

“双碳”目标下中国碳达峰预测和减排路径研究

叶爱山¹, 李晓华¹, 邓洋阳¹, 龚利²

(1. 南通理工学院 商学院, 江苏 南通 226002; 2. 苏州科技大学 马克思主义学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:探究“双碳”目标下中国碳达峰预测和减排路径具有重要现实意义。基于系统动力学模型和对数平均迪式指数法(LMDI)研究发现,中国碳排放量呈倒“U”形曲线,将在2035年实现碳达峰。碳排放影响因素中经济发展对中国碳排放的贡献率最大,其次是技术创新、产业结构、人口规模和能源结构。碳减排路径中,技术创新是实现碳减排承诺的关键路径,经济增长放缓将推迟中国碳排放峰值的到来。针对减排路径结果,从技术创新、经济质量、能源结构、产业结构、人口规模等方面提出针对性建议,以加速中国碳达峰进程。

关键词:碳达峰;系统动力学;对数平均迪式指数法(LMDI);减排路径

中图分类号:X323;F206 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)23-0034-10

全球气候变暖及其应对措施一直备受学界关注,降低二氧化碳排放量是减缓气候变化的有效途径。全球减排是全人类的共同责任,实现《全球温控1.5℃特别报告》中设定的温控目标需要各国共同努力。在碳减排方面,国际社会已经采取了多种行动,包括引入碳交易机制等措施来推动全球气候变化的治理。作为全球能源消费大国,中国由于碳排放总量大且占比较高,成为减排工作的重点。实现有效的碳减排对于中国和全球的长期可持续发展至关重要。“双碳”目标是指中国将力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。这不仅树立了全球绿色低碳发展的典范,也对中国应对气候变化提出了更高要求。碳达峰碳中和是应对气候变化的关键策略,欧盟作为全球气候行动的先驱,在20世纪90年代就实现了整体的碳排放峰值。此外,许多其他国家和地区也在积极探索实现碳中和的途径,并实现了碳排放峰值目标。对于尚未达到峰值的国家来说,明确碳排放峰值目标变得迫切重要。因此,开展碳达峰预测和减排路径研究具有重要的实际意义,可为中国在合理制定2030年碳达峰目标和相应措施方面提供科学依据。

1 文献回顾

现有文献主要涵盖了碳排放影响因素和碳达峰预测两个方面的研究内容。碳排放影响因素是国内外研究的热点领域之一。通过对影响因素的研究,可以揭示碳排放的内在驱动原因,进而寻求可行的减排方法和路径。在目前的研究中,学者们较多关注经济规模^[1]、产业结构^[2]、能源结构^[3]、能效水平^[4]、人口^[5]、城市化程度^[6]、人均GDP^[7]、科技进步^[8]、碳排放交易政策^[9]等影响因素。这些因素在相关研究中被广泛分析。在碳排放影响因素的研究方法和模型方面,常用的包括Kaya模型、对数平均迪式指数法(logarithmic mean Divisia index, LMDI)分解模型、扩展的环境负荷模型(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIRPAT)分解模型、向量自回归(vector autoregressive, VAR)模型以及环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)等。这些模型和方法可以帮助学者解析碳排放与影响因素之间的关系。此外,碳排放影响因素的研究也涵盖了多个领域,如工业、建筑业、交通运输业、居民消费等,这些领域都与碳排放密切相关,因

收稿日期:2023-09-03

基金项目:江苏省社科应用研究精品工程课题;中国物流学会、中国物流与采购联合会研究课题(2023CSLKT3-262, 2023CSLKT3-055);江苏省高校哲学社会科学研究项目(2023SJYB1724);江苏省大学生创新创业训练计划项目(202312056022Y);南通市科协科技创新智库课题(CXZK202111);江苏高校“青蓝工程”资助项目。

