县人, 研究员, 硕士, 主要从事环境规划与政策模拟研究, caodong@caep.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.72140008, 72140004); 自然资源保护协会项目

Supported by National Science Foundation of China (No.72140008, 72140004); Natural Resources Defense Council, Inc.

6. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China

7. State Key Laboratory of Vehicle Pollution Control and Simulation for Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

8. China Petroleum and Chemical Industry Federation, Beijing 100723, China

9. China Nonferrous Metals Industry Association, Beijing 100814, China

Abstract: Carbon emission reduction in key industries requires enormous investment from the central government, local governments and enterprises. How to determine the capital scale of key emission industries and sectors and select the most economical and effective carbon reduction measures is crucial for China's carbon peak pathway. Aiming at 59 carbon reduction measures in six major industries (power industry, steel, cement, aluminum smelting, oil refining and petrochemical, coal chemical industry) and two major sectors (transportation, construction), we adopt the bottom-up comprehensive cost evaluation model of carbon reduction technology to estimate the investment cost and simulate its potential macroeconomic impact from 2021 to 2035. The results show that: (1) The cumulative investment cost of achieving carbon peak in key industries/sectors across the country from 2021 to 2035 is 34.0×10^{12} RMB, of which the capital investment in carbon peak before 2030 is 20.8×10^{12} RMB, and the average annual investment is 2.1×10^{12} RMB, accounting for about 1.5% of GDP. (2) It is expected that by 2030, China's carbon peak needs to invest 10.7×10^{12} RMB, 1.3×10^{12} RMB, 5.2×10^{12} RMB, 3.6×10^{12} RMB in the power industry, key industrial sectors, transportation sector and construction sector, respectively, with the lowest unit carbon reduction cost in the aluminum smelting industry (624 RMB/t) and the highest unit carbon reduction cost in the transportation sector (47,869 RMB/t). (3) Carbon peak will stimulate high-quality economic growth by promoting the development of new energy industries, energy conservation in key industrial sectors, green upgrades in the transportation sector, and green infrastructure construction. By 2030, the investment in carbon peak will accumulatively drive GDP growth of about 26.2×10^{12} RMB, and create about 677×10^4 new jobs per year. The study shows that industrial sector is the most economical field of carbon emission reduction, while the transportation sector requires a large investment to achieve carbon emission reduction. The carbon peak investment will effectively promote the green and low-carbon transformation of the industry.

Keywords: carbon peak; cost; economic impact; key industries/sectors

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次评估报告中显示, 1880—2012年, 全球平均地表温度上升了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1], 如果不采取进一步的缓解措施, 到20世纪末, 平均气温可能上升 $2.6\text{--}4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]. 我国的碳排放量依然处于世界首位, 超过了美国和欧盟的总排放量^[3]. 2015年中国提交《国家自主贡献》, 承诺 CO_2 排在2030年左右达到峰值, 争取尽早达峰. 2020年12月气候雄心峰会上, 我国宣布提高国家自主贡献度, CO_2 排放“力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”, 并提出构建“1+N”的碳达峰实施方案政策体系^[4]. 2021年10月, 国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》的通知, 提出对能源、工业、建筑和交通等领域提出碳减排的总体部署. 分领域分行业实施方案是我国制定碳达峰、碳中和顶层设计重点之一. 2020年, 六大行业(电力、钢铁、水泥、铝冶炼、炼油和石化、煤化工)及两大领域(交通、建筑)的能源活动碳排放占到我国能源活动碳排放的90%以上, 行业碳达峰需要国家、地方乃至企业投入大量资金, 同时, 碳达峰行动将重新塑造我国的能源和产业结构, 全面推动我国绿色低碳转型和高质量发展^[5]. 科学评

估碳达峰路径实施的成本与社会经济影响, 可为政府后期制定相应的政策措施提供量化的决策建议.

碳减排成本核算是碳达峰、碳中和政策的重要内容^[6-7]. 碳减排成本的核算形式包含边际减排成本^[8-9]、平均减排成本、增量减排成本、影子价格^[10]和碳价格等^[11], 测算的方法分为自下而上模型、自上而下模型、混合模型. 自下而上的模型可以给出碳减排的技术构成, 分析技术的碳减排成本, 如节能技术综合成本估算模型、TIMES模型^[12]、LEAP模型^[13]等. 节能技术综合成本估算模型适用于发展成熟的行业, 基于各种减排技术措施及长期全面的统计数据来核算行业碳减排成本, 能够计算包括减排设备投资、节能技术开发、低碳能源替代等减排成本. 自上而下的模型可以模拟行业间的反馈和联系, 侧重于碳减排政策对宏观经济及产业部门的影响, 常用的有宏观经济模型、可计算一般均衡模型等. 混合模型则结合了二者的优势, 如MESSAGEix模型, 但模型计算随之变得较为复杂. 欧美发达国家在出台国家碳减排行动方案时, 均考虑了政策实施预计投入的成本. 2020年, 美国发布《美国零碳行动计划》(America's Zero Carbon Action Plan), 预计2020—2050年, 美国实行重点领域深度脱碳的年度成本约占GDP的0.5%^[14].

2019 年, 欧盟出台《欧洲绿色协议》(European Green Deal), 预计到 2030 年每年将投入约 $2\ 600 \times 10^8$ 欧元^[15]. 行业层面, 近年来随着绿色低碳理念的推广, 国内外对电力^[16-17]、钢铁^[18-20]、水泥^[20-22]、铝冶炼^[23-25]、炼油和石化^[26-27]、煤化工^[28-30]等重点行业及交通^[31-34]、建筑^[35-38]等领域的成本已经展开了大量的研究并取得很多宝贵的经验, 相关研究在调研实测方法、优化决策模型、能源系统模型和全生命周期理论方面均取得丰硕成果.

