

基于碳排放影响因素的城市群碳达峰研究*

高国力¹ 文扬² 王丽² 徐睿宁³

(1. 中国城市和小城镇改革发展中心, 北京 100038;

2. 中国宏观经济研究院国土开发与地区经济研究所, 北京 100038;

3. 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070)

内容提要:城市群是我国经济、人口高度集聚的地区,也是碳排放较为集中的空间单元,更是率先实现碳达峰的排头兵、领头雁。本文运用 STIRPAT 模型分析了城市群碳排放的影响因素,预测了各城市群在不同情境下的碳排放量和碳达峰时间,构建了压力、潜力和动力指数,对城市群碳达峰压力、碳减排潜力和碳减排达峰动力进行测算。研究发现,人口规模、富裕程度、城镇化水平和技术水平对城市群碳排放量产生显著影响。对城市群碳达峰的预测结果表明,哈长、长三角、京津冀和珠三角城市群在四种情景下均能于 2030 年前实现碳达峰;长江中游、成渝、中原、北部湾、关中平原和兰州—西宁城市群在低增长慢降耗情境和低增长快降耗情境下能够在 2025—2028 年实现碳达峰,而在高增长慢降耗情境和高增长快降耗情境下无法在 2030 年前实现碳达峰;呼包鄂榆城市群在四种情境下都无法实现 2030 年前碳达峰。进一步研究指出,应根据碳达峰压力、碳减排潜力和碳减排达峰动力对城市群进行分类,并针对不同类型城市群提出差异化的碳达峰实现路径。本文认为,各城市群要通过制定差异化碳达峰目标、推动差异化碳达峰路径模式、明确差异化减碳降碳重点领域、加大低碳脱碳技术研发应用、推动多样化低碳战略性平台建设、完善推进碳达峰监督考评机制,从而率先实现碳达峰。

关键词:城市群 STIRPAT 碳达峰 影响因素

中图分类号:F061.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2023)02—0039—20

一、引言

控制温室气体排放,应对全球气候变暖,是世界各国共同的责任。改革开放以来,随着中国工业化和城镇化的深入推进,能源消耗和碳排放快速增长(Lin 和 Benjamin, 2019)^[1]。2005 年,中国已超过美国成为全球最大的碳排放国(Liu 和 Lin, 2019)^[2]。BP(2020)^[3]数据显示,2019 年中国一次能源消耗量达到 141.7 艾焦,二氧化碳排放量达到 98.3 亿吨,占全球比重分别高达 24.3% 和 28.8%,能源降耗和碳减排面临巨大压力。中国政府承诺在 2030 年前达到碳排放峰值,碳达峰目标的实施,意味着中国碳减排重点逐步从基于排放强度转向基于排放总量的控制(Yang 等,

收稿日期:2022-02-28

* 基金项目:国家自然科学基金项目“黄河流域城市群和产业高质量发展的协同推进路径与模式”(72050001);国家高端智库重大课题和中国宏观经济研究院重点应急课题“基于产业链金融链数据链协同的生态产品价值实现机制设计、模式路径和政策措施”。

作者简介:高国力,男,研究员,博士生导师,经济学博士,研究领域是区域经济、区域政策,电子邮箱:gaoguoligus@163.com;文扬,男,助理研究员,经济学博士,研究领域是资源经济、区域经济,电子邮箱:wenyangcylwj@163.com;王丽,女,副研究员,管理学博士,研究领域是可持续发展、城市与区域,电子邮箱:luojianhua@126.com;徐睿宁,女,研究助理,研究领域是城市与区域发展,电子邮箱:xuruining2000@163.com。通讯作者:文扬。

2019^[4];田云和陈池波,2019^[5])。另外,中国地域辽阔,各地区在经济社会发展水平、资源禀赋、人口分布等方面差异显著。此外,由于科技发展水平的不同,各地区的能源利用效率和碳减排效率也存在差异(Li等,2020^[6];武红,2015^[7])。为了实现2030年前碳达峰目标,中国的国家目标必须在区域层面上依据“共同但有区别责任”的原则进行分解。因此,如何在区域层面公平而有效地制订碳达峰计划和确定路径模式是当前需要解决的重要问题。

为减缓气候变化,控制温室气体排放,中国做出了巨大努力。国际承诺方面,2020年9月,习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上宣布,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。机构建设方面,相继成立了国家气候变化对策协调小组、国家应对气候变化领导小组、国家应对气候变化战略研究和国际合作中心工作支持机构,负责研究制定国家应对气候变化的重大战略、方针和对策(解振华,2009^[8];中华人民共和国国务院办公厅,2011^[9])。相关政策方面,相关部门陆续出台了《中国应对气候变化国家方案》《国家适应气候变化战略》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》《“十三五”节能减排综合工作方案》等宏观政策,明确在工业、交通、建筑和能源等领域控制温室气体排放(李俊峰等,2016)^[10],并先后启动了第三批国家低碳试点城市(张华,2020)^[11]和全国碳交易市场建设。

城市群是城市高度一体化的空间形态,已成为中国城镇化进程中区域空间组织的主要形式(He等,2021^[12];马燕坤,2016^[13])。城市群是指在特定的地域范围内,依托一定的基础条件,各城市按照一定的结构发生着紧密联系,共同构成地域整合体(姚士谋等,2006^[14])。在过去的40多年里,城市群对中国的城镇化和经济发展作出了巨大贡献(乔彬和李国平,2006^[15];Fang和Yu,2017^[16];方创琳,2018^[17];魏守华等,2013^[18])。城镇化和人口密集、中心城市作用突出、城市之间经济社会联系紧密、开放程度较高是城市群的重要特征(陈雯等,2015)^[19]。高技术产业发展、信息技术应用、快速交通网络建设、经济快速增长和结构优化以及区域一体化已成为推动城市群发展的主要动力(王利伟和冯长春,2016^[20];郑艳婷等,2016^[21];高鹏等,2019^[22])。城市群代表着各区域经济社会发展的最先进水平,承担着率先实现碳达峰的重任,为其他地区做出示范并提供宝贵经验,是区域层面实现碳达峰的重点和关键。

本文以城市群为研究对象,采用STIRPAT模型分析了人口规模、经济社会发展水平和技术水平等因素对碳排放的影响。首先,本文对非平衡面板数据进行了平稳性检验,并对回归结果进行豪斯曼(Hausman)检验,根据检验结果选取合适的回归结果进行分析,采用改变样本容量法对模型结果进行稳健性检验。其次,依据各城市群不同行业的碳排放效率和碳排放占比现状,剖析了各城市群碳减排的重点领域和任务,随后设置了四种不同情境,在各情境下根据STIRPAT模型回归结果预测了各城市群2022—2035年的碳排放量和实现碳达峰的时间。最后,构建了压力、潜力和动力指数,对各城市群的碳达峰压力、碳减排潜力和碳减排达峰动力进行测算,根据测算结果提出了不同类型城市群差异化的碳达峰路径模式。

本文的边际贡献主要有:第一,从城市群视角出发,运用STIRPAT模型,分析城市群碳排放的影响因素,探索区域碳达峰的路径模式。现有研究主要关注省域碳达峰路径模式,然而在省级单元内各地区的经济发展水平、发展阶段、特色产业、优势领域差异很大,省级行政区统一的达峰路径模式并不一定适合各城市。城市群作为高度关联的城市联合体,内部各城市的社会经济发展特征相似度较高,碳达峰路径模式可在城市群内复制推广。第二,针对我国11个城市群,设置不同情境预测了碳达峰的时间和峰值,揭示了不同发展阶段城市群实现碳达峰的难度,并根据各城市群碳排放结构现状以及各产业碳减排效率,明确了减排重点领域;第三,现有研究主要通过分析减排潜力来明确不同区域的碳达峰路径模式,但却忽视了各区域实现碳达峰所面临的客观压力,本文构建了城市群碳达峰压力指数、碳减排潜力指数和碳减排达峰动力指数,根据所面临的碳达峰压力和存在的碳减排潜力对城市群进行分类,并提出了差异化的碳达峰路径模式。

二、文献综述

1. 碳排放影响因素

关于碳排放影响因素,国内外学者主要采用 STIRPAT 模型和对数平均迪氏分解法(LMDI)等方法进行定量分析,并认为应重点关注人口规模、经济社会发展和能源消耗等因素对碳排放的影响。从人口规模和社会经济发展角度,以人均 GDP 表征人均收入,研究发现人口规模和人均收入是对中国人均碳排放影响最大的因素(林伯强和蒋竺均,2009^[23];王娟和张克中,2014^[24];Wen 等,2020^[25]),人口规模和人均 GDP 的增长导致更多的生产和消费,带来了能源消耗和碳排放的增长,从而推高了碳排放。另外,人均碳排放增长率与人均 GDP 存在正相关关系,扩大经济社会发展规模会产生更多碳排放,人口规模增长将增加对能源在内的各种资源需求,但是,当经济发展越过环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve,EKC)“拐点”时,人均 GDP 与碳排放呈负相关(Pan 和 Zhang,2020)^[26]。环保财政支出的增加则出乎意料地导致了碳排放增长(Yang 等,2018)^[27],城镇化水平对交通和生活碳排放产生正向影响(Li 等,2020)^[28]。从能源消耗角度,不管是从不同行业视角还是省级区域视角,大部分学者都认为,能源强度下降是碳排放减缓的主要驱动因素(Xu 等,2014^[29];Ren 等,2012^[30];Kim 和 Kim,2012^[31])。但是,能源强度的下降幅度普遍还不足以抵消由于人口规模和人均收入增长等因素所导致的碳排放增加,在保持人均收入持续增长的同时,减缓碳排放的关键是进一步降低能源强度,调整产业和能源结构(Chen 等,2019^[32];Gu 等,2019^[33];孙耀华和仲伟周,2014^[34])。

2. 碳达峰目标实现预测

关于碳达峰目标实现,大部分研究主要运用 STIRPAT 模型,设置不同情境对我国及部分区域碳排放进行预测。研究普遍认为,在合理的经济社会发展速度与碳排放强度降速等情境下,中国有可能在 2030 年前提早实现碳达峰(Liu 和 Xiao,2018^[35];Su 和 Lee,2020^[36];Fang 等,2019^[37]);而在某些情境下,无法在 2030 年前实现碳达峰(渠慎宁和郭朝先,2010^[38];马丁和陈文颖,2017^[39]),碳排放峰值即为 EKC 曲线“拐点”,中国应加强清洁能源的开发与利用,在“两高”行业推广节能减排技术,提升服务业在经济结构中的比重,从而减少碳排放,实现碳达峰目标。对于各地区碳排放预测,青岛市要实现碳达峰目标压力非常大,需要大力控制人口规模、降低能耗强度、提升非化石能源消费比重、提高第三产业增加值比重,调整经济结构,转变经济发展方式,积极扩大内需(Wu 等,2018)^[40]。江苏省未来仍需发展节能减排技术、提高技术水平,转变经济增长方式,使经济增长趋向新常态(黄蕊等 2016)^[41]。中国应对对省级层面碳排放进行区分,从而更加明确各省市在节能减排中承担的责任(杜强等,2013)^[42]。

