

“双碳”目标约束下的中国城市群高质量发展 SD 模型与模拟

曾 鹏,魏 旭,黄丽露

(广西民族大学民族学与社会学学院,广西南宁 530006)

摘 要:高质量碳排放已成为未来我国经济高质量发展的重要目标之一。将碳排放和碳吸收作为主控要素嵌入系统动力学(SD)模型,构建基于“双碳”目标约束的中国城市群高质量发展 SD 模型,运用 2019 年数据和系统参数,模拟预测在基准情景和高质量发展情景下,2030 年和 2060 年的城市群碳达峰、碳中和情况。结果表明:真实性检验证明模型模拟效果良好,具有可操作性;在基准情景下,“双碳”目标难以实现,碳排放系统濒临崩溃,但在高质量发展情景下,除中部城市群外,其他城市群均能在“十四五”规划提出的年限内实现“双碳”目标;城市群高质量发展过程中要想真正实现“双碳”目标,要明确低碳技术是重要手段,工业转型是关键,同时要实现能源和产业结构系统性变革,促进绿色经济能源使用。

关键词:碳中和;城市群;高质量发展;SD 模型;模拟预测

中图分类号:F426.2;X24

文献标志码:A

文章编号:1671-4970(2022)05-0052-10

一、引 言

中国在第七十五届联合国大会上提出:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,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。”^[1]如何在时间节点前实现碳达峰、碳中和两大目标,同时推动经济增长和绿色低碳发展成为我国高质量发展的重要任务。城市是我国重要的碳排放源,控制住城市的碳排放意味着控制碳排放的主体,城市碳排放量达峰和实现碳中和是中国绿色低碳发展的重要支撑^[2]。随

着我国经济的长期良好发展和工业化、城镇化水平的不断提高,经济模式和土地扩张方式在演变,资源环境的发展受到巨大影响^[3],传统发展模式诱发了大量能源消费增长,导致碳排放量增加。从实践经验来看,碳排放增长不仅集中于大城市或特大城市,更广泛存在于以城市群为核心的“两横三纵”城镇化格局中,城市群的碳达峰、碳中和是实现中国碳达峰、碳中和目标的必要条件。因此,深入分析未来城市群高质量发展过程中实现“双碳”目标的问题,对中国“在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的“双碳”目标具有重要的现实意义及深远影响。

基金项目:国家社会科学基金重大项目(20&ZD157)

作者简介:曾鹏(1981—),男,教授,博士,主要从事城镇化与区域可持续发展研究。E-mail:zengpengfast@163.com

目前,国内外学者虽然对中国碳排放的预测进行了大量的研究,灰色模型^[4]、LMDI 方法^[5]、环境库兹涅兹曲线(EKC)^[6]、回归分析法^[7]、KAYA 分解方法^[8-9]、STIRPAT 模型^[10-11]、BP 神经网络^[12]等模型被广泛使用,但以往研究通常仅讨论中国能否在 2030 年完成相应的碳减排承诺,还未对碳排放的持续、多场景预测有过深入研究,更未将城市群作为研究对象进行系统性分析。例如黄贤金等基于 IPAT 和 IBIS 模型探讨中国 2060 年实现碳中和的可行性以及不同土地利用方式承载的碳汇分布^[13];Elzen 等认为中国现行的减排政策难以实现碳减排承诺,基准情景下中国 2030 年碳排放量达 147 亿~154 亿 t,而政策情景下将减少到 131 亿~137 亿 t^[14]。总体而言,我国碳达峰与碳减排有关的领域内的成果丰富,但在多种因素作用下研究结论有所不同。导致这一现状的主要原因是只基于历史数据,难以较真实地预测出未来社会发展动向,反之,在合理、长期的发展情境下,设定开展预测研究会更加逼近未来碳排放的场景。对此,可以采用系统动力学(system dynamics,SD)的方法对未来发展动向进行预测,提升研究的科学性。该方法从系统内部微观结构入手,通过建立 SD 数学模型实现系统动态演变过程^[15],广泛应用于社会经济系统问题、政策作用分析等方面的研究^[16-17]。例如揭俐等基于系统动力学模型,通过情景模拟评估中国能源开采业碳脱钩的潜力^[18];李启庚等通过构建工业能源消费和污染物排放系统动力学模型,评估山西各项环境规制政策的节能减排效果,为资源型地区工业环境规制政策创新提供现实依据^[19]。

综上,国内外现有研究关于中国碳排放达峰或者减排相关的成果丰富,但结论不一致,没有以城市群为研究对象的研究,因此以城市群为研究对象,在详细合理、长期的发展情景下,开展预测研究会更贴合未来我国碳排放的场景。因此本文尝试基于系统动力学模型,从历史趋势分析和未来情景模拟对中国城市群碳排放进行多情景预测,将碳排放和碳吸收作为中国城市群高质量发展的主控要素与经济、人口等因子进行耦合,系统化研究中国城市群高质量发展与“双碳”目标如何协调等问题,为我国实现“双碳”目标提供决策依据具有重要的现实与理论价值。

在已有研究的基础上,本文期望做出以下边际贡献:第一,构建“双碳”目标为约束条件的中国城

市群高质量发展 SD 模型框架,以基准情景和高质量发展情景对 2030 年和 2060 年的碳减排阶段的变化展开分析,在研究方法的运用上有一定创新;第二,以中国城市群为研究对象,结合东北部、东部、中部和西部城市群的区划尺度,模拟预测各区域板块城市群碳排放和碳吸收的变化发展,在研究对象的选取上有一定创新。