我国碳排放量大, 能源结构以碳密度较大的煤炭为主^[39], 且承诺的碳达峰与碳中和时间间隔远短于发达国家^[40], 如何在重点行业和领域选取最为经济有效的碳减排措施, 是制定我国国家和重点行业碳达峰方案需要重点考虑的关键因素^[39]. 目前对于在碳达峰背景下全行业各减排措施的成本和减排贡献, 涉及工业分行业详细措施核算的文献较少, 在碳达峰路径方面也缺乏各相关行业之间的统筹考虑. 该文定量分析了重点行业和领域碳排放达峰成本和社会经济影响, 建立了基于清洁能源降碳、能效提升降碳、资源循环降碳、管理调控降碳等具体措施的重点行业/领域碳达峰成本核算数据库, 并采用节能技术综合成本估算模型构建了降碳技术综合成本估算模型, 全面系统地核算了我国 2025 年、2030 年、2035 年不同阶段的分行业/领域、分措施的达峰成本及单位减排成本, 并对重

点行业和领域碳排放达峰投资对 GDP、就业、产业的影响进行了量化分析, 以期为政府及行业制定碳达峰行动方案及政策措施提供经济有效的建议.

1 方法与数据

1.1 重点行业/领域碳达峰路径成本及经济影响分析框架

该文对接各行业碳达峰措施研究, 以 2020 年为基准年. 通过对全国 2021—2035 年实行业碳达峰路径清洁能源降碳、能效提升降碳、资源循环降碳、管理调控降碳 4 类降碳措施的梳理整合, 对全国电力、钢铁、水泥、炼油和石化、煤化工、有色 6 个重点行业和交通、建筑 2 个重点领域进行成本评估, 基于各项行业特点和降碳措施, 构建了自下而上的降碳技术综合成本估算模型, 模型中主要包括了新能源设施投入、低碳技术改造投入、资源循环体系建设投入以及管理手段的投入或补贴 4 个方面的成本, 主要采用成本系数法进行各项计算 (见图 1). 此外, 结合碳减排量综合对比分析得出分行业分措施的单位减排成本. 经济影响分析通过投入产出模型计算, 主要包括行业碳达峰路径各措施实施对宏观经济产生的影响, 主要体现在 GDP、产业带动及就业的净影响. 投资主体从全社会系统考虑, 包括政府、企业和公众.

1.2 行业成本计算思路范围

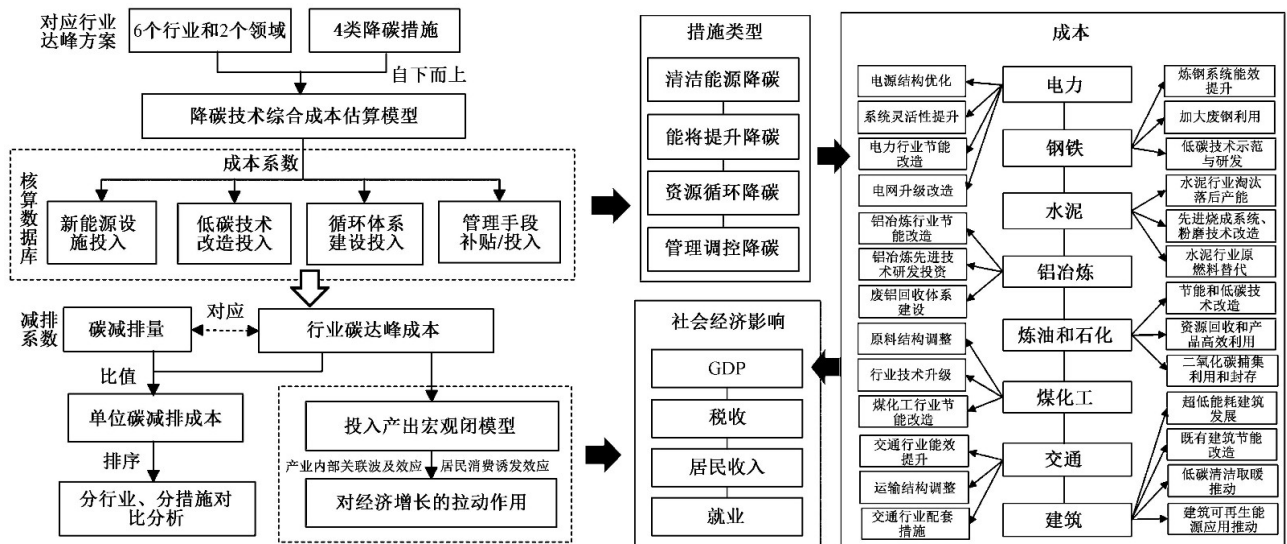


图 1 行业碳达峰成本分析框架

Fig.1 The framework of carbon peak costs of industries

以重点行业/领域碳达峰路径的政策措施为对象, 该文主要对全国 6 个重点行业和 2 个重点领域进行成本评估, 包含 26 个一级措施和 59 个二级措施, 各行业/领域的碳减排措施如表 1 所示.

需要说明的是, 该文计算的范围主要为直接与碳

达峰相关的部分, 未包含部分基础设施建设或直接关系较小的部分 (即若没有“双碳”目标, 此部分仍将增长), 如电力行业电网升级改造投入仅包含了新能源消纳输电通道新建投资及接网投资成本, 并未包含其他电网投资成本. 此外, 该文核算对象为各项措施的