3. 碳达峰实现路径

关于碳达峰实现路径,研究主要从行政区域和重点行业两个维度进行分析。从行政区域维度,学者普遍认为,控制能耗总量及增速、优化能源结构、推广绿色技术、构建低碳经济、降低能耗强度等是实现碳达峰的主要路径(胡西武等,2021^[43];程云鹤,2021^[44];刘甜等,2015^[45])。另外,加快碳交易市场建设、逐步实施征收碳税、开展绿色补偿激励、构建绿色金融体系等体制机制建设也是我国实现碳达峰的主要路径(胡鞍钢,2021)^[46]。构建差异化绿色能源体系、推进生产生活方式绿色低碳转型、完善碳排放法律法规和协同管理机制等是实现碳达峰的变革路径(王怡,2022)^[47]。丰富碳汇资源储备,提升生态系统碳汇能力,构建多能互补体系和多能竞争市场体制,是实现中西部地区能源共济和 2030 年前碳达峰等目标的重要手段(胡西武等,2021^[43];程云鹤,2021^[44])。考虑中西部各省份的差异,应细化阶段目标任务、厘清各地区减排关键领域、加大财政金融对技术研发推广的支持力度、实施动态评估机制(田云和陈池波,2019)^[5]。沿海工业城市要加强区域碳排放统计及相关能力建设,并确定各行业碳排放强度先进值,从而更好服务全国碳达峰目标的实现(刘甜等,2015)^[45]。从重点行业

维度,电力和工业高能耗部门是实现碳达峰的关键部门,要通过普及供应侧的低碳发电技术和消费侧的节能减排技术,推动关键部门分阶段实现碳达峰,并将 2030 年碳排放峰值控制在 100 亿~108 亿吨之间(马丁和陈文颖,2016)^[48]。另外,政府要进一步引导激励制造业增加以节能减排为目的的投资活动,从而激发制造业的碳减排潜力,助力制造业实现碳达峰(邵帅等,2017)^[49]。同时,在工业领域中,建材和纺织业能够率先实现碳达峰,石油化工和电力行业最具减排潜力,应根据减排潜力分行业、分阶段制定碳达峰战略,加强行业间统筹协作,推动工业领域尽早实现碳达峰(王勇等,2017)^[50]。通过设定适当的经济增长速度 and 人口规模增速,制定低碳交通基础设施建设战略,鼓励使用新能源汽车,提高交通运输能效,是推动中国交通脱碳化的主要路径(Wang 等,2021)^[51]。

4. 文献评述

已有研究为碳排放影响因素的理论分析和碳达峰实现路径做了丰富的探索,但仍存在以下不足:一是研究对象聚焦全国、省级行政区或单个城市。我国幅员辽阔,不同区域的社会经济发展阶段、产业结构、技术水平等差异较大,各地区要实行分批梯次达峰,实现目标和政策的分类指导。以全国和省级行政区作为研究对象太过于宏观,碳达峰目标无法体现各区域的差异性,实现路径难以与各地区的产业特点、基础相适应。而以单个城市作为研究对象又过于微观、特征性较强,实现路径仅能在特定区域复制推广。二是研究在分析碳达峰实现路径时仅关注了节能减排潜力,缺乏对达峰压力的统筹考虑。发达地区实现碳达峰的难度较小,节能减排潜力也较小,处于工业化初期阶段的部分相对落后地区,尽管节能减排潜力较大,但实现社会经济发展与碳排放脱钩难度较大。仅考虑减排潜力的碳达峰路径模式研究,脱离了各地区或各行业发展现状的客观事实,无法得出切实可行的结论与建议。

三、研究设计

1. 样本选取

国家“十三五”“十四五”规划确定了全国 19 个城市群,其中,跨省域城市群由于涉及主体广、覆盖范围大、影响程度深,主要由中共中央、国务院或国家发展改革委发布规划。属于上述情况的城市群共有 11 个,分别是京津冀城市群、珠三角城市群、长江中游城市群、哈长城市群、成渝城市群、长江三角洲城市群、中原城市群、北部湾城市群、关中平原城市群、呼包鄂榆城市群、兰州-西宁城市群,各城市群范围^①如表 1 所示。

表 1 11 个城市群规划范围

城市群名称	规划范围
京津冀城市群	北京、天津、河北
珠三角城市群	广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆、香港、澳门
长江中游城市群	湖北武汉、黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、潜江、天门、襄阳、宜昌、荆州、荆门,湖南长沙、株洲、湘潭、岳阳、益阳、常德、衡阳、娄底,江西南昌、九江、景德镇、鹰潭、新余、宜春、萍乡、上饶及抚州、吉安的部分县(区)

^① 鉴于数据的可获性,研究对象中长江中游城市群不包含湖北省天门、仙桃和潜江三个省辖县级市;珠三角城市群不包含香港和澳门;哈长城市群不包含吉林省延边朝鲜族自治州;中原城市群不包含河南省辖县级市济源;北部湾城市群不包含海南省儋州市以及东方、澄迈、临高和昌江四个省辖县或省辖县级市;兰州-西宁城市群不包含甘肃省临夏回族自治州下辖县市,青海省海东市、海北藏族自治州、海南藏族自治州和海南藏族自治州下辖县市。另外,鉴于区县数据采集困难,对于国土面积、人口和经济规模占其所在地级市比重较大的区县,将其地级市全境纳入研究范围,反之则不考虑。纳入研究范围的地级市包括:长江中游城市群的江西省抚州市和吉安市;成渝城市群的重庆市以及四川省绵阳市、达州市和雅安市;关中平原城市群的陕西省商洛市,山西省运城城市和临汾市以及甘肃省平凉市和庆阳市;兰州-西宁城市群的甘肃省白银市和定西市。

续表 1

城市群名称	规划范围
哈长城市群	黑龙江哈尔滨、大庆、齐齐哈尔、绥化、牡丹江,吉林长春、吉林、四平、辽源、松原、延边朝鲜族自治州
成渝城市群	重庆渝中、万州、黔江、涪陵、大渡口、江北、沙坪坝、九龙坡、南岸、北碚、綦江、大足、渝北、巴南、长寿、江津、合川、永川、南川、潼南、铜梁、荣昌、璧山、梁平、丰都、垫江、忠县等以及开县、云阳的部分地区,四川成都、自贡、泸州、德阳、绵阳(除北川、平武)、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州(除万源)、雅安(除天全、宝兴)、资阳
长江三角洲城市群	上海,江苏南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州,浙江杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州,安徽合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城
中原城市群	河南郑州、开封、洛阳、平顶山、新乡、焦作、许昌、漯河、济源、鹤壁、商丘、周口,山西晋城,安徽亳州
北部湾城市群	广西南宁、北海、钦州、防城港、玉林、崇左,广东湛江、茂名、阳江,海南海口、儋州、东方、澄迈、临高、昌江
关中平原城市群	陕西西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、杨凌及商洛商州区、洛南、丹凤、柞水,山西运城(除平陆、垣曲)、临汾尧都区、侯马、襄汾、霍州、曲沃、翼城、洪洞、浮山,甘肃天水及平凉崆峒区、华亭、泾川、崇信、灵台和庆阳市区
呼包鄂榆城市群	内蒙古呼和浩特、包头、鄂尔多斯,陕西榆林
兰州—西宁城市群	甘肃兰州、白银市辖区、靖远、景泰、定西安定区、陇西、渭源、临洮、临夏、东乡族自治县、永靖、积石山保安族东乡族撒拉族自治县,青海西宁、海东、海晏、共和、贵德、贵南、同仁、尖扎

资料来源:城市群范围参考中共中央、国务院印发的《京津冀协同发展规划纲要》和《粤港澳大湾区发展规划纲要》,以及《长江中游城市群发展规划》(发改地区[2015]738号)、《哈长城市群发展规划》(发改地区[2016]499号)、《成渝城市群发展规划》(发改规划[2016]910号)、《长江三角洲城市群发展规划》(发改规划[2016]1176号)、《中原城市群发展规划》(发改地区[2016]2817号)、《北部湾城市群发展规划》(发改规划[2017]277号)、《关中平原城市群发展规划》(发改规划[2018]220号)、《呼包鄂榆城市群发展规划》(发改地区[2018]358号)、《兰州—西宁城市群发展规划》(发改规划[2018]423号);数据处理见文中描述

2. 模型设计

(1) STIRPAT 模型。为在不同情境下对未来碳排放进行预测,本文采用 STIRPAT 模型分析了人口规模、经济社会发展水平和能源消耗强度等因素对城市群碳排放量的影响。STIRPAT 模型是由 Ehrlich 和 Holdren (1971)^[52] 提出的 IPAT 模型变化而来。IPAT 模型旨在定量分析人口 (population)、富裕水平 (affluence) 和技术 (technology) 对环境的影响 (impact), 即 $I = P \times A \times T$ 。在考察城市群碳排放影响因素时,模型可表示为:

$$C = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{C}{E} = P \times G \times IS \times FA \quad (1)$$

其中, C 为城市群碳排放量; P 为城市群常住人口数, 表征人口规模; GDP 为城市群 GDP; E 为城市群能源消耗; G 为城市群人均 GDP, 表征富裕程度; IS 为城市群能源消耗强度, 表征技术水平; FA 为单位能源碳排放系数, 是常数项, 假设 $\ln FA = \alpha$ 。

对式(1)两边取对数后,可以得到下式:

$$\ln C = \alpha + \ln P + \ln G + \ln IS \quad (2)$$

但是, IPAT 模型默认各因素对环境的影响呈线性关系, 且可考察的影响因素有限, 无法分析其他因素对环境的影响。为了克服 IPAT 模型的局限性, Dietz 和 Rosa (1994)^[53] 提出了 IPAT 方程的随机模型, 即 STIRPAT 模型, 公式为 $I = aP^b \times A^c \times T^d e$ 。在考察城市群碳排放影响因素时, 模型可表示为:

$$\ln C = \alpha + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln G + \beta_3 \ln IS + \gamma \ln X + \varepsilon \quad (3)$$

其中, α 为模型系数; β_1 、 β_2 和 β_3 为解释变量的估计系数; γ 为控制变量的估计系数; X 为控制变

量; ε 为随机误差项。

STIRPAT 模型拒绝了单位弹性假设,增加了随机性,且具有更好的扩展延伸性。在该模型中,可以增加对环境有影响的其他因素,例如城镇化率、财政支出等。在模型变量选择上,本文选取城市群碳排放作为被解释变量,选取城市群常住人口、人均 GDP 和能源消耗强度作为解释变量。近年来,城市群聚集了大量人口和产业,承载了全国一半以上的人口总量和 60% 以上的地区生产总值,生产规模和消费规模随着人口规模和富裕程度的增加而增长,从而推动化石燃料消耗碳排放的增长。随着城市群现代化建设的不断深入,推动清洁生产技术快速发展,碳排放强度稳步下降,致使碳排放增速逐渐放缓。