二、研究方法与数据来源

1. “双碳”目标系统与中国城市群高质量发展 SD 模型关联思路

中国城市群高质量发展离不开以减排为核心的低碳发展环境支持,碳排放和碳吸收不能简单地视为中国城市群高质量发展的外生变量,应该作为高质量发展过程的主控要素。本文从碳排放、碳吸收、低碳发展环境等层面对“双碳”目标子系统进行解构,拓展出关联碳排放、碳吸收主控要素的中国城市群高质量发展 SD 模型。《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中重点选取了能源、交通运输、建筑三大行业阐述指导低碳发展方向,聚焦产业、能源、交通、建筑、居民生活等五大重点领域降碳。其中,能源消费和工业生产是碳排放的主要来源,能源强度和能源结构与碳排放呈现直接的相关关系^[20],人口集聚和消费升级使居民在生活中产生的碳稳步上升,居民生活碳排放的快速增长已成为不可忽视的问题^[21],城市化过程中带来的交通工具数量上升正对全球气候变暖产生重要影响^[22]。因此在模型中,将工业碳排放、建筑业碳排放、居民生活碳排放、交通碳排放作为碳排放的重点分析,除了考虑劳动力等生产要素转移和配置、产业发展等社会经济发展动力过程外,进一步模拟了由生产、生活和生态环境所驱动的碳排放以及碳吸收情况。“双碳”目标系统与中国城市群高质量发展 SD 模型的联系如图 1 和图 2 所示(图中箭头前端对后端构成需求或产生正负效应)。

从图 1 和图 2 可以看出:第一,中国城市群高质量发展需要低碳发展,包括减少工业、建筑业、交通业的碳排放和通过技术手段以及扩大人工造林固碳等。第二,中国城市群高质量发展过程对“双碳”目标系统构成压力,而“双碳”目标系统对此所做出的响应终将可能对中国城市群高质量发展造成一定的影响。大量的二氧化碳会在工业的生产过程中排放

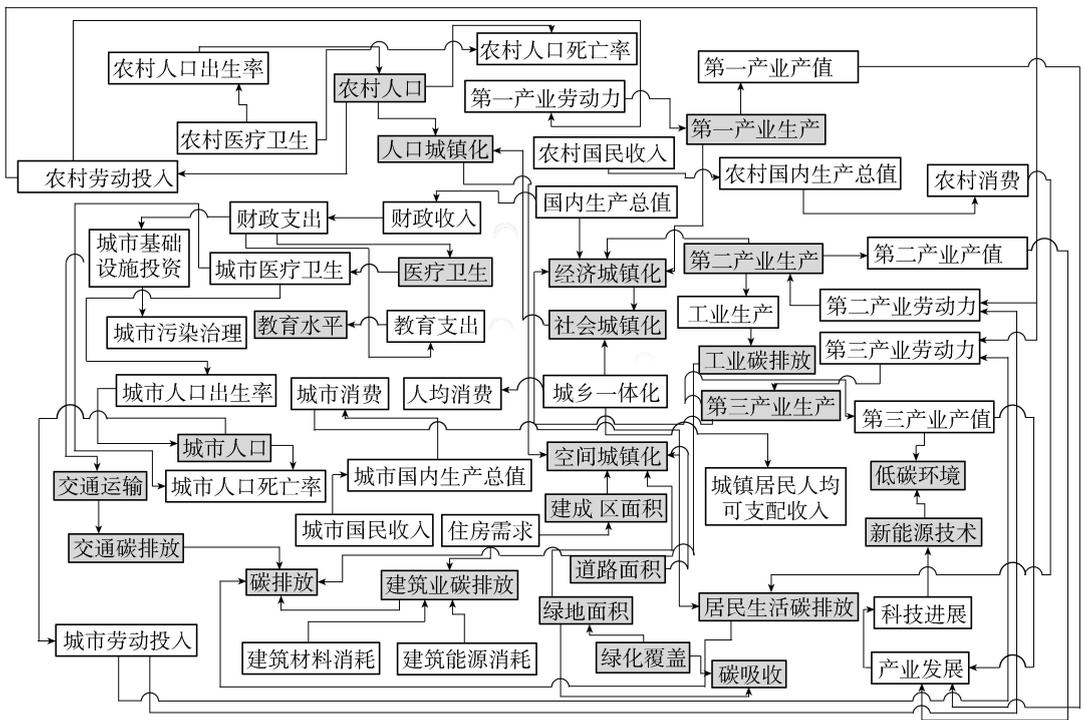


图1 基于“双碳”目标约束的中国城市高质量发展 SD 模型因果关系

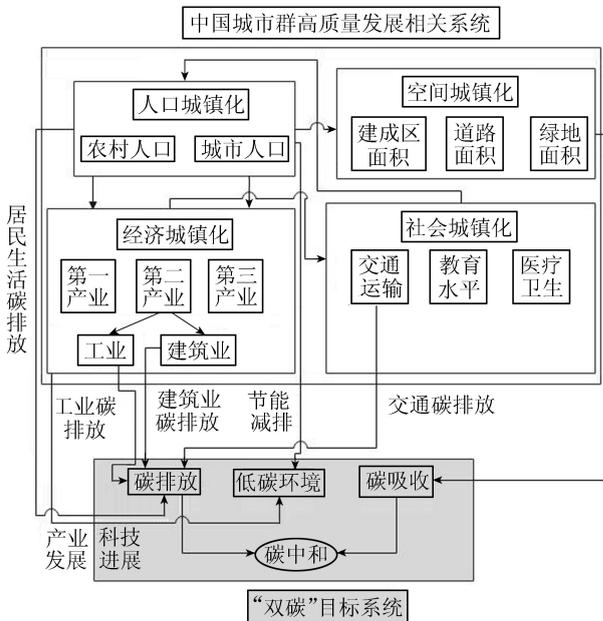


图2 “双碳”目标系统与中国城市群高质量发展 SD 模型相关子系统逻辑关系

出来,由于私家车的使用比例提高,道路交通的碳排放量在逐年升高,在建筑运行和建材生产过程也会造成大量的碳排放。第三,城市群高质量发展过程与“双碳”目标系统之间可以形成良性协调的关系。在社会经济发展、科学技术进步的作用下,碳排放减少,碳吸收能力明显增强,从而有利于加快碳达峰、