表 1 各行业措施描述
Table 1 Detailed measures for each sector

行业	序号	一级措施	二级措施描述
电力	Et1	电源结构优化	包括水电、风电、核电、太阳能、生物质等新能源发电发展
	Et2	系统灵活性提升	包括抽水蓄能、新型储能、纯凝机组建设、热电联产灵活性改造
	Et3	电力行业节能改造	包括服役期满机组淘汰、现役机组节能改造等措施
	Et4	电网升级改造	新能源消纳输电通道建设
钢铁	St1	炼钢系统能效提升	包括高炉燃料比提升、余热余能利用
	St2	加大废钢利用	包括废钢废铁回收体系建设、推进电炉短流程炼钢
	St3	低碳技术示范与研发	低碳技术示范与研发
水泥	Cm1	水泥行业淘汰落后产能	淘汰2 000 t/d以下的水泥熟料生产线
	Cm2	先进烧成系统、粉磨技术改造	包含建线使用六级预热预分解系统或两档窑, 更换第四代冷却机, 配备各类减风、密封、助燃等措施, 新型隔热、保温耐火材料, 高效粉磨技术, 余热发电技术升级
	Cm3	水泥行业原燃料替代	包含协同处置生活垃圾、电石渣等替代石灰石等措施
铝冶炼	Al1	铝冶炼行业节能改造	铝冶炼行业节能改造
	Al2	铝冶炼行业先进技术研发投资	包括惰性电极技术等革命性技术研发投资
	Al3	废铝回收体系建设	废铝回收体系建设
煤化工	CC1	原料结构调整	包括天然气或焦炉煤气替代合成氨&甲醇原料煤
	CC2	行业技术升级	焦化行业自动化改造
	CC3	煤化工行业节能改造	包括合成氨低温余热发电技术应用、甲醇低温余热发电技术应用
炼油和化工	Pe1	节能和低碳技术改造	炼油和化工节能和低碳技术改造
	Pe2	资源回收和产品高效利用	包括重点领域资源回收利用、产品高效利用体系建设
	Pe3	CO ₂ 捕集利用和封存	CCS技术
交通	Tf1	交通行业能效提升	包括推广新能源车、铁路机车电气化、加速淘汰重卡、推广LNG船、飞机低碳改造
	Tf2	运输结构调整	包括铁路专线建设、大宗货物“公转水”“公转铁”
	Tf3	交通行业配套措施	包括船舶岸电、充电桩补贴、加氢站等
建筑	Cs1	超低能耗建筑发展	积极发展超低能耗建筑
	Cs2	既有建筑节能改造	包括供热管网改、城镇既有居住建筑节能改造、城镇既有公共建筑能效提升
	Cs3	低碳清洁取暖推动	包括北方地区清洁取暖、农房节能改造
	Cs4	建筑领域可再生能源应用推动	包括建筑太阳能光伏应用、建筑太阳能光热应用、建筑地源热泵应用

初始投资成本, 并未包含措施运行相关成本.

1.3 成本计算方法

清洁能源降碳类措施投资成本主要包括非化石能源发电新增装机和配套设施建设、车船铁路电气化、清洁供暖等的费用; 能效提升降碳类措施成本包括余热余能利用改造、节能和低碳技术改造等的费用; 资源循环降碳类措施成本包括资源回收体系建设和产品高效利用体系建设等的费用; 管理调控类措施投资成本包括淘汰落后产能补贴、先进技术研发投入、超低能耗建筑投入、货运运输结构调整的费用. 各类型的措施计算方法如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} INT_{ce} = INT_{ne} + INT_{sf} = NCAP \times C_{ne} + SCAP \times C_{sf} \\ INT_{tm} = MCAP \times C_{tm} \\ INT_{rc} = CRC \times Y_{rc} \\ INT_{mg} = GCAP \times C_{mg} \end{cases} \quad (1)$$

式中: INT_{ce} 为新能源设施总投入, 10^8 元; INT_{ne} 为新建或改造新能源设施的投入, 如电源新增装机投资、

汽车、船舶或铁路的本身电动化改造投资或补贴、清洁供暖设施投入等, 10^8 元; INT_{sf} 为发展新能源配套的投入, 如电力行业灵活性提升投资、交通供电设施投资、清洁供暖管道或电网等投资, 10^8 元; $NCAP$ 、 $SCAP$ 分别为新建新能源设施量、配套设施量, 单位均为套; C_{ne} 、 C_{sf} 分别为单位新能源设施建设成本或补贴、单位配套设施建设成本, 10^8 元/套; INT_{tm} 为技术改造投入, 10^8 元; $MCAP$ 技术改造量, 套; C_{tm} 为单位技术改造成本, 10^8 元/套; INT_{rc} 为资源回收体系建设和产品高效利用体系建设投入, 10^8 元; CRC 为项目年投资成本, 10^8 元/a; Y_{rc} 为项目投资时长, a; INT_{mg} 为管理调控措施的补贴或推广投资, 10^8 元; $GCAP$ 为补贴的淘汰量、推广量或结构调整量, 10^4 t; C_{mg} 为补贴标准或单位投资成本, 10^4 元/(10^4 t). 以上参数系数主要来源于行业协会调研结果、统计年鉴及相关文献, 单位投资成本考虑了技术改进所带来的成本降低因

素,随技术发展水平、成熟度、建设难度在不同时期有所上升或下降。

1.4 单位碳减排成本计算方法

减排成本是碳达峰路径选择的重要考量因素,如何在减排量一定的情况下,寻求成本最低的减排方案是一个值得探讨的问题.单位碳减排成本表示减排一单位 CO₂ 所需要的成本,是技术措施选择的重要定量指标,计算公式:

$$MAC_i = INT_i / \Delta R_i \quad (2)$$

式中: MAC_i 为技术措施 i 的单位减排成本,元/t(以 CO₂ 计); INT_i 为技术措施 i 的投资成本,元; ΔR_i 为技术措施 i 的碳减排量,表示在假设其他措施不变、仅考虑此措施变化下的排放变化量, t(以 CO₂ 计)。

1.5 经济影响计算方法

行业碳达峰路径实施的经济社会影响主要为在实施过程中对宏观经济、产业结构、税收及就业等方面产生的直接和间接影响.该文将行业碳达峰路径的投资成本作为核算对象,以 2018 年中国 153 个部门投入产出表为基础,构建了包含产业内部关联波及效应和居民消费诱发效应的投入产出宏观闭模型,在此基础上评估行业碳达峰路径投入对 GDP 增长的直接和间接拉动作用,同时根据增加值系数、税收系数、居民收入系数、劳动力占用系数,进一步核算超低排放投入对国民经济不同行业其他方面的贡献作用.当最终产出发生变化时,所引起的国民经济总产出增量 (ΔX) 的计算公式^[41-42]如下:

$$\Delta X = (I - A)^{-1} [I - C(1 - t)\hat{h}F\hat{v}(I - A)^{-1}]^{-1} \Delta Y_e \quad (3)$$