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的报告指出,除人口规模、经济增长和能源强度外,城镇化水平是影响碳排放的另一重要因素 (Pachauri 等, 2015)^[54]。城镇化与碳排放之间的联系错综复杂,涉及因素包括城市形态、发展水平和基础设施等。在交通运输、建筑、工业、家庭生活等主要排放领域,城镇地区对能源的消费要高于农村地区,特别是城镇商业用电、工业用电远高于农业生产用电,而我国电力供应主要来自于燃煤发电,产生较大份额的碳排放。另外,根据已有文献可知,财政支出和劳动力资源对环境的间接影响也不容忽视 (赵哲和谭建立, 2020^[55]; 刘书玲等, 2018^[56]; 朱勤, 2018^[57])。在一般公共预算主要支出项目中,节能环保支出是重要组成部分,体现了政府对节能减排项目的财政支持。城市群公共财政支出增加,特别是节能环保类支出的增加,将引导低碳生产生活方式,推动城市群碳减排。另外,劳动力是影响产业生产率的关键要素,城市群就业规模的增加将影响劳动生产率,进而提升碳减排效率,降低碳排放强度。因此,为控制解释变量以外的其他因素对碳排放的影响,综合考虑数据可得性,本文选取城镇化率、公共财政支出和从业人员数作为控制变量。

各因素对城市群碳排放的影响机理如图 1 所示。

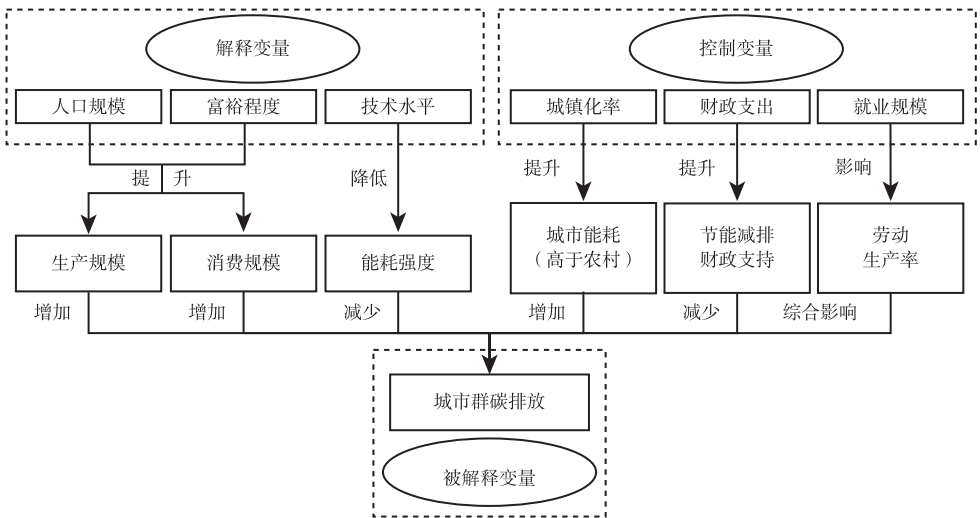


图 1 各因素对城市群碳排放的影响机理

本文构建的城市群碳排放影响因素模型如下:

$$\ln C = \alpha + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln G + \beta_3 \ln IS + \beta_4 \ln UB + \beta_5 \ln FE + \beta_6 \ln EM + \mu_i + \varepsilon \quad (4)$$

其中, UB 为城市群城镇化率, 表征城镇化水平; FE 为城市群财政一般公共预算内支出, 表征公共财政支出; EM 为各产业从业人员总数, 表征就业规模; β_4 、 β_5 和 β_6 为控制变量的估计系数; μ_i 为个体不随时间变化的因素。

(2) 碳达峰压力指数。由于中国确定了 2030 年前实现碳达峰的目标, 因此对于各城市群而

言,碳达峰时间是实现碳达峰目标首当其冲的压力。碳排放量和碳排放增速是城市群实现碳达峰的另外两个压力,碳排放量较大的城市群实现碳达峰,对全国实现碳达峰的贡献较高,因此其率先实现碳达峰的责任更大;而对于碳排放增速较高的城市群,控制碳排放增长速度面临的阻力较大,短期内实现碳达峰的压力也较大。因此,本文从时间、规模和速度三个视角构建了城市群碳达峰压力指数。构建的城市群碳达峰压力指数如下所示:

$$I_{pr} = \gamma I_{Tav} + \delta I_C + \theta I_{Cg} \tag{5}$$

其中, I_{pr} 为城市群碳达峰压力指数; I_{Tav} 为城市群目标压力指标,反映不同情境下各城市群实现碳达峰的平均年份,表征为实现碳达峰目标所面临的压力; I_C 为城市群碳排放贡献压力指标,反映2030年各城市群在四种情境下碳排放平均值的相对大小,表征助力全国实现碳达峰所肩负责任带来的压力; I_{Cg} 为城市群本源压力指标,反映2022—2030年各城市群在四种情境下碳排放平均增速的相对大小,表征在各自碳排放增长速度下实现碳达峰所面临的压力。 γ 、 δ 和 θ 为各压力指标的权重。考虑到各压力指标的单位不同,需要对各指标数值进行标准化处理,如下所示:

$$I_{i,x} = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x} \tag{6}$$

其中, I 为标准化指标; i 为城市群编号; x 为原始指标; $\min x$ 表示所有城市群 x 指标的最小值, $\max x$ 表示所有城市群 x 指标的最大值。

(3)碳减排潜力指数。本文基于效率与公平的视角构建了城市群碳减排潜力指数。从效率角度来看,碳排放强度越高,说明碳排放效率越低,表明通过技术升级和结构调整手段降低碳排放的潜力越大;从公平角度来看,每个人都有排放同等二氧化碳的权利,人均碳排放量越高,则表明通过经济调控手段降低碳排放的潜力越大。潜力指标数值根据式(6)进行标准化处理,构建的城市群碳减排潜力指数如下所示:

$$I_{po} = \rho I_{ef} + \sigma I_{fa} \tag{7}$$

其中, I_{po} 为城市群碳减排潜力指数; I_{ef} 为城市群效率潜力指标,反映2030年各城市群在四种情境下碳排放平均强度的相对大小,表征在碳排放效率方面存在的碳减排潜力; I_{fa} 为城市群公平潜力指标,反映2030年各城市群在四种情境下人均碳排放平均值的相对大小,表征在碳排放公平性方面存在的减排潜力; ρ 和 σ 分别为效率和公平潜力指标的权重。

(4)碳减排达峰动力指数。城市群需要综合考量其碳达峰压力和碳减排潜力,以制定全面科学的减排方案和碳达峰目标。根据上述碳达峰压力指数和碳减排潜力指数,本文构建了城市群碳减排达峰动力指数,如下所示:

$$I_{fo} = \varphi I_{pr} + \omega I_{po} \tag{8}$$

其中, I_{fo} 为城市群碳减排达峰动力指数, φ 和 ω 分别为城市群碳达峰压力指数和碳减排潜力指数的权重。

3. 数据来源及处理

研究中2005年、2010年、2012年和2015年各城市群地级市碳排放数据来源于中国城市温室气体工作组编制的《中国城市二氧化碳排放数据集(2005)》《中国城市二氧化碳排放数据集(2010)》《中国城市二氧化碳排放数据集(2012)》和《中国城市温室气体排放数据集(2015)》,经济、人口及城镇化数据来源于各省份统计年鉴。其中,地区生产总值以2005年的不变价格进行标准化换算。由于地级市能源消耗相关数据的缺失,研究采用省域数据表征各城市群能源消耗情况,能源消耗强度数据来源于《能源统计年鉴》和各省份统计年鉴,各类能源的标准煤折算系数来源于《能源统计年鉴2019》,如表2所示。各城市群地级市从业人员数和公共财政支出来源于《城市统计年鉴》,各变量的描述性统计如表3所示。

表 2 各类能源的标准煤折算系数

能源品种	标准煤折算系数	能源品种	标准煤折算系数
原煤	0.7143 千克标准煤/千克	柴油	1.4571 千克标准煤/千克
洗精煤	0.9000 千克标准煤/千克	燃料油	1.4286 千克标准煤/千克
焦炭	0.9714 千克标准煤/千克	液化石油气	1.7143 千克标准煤/千克
焦炉煤气	0.5714 千克标准煤/立方米	炼厂干气	1.5714 千克标准煤/千克
原油	1.4286 千克标准煤/千克	天然气	1.200 千克标准煤/立方米
汽油	1.4714 千克标准煤/千克	热力	0.03412 千克标准煤/百万焦耳
煤油	1.4714 千克标准煤/千克	电力	0.1229 千克标准煤/千瓦小时

资料来源:《能源统计年鉴 2019》

表 3 变量定义和描述性统计

变量类型	变量名称	变量符号缩写	变量符号全称	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	碳排放量(亿吨)	<i>C</i>	<i>C</i>	5.050	3.764	0.652	15.737
解释变量	常住总人口(亿人)	<i>P</i>	<i>population</i>	0.663	0.419	0.099	1.435
	人均 GDP(万元/人)	<i>G</i>	<i>GDP per</i>	3.582	2.196	0.946	9.505
	能源消耗强度(吨/万元)	<i>IS</i>	<i>intensity</i>	0.771	0.313	0.290	1.540
控制变量	城镇化率(%)	<i>UB</i>	<i>urbanization</i>	0.520	0.132	0.331	0.844
	公共财政支出(万亿元)	<i>FE</i>	<i>financial expenditure</i>	0.412	0.435	0.012	2.004
	从业人员总数(亿人)	<i>EM</i>	<i>employee</i>	0.085	0.072	0.010	0.327

四、实证结果与分析

1. 城市群碳排放影响因素分析

基于 11 个城市群 2005 年、2010 年、2012 年和 2015 年的面板数据,剔除缺失值并将非连续时间的非平衡面板数据处理成平衡面板数据后进行混合 OLS 回归,估算了城市群固定效应和随机效应。随后,根据豪斯曼(Hausman)检验结果对模型进行选择,并对模型进行了稳健性检验。根据式(4),为解决各变量量纲不一致的问题,本文构建的 STIRPAT 模型分别对解释变量、被解释变量和控制变量取对数。因此,在进行检验和回归之前,首先要对所有变量进行对数处理。

(1) 平稳性检验。为了避免变量的非平稳而导致的伪回归,需要对面板数据进行平稳性检验。由于研究数据为非平衡面板数据,因此选用 Fisher type 检验进行平稳性检验。根据表 4 的检验结果可知,无论是被解释变量、解释变量还是控制变量的检验统计量均显著,模型中的所有变量均平稳,通过平稳性检验,面板数据可以用于回归分析。