碳中和。因此,“双碳”目标子系统通过第二产业产值、城市人口和农村人口等重要变量,与中国城市群高质量发展 SD 模型的人口、经济、社会子系统发生直接联系。

2. “双碳”目标系统构建主要方法

本文所构建的基于“双碳”目标约束的中国城市群高质量发展 SD 模型在 Vensim 平台中完成。重点阐述“双碳”目标子系统的模型结构与主要方法。

碳排放模块主要模拟中国城市群的碳排放总量,碳排放达到峰值时即实现碳达峰目标,假定来源于居民生活碳排放、建筑业碳排放、工业碳排放、交通碳排放等。其中居民生活碳排放取决于居民生活能源消耗,而生活能源消耗又包括城市生活能源消耗和农村生活能源消耗,主要是受到城市人口和农村人口的增长数量以及人均可支配收入的影响。工业碳排放由工业增加值和工业能源消耗所决定。建筑业碳排放总量是由建筑能源消耗决定。交通碳排放是由机动车能源消耗总量影响,人均 GDP 的提高使得人均机动车数量提高,机动车的大量使用能源的消耗量也不断提升。

碳吸收模块主要反映绿地、林地、耕地和水域对碳的吸收能力,碳吸收的总量与碳排放的总量之间的差就是碳吸收的缺口,当缺口为零时即实现碳中和目标。碳吸收总量是由绿地面积、林地面积、耕地

面积和水域面积以及绿地碳吸收系数、林地碳吸收系数、耕地碳吸收系数和水域碳吸收系数所决定的。

低碳发展环境模块将碳排放与碳吸收相关联,在模拟碳排放和碳吸收的基础上,计算出碳排放和碳吸收的总量以及二者的缺口。通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,尽可能地减少煤炭、石油等高碳能源消耗,减少碳排放,达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态,进一步设定新能源技术的系数,以估算碳吸收量。总体上,新能源技术系数逐年升高,以反映技术进步的贡献。

3. 城市群样本选择

“十四五”发展规划指出要推动京津冀、长三角、珠三角、成渝、长江中游城市群不断优化提升,山东半岛、粤闽浙沿海、中原、关中平原、北部湾城市群需要发展壮大,哈长、辽中南、山西中部、黔中、滇中、呼包鄂榆、兰州—西宁、宁夏沿黄、天山北坡城市群进一步培育发展。按城市群的地理方位分类,分为东北部、东部、中部和西部城市群。由于城市群样本中包含部分地级市代管的县级市或省直管的县级市,数据样本可能会出现重叠,因此予以剔除,加之部分城市数据缺失严重,同样需要剔除,因此选取城市群样本区间包含的全国 229 个地级市的数据进行研究,具体如表 1 所示。

4. 数据及来源

随着中国经济的发展和人口增长,碳排放与经济发展成正比关系,中国城市群的碳排放量整体呈现增长态势,2006 年中国城市群的碳排放量 14.68 亿 t,2019 年增长至 30.81 亿 t。研究涉及大量基础数据,分为人口、经济、碳排放、能源消费及供给四个方面,包括年末人口数、城镇人口、乡村人口、国内生产总值、地方生产总值、第一产业产值、第二产业产值、第三产业产值、工业增加值、建筑业产值、交通运输产值、国内生产总值增长速度、能源生产增长速度、能源消费增长速度、耕地面积、林地面积、水域面积、绿地面积、二氧化碳排放量、能源消费总量、人均生活能源消费量、机动车拥有量、万元国内生产总值能源消费量等,本文碳排放数据来源于各地级市统计年鉴以及中国碳排放数据库汇总,研究所用其他数据整理 2007—2020 年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国环境统计公报》《中国国民经济和社会发展统计公报》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》等统计资料。

三、情景模拟与结果分析

1. 模型检验

通过系统模型的真实性的检验,表明模型是可用

表 1 中国城市群及所包含的城市

区域	城市群	城市群所包含的城市
东北部城市群	辽中南	沈阳、大连、鞍山、抚顺、本溪、丹东、锦州、营口、辽阳、盘锦、铁岭、葫芦岛
	哈长	哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、牡丹江、绥化、长春、吉林、四平、辽源、松原、延边
	京津冀	北京、天津、石家庄、秦皇岛、唐山、保定、承德、张家口、廊坊、沧州、邢台、邯郸、衡水
东部城市群	山东半岛	济南、青岛、淄博、东营、烟台、潍坊、威海、日照、枣庄、济宁、泰安、滨州、德州、聊城、临沂、菏泽
	长三角	上海、南京、无锡、杭州、盐城、南通、常州、苏州、泰州、扬州、镇江、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州、合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城
	粤闽浙沿海	福州、厦门、莆田、泉州、漳州、宁德、温州、汕头、潮州、揭阳、汕尾
中部城市群	珠三角	广州、深圳、珠海、佛山、江门、肇庆、惠州、东莞、中山、香港、澳门
	晋中	太原、晋中、阳泉、忻州、长治、吕梁
	长江中游	晋城、亳州、郑州、开封、洛阳、平顶山、鹤壁、新乡、焦作、许昌、漯河、济源、商丘、周口
西部城市群	中原	南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、吉安、宜春、抚州、上饶、武汉、黄石、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、常德、益阳、娄底、仙桃、潜江、天门
	呼包鄂榆	呼和浩特、包头、鄂尔多斯、榆林
	成渝	重庆、成都、自贡、泸州、德阳、绵阳、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州、雅安、资阳
	黔中	贵阳、遵义、安顺、毕节、黔东南、黔南
	滇中	昆明、曲靖、玉溪、楚雄、红河
西部城市群	关中平原	运城、临汾、西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌、商洛、天水、平凉、庆阳
	北部湾	湛江、茂名、阳江、南宁、北海、防城港、钦州、玉林、崇左、海口、儋州、东方、澄迈、临高、昌江
	宁夏沿黄	银川、吴忠、石嘴山、中卫
	兰州—西宁	兰州、白银、定西、临夏回族自治州、西宁、海东、海北、海南、黄南
	天山北坡	乌鲁木齐、克拉玛依、昌吉、吐鲁番、伊犁州、塔城、五家渠、石河子