式中: $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵; I 为单位对角矩阵; C 为边际消费倾向; t 为边际税收倾向; \hat{h} 为最终产品国内满足率对角矩阵,指各行业最终产品中由本国生

产的产品所占比例; F 为居民直接消费系数列向量,指投入产出表中各行业的居民消费占总居民消费的比重; \hat{v} 为单位行向量; \hat{V} 为劳动报酬系数的对角矩阵,指由投入产出表中各行业劳动报酬除以总产出得到的系数; ΔY_e 为固定资产形成或商品服务消费变动的列向量。

2 结果与讨论

2.1 成本计算

我国重点行业和领域“十四五”“十五五”“十六五”期间资金总投入分别为 9.3×10^{12} 、 11.5×10^{12} 、 13.3×10^{12} 元,累计投入 34.0×10^{12} 元,平均每年投入 2.3×10^{12} 元,约占年均 GDP 的 1.5%。其中,我国重点行业和领域 2030 年前碳达峰(2021—2030 年)资金投入为 20.8×10^{12} 元,年均投入 2.1×10^{12} 元,约占年均 GDP 的 1.5%。

分行业/领域(见图 2、图 3)来看,“十四五”“十五五”“十六五”期间电力行业投入 17.8×10^{12} 元,占比为 52.4%;其他重点工业行业投入 1.8×10^{12} 元,占比为 5.3%;交通领域投入 8.1×10^{12} 元,占比为 23.8%;建筑领域投入 6.3×10^{12} 元,占比为 18.5%。其中,我国电力行业、钢铁行业、炼油和石化行业、水泥行业、有色行业、煤化工行业、交通领域、建筑领域 2030 年前实现碳达峰,分别需要投入 10.7×10^{12} 、 5.050×10^8 、 3.715×10^8 、 3.289×10^8 、 644×10^8 、 265×10^8 、 5.2×10^{12} 、 3.6×10^{12} 元。这说明资金主要投入到了新能源发电、新能源汽车产业、节能设备制造、绿色建筑、资源回收利用等绿色低碳产业。

分措施看,电力行业和交通、建筑领域措施的成本普遍高于工业领域措施的成本.电源结构优化、电力系统灵活性提升、交通运输结构调整是成本最高的三项措施,共占总成本的 1/2 以上.电源结构优化

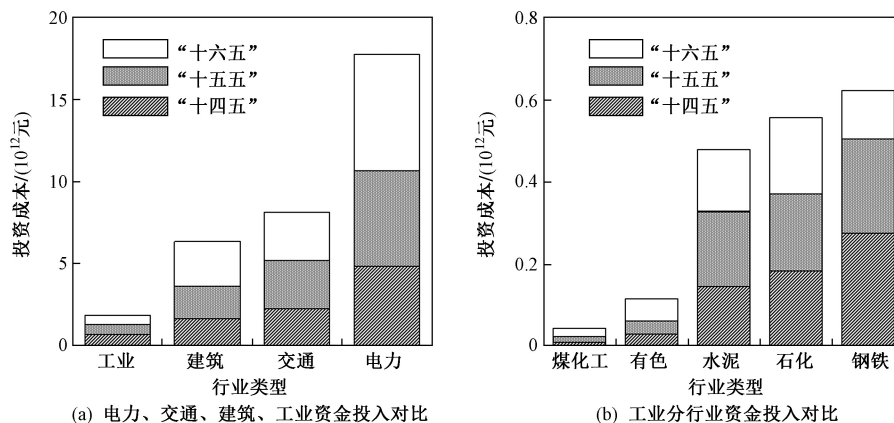


图2 “十四五”“十五五”“十六五”各行业资金投入对比

Fig.2 Comparison of capital investment in various sectors during the '14th, 15th, 16th Five-Year Plan'