表 4 平稳性检验结果

变量	检验结果	变量	检验结果
<i>C</i>	159.254 ***	<i>urbanization</i>	366.549 ***
<i>population</i>	419.880 ***	<i>financial_expenditure</i>	219.813 ***
<i>GDP_per</i>	298.275 ***	<i>employee</i>	133.524 ***
<i>intensity</i>	231.195 ***		

注:*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平显著

(2) 模型估计结果。通过估计方程(4)检验了人口规模、富裕程度和技术水平对城市群碳排放的影响。模型分别引入了个体固定效应和随机效应,个体固定效应模型解决了不随时间而变但随个体而异的遗漏变量问题,随机效应解决了误差的自相关性,检验结果如表 5 所示。第(1)列回归没有引入控制变量、随机效应和固定效应,人口规模、富裕程度和技术水平对碳排放的影响均在 0.01 水平上显著。第(2)列回归加入控制变量并引入随机效应,三个控制变量对碳排放的影响不显著,其他三个解释变量对碳排放的影响依旧维持在 0.01 水平上显著。第(3)列回归加入控制变量并引入固定效应,公

共财政支出和从业人员数对碳排放影响不显著,人口规模、富裕程度、技术水平和城镇化水平对碳排放的影响分别在 0.1、0.05、0.1 和 0.05 水平上显著,估计系数分别为 0.97、1.046、0.459 和 0.826。

表 5 城市群碳排放影响因素结果分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	C	C	C	C
	OLS	随机效应	固定效应	稳健性检验
population	0.899***(0.000)	0.954***(0.000)	0.970*(0.063)	0.967*(0.053)
GDP_per	0.814***(0.000)	0.979***(0.000)	1.046**(0.025)	1.044**(0.019)
intensity	0.801***(0.000)	0.853***(0.000)	0.459*(0.057)	0.384*(0.064)
urbanization		0.345(0.284)	0.826**(0.025)	0.882**(0.012)
financial_expenditure		-0.177(0.188)	-0.357(0.148)	-0.375(0.113)
employee		0.134(0.269)	0.0342(0.775)	0.0138(0.902)
常数项	1.346***(0.000)	1.584***(0.005)	1.168(0.198)	1.135(0.188)
R ²	0.891	0.886	0.879	0.883
VIF	9.174	8.772	8.264	8.547

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平显著

为检验模型是否存在多重共线性,计算了回归模型自变量的方差膨胀因子(VIF)。结果显示,第(1)~(3)列 OLS 回归模型的 VIF 分别为 9.174、8.772、8.264,均未超过 10,说明回归模型不存在多重共线性。

(3)豪斯曼检验。为确保回归结果的可靠性,选取合适的模型结果进行分析,本文对模型结果进行 Hausman 检验。城市群碳排放影响因素回归模型的 Hausman 检验结果如表 6 所示。结果表明,城市群碳排放的 Hausman 检验结果显著,Hausman 检验拒绝原假设,结合固定效应模型的 F 检验结果可知,固定效应模型的效果优于随机效应模型和 OLS 回归,应选用固定效应模型的回归结果进行分析。

表 6 豪斯曼检验结果

变量	结果
Hausman 检验	19.91 Prob > chi2 = 0.0005
模型选择	固定效应

根据上述 Hausman 检验结果,碳排放量测算公式如下:

$$\ln C = 0.97 \ln P + 1.046 \ln G + 0.459 \ln I S + 0.826 \ln U B + 1.168 \quad (9)$$

(4)回归结果分析。如表 5 第(4)列所示,各因素对城市群碳排放的影响程度有所差异。其中,富裕程度的提升是推动城市群碳排放增长的主要驱动因素;人口规模和城镇化水平的提高也是导致城市群碳排放增加的重要因素;技术水平的进步,即能源消耗强度的下降,能起到一定程度的减排作用;公共财政支出和从业人员总数对城市群碳排放的影响并不显著。

人口规模的回归系数在各模型中都为正,常住人口的增加对碳排放产生了显著的正向影响。在其他因素不变的情况下,城市群常住人口增加 1%,碳排放量将增加 0.97%。人口增长对碳排放的弹性系数小于 1,人口的聚集将推动规模化生产和提升公共设施利用效率,从而使人均碳排放有所下降,致使人口增长产生的边际碳排放递减。

富裕程度的回归系数在各模型中都为正,经济增长是碳排放增长的主要驱动因素。在其他因素不变的情况下,人均 GDP 增加 1%,碳排放量将增加 1.046%。经济增长对碳排放的弹性系数略大于 1,城市群的经济增长主要由投资、资源等传统要素驱动,科技创新驱动能力不足,尚未充分发挥技术创新降碳作用。即,当前城市群的发展模式仍较粗放,经济增长伴随着资源能源的大量消

耗,为排放密集型经济增长方式,全要素生产率水平不高,科技创新的作用还未充分发挥,整体尚未进入绿色低碳的高质量发展阶段,造成经济增长产生的边际碳排放递增。

技术水平的回归系数在各模型中也都为正,能源消耗强度的下降促进了碳减排。在其他因素不变的情况下,能源消耗强度下降1%,碳排放量将下降0.459%。能源消耗强度对碳排放的弹性系数低于0.5,城市群清洁生产技术的提高降低了能源消耗强度从而一定程度上减少了碳排放,但是技术水平进步所带来的碳减排却十分有限,先进技术产生的边际减碳递减,技术减排效果仍有很大的提升空间,需要进一步加强技术研发投入。相较于其他促进碳排放增长的因素,能耗强度对碳排放的影响较小。城市群通过降低能耗强度推动的碳减排不足以抵消其他因素拉动的碳排放增长,致使城市群的碳排放量总体呈上升趋势。

城镇化水平在 OSL 和随机效应模型中不显著,在固定效应模型中显著为正,说明城镇化进程对碳排放增长有一定的影响。在其他因素不变的情况下,城镇化率增加1%,碳排放量将增加0.826%。整体而言,随着城市群的城镇化建设与推进,带动了碳排放一定程度的增长。但是,城镇的集聚效应有利于提升能源利用效率,导致城镇化提升带来的边际碳排放递减。

(5) 稳健性检验。为检验固定效应模型的稳健性,本文采用改变样本容量法进行稳健性检验,在11个城市群样本的基础上增加了山东半岛城市群,山东半岛城市群的规划范围为山东省全境。回归结果第(4)列为稳健性检验结果,根据结果可知,各解释变量和控制变量的显著程度与估计系数并没有很大的变化。人口规模、技术水平依旧在0.1水平上显著,估计系数分别为0.967和0.384;富裕水平和城镇化水平仍在0.05水平上显著,估计系数分别为1.044和0.882;公共财政支出和从业人员总数对碳排放影响依然不显著,且估计系数正负号无变化。模型通过稳定性检验。

2. 城市群碳达峰预测

(1) 各年碳排放状况。城市群经济社会发展阶段及自然资源禀赋不同,导致碳排放差别较大。在11个城市群中,长三角和京津冀城市群碳排放量远超其他城市群,2010年碳排放量均超过10亿吨,2015年碳排放量分别为15.7亿吨和11.3亿吨,如图2所示。长江中游、成渝、中原、关中平原、呼包鄂榆和珠三角城市群碳排放量居中,2015年碳排放量均在4亿~8亿吨之间,如图3所示。哈长、北部湾和兰州-西宁城市群碳排放量远低于其他城市群,2015年碳排放量均未超过4亿吨,如图4所示。

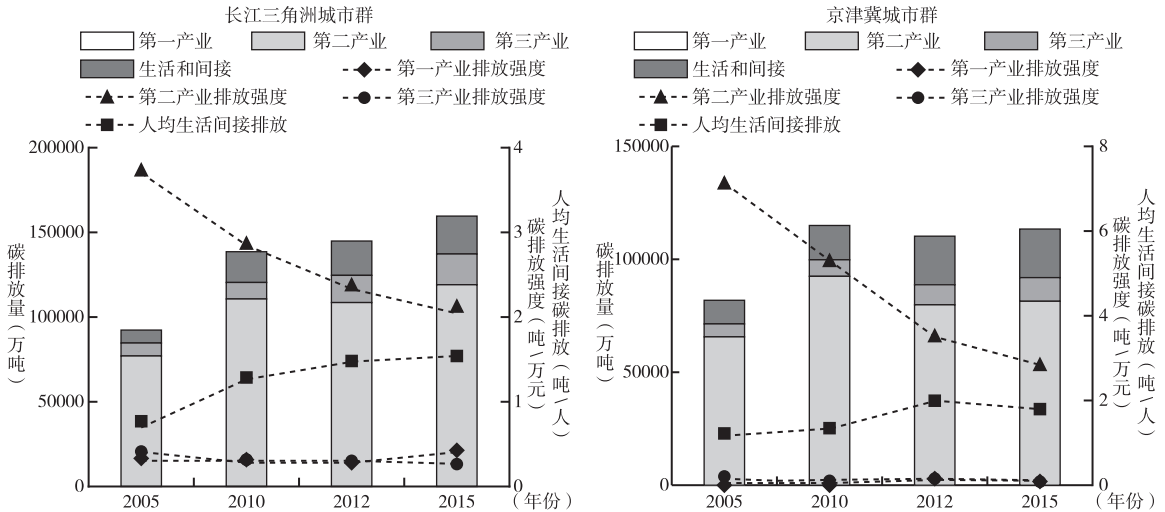


图2 碳排放较高城市群排放状况

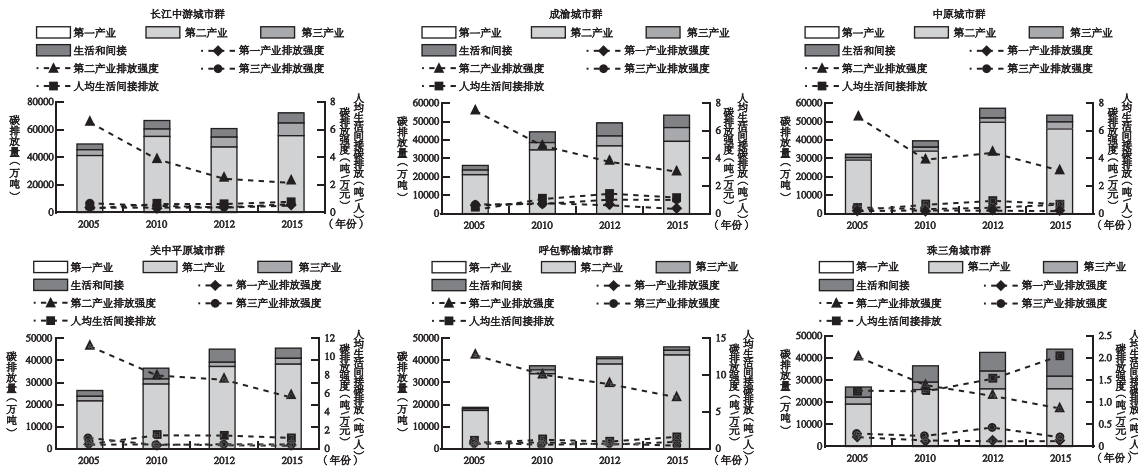


图3 碳排放居中心城市群排放状况

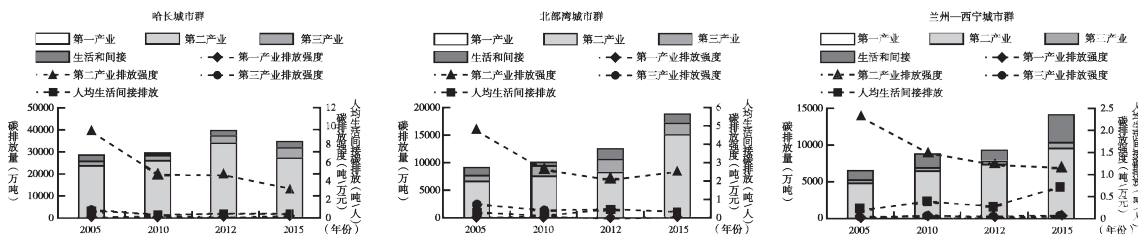


图4 碳排放较低城市群排放状况

各城市群第一产业碳排放占比非常低,长江中游、哈长和北部湾城市群的第一产业碳排放占比分别为1.7%、1.9%和1.1%,其他城市群的第一产业碳排放占比均不足1%。因此,第一产业碳排放并不是各城市群碳减排的重点领域。