且能够作为政策预测的工具,而使用历史检验方法可对系统模型进行有效性检验。历史检验方法即比较系统模拟值与真实数据的差值,测定模型得出的模拟数据与实际情况的符合程度,且将误差控制在一定合理范围之内,模型才具有真实性和有效性。因2006年“十一五”规划首次提出“将城市群作为推进城镇化的主体形态”的城市群战略,在此以2006年为基准,比较2006—2019年关键变量的模拟值与真实历史数据,检验其相对误差(表2)。由于关联“双碳”目标的中国城市群高质量发展SD模型系统复杂,设计变量较多,故系统检验所选取的关键变量主要为国内生产总值、总人口、碳排放总量等。结果表明,各主要指标模拟值与实际值的相对误差均在10%以内,

故认为误差是在一定合理范围之内的。

总体来说,关键变量的模拟值与真实值吻合程度较高,据此判断基于“双碳”目标约束下的中国城市群高质量发展SD模型(图3)具有良好地模拟效果和充分的稳定性,能够较好的反映和模拟中国城市群高质量发展过程中的碳排放和碳吸收情况。首先,碳排放总量受到建筑业、工业、交通、居民生活的碳排放以及科技进步的影响;建筑碳排放的提升主要由于建筑能源的消耗,工业碳排放随着第二产业生产以及工业增加值的影响而提升,随着人均GDP的提高,机动车的能源消费也将提升,进而导致交通碳排放的上升;城市人均可支配收入以及农村人均纯收入的增加,居民消费水平相应提高,将增加碳密

表2 中国城市群2006—2019年关键变量模拟值、真实值及误差率

年份	国内生产总值			总人口			碳排放总量		
	模拟值/亿元	真实值/亿元	误差率/%	模拟值/万人	真实值/万人	误差率/%	模拟值/亿t	真实值/亿t	误差率/%
2006	198760	198760	0	90441	90441	0	14.68	14.79	0.73
2007	236974	231158	-2.45	91430	90559	-0.95	16.85	15.67	-6.99
2008	282328	275771	-2.32	92367	90811	-1.68	16.98	16.02	-5.66
2009	314624	321274	2.11	93035	90870	-2.33	17.45	18.46	5.77
2010	374219	375248	0.27	94142	93436	-0.75	18.53	18.71	0.96
2011	440936	441291	0.08	94553	93613	-0.99	18.48	19.36	4.76
2012	496760	513663	3.40	95520	93925	-1.67	19.61	20.41	4.08
2013	544571	565029	3.76	95739	94559	-1.23	21.21	21.55	1.62
2014	586400	598931	2.14	96644	95354	-1.34	21.84	22.12	1.28
2015	620519	636065	2.51	96746	96261	-0.50	21.46	23.16	7.94
2016	664682	679317	2.2	97544	97026	-0.53	22.10	23.98	8.48
2017	655893	703473	7.25	97567	97887	0.33	23.21	25.09	8.08
2018	777433	769052	-1.08	98537	98879	0.35	27.01	27.62	2.26
2019	821704	815195	-0.79	99300	99484	0.19	30.81	29.54	-4.14