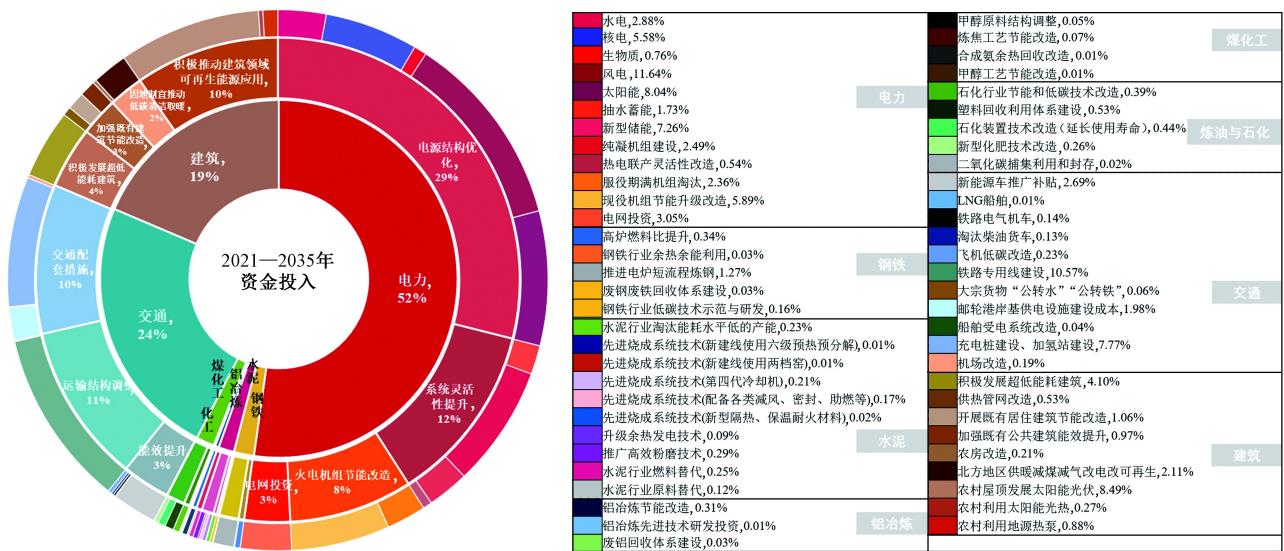


图3 2021—2035年分行业分措施的资金投入占比

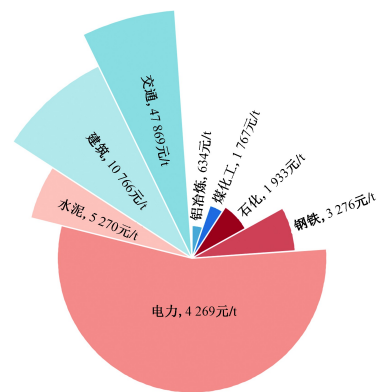
Fig.3 Proportion of capital investment by sectoral measures from 2021 to 2035

在2030年前碳达峰共投入 6.59×10^{12} 元, 主要包括水电、核电、风电、光伏发电和生物质等新能源发电的新增装机投入; 电力系统灵活性提升为发展新能源同时推进的配套措施, 包括新建新型储能、纯凝机组、抽水蓄能和热电联产灵活性改造等, 2030年前碳达峰共需投入 2.29×10^{12} 元; 交通运输调整主要为铁路专用线建设、大宗货物“公转铁”“公转水”, 2030年前碳达峰共需投入 2.42×10^{12} 元. 工业领域措施成本在2%以下, 投资成本最高的措施为炼钢系统能效提升, 包括余热余能利用和新增球团矿, 2030年前碳达峰共需投入 0.35×10^{12} 元.

2.2 单位碳减排成本计算

2030年前我国重点行业和领域碳减排总量为 34.7×10^8 t, 电力、工业、交通、建筑4个领域分别减排 25.0×10^8 、 5.2×10^8 、 1.1×10^8 、 3.4×10^8 t, 占比分别为72.1%、15.1%、3.1%、9.7%. 2030年前碳达峰电力、工业、交通、建筑单位碳减排成本分别为4269、2467、47869、10766元/t(以CO₂计), 各行业/领域的碳减排措施成本与减排量如图4、5所示. 核算结果显示, 工业领域单位碳减排成本远小于电力、交通和建筑领域, 从经济角度看是碳达峰减排首选的领域. 铝冶炼行业为工业中单位减排成本最低的行业[624元/t(以CO₂计)], 其次为煤化工行业[1767元/t(以CO₂计)]和炼油和化工行业[1933元/t(以CO₂计)]. 二级措施来看, 上述行业中的废铝回收体系建设、煤化工节能改造等措施减排成本最低, 建议优先加以推广.

电力行业单位碳减排成本稍高于工业领域. 电源

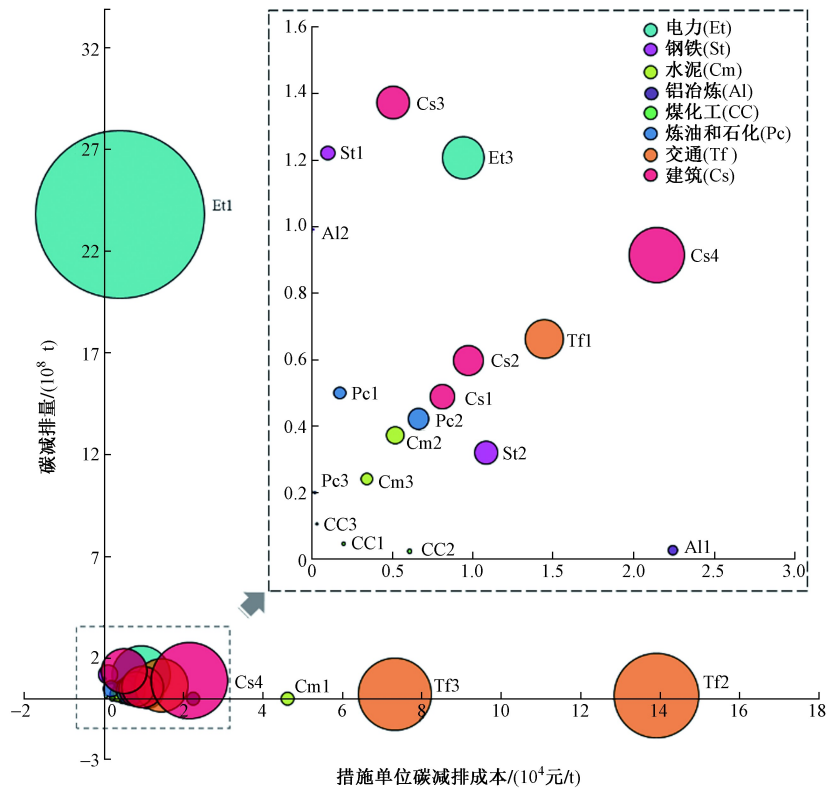


注: 各行业扇形角度大小代表了各行业占比的大小关系, 长度代表各行业单位碳减排成本.