各城市群第二产业碳排放占比非常高,均超过了60%。其中,关中平原、呼包鄂榆和兰州-西宁城市群的第二产业碳排放效率较低、强度较高,排放强度分别为5.9吨/万元、7.3吨/万元和5.7吨/万元,第二产业是这三个城市群碳减排的重点领域。

长江中游、哈长、成渝和北部湾城市群的第三产业碳排放占比较高,均超过了10%,且第三产业碳排放效率较低、强度较高,排放强度分别为0.49吨/万元、0.45万元/吨、0.63吨/万元和0.40吨/万元,第三产业是这四个城市群碳减排的重点领域。

长三角、兰州-西宁、京津冀和珠三角城市群的生活和间接碳排放占比较高,均超过了14%,且人均生活和间接碳排放较高,均超过了1.5吨/万元,生活和间接碳排放是这四个城市群的重点减排领域。

(2)碳排放预测情境设置。根据世界资源研究所(Rich等,2014)^[58]提出的碳达峰判断依据,某地区的碳排放达到峰值后的五年或者更长的历史时间内碳排放呈下降趋势即为已经实现碳达峰。针对中国2030年实现碳达峰的目标,本文对影响碳排放的主要解释变量设置了四种不同的情境,分别为高增长快降耗、低增长快降耗、高增长慢降耗和低增长慢降耗,并在四种情境下,基于STIRPAT模型预测了各城市群2022—2035年碳排放量。

根据边际效益递减原则,随着经济社会发展和技术水平的提高,其发展速度不断放缓,对应指标的增速或降幅也将不断下降。而经济社会发展水平较高的地区相对于发展水平较低的地区,对应指标的增速或降幅也下降更快。将城市群的人口规模、经济发展水平、城镇化水平和技术水平分别按照总人口、人均GDP、城镇化率、能源消耗强度等指标进行聚类,其中,长江中游、成渝、长三

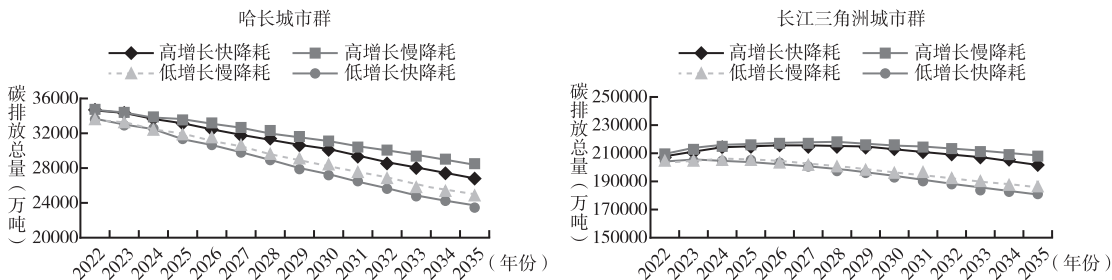
角、中原、京津冀和珠三角城市群属于人口规模较大城市群;长三角、呼包鄂榆、京津冀和珠三角城市群属于经济发展水平较高城市群;长三角、呼包鄂榆、京津冀和珠三角城市群属于城镇化水平较高城市群;哈长、成渝、长三角、中原和珠三角城市群属于技术水平先进城市群。在低(高)增长情境中,经济社会处于发展速度放缓(保持高速发展)状态;在慢(快)降耗情境中,技术水平提升较慢(快)导致能源消耗强度缓慢(快速)下降。各情境中经济社会和技术水平指标的增速以2015—2018年均增速为基准进行变化,相关指标设置如表7所示。

表7 四种类型情境设置 单位:%

情景类型	人口增速年均降幅		人均GDP增速年均降幅		城镇化率增速年均降幅		能耗强度降速年均降幅	
	人口规模较大城市群	其他城市群	经济发展水平较高城市群	其他城市群	城镇化水平较高城市群	其他城市群	技术水平先进城市群	其他城市群
低增长慢降耗	20	15	20	15	20	15	4	3
高增长慢降耗	15	10	15	10	15	10	4	3
低增长快降耗	20	15	20	15	20	15	3	2
高增长快降耗	15	10	15	10	15	10	3	2

(3) 碳达峰预测。根据 STIRPAT 模型回归结果,在四种不同情景下预测了2022—2035年各城市群的碳排放量。在高增长慢降耗情境下,经济社会高速发展造成大量碳排放增长,技术水平缓慢提升放缓了碳减排速率,城市群实现碳达峰速度非常慢。在高增长快降耗情境下,经济社会高速发展造成碳排放增长,技术水平快速提升促进了碳减排速率,城市群碳达峰取决于两者的平衡。在低增长慢降耗情境下,经济社会低速发展使得碳排放增长缓慢,技术水平缓慢提升放缓了碳减排速率,城市群碳达峰取决于两者的平衡。在低增长快降耗情境下,经济社会低速发展使得碳排放增长缓慢,技术水平快速增长提高了碳减排速率,城市群实现碳达峰速度非常快。

在11个城市群中,哈长、长三角、京津冀和珠三角城市群在四种情境下都能在2030年前实现碳达峰,如图5所示。由于经济社会发展放缓,哈长城市群是最先实现碳达峰的城市群,在2022年即已实现碳达峰,四种情境的平均达峰排放量为3.42亿吨。长三角、京津冀和珠三角城市群分别在2023—2027年、2024—2028年和2026—2030年实现碳达峰,四种情境的平均达峰排放量分别为21.09亿吨、15.7亿吨和6.66亿吨。这三个城市群的社会经济发展水平较高,已经开始从经济快速增长迈向高质量增长阶段,率先实现达峰难度较小。



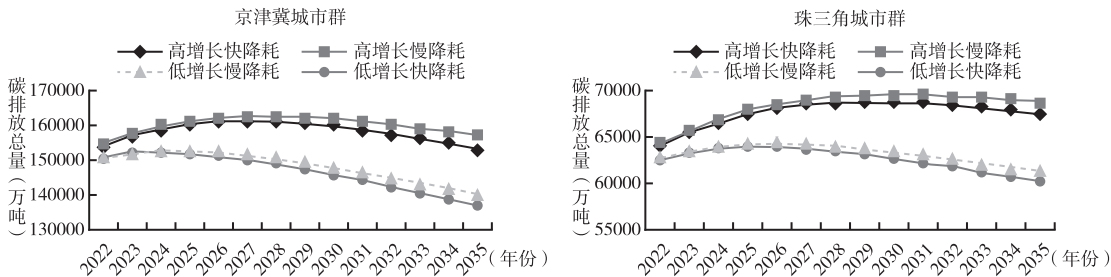


图5 率先碳达峰城市群碳排放预测

长江中游、成渝、中原、北部湾、关中平原和兰州—西宁城市群在低增长慢降耗情境和低增长快降耗情境下均能够在2025—2028年间实现碳达峰,而在高增长慢降耗情境和高增长快降耗情境下均无法在2030年前实现碳达峰,如图6所示。这六个城市群在四种情境下的平均达峰排放量分别为11.91亿吨、8.65亿吨、8.34亿吨、3.08亿吨、7.28亿吨和1.95亿吨。这六个城市群尚处于经济高速增长阶段,且承接了发达城市群转移的碳排放密集产业,仍有较大的碳排放需求,要率先实现碳达峰难度较大。

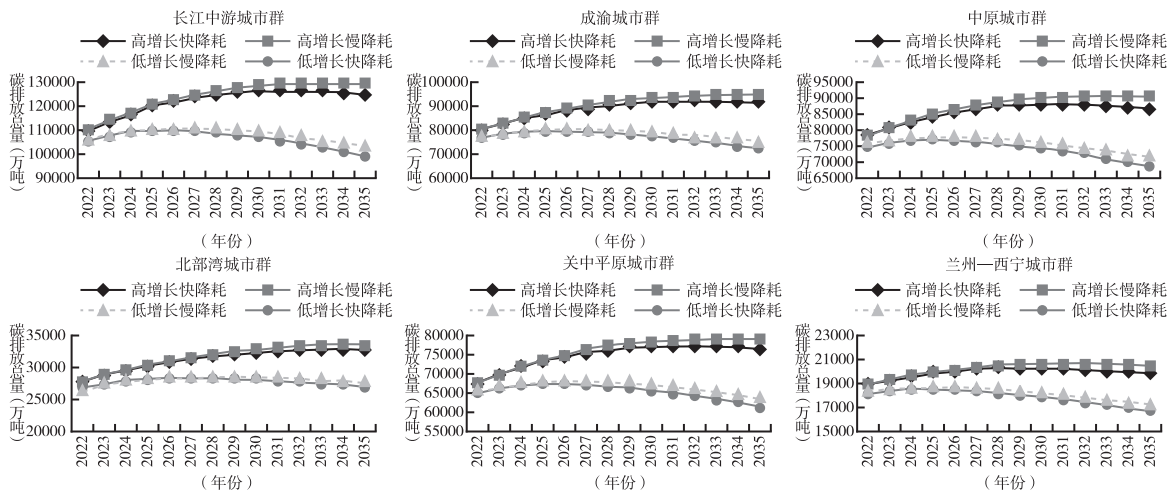


图6 碳达峰较难城市群碳排放预测

呼包鄂榆城市群在四种情境下都无法在2030年前实现碳达峰,如图7所示。2022—2035年,呼包鄂榆城市群的碳排放逐年稳步增长,且增速逐年放缓,该城市群在四种情境下2035年的平均碳排放量为7.93亿吨。该城市群属于能源输出型,生产的能源和电力向全国其余地区输送。为了满足其余地区的需求,该城市群能源消耗将维持增长态势,中长期内无法实现碳达峰目标。