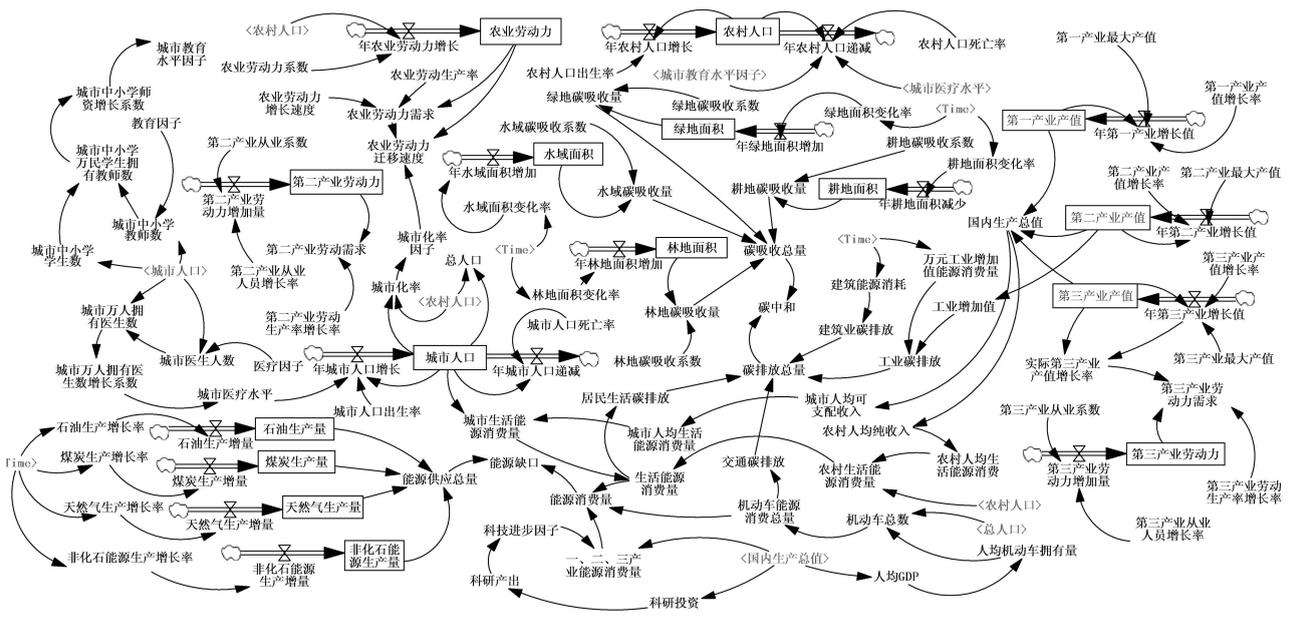


图3 基于“双碳”目标约束的中国城市群高质量发展SD模型

集型产品消耗量,能源的消费将会加重居民生活的碳排放,此外,随着科研经费投资增加,科研产出大幅增加,引导绿色能源消费不断减少能源消费量。其次,碳吸收总量受到耕地、绿地、水域以及林地的碳吸收影响;耕地、绿地、水域以及林地是固碳的重要单元,耕地、绿地、水域、林地面积的增加或减少对于碳吸收量有着重要的影响。最后,是国内生产总值以及人口规模对于碳排放的影响,人口规模集聚带来大规模生活与生产活动聚集,促进能源消费和碳排放;经济活动集聚、大规模基础设施建设、能源消费增长等都将提高碳排放。

2. 情景方案参数设定

基准情景是依据城市群的碳排放现状、未来的能源需求以及政府制定的环境政策等,基于当下的社会、经济和能源利用的现状与历史发展规律所构建的中国城市群“双碳”目标模型;在基准情景的基础上考虑到2030年实现碳达峰和2060年实现碳中和的相关政策规划以及能源结构优化对碳排放的影响作用,设定高质量发展情景,分别分析中国城市群在发展中不同情景下碳排放、碳吸收的状况,如表3所示。

在两种情景中,基准情景的人口自然增长率初始设置为4.5%,按照“十二五”期间到“十三五”期间的自然增长率演变趋势,设定每5年降低0.5%;高质量发展情景依据《国家人口发展规划(2016—2030年)》强调到2030年,人口自身均衡发展的态势基本形成,人口与经济社会、资源环境的协调程度进一步提高,全国总人口达到14.5亿人左右,要以促进人口均衡发展为主线,鼓励按政策生育,创造有利于发展的人口总量势能、结构红利和素质资本叠加优势,促进人口与经济社会、资源环境协调可持续发展。此外,《关于优化生育政策促进人口长期均

衡发展的决定》指出,为进一步优化生育政策,实施一对夫妻可以生育三个子女政策及配套支持措施,这两种情景均控制人口总量。基准情景中的GDP增长率的设定是按照历史变化规律每5年下降0.5%,高质量发展情景中的经济不再一味追求高速增长,而中国承诺到2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和,“双碳”目标的承诺会对经济有一定的影响,因此在GDP增长率的设定上,GDP增长率低于基准情景。基准情景中设定工业仍然处于主导地位,不同产业结构对碳排放产生不同影响,工业化是化石能源的主要消费源,工业占比越大,碳排放越高;而中国进入高质量发展阶段,从工业化进程看,这属于工业化后期向后工业化转变的阶段,根据工业化国家的经验^[23],在工业化后期第一产业占比保持在5%左右,第二产业占比约40%,第三产业占比约55%,中国预计2030年将进入工业化后期,第三产业将会成为主导产业。在基准情景中不考虑能源消费结构的优化,煤炭仍然是总量的主体,总体及各部门能耗结构均根据历史规律,通过GM(1,1)模型进行预测;高质量发展情景中依据《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》提出2021—2030年,可再生能源、天然气和核能利用持续增长,高碳化石能源利用大幅减少,能源消费总量控制在60亿t标准煤以内,非化石能源占能源消费总量比重达到20%左右,天然气占比达到15%左右,新增能源需求主要依靠清洁能源满足,2050年能源消费总量基本稳定,非化石能源占比超过一半,建成能源文明消费型社会。

3. “双碳”目标约束下中国城市群高质量发展模拟

2030年是中国承诺碳达峰的时间,碳排放量不再增长,达到峰值后碳排放量逐渐下降,2060年针

表3 中国城市群“双碳”目标情景及参数设置

项目	基准情景	高质量发展情景
人口总量	在“十二五”期间中国人口的自然增长率是0.5%，“十三五”期间的自然增长率是0.45%，根据这种演变趋势，设定以后每5年降低0.05%，总人口和各部门人口均按此设定	根据《国家人口发展规划(2016—2030年)》以及政府颁布的3孩政策,2025年出生人口性别比趋于正常,2030年达到14.5亿人左右,各部门人口根据总人口增长速率测算
经济增长	“十二五”期间GDP增长率为7%，“十三五”期间GDP增长率为6.5%，设定之后每5年降低0.5%	中国经济发展进入高质量发展阶段，考虑到“双碳”目标的承诺和碳减排的约束,GDP增长率低于基准情景,在此设定“十三五”期间GDP增长率为6%，之后每5年降低0.5%
产业结构	根据当前的产业结构发展趋势,按照2006—2019年三大传统产业数据进行计算,工业仍然处于主导地位	根据工业化国家的经验,在工业化后期第一产业占比保持在5%左右,第二产业占比约40%,第三产业占比约55%,中国预计2030年将进入工业化后期,第三产业将会成为主导产业
能源结构	在不优化能源消费结构的情况下,煤炭仍是能源消费总量的主体,根据历史发展趋势预测能源消耗结构	根据《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》,2030年煤炭消费48%,天然气15%,非化石能源20%;2050年能源消费总量稳定,非化石能源占比超过一半