作者简介:叶爱山(1992—),男,江苏泰州人,南通理工学院商学院,讲师,硕士,研究方向为环境经济;通信作者李晓华(1995—),女,江苏淮安人,南通理工学院商学院,讲师,硕士,研究方向为物流经济;邓洋阳(1985—),男,江苏南通人,南通理工学院商学院,副教授,硕士,研究方向为产业地理;龚利(1993—),女,江苏盐城人,苏州科技大学马克思主义学院,硕士研究生,研究方向为城市问题与空间理论。

此对于各领域碳减排的探索非常必要。

碳达峰预测和峰值方面的相关研究主要集中在两个方面。首先,根据历史发展状况,利用不同的预测模型方法来预测未来的碳排放趋势,并探讨是否存在碳排放峰值。其次,假设存在碳排放峰值的前提下,预测未来不同发展情景下碳排放的变化趋势,并通过考虑影响因素的角度来模拟相应的碳减排或达峰路径。这些研究主要聚焦于处于工业化发展阶段的发展中国家,尤其是以中国为主要研究对象。在碳达峰预测方面,学界进行了大量的预测工作,关于中国是否能在 2030 年前实现碳达峰目标,尚无统一的结论。Li 等^[10]预测,在碳排放下降速度高于经济增长速度的情况下,中国才有可能在 2030 年实现碳达峰目标,但目前这仍然十分困难。余碧莹等^[11]从行业的角度出发,研究表明中国最早在 2025 年实现碳达峰,最晚在 2030 年实现碳达峰。还有一些学者通过设定不同情景,给出了不同的碳达峰时间,如基准、低碳、综合调控情景下的预测结果分别为 2038 年、2030 年、2027 年^[12],绿色模式、节能模式、基准模式下的达峰时间分别为 2025 年、2030 年和 2035 年^[13]。不同学者使用的理论、方法和假设可能存在差异。针对碳排放峰值预测,除了情景分析方法,相关研究还使用了 STIRPAT 模型、长期能源替代规划系统(long-range energy alternatives planning system, LEAP)模型、灰色预测模型 GM(1,1)、环境库兹涅茨曲线(EKC)模型、系统动力学模型等多种方法。

综上所述,在碳排放影响因素方面,学者们主要关注经济规模、产业结构、能源结构、能效水平、人口和城市化程度等因素,并应用多种模型和方法进行分析。在碳达峰预测方面,不同学者使用不同的预测模型和假设,得出了各自的预测结果。对于中国是否能在 2030 年前实现碳达峰目标,学术界尚无统一结论,尽管存在差异,但这些研究为理解碳排放变化趋势和制定碳减排策略提供了科学参考。通过梳理现有文献,已有学者利用系统动力学模型对碳排放进行研究,并取得了部分成果,为本研究提供了重要的参考价值和理论指导。然而现有的研究成果在制定碳减排路径时,参数设定大部分基于理论分析,缺乏设定参数的依据。因此,在构建碳排放系统动力学模型的基础上,采用对数平均迪式指数方法(LMDI)对碳排放的影响因素进行分析,并基于各因素对碳排放的作用和方向,确定最佳碳排放路径,以期为中国政府如期履行碳减排承诺提供参考。

2 研究模型与数据来源

2.1 碳排放计算

在构建中国碳排放的系统动力学模型前,首先需要计算中国的碳排放量。参考 IPCC(政府间气候变化专门委员会)(2006)指南中的通用模型,计算化石能源燃烧过程中产生的二氧化碳量,计算公式为

$$C_{ij} = E_{ij}F_j \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为*i*行业*j*类能源的碳排放量; E_{ij} 为*i*行业*j*类能源的能源消耗量; F_j 为*j*类能源的碳排放系数。

2.2 系统动力学模型

2.2.1 因果回路图

系统动力学的因果回路图是一种图形工具,可以清楚地描述中国碳排放系统中各变量之间的相互作用关系,并确定系统边界,进而进行系统的分析、模拟和预测。因果回路图通过箭头表示因果关系,帮助更好理解各变量的相互影响。同时,也可以用于识别反馈环路,即变量之间形成闭环的情况,帮助理解系统中可能出现的积极或消极的自我增强或自我抑制机制。当一个变量的增加导致另一个变量增加时,使用一个箭头连接两个变量,并在箭头标注“+”号,反之标注“-”号。根据碳排放影响因素的作用机制,构建中国碳排放系统动力学模型的因果回路图,如图 1 所示。