图4 2021—2030年各行业单位碳减排成本

Fig.4 Unit carbon emission reduction cost by sector from 2021 to 2030

结构优化措施的单位减排成本较低[4009元/t(以CO₂计)]; 不同电源结构单位碳减排成本从低至高依次为生物质<太阳能<核电<风电<水电, “十六五”太阳能发电成本将进一步下降. 建筑领域单位碳减排成本高于电力行业. 2030年前建筑领域分措施单位碳减排成本从低至高依次为低碳清洁取暖<超低能耗建筑发展<既有建筑节能改造<建筑领域可再生能源应用. 交通领域单位碳减排成本最高, 由于货物运输结构调整的铁路专用线建设成本较高, 但短期内减排量相对有限, 此外交通配套的充电桩、加氢站建设、机场改



注: 横坐标轴为各措施对应的单位减排成本水平, 纵坐标轴表示各技术措施的碳减排量, 每个气泡的大小表示措施对应的碳减排总成本大小。

图 5 2021—2030 年各行业一级措施单位碳减排成本与碳减排量

Fig.5 Unit carbon emission reduction cost and amount for primary measures of each sector from 2021 to 2030

造等措施成本也较高, 故交通领域单位减排成本最高。

2.3 社会经济影响评估

碳达峰通过促进新能源产业发展、重点工业行业节能、交通运输行业绿色升级以及绿色建筑、绿色基础设施建设等, 将刺激经济高质量增长。基于投入产出模型的模拟结果 (见图 6) 显示, 2021—2035 年,

碳达峰投资累计创造 GDP 增长约 42.8×10^{12} 元 (其中 2030 年前 GDP 增长 26.2×10^{12} 元), 税收增加 3.8×10^{12} 元, 居民收入增加 11.2×10^{12} 元, 每年新增就业岗位约 677×10^4 个, 达峰路径带动的绿色低碳产业投入产出比为 1.26 (即达峰路径投资 1 元将带来 GDP 增加 1.26 元), 高于传统基建产业 (约 1.20), 略低于新基建

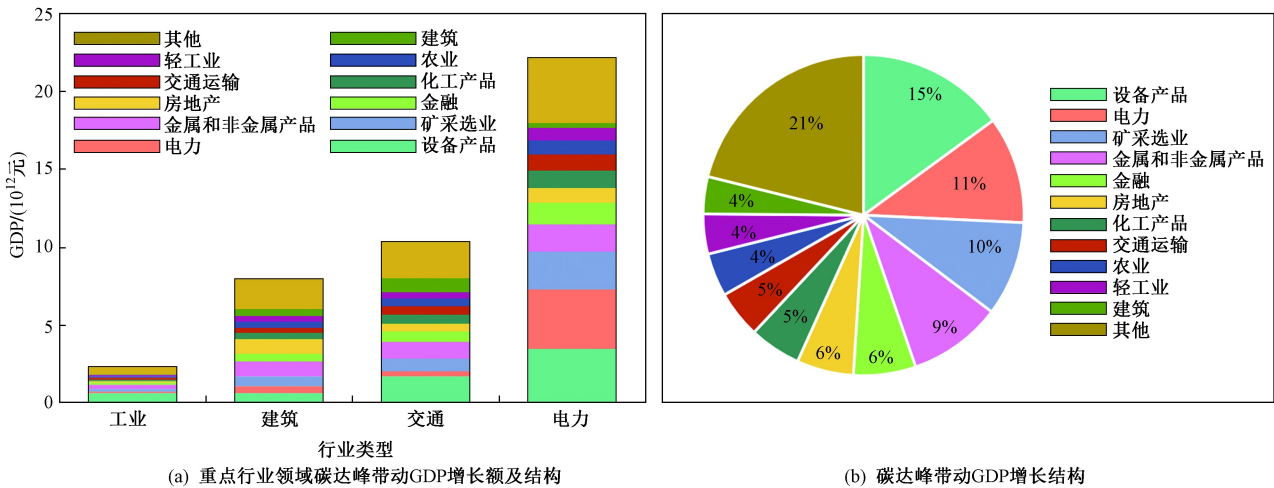


图 6 重点行业/领域碳达峰带动 GDP 增长额及比例 (2021—2035 年)

Fig.6 GDP growth and proportion of key sectors in GDP growth from 2021 to 2035 driven by China's carbon peak pathway

产业(约1.30),有利于战略新兴产业发展和经济绿色低碳转型。分行业看,重点行业/领域碳达峰资金投入主要带动了设备产品制造业、矿采选业、金属和非金属产品制造业GDP的增长,其中设备产品制造业增长主要集中于电气机械和器材制造(占比在1/2以上),其余包括通用设备、专用设备、运输设备、电子设备制造等。矿采选业中GDP增长主要为煤炭采选、石油和天然气开采和金属矿采选等行业,金属和非金属产品中GDP增长的主要为金属冶炼和压延加工业,占金属和非金属产品GDP增长的61%左右。其他行业主要包括了除设备产品、电力、矿采选业、金属和非金属产品、金融、房地产、化工产品、交通运输、农业、轻工业、建筑外的其他工业行业和服务业,占比较大原因在于重点行业/领域碳达峰资金投入同时带动了信息技术服务、综合技术服务、其他制造产品和废品废料、批发零售等行业的增长。

3 结论与展望

a) 该文利用成本分析法、投入产出模型预评估了2021—2035年六大行业(电力、钢铁、水泥、铝冶炼、炼油和石化、煤化工)及两大领域(交通、建筑)实施碳达峰路径所花费的投资成本、单位减排成本及对经济社会的影响。结果显示,2021—2035年8个重点行业/领域碳达峰路径实施需累计投入 34.0×10^{12} 元,其中,我国重点行业和领域2030年前碳达峰(2021—2030年)资金投入为 20.8×10^{12} 元,年均投入 2.1×10^{12} 元,约占年均GDP的1.5%。

b) 我国2030年前碳达峰电力行业、工业行业、交通领域、建筑领域分别需要投入 10.7×10^{12} 、 1.3×10^{12} 、 5.2×10^{12} 、 3.6×10^{12} 元,占比分别为51%、6%、25%、18%,资金主要投入新能源发电、新能源汽车产业、节能设备制造、绿色建筑、资源回收利用等绿色低碳产业。分措施看,电源结构优化、电力系统灵活性提升、交通运输结构调整、交通配套措施、建筑领域可再生能源应用、电力节能改造投资成本较高,6种措施投资成本占总投资成本的78%。重点工业行业领域炼钢系统能效提升、炼油与化工行业资源回收和产品高效利用体系建设投资,水泥行业先进烧成系统与粉磨技术改造投资成本为最高的3种措施。

c) 2030年前碳达峰单位碳减排成本由低至高依次为工业行业[2467元/t(以CO₂计)]、电力行业[4269元/t(以CO₂计)]、建筑领域[10766元/t(以CO₂计)]和交通领域[47869元/t(以CO₂计)]。从经济角度,工业碳减排是碳达峰减排首选的领域,其中铝冶炼行业单位碳减排成本最低[624元/t(以CO₂计)]。