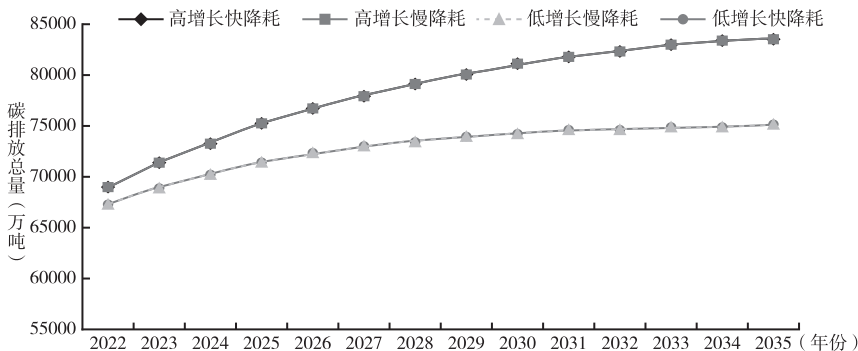


图7 呼包鄂榆城市群碳排放预测

全部城市群在高增长快降耗情境、低增长慢降耗情境和低增长快降耗情境下分别能够在 2029 年、2025 年和 2025 年实现碳达峰,而在高增长慢降耗情境下无法在 2030 年前实现碳达峰,如图 8 所示。全部城市群在四种情境下的平均达峰排放量为 94.97 亿吨。

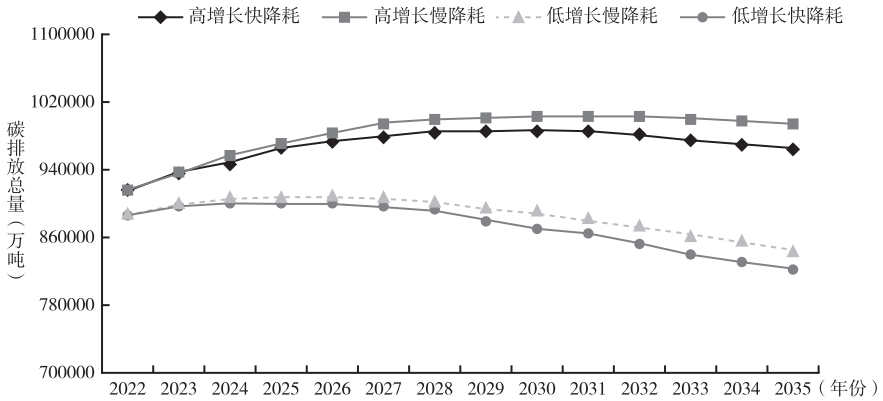


图 8 全部城市群碳排放预测

五、进一步研究

1. 城市群碳达峰压力

根据式(5)构建的碳达峰压力指数模型,对各城市群碳达峰压力进行测算,结果如表 8 所示。目标压力源自于上级部门的目标考核,属于外部压力。责任压力与本源压力是由各城市群自身碳排放量与增速所产生的压力,属于内部压力。外部压力与内部压力优先级相同,故 $\gamma = \delta + \theta = 0.5$ 。另外,各城市群应站在全国一盘棋角度,优先考虑其对全国实现碳达峰的责任,再考虑减缓碳排放增速的压力,因此 $\delta > \theta$ 。考虑到不同压力指标的优先级,目标压力指标、责任压力指标和本源压力指标的权重分别设置为 0.5、0.3 和 0.2。

从表 8 可以看出,在 11 个城市群中,呼包鄂榆和长江中游城市群面临的碳达峰压力较大,碳达峰压力指数均超过 0.6。成渝、北部湾、关中平原、长三角、中原、京津冀和珠三角城市群的碳达峰压力适中,碳达峰压力指数均在 0.4~0.6 之间。兰州-西宁和哈长城市群的碳达峰压力较小,碳达峰压力指数分别为 0.36 和 0.02。

表 8 城市群碳达峰压力评估

城市群	目标压力	责任压力	本源压力	达峰压力指数	排名
呼包鄂榆城市群	1	0.31	1	0.79	1
长江中游城市群	0.56	0.53	0.85	0.61	2
成渝城市群	0.60	0.36	0.85	0.57	3
北部湾城市群	0.69	0.06	0.93	0.55	4
关中平原城市群	0.58	0.28	0.83	0.54	5
长江三角洲城市群	0.23	1	0.51	0.52	6
中原城市群	0.52	0.34	0.78	0.52	7
京津冀城市群	0.29	0.73	0.57	0.48	8
珠三角城市群	0.44	0.25	0.69	0.44	9
兰州-西宁市城市群	0.44	0	0.68	0.36	10
哈长城市群	0	0.05	0	0.02	11

2. 城市群碳减排潜力

根据式(7)构建的碳减排潜力指数模型,对各城市群碳减排潜力进行测算,结果如表 9 所示。在评估减排潜力时需要兼顾公平与效率,因此效率潜力指标和公平潜力指标的权重均设置为 0.5。

在 11 个城市群中,呼包鄂榆、兰州 - 西宁和关中平原城市群存在的碳减排潜力较大,碳减排潜力指数均超过了 0.35。中原和京津冀城市群存在的碳减排潜力适中,碳减排潜力指数均为 0.18。长三角、北部湾、长江中游、成渝、珠三角和哈长城市群的碳减排潜力较小,碳减排潜力指数均未超过 0.1。

表 9 城市群碳减排潜力评估

城市群	效率潜力	公平潜力	减排潜力指数	排名
呼包鄂榆城市群	1	1	1	1
兰州 - 西宁城市群	0.58	0.20	0.39	2
关中平原城市群	0.60	0.15	0.38	3
中原城市群	0.27	0.08	0.18	4
京津冀城市群	0.24	0.11	0.18	5
长江三角洲城市群	0.09	0.11	0.10	6
北部湾城市群	0.18	0.01	0.09	7
长江中游城市群	0.14	0.04	0.09	8
成渝城市群	0.14	0.02	0.08	9
珠三角城市群	0	0.04	0.02	10
哈长城市群	0.04	0	0.02	11

3. 城市群碳减排达峰动力

根据式(8)构建的碳减排达峰动力指数模型,对各城市群碳减排达峰动力进行测算,结果如表 10 所示。在确定城市群碳达峰路径模式时,需要综合考虑碳达峰压力和碳减排潜力。考虑到碳达峰是目标考核,各城市群无论减排潜力大小都要在 2030 年前助力实现全国碳达峰,因而压力指数的优先级要高于潜力指数,即 $\varphi > \omega$,碳达峰压力指数和碳减排潜力指数权重分别设置为 0.6 和 0.4。

在 11 个城市群中,呼包鄂榆和关中平原城市群的减排达峰动力较大,碳减排达峰动力指数分别为 0.88 和 0.48,呼包鄂榆城市群的三项指数均为所有城市群最高。呼包鄂榆和关中平原城市群的碳达峰压力都不小,且碳减排潜力都很大,属于碳减排动力源城市群,需要重点关注能源开采与加工、黑色金属冶炼、化工等“两高”行业生产工艺的低碳绿色改造,与碳达峰示范城市群开展低碳发展合作,引入先进低碳技术,实现能源高效利用,助力尽早实现碳达峰。

长江中游、中原、成渝、兰州 - 西宁、北部湾、京津冀、长三角和珠三角城市群的碳减排达峰动力适中,碳减排达峰动力指数均在 0.25 ~ 0.4 之间。中原和兰州 - 西宁城市群的碳达峰压力不大,但是碳减排潜力也不小,属于低碳培育型城市群,需要重点关注风能、太阳能、生物质等清洁能源的利用,加强储能场景应用,优化能源消费结构,形成以可再生能源为主、储能调峰为辅的多能互补新格局,鼓励碳汇资源开发,加快碳捕获、利用与封存(CCUS)的应用示范,加强碳中和储备。

长江中游、成渝、京津冀、长三角、北部湾和珠三角城市群的碳达峰压力不小,但是碳减排潜力却不大。长江中游、成渝和北部湾城市群属于高质量转型城市群,需要重点关注战略性新兴产业培育、制造业数字化绿色化转型、产业价值服务化延伸,提升产业电气化水平,实现产业低碳发展和高质量转型。京津冀、长三角和珠三角城市群属于碳达峰示范城市群,需要重点关注建筑、交通、生活等全方位减排,积极发展零碳建筑,构建低碳交通网络体系,引导低碳生活与消费方式,打造安全高效的数字化智慧能源体系,并加大低碳科技创新研发力度,突破现有技术瓶颈,通过技术溢出效应支持帮助其他地区尽快实现碳达峰。

哈长城市群的减排达峰动力较小,减排达峰动力指数为 0.02。该城市群的三项指数均为所有城市群最低。如前所述,哈长城市群经济社会发展趋缓,在不采取任何措施的情况下,也可最快实现碳达峰。

表 10 城市群碳减排达峰动力评估

城市群	碳达峰压力指数	碳减排潜力指数	碳减排达峰动力指数	排名
呼包鄂榆城市群	0.79	1	0.88	1
关中平原城市群	0.54	0.38	0.48	2
长江中游城市群	0.61	0.09	0.40	3
中原城市群	0.52	0.18	0.38	4
成渝城市群	0.57	0.08	0.38	5
兰州-西宁城市群	0.36	0.39	0.37	6
北部湾城市群	0.55	0.09	0.37	7
京津冀城市群	0.48	0.18	0.36	8
长江三角洲城市群	0.52	0.10	0.35	9
珠三角城市群	0.44	0.02	0.27	10
哈长城市群	0.02	0.02	0.02	11

六、研究结论与政策建议

1. 研究结论

本文运用 STIRPAT 模型分析了人口规模、经济社会发展水平和技术水平等因素对城市群碳排放的影响。结果显示,人口规模、富裕程度、技术水平和城镇化水平能够显著影响城市群碳排放。基于模型回归结果预测了各城市群 2022—2035 年碳排放量和碳达峰时间。哈长、长三角、京津冀和珠三角城市群在四种情境下都能在 2030 年前实现碳达峰;长江中游、成渝、中原、北部湾、关中平原和兰州-西宁城市群在低增长慢降耗情境和低增长快降耗情境下均能够在 2025—2028 年间实现碳达峰,而在高增长慢降耗情境和高增长快降耗情境下均无法在 2030 年前实现碳达峰;呼包鄂榆城市群在四种情境下都无法在 2030 年前实现碳达峰。研究最后测算了城市群碳达峰压力、碳减排潜力和碳减排达峰动力,呼包鄂榆和关中平原城市群的碳减排达峰动力较大,这两个城市群的碳达峰压力都不小,且碳减排潜力都很大;中原和兰州-西宁城市群的碳减排达峰动力适中,这两个城市群的碳达峰压力不大,但是碳减排潜力也不小;长江中游、成渝、京津冀、长三角、北部湾和珠三角城市群的碳减排达峰动力适中,这六个城市群的碳达峰压力不小,但是碳减排潜力却不大;哈长城市群的碳减排达峰动力较小,该城市群的碳达峰压力和碳减排潜力均为所有城市群最低。