对碳排放要采取一系列碳吸收方式实现碳中和,故本文将重点考察上述两个时间点为代表的碳排放量和碳吸收量。根据情景分析的基本原理,本文以2019年为基期,分别对2025—2060年中国城市群碳排放、碳吸收的基准情景和高质量发展情景进行模拟预测。

(1) 基于基准情景的“双碳”目标系统模拟

基准情景中,2025—2060年“双碳”目标系统中,中国城市群人口在2030年左右达到人口高峰,2030—2060年城市群人口开始处于下降趋势;经济要素整体上处于上升的趋势。

由表4模拟结果可知,在基准情景中,城市群的人口和经济的快速增长与科学技术进步、产业结构调整升级、能源结构优化的减排作用相互抵消,中国城市群的碳排放量持续增长,2030年达到64.46亿t,2060年达到了117.71亿t,碳吸收的缺口也随之越来越大,2025—2060年的碳吸收缺口由19.07亿t增加到83.31亿t,在基准情景下即没有实现碳达峰目标,也没有实现碳中和。

表4 中国城市群“双碳”目标基准情景模拟结果

单位:亿t

年份	碳排放量	碳吸收量	碳吸收缺口
2025	47.86	23.79	-24.07
2030	64.46	25.3	-39.17
2035	70.58	26.19	-44.39
2040	81.29	27.13	-54.16
2045	89.82	28.46	-61.36
2050	97.69	29.54	-68.15
2055	108.23	30.5	-77.74
2060	117.71	31.39	-86.31

结合东北部、东部、中部和西部城市群的区划尺度,分析在基准情景中不同区域的碳排放情况(表5)。东北部城市群2030年碳排放量达到13.23亿t,2060年碳排放量达到26.70亿t;东部城市群2030年碳排放量达到29.37亿t,2060年碳排放量达到

表5 中国分区域城市群“双碳”目标基准情景模拟结果

单位:亿t

区域	年份	居民生活碳排放	工业碳排放	建筑业碳排放	交通碳排放	碳排放量	碳吸收量	碳吸收缺口
东北部城市群	2030	0.36	10.74	1.91	0.22	13.23	4.54	-8.70
	2060	0.48	22.38	3.45	0.39	26.70	5.19	-21.51
东部城市群	2030	2.03	17.32	8.52	1.49	29.37	10.40	-18.97
	2060	2.59	28.55	15.42	2.59	59.15	11.95	-47.20
中部城市群	2030	1.05	6.31	2.42	0.62	10.40	4.81	-5.59
	2060	1.34	13.15	4.38	1.07	19.94	6.56	-13.38
西部城市群	2030	1.21	6.89	2.65	0.71	11.46	5.55	-5.91
	2060	1.54	14.36	4.79	1.23	21.92	7.70	-14.22

59.15亿t;中部城市群2030年碳排放量达到10.40亿t,2060年碳排放量达到19.94亿t;西部城市群2030年碳排放量达到11.46亿t,2060年碳排放量达到21.92亿t;东部城市群碳排放量增加最多。在基准情景中,造成城市群碳排放量逐年增长的关键是工业碳排放。在2030年工业的碳排放量达到了41.25亿t,占同期中国城市群碳排放总量的64.03%;2060年工业碳排放量达到了88.44亿t,占同期中国城市群碳排放总量的69.25%;建筑业碳排放、居民生活碳排放、交通碳排放等碳排放总量相对较小。

如图4所示,在基准情景中,各区域城市群的碳排放量呈现上升趋势且存在显著差异,东部城市群的碳排放量最大,其次是东北部城市群。按照基准情景中的经济发展模式,能源将会不断消耗,产生大量的碳排放,加剧环境污染程度。从与其他区域城市群的对比来看,城镇化进程产生的环境压力,东部城市群远高于其他区域城市群;西部城市群前期的碳吸收缺口较小,但在承接东部城市群的转移产业之后,产业发展造成的碳排放量增大,碳吸收缺口也在增大;中部城市群的经济发展和人口规模的扩大使得碳排放量不断提升,碳吸收缺口也在不断扩大。

(2) 基于高质量发展情景的“双碳”目标系统模拟

高质量发展情景中,2025—2060年“双碳”目标系统中,中国城市群人口在2030—2060年总规模仍呈现平稳上升趋势;经济要素整体上处于上升的趋势。

由表6模拟结果可知,高质量发展情景下,城市群碳排放量及其增长趋势在2020—2030年明显减缓,2030年碳排放量达到了50.90亿t;2030—2060年碳排放量明显减少,2060年碳排放量降至37.82亿t;在高质量发展情景下实现了碳达峰、碳中和目标。

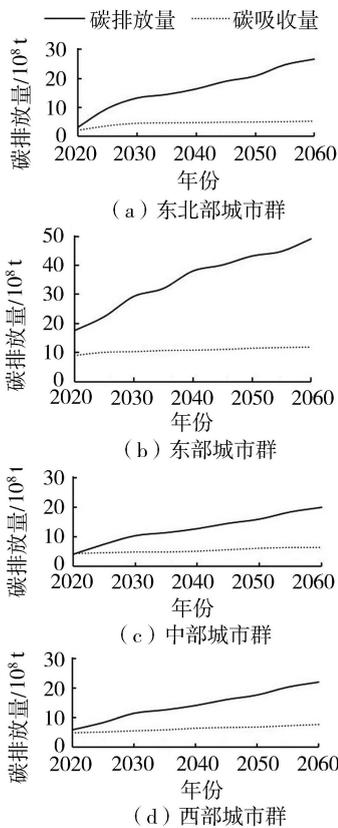


图4 各区域城市群碳排放量基准情景预测

表6 中国城市群“双碳”目标高质量发展情景模拟结果

单位:亿 t

年份	碳排放量	碳吸收量	碳吸收缺口
2025	45.51	26.39	-19.12
2030	50.90	29.71	-21.19
2035	47.62	32.90	-14.72
2040	46.22	35.40	-10.82
2045	43.24	37.25	-5.99
2050	41.18	37.99	-3.19
2055	37.82	38.87	1.04
2060	34.77	39.83	5.06