其次为电力行业,不同电源结构单位碳减排成本从低至高依次为生物质<太阳能<核电<风电<水电,低碳清洁取暖和超低能耗建筑发展是建筑领域单位减排成本较低的2个措施。

d) 碳达峰将通过促进新能源产业发展、重点工业行业节能、交通运输行业绿色升级以及绿色建筑、绿色基础设施建设等刺激经济高质量增长。2030年前碳达峰投资累计创造GDP增长约 26.2×10^{12} 元,每年新增就业岗位约 677×10^4 个,达峰带动的绿色低碳产业投入产出比为1.26(即达峰投资1元将带来GDP增加1.26元),高于传统基建产业(约1.20),略低于新基建产业(约1.30),有利于战略新兴产业发展和经济绿色低碳转型。

e) 由于数据的可获得性等原因,该研究在系数选取、成本范围等方面仍存在局限性,需要在未来的研究中进一步加强。首先,在成本的计算过程中,应该了解独立于行业碳达峰政策的其他因素带来资金的使用和增长,如技术进步和产业结构调整、经济增长本身带来的成本增加。其次,该文只计算了投资成本,成本范围偏小,导致部分措施单位减排成本可能出现严重低估,如推进电炉短流程炼钢,主要是运行成本较高的问题。再次,各行业成本数据也存在一定的不确定性。该文数据主要来源于各行业碳达峰路径措施,系数主要来自调研数据和经验数据,方法上变化成本的计算多采用系数法,但部分措施的单位投资系数各年度并没有变化,下一步可以选择差别化的系数,以更好地体现各年度之间的差异。最后,该文经济社会影响基于包含产业内部关联波及效应和居民消费诱发效应的投入产出宏观闭模型得到,投入产出模型可以清楚地反映产业链的关系,但缺少负面的反馈,经济社会影响存在一定的不确定性。未来可针对以上问题进一步开展细化研究,提升研究的科学性和精度。

参考文献(References):

- [1] GENEVA.Climate Change 2014:synthesis report[R].Switzerland: IPCC,2014.
- [2] WATTS N,ADGER W N,AGNOLUCCI P.Health and climate change:policy responses to protect public health[J].The Lancet, 2015,6736(15):60854-60856.
- [3] FRIEDLINGSTEIN P,ANDREW R M,ROGELJ J,et al.Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets[J].Nature,2014,7:709.
- [4] 王深,吕连宏,张保留,等.基于多目标模型的中国低成本碳达峰碳中和路径研究[J].环境科学研究,2021,34(9):2044-2055.
WANG S,LÜ L H,ZHANG B L,et al.Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon

- dioxide emissions and carbon neutrality[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(9):2044-2055.
- [5] 张型芳,罗宏,吕连宏.碳排放与经济增长的协调性分析[J].*环境工程技术学报*,2017,7(4):517-524.
ZHANG X F,LUO H,LU L H.Coordination analysis on carbon emission and economic growth[J].*Journal of Environmental Engineering Technology*,2017,7(4):517-524.
- [6] CHEN X,SHUAI C,WU Y,et al.Analysis on the carbon emission peaks of China's industrial, building, transport, and agricultural sectors[J].*Science of the Total Environment*,2020,709:135768.
- [7] 李新,路路,穆献中,等.京津冀地区钢铁行业协同减排成本-效益分析[J].*环境科学研究*,2020,33(9):2226-2234.
LI X,LU L,MU X Z,et al.Cost-benefit analysis of synergistic emission reduction in steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei Region,China[J].*Research of Environmental Sciences*,2020,33(9):2226-2234.
- [8] WANG J,LV K,BIAN Y,et al.Energy efficiency and marginal carbon dioxide emission abatement cost in urban China[J].*Energy Policy*,2017,105:246-255.
- [9] HE W,WANG B,DANISH,et al.Will regional economic integration influence carbon dioxide marginal abatement costs?evidence from Chinese panel data[J].*Energy Economics*,2018,74:263-274.
- [10] PRICE R,THORNTON S,NELSON S.The social cost of carbon and the shadow price of carbon:what they are, and how to use them in economic appraisal in the UK[J].*Mpra Paper*,2007,14(6):525-30.
- [11] 周鹏,周迅,周德群.二氧化碳减排成本研究述评[J].*管理评论*,2014,26(11):20-27.
ZHOU P,ZHOU X,ZHOU D Q.A review of research on carbon dioxide emission reduction costs[J].*Management Review*,2014,26(11):20-27.
- [12] CHEN W.The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China MARKAL-MACRO modeling[J].*Energy Policy*,2005,33(7):885-896.
- [13] CAI L,GUO J.Scenario analysis of CO₂ emission abatement effect based on LEAP[J].*Energy Procedia*,2018,152:965-970.
- [14] UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN). America's zero carbon action plan[EB/OL].New York:SDSN,(2020-01-01)[2021-07-05].<https://www.unsdsn.org/Zero-Carbon-Action-Plan>.
- [15] European Commission.European Green Deal [EB/OL].Brussel: European Commission,(2019-12-11)[2021-07-05].https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [16] 高鹏飞,陈文颖,何建坤.中国的二氧化碳边际减排成本[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2004,44(9):1192-1195.
GAO P F,CHEN W Y,HE J K.Marginal carbon abatement cost in China[J].*Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*,2004,44(9):1192-1195.
- [17] 李政,陈思源,董文娟,等.现实可行且成本可负担的中国电力低碳转型路径[J].*洁净煤技术*,2021,27(2):1-7.
LI Z,CHEN S Y,DONG W J,et al.Feasible and affordable pathways to low-carbon power transition in China[J].*Clean Coal Technology*,2021,27(2):1-7.
- [18] LONG W Q,WANG S S,LU C Y,et al.Quantitative assessment of energy conservation potential and environmental benefits of an iron and steel plant in China[J].*Journal of Cleaner Production*,2020,273:123163.
- [19] LEI R,SHENG Z,TIAN P,et al.A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2021,143:110846.
- [20] AN R,YU B,WEI Y M.Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry[J].*Applied Energy*,2018,226:862-880.
- [21] RISSMAN J,BATAILLE C,MASANET E,et al.Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070[J].*Applied Energy*,2020,266:114848.
- [22] TANG B J,LI R,YU B Y,et al.How to peak carbon emissions in China's power sector:a regional perspective[J].*Energy Policy*,2018,120:365-381.
- [23] WANG N,CHEN X,WU G,et al.A short-term based analysis on the critical low carbon technologies for the main energy-intensive industries in China[J].*Journal of Cleaner Production*,2018,171:98-106.
- [24] GUO Y,ZHU W,YANG Y,et al.Carbon reduction potential based on life cycle assessment of China's aluminum industry:a perspective at the province level[J].*Journal of Cleaner Production*,2019,239:118004.
- [25] 卢浩浩,王婉君,代敏,等.中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策[J].*中国环境科学*,2021,41(1):451-462.
LU H J,WANG W J,DAI M,et al.Scenario analysis of energy consumption and carbon emissions in Chinese aluminum life cycle and emissions reduction measures[J].*China Environmental Science*,2021,41(1):451-462.
- [26] PARASKEVAS D,KELLENS K,DEWULF W,et al.Environmental modelling of aluminum recycling:a life cycle assessment tool for sustainable metal management[J].*Journal of Cleaner Production*,2015,105(3):57-70.
- [27] 赵晓飞.碳中和框架之下能化行业的机遇与变革[J].*中国石油和化工*,2021(4):12-15.
- [28] HASSAN A.Dealing with vulnerability to carbon emission from gas flaring:the roles of transparency and utilization policies in Nigeria[J].*OPEC Energy Review*,2020.doi:10.1111/opec.12187.
- [29] 朱超,志斌,鲁金涛.碳达峰、碳中和对我国煤炭工业发展的影响及对策[J].*煤炭经济研究*,2021,41(4):59-64.
ZHU C,SHI Z B,LU J T.The impact of carbon peak and carbon neutrality on the development of China's coal industry and its countermeasures[J].*Coal Economic Research*,2021,41(4):59-64.
- [30] 刘殿栋,王钰.现代煤化工产业碳减排、碳中和方案探讨[J].*煤*

- 炭加工与综合利用,2021(5):67-72.
- LIU D D,W Y.Discussion on scheme of carbon reduction and carbon neutralization in modern coal chemical industry[J].Coal Processing & Comprehensive Utilization,2021(5):67-72.
- [31] CRIVELLARI A,MORENO V C,COZZANI V,et al.Multi-criteria sustainability assessment of methanol production processes[J].*Journal of Cleaner Production*,2021,293:126226.
- [32] ZHANG R,FUJIMORI S.The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios[J].*Environmental Research Letters*,2020,15(3):034019.
- [33] LI X,YU B.Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J].*Energy Policy*,2019,133:110913.
- [34] 郭秀锐,刘芳熙,符立伟,等.基于LEAP模型的京津冀地区道路交通节能减排情景预测[J].北京工业大学学报,2017,43(11):1743-1749.
- GUO X R,LIU F X,FU L W,et al.Scenarios prediction of energy saving and emission reduction in the road transport sector of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J].*Journal of Beijing University of Technology*,2017,43(11):1743-1749.
- [35] 陆潘涛,韩亚龙,戴瀚程.1.5℃和2℃目标下中国交通部门2050年的节能减排协同效益[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(3):517-528.
- LU P T,HAN Y L,DAI H C.Co-benefits of decarbonizing China's transport sector in energy saving and emission reduction under 1.5- and 2-degree targets in 2050[J].*Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,2021,57(3):517-528.
- [36] GARCIA A,DAVID E.Green areas management and bioengineering techniques for improving urban ecological sustainability[J].*Sustainable Cities & Society*,2017,30:108-117.
- [37] VALOR C,ESCUADERO C,LABAJO V,et al.Effective design of domestic energy efficiency displays: a proposed architecture based on empirical evidence[J].*Renewable & Sustainable Energy Reviews*,2019,114:109301.1-109301.11.
- [38] 江亿.我国建筑节能战略研究[J].*中国工程科学*,2011,13(6):30-38.
- [39] 赵明轩,吕连宏,王深,等.中国碳达峰路径的Meta回归分析[J].环境科学研究,2021,34(9):2056-2064.
- ZHAO M X,LÜ L H,WANG S,et al.Meta regression analysis of pathway of peak carbon emissions in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(9):2056-2064.
- [40] 赵明轩,吕连宏,张保留,等.中国能源消费、经济增长与碳排放之间的动态关系[J].环境科学研究,2021,34(6):1509-1522.
- ZHAO M X,LÜ L H,ZHANG B L,et al.Dynamic relationship among energy consumption, economic growth and carbon emissions in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(6):1509-1522.
- [41] ZHANG W,WANG F,KLAUS H,et al.Unequal exchange of air pollution and economic benefits embodied in China's exports[J].*Environmental Science & Technology*,2018,52(7):3888-3898.
- [42] ZHANG W,LIU Y,WANG J N,et al.Revealing environmental inequality hidden in China's inter-regional trade[J].*Environmental Science & Technology*,2018,52(13):7171-7181.

(责任编辑:张蕊)