2. 政策建议

基于上述研究结论,本文针对中国城市群碳达峰提出以下政策建议:

第一,制定差异化碳达峰目标。各城市群要根据经济社会发展阶段和现状特征判断未来发展情境,并进一步参照 STIRPAT 模型预测的碳达峰时间和达峰排放量,因地制宜设定碳达峰目标。哈长城市群经济社会发展趋缓,可最快实现碳达峰,要在 2024 年前实现碳达峰,达峰排放量控制在 3.42 亿吨左右。长三角、京津冀和珠三角城市群经济社会发展水平较高,技术水平先进,已从经济快速增长迈向高质量发展阶段,率先实现碳达峰难度较小,要在 2025—2029 年间率先实现碳达峰,为较晚实现碳达峰地区提供宝贵的发展空间,碳达峰排放量分别控制在 21.09 亿吨、15.7 亿吨和 6.66 亿吨左右。长江中游、成渝、中原、北部湾、关中平原和兰州-西宁城市群尚处于经济高速增长阶段,且承接了发达城市群转移的碳排放密集产业,仍有较大的碳排放需求,要率先实现碳达峰难度较大,要力争在 2030 年左右实现,碳达峰排放量分别控制在 11.91 亿吨、8.65 亿吨、8.34 亿吨、3.08 亿吨、

7.28亿吨和1.95亿吨左右。呼包鄂榆城市群是能源输出型城市群,提供了全国其他地区的能源和电力消费。为了满足全国其余地区的能源需求,该城市群能源消耗将维持增长态势,中长期内几乎无法实现碳达峰。

第二,推动差异化碳达峰实现路径。综合考虑城市群的碳达峰压力、碳减排潜力、碳减排达峰动力指数,各城市群应实行差异化碳达峰路径。减排动力源城市群(呼包鄂榆和关中平原)要引入先进技术,推动“两高”行业绿色低碳改造;低碳培育型城市群(兰州-西宁和中原)要积极推进“风光储一体化”现代能源体系建设,鼓励碳汇开发与CCUS应用;高质量转型城市群(长江中游、成渝和北部湾)要加快产业低碳高质量转型,提升产业电气化水平;碳达峰示范城市群(京津冀、长三角和珠三角)要实现建筑、交通、生活等全方位减排,加强绿色低碳技术攻关,突破现有技术瓶颈,通过技术溢出效应支持其他地区尽早实现碳达峰。哈长城市群在保障人口和产业不断聚集前提下,加快实现碳达峰。

第三,明确差异化减碳降碳重点领域。第一产业不是各城市群碳减排的重点领域。关中平原、呼包鄂榆和兰州-西宁城市群碳减排的重点领域是第二产业。长江中游、哈长、成渝和北部湾城市群应大力推动第三产业碳减排。长三角、兰州-西宁、京津冀和珠三角城市群应强化生活和间接碳减排。中原城市群应将各行业的碳排放增速维持在较低水平,统筹推进第二产业、第三产业、生活和间接领域碳减排措施,综合控制各行业碳排放增速。

第四,加大低碳脱碳技术研发应用。支持城市群强化低碳技术研发,引导企业、研发机构、服务中介以及各类社会组织参与低碳技术创新,推动城市群成为低碳技术创新高地。强化对清洁煤技术的开发利用,积极推广燃煤高效发电、先进燃烧、烟气净化等技术。拓展风能、太阳能、水能、地热能等清洁能源利用深度与广度。在中原、长江中游、哈长、长三角城市群以完善生物质资源收运体系为重点,降低成本,促进生物质能发电规模开发。鼓励城市群率先推动智慧能源建设,促进城市群加快绿色智能高效的交通运输技术研究和推广,推动新能源和清洁能源的开发应用,因地制宜推广天然气汽车,广泛运用“互联网+”、北斗卫星完善智能交通体系。积极发展零碳建筑、近零碳排放园区社区,推广运用建筑光伏发电、热泵采暖、高效绝热、高效电器等技术对传统建筑进行改造。支持对可控核聚变、氢燃料、海洋能、碳汇农业、碳捕获与封存等战略性技术实行集中攻关。

第五,推动多样化低碳战略性平台建设。稳步推动全国碳排放权交易市场建设,支持专门设立城市群碳排放权交易板块,鼓励建设城市群碳排放权交易所。在京津冀、长三角、珠三角城市群探索开展碳配额招拍挂,在其他城市群采用差异化基准值法分配配额。建立城市群碳排放数据库,共享碳排放交易信息,研究编制城市群碳排放权交易指数。支持率先在京津冀、长三角、珠三角三大城市群,探索开展吸引境外投资者参与国内碳市场的境内外碳资产回购式融资模式。搭建城市群低碳发展协调平台,因地制宜推动建立城市群低碳发展组织机构,组织开展城市群碳达峰市长联席会议、部门合作协商会议等。加强城市群交流平台建设,鼓励城市群内各城市轮流举办碳达峰博览会、展会,广泛开展低碳发展论坛、研讨会、磋商对话,不断完善国内外低碳发展合作交流机制。积极构建城市群低碳发展融资平台,鼓励政策性银行与商业银行联动创新低碳发展融资系统,强化碳税、碳债券、碳基金、碳保险、碳期权、碳资产证券化等工具创新。建立碳达峰信息交流和宣传平台,普及低碳知识,让城市居民、企业和社会组织在低碳节能减排中发挥主动作用。

第六,完善推进碳达峰监督考评机制。健全城市群碳排放相关统计标准,完善评价和碳标识制度,在国家统一指标下突出城市群的引领性适度提高标准并结合不同城市群特征细化内部方案。积极推动城市群能源、工业、交通、建筑等重点行业部门制定实施碳达峰行动方案,实施重点领域碳排放强度分类管理。在设立相关指标和标准时,强化降污减碳协同推进。鼓励各城市群公布碳达峰期限和达峰峰值目标,并制定路线图和施工图。健全城市群碳排放动态监测体系,鼓励独立有资质第三方机构对城市群碳排放数据进行核查。实施城市群碳排放公报制度,按照相关标准编制年

度碳排放清单。完善城市群碳排放考核制度,将碳排放情况纳入各城市年度工作目标责任考核体系。建立城市群碳排放考评预警和奖惩制度,实行碳排放红黄绿灯分档预警机制,根据各城市碳排放完成情况实施严格规范的奖励或处罚。加强城市群碳达峰国际交流合作,率先推进碳减排标准、统计、监测等领域与国际接轨。

参考文献

- [1] Lin, B., and N. I. Benjamin. Determinants of Industrial Carbon Dioxide Emissions Growth in Shanghai: A Quantile Analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, (217): 776 – 786.
- [2] Liu, K., and B. Lin. Research on Influencing Factors of Environmental Pollution in China: A Spatial Econometric Analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, (206): 356 – 364.
- [3] BP. BP Statistical Review of World Energy 2020[M]. London: Whitehouse Associates, 2020.
- [4] Yang, M., Q. An, T. Ding, P. Yin, and L. Liang. Carbon Emission Allocation in China Based on Gradually Efficiency Improvement and Emission Reduction Planning Principle[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, (278): 123 – 139.
- [5] 田云, 陈池波. 中国碳减排成效评估、后进地区识别与路径优化[J]. *北京: 经济管理*, 2019, (6): 22 – 37.
- [6] Li, Y., Y. Wei, X. Zhang, and Y. Tao. Regional and Provincial CO₂ Emission Reduction Task Decomposition of China's 2030 Carbon Emission Peak Based on the Efficiency, Equity and Synthesizing Principles[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2020, (53): 237 – 256.
- [7] 武红. 中国省域碳减排: 时空格局、演变机理及政策建议——基于空间计量经济学的理论与方法[J]. *北京: 管理世界*, 2015, (11): 3 – 10.
- [8] 解振华. 国务院关于应对气候变化工作情况的报告——2009年8月24日在第十一届全国人民代表大会常务委员会第十次会议上[J]. *北京: 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报*, 2009, (6): 585 – 590.
- [9] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国应对气候变化的政策与行动(2011)[N]. *北京: 人民日报*, 2011 – 11 – 23(015).
- [10] 李俊峰, 柴麒敏, 马翠梅, 王际杰, 周泽宇, 王田. 中国应对气候变化政策和市场展望[J]. *北京: 中国能源*, 2016, (1): 5 – 11, 21.
- [11] 张华. 低碳城市试点政策能够降低碳排放吗? ——来自准自然实验的证据[J]. *北京: 经济管理*, 2020, (6): 25 – 41.
- [12] He, Y., Y. Lin, G. Zhou, Y. Zhu, and K. Tang. Spatial Pattern and Drivers of Urbanization in China's Mid-level Developing Urban Agglomeration: A Case Study of Chang-Zhu-Tan[J]. *Regional Sustainability*, 2021, 2, (1): 83 – 97.
- [13] 马燕坤. 城市群功能空间分工形成的演化模型与实证分析[J]. *北京: 经济管理*, 2016, (12): 31 – 46.
- [14] 姚士谋, 陈振光, 朱英明. 中国城市群(第三版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [15] 乔彬, 李国平. 城市群形成的产业机理[J]. *北京: 经济管理*, 2006, (22): 78 – 83.
- [16] Fang, C., and D. Yu. Urban Agglomeration: An Evolving Concept of An Emerging Phenomenon[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, (162): 126 – 136.
- [17] 方创琳. 改革开放40年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J]. *长沙: 经济地理*, 2018, (9): 1 – 9.
- [18] 魏守华, 李婷, 汤丹宁. 双重集聚外部性与中国城市群经济发展[J]. *北京: 经济管理*, 2013, (9): 30 – 40.
- [19] 陈雯, 闫东升, 孙伟. 长江三角洲新型城镇化发展问题与态势的判断[J]. *北京: 地理研究*, 2015, (3): 397 – 406.
- [20] 王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制——基于夜间灯光数据方法[J]. *北京: 地理学报*, 2016, (12): 2155 – 2169.
- [21] 郑艳婷, 马金英, 戴荔珠, 赵赛. 武汉城市群的区域性城市化特征及其动力机制[J]. *北京: 资源科学*, 2016, (10): 1948 – 1961.
- [22] 高鹏, 何丹, 于越敏, 张凡. 长江中游城市群社团结构演化及其邻近机制——基于生产性服务企业网络分析[J]. *长春: 地理科学*, 2019, (4): 578 – 586.
- [23] 林伯强, 蒋蕊均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. *北京: 管理世界*, 2009, (4): 27 – 36.
- [24] 王娟, 张克中. 中国省域碳排放趋同与经济增长[J]. *北京: 经济管理*, 2014, (6): 34 – 43.
- [25] Wen, Y., P. Hu, J. Li, Q. Liu, L. Shi, J. Ewing, and Z. Ma. Does China's Carbon Emissions Trading Scheme Really Work? A Case Study of the Hubei Pilot[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, (277): 124 – 151.
- [26] Pan, B., and Y. Zhang. Impact of Affluence, Nuclear and Alternative Energy on US Carbon Emissions from 1960 to 2014[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, (32): 100581.
- [27] Yang, S., D. Cao, and K. Lo. Analyzing and Optimizing the Impact of Economic Restructuring on Shanghai's Carbon Emissions Using STIRPAT and NSGA-II[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, (40): 44 – 53.
- [28] Li, Z., X. Deng, and L. Peng. Uncovering Trajectories and Impact Factors of CO₂ Emissions: A Sectoral and Spatially Disaggregated

Revisit in Beijing[J]. *Technological Forecasting and Social Change*,2020,(158):120-124.