这表明,在实施低碳发展政策的情景下城市群整体上有潜力完成“双碳”目标,但仍然需要进一步加强

表7 中国分区域城市群“双碳”目标高质量发展情景模拟结果

单位:亿 t

区域	年份	居民生活碳排放	工业碳排放	建筑业碳排放	交通碳排放	碳排放量	碳吸收量	碳吸收缺口
东北部城市群	2030	0.38	6.94	1.08	0.22	8.62	5.04	-3.59
	2060	0.15	5.11	1.01	0.09	6.37	7.19	0.82
东部城市群	2030	2.03	15.17	3.54	1.19	21.94	11.93	-10.01
	2060	0.59	11.05	2.24	0.36	14.24	15.49	1.25
中部城市群	2030	0.98	6.50	1.66	0.39	9.53	6.21	-3.31
	2060	0.42	5.88	1.17	0.25	7.73	7.56	-0.16
西部城市群	2030	0.50	7.89	2.13	0.29	10.81	6.54	-4.27
	2060	0.21	5.03	1.07	0.13	6.44	9.60	3.16

低碳政策实施。

在高质量发展情景中,工业碳排放仍然占据主导地位,如表7所示。但随着中国城市群经济高质量,经济增长速度变缓,产业结构不断调整以及能源结构优化,大大降低了工业碳排放量,这说明污染严重的工业行业不断减少,有利于实现全国碳减排目标;建筑业碳排放、交通碳排放和居民生活碳排放总量随着科技发展以及环保政策的实施得到了有效的控制。东北部城市群2030年碳排放量达到8.62亿t,2060年碳排放量降至6.37亿t;东部城市群2030年碳排放量达到21.94亿t,2060年碳排放量降至14.24亿t;中部城市群2030年碳排放量达到9.53亿t,2060年碳排放量降至7.73亿t;西部城市群2030年碳排放量达到10.81亿t,2060年碳排放量降至6.44亿t。从数值来看,东部城市群的碳排放量减少最多,碳吸收量增加最多。

如图5所示,在高质量发展情景中,各区域城市群均在2030年实现碳达峰,其中东部城市群在2025年前后实现碳达峰目标,2060年前后实现碳中和目标。2020—2030年各区域城市群碳排放总量及其增长趋势明显减缓,2030—2060年各区域城市群碳排放量呈现下降趋势;东北部城市群、西部城市群均在2060年前后实现碳中和目标;西部城市群在产业发展过程中注重环境保护并积极实施低碳政策将在2045年左右实现碳中和;中部城市群在2060年距离实现碳排放和碳吸收均衡还存在一定的距离,中部城市群还需不断加强科学技术,有助于环境改善。

四、研究发现与讨论

基于系统动力学模型,对中国城市群的碳排放、碳吸收进行建模与仿真,并且通过Vensim软件动态模拟了碳排放、碳吸收的发展趋势,模拟效果良好,具有可操作性,这也佐证了碳中和在中国城市群高

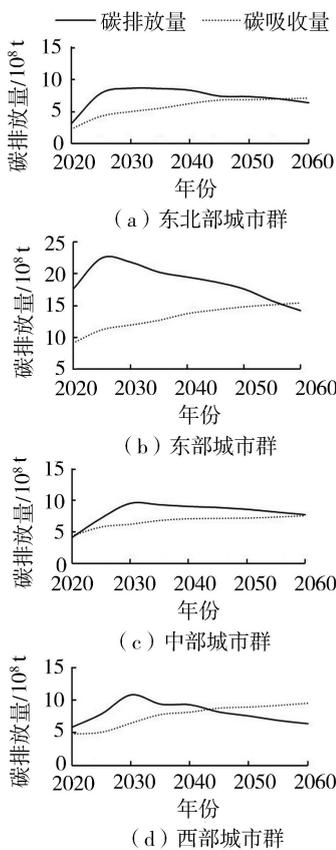


图5 各区域城市群碳排放量政策情景预测

质量发展过程中具有重要的作用,通过碳排放模型的仿真与分析,研究得到以下发现:

a. 在不考虑政策影响的基准情景下,城市群“双碳”目标难以实现,碳排放系统濒临崩溃。经济增长与经济结构是影响碳排放的主要因素。经济发展处于上升阶段,经济高速发展、收入水平普遍提升^[24],尽管产业结构调整一定程度上制约了经济的高速增长,但经济发展依赖于传统工业,直接导致了碳排放量相对较高^[25]。基准情景中城市群经济增长保持中高速增长趋势,碳排放总量不断增加;长期以来,东部城市群是我国能源消费的主要区域,东北部城市群经济增长建立在能源高消耗与环境重污染的基础上,而中西部城市群目前仍处于发展经济的阶段,可能会为了追求经济效益而忽视了环境效益,造成工业、生活碳排放等不符合标准。

b. 在考虑人口、经济、能源和技术等方面的城市群高质量发展政策情景下,城市群碳达峰目标可以如期实现,除中部城市群外,城市群碳中和目标可以如期实现。政策情景下经济增长相对缓慢,通过产业结构调整、能效提升、能源结构优化、碳捕集等