[29] Xu, X., T. Zhao, N. Liu, and J. Kang. Changes of Energy-related GHG Emissions in China: An Empirical Analysis from Sectoral Perspective[J]. *Applied Energy*,2014,(132):298-307.

[30] Ren, S., X. Fu, and X. Chen. Regional Variation of Energy-related Industrial CO₂ Emissions Mitigation in China[J]. *China Economic Review*,2012,23,(4):1134-1145.

[31] Kim, K., and Y. Kim. International Comparison of Industrial CO₂ Emission Trends and the Energy Efficiency Paradox Utilizing Production-based Decomposition[J]. *Energy Economics*,2012,34,(5):1724-1741.

[32] Chen, J., C. Xu, L. Cui, S. Huang, and M. Song. Driving Factors of CO₂ Emissions and Inequality Characteristics in China: A Combined Decomposition Approach[J]. *Energy Economics*,2019,(78):589-597.

[33] Gu, S., B. Fu, T. Thriveni, T. Fujita, and J. W. Ahn. Coupled LMDI and System Dynamics Model for Estimating Urban CO₂ Emission Mitigation Potential in Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*,2019,(240):118034.

[34] 孙耀华, 仲伟周. 中国省际碳排放强度收敛性研究——基于空间面板模型的视角[J]. *北京: 经济管理*,2014,(12):31-40.

[35] Liu, D., and B. Xiao. Can China Achieve Its Carbon Emission Peaking? A Scenario Analysis Based on STIRPAT and System Dynamics Model[J]. *Ecological Indicators*,2018,(93):647-657.

[36] Su, K., and C. M. Lee. When Will China Achieve Its Carbon Emission Peak? A Scenario Analysis Based on Optimal Control and the STIRPAT Model[J]. *Ecological Indicators*,2020,(112):106-138.

[37] Fang, K., Y. Tang, Q. Zhang, J. Song, Q. Wen, H. Sun, C. Ji, and A. Xu. Will China Peak Its Energy-related Carbon Emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese Provinces[J]. *Applied Energy*,2019,(255):113852.

[38] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放达峰预测研究[J]. *济南: 中国人口资源与环境*,2010,(12):10-15.

[39] 马丁, 陈文颖. 基于中国 TIMES 模型的碳排放达峰路径[J]. *北京: 清华大学学报(自然科学版)*,2017,57,(10):1070-1075.

[40] Wu, C. B., G. H. Huang, B. G. Xin, and J. K. Chen. Scenario Analysis of Carbon Emissions' Anti-driving Effect on Qingdao's Energy Structure Adjustment with An Optimization Model, Part I: Carbon Emissions Peak Value Prediction[J]. *Journal of Cleaner Production*,2018,(172):466-474.

[41] 黄蕊, 王铮, 丁冠群, 龚洋冉, 刘昌新. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. *北京: 地理研究*,2016,(4):781-789.

[42] 杜强, 陈乔, 杨锐. 基于 Logistic 模型的中国各省碳排放预测[J]. *武汉: 长江流域资源与环境*,2013,(2):143-151.

[43] 胡西武, 黄蕾, 李毅. 应对气候变化下的青藏高原碳脱钩水平测度及碳达峰路径选择——以青海省为例[J]. *西宁: 青海社会科学*,2021,(5):43-54.

[44] 程云鹤, 董洪光, 耿纪超, 何继善. 中部地区崛起的能源需求及碳达峰路径研究[J]. *北京: 中国工程科学*,2021,(1):68-78.

[45] 刘甜, 王润, 孙冰洁. 中国典型沿海工业城市碳排放达峰分析[J]. *济南: 中国人口·资源与环境*,2015,(S2):25-28.

[46] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. *北京: 北京工业大学学报(社会科学版)*,2021,(3):1-15.

[47] 王怡. 中国省域二氧化碳碳排放达峰情景预测及实现路径研究[J]. *北京: 科学决策*,2022,(1):95-105.

[48] 马丁, 陈文颖. 中国 2030 年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. *济南: 中国人口·资源与环境*,2016,(S1):1-4.

[49] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 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[J]. *北京: 中国工业经济*,2017,(3):44-63.

[50] 王勇, 毕莹, 王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估[J]. *济南: 中国人口·资源与环境*,2017,(10):131-140.

[51] Wang, L., Z. Zhao, X. Wang, and X. Xue. Transportation De-carbonization Pathways and Effect in China: A Systematic Analysis Using STIRPAT-SD Model[J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,(288):125574.

[52] Ehrlich, P. R., and J. P. Holdren. Impact of Population Growth[J]. *Science*,1971,171,(3977):1212-1217.

[53] Dietz, T., and E. A. Rosa. Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology[J]. *Human Ecology Review*,1994,1,(2):277-300.

[54] Pachauri, R. K., L. Meyer, and Working Groups. *Climate Change 2014: Synthesis Report*[R]. Geneva: IPCC, 2015.

[55] 赵哲, 谭建立. 中国财政支出对碳排放影响的双重效应分析[J]. *昆明: 云南财经大学学报*,2020,(5):24-36.

[56] 刘书玲, 曹庆仁, 郑卫. 政府支出与碳排放的影响因素分析——基于 STIRPAT 拓展模型的面板实证[J]. *北京: 中国煤炭*,2018,(10):28-32.

[57] 朱勤. *人口老龄化与碳排放: 劳动供给与消费模式的影响*[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.

[58] Rich, D., P. Bhatia, J. Finnegan, K. Levin, and A. Mitra. *Mitigation Goal Standard*[R]. Washington D. C.: World Resources Institute, 2014.

Study on Carbon Peak of Urban Clusters based on Analysis of Influencing Factors of Carbon Emissions

GAO Guo-li¹, WEN Yang², WANG Li², XU Rui-ning³

(1. The China Center for Urban Development, Beijing, 100038, China;

2. Institute of Spatial Planning & Regional Economy, Chinese Academy of Macroeconomic Research, Beijing, 100038, China;

3. School of Urban Economics and Public Administration, Capital University of Economics and Business, Beijing, 100070, China)

Abstract: In 2014, China proposed to achieve carbon peak around 2030 for the first time, and then strengthened the target to strive to achieve carbon peak before 2030. As the representative of the most advanced level of regional social and economic development, the urban clusters undertake the task of taking lead to carbon peak and providing demonstration experience for other regions.

Based on the STIRPAT model, this paper analyzed the impacts of population scale, social and economic development level and technological level on carbon emissions of urban clusters. Firstly, the stationarity test is conducted on the unbalanced panel data, and all variables pass the test, which indicates that the panel data can be used for the regression analysis. After the regression analysis, the Hausman test is conducted on the STIRPAT model, and the fixed effect model was selected to analyze according to the test result, the model results pass the robustness test. Then, four different scenarios were set, and the carbon emissions during 2022 to 2035 and carbon peak time of each urban cluster were predicated under four scenarios based on the regression results of STIRPAT model. Finally, the pressure, potential and driving force index were constructed to calculate the carbon peak pressure, carbon mitigation potential and driving force of emission mitigation to carbon peak of each urban cluster, respectively.

Our research finds that population scales, affluence, technological level and urbanization level can significantly affect the total carbon emissions of urban cluster. The Harbin-Changchun, the Yangtze River Delta, the Beijing-Tianjin-Hebei and the Pearl River Delta urban clusters can reach the carbon peak before 2030 under four scenarios. The middle reaches of the Yangtze River, the Chengdu-Chongqing, the Central Plains, the Beibu Bay, the Guanzhong Plains and the Lanzhou-Xining urban clusters can reach carbon peak during 2025-2028 under the low growth, slow consumption reduction and low growth, fast consumption reduction scenarios, while they cannot reach the carbon peak before 2030 under the high growth, slow consumption reduction and high growth, fast consumption reduction scenarios. The Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban cluster will fail to reach carbon peak before 2030 under the four scenarios. The research points out that it is less difficult for the Yangtze River Delta, the Beijing-Tianjin-Hebei and the Pearl River Delta urban clusters to be the first to reach carbon peak. It is necessary to strengthen the leadership of scientific and technological innovation and research, reduce emissions in all areas, including construction, transportation and living, support other regions to achieve carbon peak as soon as possible through technological spillover effect. The middle reaches of the Yangtze River, the Chengdu-Chongqing and the Beibu Bay urban clusters need to speed up the transformation of industries into low-carbon and high quality industries, and upgrade the level of industrial electrification. The Lanzhou-Xining and the Central Plains urban clusters can promote the construction of a modern energy system based on wind power, solar power and stored energy, and strengthen carbon neutral storage. The Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin and the Guanzhong Plains urban clusters can actively introduce advanced technologies to promote green and low-carbon reform of the 'two high' industries. The social and economic development of Harbin-Changchun urban cluster is slowing down gradually. Even if it does not adopt any measures, it can also achieve carbon peak fastest.

The contribution of this paper is as follow: firstly, the STIRPAT model is used to analyze the influencing factors of the total carbon emission of urban clusters. Secondly, unlike the existing studies those focus on the path and mode of carbon peak at the provincial level, this paper predicts the period of carbon peak in each region and analyzes the difficulty of different regions to achieve carbon peak first from the perspective of urban cluster, identifies the key areas of emission reduction in each urban cluster. Thirdly, unlike the existing studies, which mainly analyzed the carbon mitigation potential, this paper constructed the pressure index to achieve carbon peak and the potential index to carbon mitigation considering fairness and efficiency of urban cluster. Then, the pressure and potential index was combined to construct the driving force index of urban cluster to achieve carbon peak through carbon mitigation. A differentiated carbon peak path model was proposed.

Key Words: urban cluster; STIRPAT; carbon peak; influencing factors

JEL Classification: Q54, R11

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2023.02.003

(责任编辑: 闫 梅)