低碳路径,发展绿色经济、碳排放总量减少;东部城市群在发展中创新能源体制机制建设,推动能源消耗控制方式从能源效率指标向能源与经济指标结合发展;东北部城市群在城市化发展进程中探索新型科技创新体制,来辅助产业结构升级,发展重点城市和特色产业,改善不合理的产业规划与基础设施,重点改造老工业区,加强新兴产业对东北经济的推动作用;西部城市群是我国重要的碳汇集中区域,在碳中和进程中增加碳汇、提升固碳能力、清洁能源开发潜力巨大,可成为我国重要的清洁能源基地集群;而中部城市群,经济发展和技术进步影响碳排放的方式十分复杂,中部城市群的碳排放与经济增长之间的脱钩关系尚未形成,中部城市群的碳中和任务艰巨。

c. 在碳达峰、碳中和进程中,工业转型是关键,需要实现能源和产业结构系统性变革。我国经济的快速增长离不开工业的长期发展,工业是碳排放最主要的行业,推动工业实现碳排放达峰对于中国城市群整体实现碳达峰具有关键意义^[26]。工业碳排放占据碳排放总量中的主导地位,工业低碳发展对于减少城市群碳排放具有重要作用,将产业结构升级到高效率、低能耗、低污染的状态是非常有必要的^[27]。此外,通过市场机制可以不断促进新能源开发使用风能、太阳能等绿色经济能源,保证中国城市群碳达峰、碳中和目标的真正实现。

五、政策含义及政策建议

1. 政策含义

a. 为探究各区域城市群实现碳达峰、碳中和目标的研究提供了新角度。

b. 探究基准情景和政策情景下城市群碳排放发展的差异性,为进一步实现碳减排目标提供了理论依据与参考。

c. 模拟各区域城市群 2030—2060 年的碳排放以及碳吸收情况,为政府根据城市群碳排放进行碳减排政策的制定和实施提供借鉴。

2. 政策建议

a. 东部、东北部城市群发挥人口规模集聚、环保投资治理、产业优化转型、土地集约利用等效应,持续促进碳排放的下降,继续淘汰落后产能,优化产业和能源消费结构,提高碳排放绩效,发挥市场机制调控碳排放交易权,加强低碳技术研发。

b. 中部城市群的碳中和进程需要重点关注,中

部城市群的资本积累对碳排放的影响、赶超式的技术进步对碳排放的影响都需要纳入监控,使中部城市群顺利实现碳中和目标可能是我国区域协调碳中和的主要努力方向。

c. 西部城市群坚持经济效益、生态效益、社会效益的协调发展,在新能源技术研发、减碳固碳、新能源产业集群培育等领域加强合作,建立健全对森林、湿地、草原等生态系统保护和恢复的生态环保机制。

参考文献:

[1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-20) [2021-04-27]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.

[2] 禹湘,陈楠,李曼琪. 中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(7):1-9.

[3] 曾鹏,刘一丝,魏旭. 中国城市群循环经济与对外贸易耦合协调发展的时空演变研究[J]. 统计与信息论坛,2022,37(2):23-40.

[4] WANG Z X, YE D J. Forecasting Chinese carbon emissions from fossil energy consumption using nonlinear grey multivariable models [J]. Journal of Cleaner Production,2017,142: 600-612.

[5] 田华征,马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J]. 自然资源学报,2020,35(3):639-653.

[6] YAO S,ZHANG S,ZHANG X. Renewable energy, carbon emission and economic growth: a revised environmental Kuznets Curve perspective [J]. Journal of Cleaner Production,2019,235: 1338-1352.

[7] 王康,李志学,周嘉. 环境规制对碳排放时空格局演变的作用路径研究——基于东北三省地级市实证分析[J]. 自然资源学报,2020,35(2):343-357.

[8] MA X,WANG C,DONG B, et al. Carbon emissions from energy consumption in China: its measurement and driving factors[J]. Science of the total environment,2019,648: 1411-1420.

[9] 杨秀,付琳,丁丁. 区域碳排放峰值测算若干问题思考:以北京市为例[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(10):39-44.

[10] GHAZALI A, ALI G. Investigation of key contributors of CO₂ emissions in extended STIRPAT model for newly industrialized countries: a dynamic common correlated estimator (DCCE) approach [J]. Energy Reports,2019,5:242-252.

[11] 苏凯,陈毅辉,范水生,等. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例[J]. 中国环境科学,2019,39(2):859-867.

[12] ACHEAMPONG A O, BOATENG E B. Modelling carbon emission intensity: application of artificial neural network [J]. Journal of Cleaner Production,2019,225: 833-856.

[13] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. 自然资源学报,2021,36(12):2995-3006.

[14] ELZEN M D, FEKETE H, HOHNE N, et al. Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: can emission peak before 2030 [J]. Energy Policy,2016,89:224-236.

[15] 曹祺文,顾朝林,管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J]. 自然资源学报,2021,36(4):1062-1084.

[16] 崔学刚,方创琳,刘海猛,等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展[J]. 地理学报,2019,74(6):1079-1096.

[17] GU S, FU B, THRIVENI T, et al. Coupled LMDI and system dynamics model for estimating urban CO₂ emission mitigation potential in Shanghai, China [J]. Journal of Cleaner Production,2019,240: 118034.

[18] 揭俐,王忠,余瑞祥. 中国能源开采业碳排放脱钩效应情景模拟[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(7):47-56.

[19] 李启庚,冯艳婷,余明阳. 环境规制对工业节能减排的影响研究——基于系统动力学仿真[J]. 华东经济管理,2020,34(5):64-72.

[20] 林伯强,蒋竺均. 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]. 管理世界,2009(4):27-36.

[21] 王锋,吴丽华,杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究,2010,45(2):123-136.

[22] 林伯强,刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略[J]. 经济研究,2010,45(8):66-78.

[23] 马亚华. 美国工业化阶段的历史评估[J]. 世界地理研究,2010,19(3):81-87.

[24] 曾鹏,李洪涛. 城市行政级别、贸易开放度对区域收入的影响及其空间效应[J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版),2020,52(2):111-122.

[25] 张诗卉,李明煜,王灿,等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(9):45-54.

[26] 洪竞科,李沉潮,蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学,2021,43(4):639-651.

[27] 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.

(收稿日期:2022-03-18 编辑:张志琴)