该模型的因果关系主要包括:①碳排放→(+)生活性能源消耗→(+)碳排放;②碳排放→(+)低碳发展政策→(+)能源消费结构→(-)生产性能源消耗→(+)碳排放;③碳排放→(+)低碳发展政策→(+)技术创新→(+)生产性能源消耗→(+)碳排放;④碳排放→(+)低碳发展政策→(-)GDP→(+)经济发展→(+)生产性能源消耗→(+)碳排放;⑤碳排放→(+)低碳发展政策→(-)GDP→(+)人口规模→(+)生活性能源消耗→(+)碳排放。

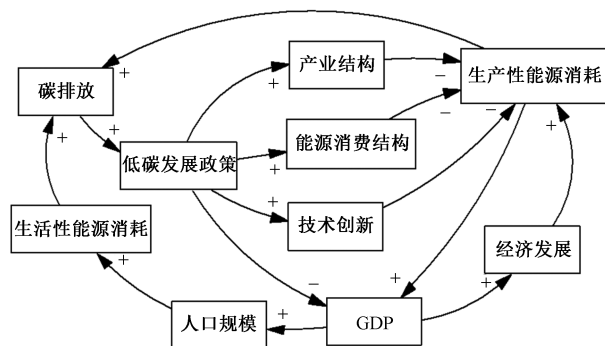


图1 碳排放系统因果回路图

人口规模→(+)生活能源能耗→(+)碳排放。

2.2.2 存量流量图

因果回路图可以直观地显示中国碳排放系统的因果关系,而存量流量图在此基础上进一步描述了变量,并以函数的方式确定了变量之间的关系,可以清晰地描述系统中的存量积累和流动过程,展示存量之间的相互作用关系和动态变化,因此可以更直观地反映中国碳排放要素之间的逻辑关系,并将中国复杂的碳排放系统转化为可测量的系统动力学模型,识别关键因素和瓶颈,并进行模拟和预测。

中国的碳排放系统是一个涉及社会、经济 and 环境的复杂系统。根据因果回路图,深入分析人口增长、经济发展、产业结构、能源结构和技术进步对碳排放的影响,使用 Vensim PLE 软件建立中国碳排放系统的存量流量图,如图2所示。采用表函数模型、线性回归模型、经验公式模型、逻辑函数等模型确定了模型参数,通过不断调整和修改中国碳排放的系统动力学模型,使模拟结果更符合中国碳排放现状。

2.3 LMDI 模型

对数平均迪式指数法(LMDI)是一种用于分解多种因素对总体变化的影响的方法,能够帮助理解多个因素对总体变化的贡献,具有广泛的应用价值。与其他模型相比,LMDI 不产生冗余项,并且允许值0存在,可以通过算术平均指数模型(AMDI)克服因子分解后的残差项问题。因此,根据中国碳

排放现状,在改进的 Kaya 模型的基础上,利用 LMDI模型分析中国碳排放的影响因素,确定各种影响因素对中国碳排放影响的大小和方向,为探索中国碳减排路径的参数设置提供参考。选取适用于中国碳排放的影响因素,进一步扩展 Kaya 模型,公式为

$$C = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{E_i}{G_i} \frac{G_i}{G} \frac{G}{P} P = \sum_{i=1} \sum_{j=1} n_{ij} m_{ij} q_i r_i g p \quad (2)$$

式中: C 为碳排放量; E 为能源消耗; G 为 GDP; P 为人口; i 为第 i 个行业; j 为第 j 类能源; n_{ij} 为碳排放系数; m_{ij} 为能源消费结构; q_i 为技术创新; r_i 为产业结构; g 为经济发展水平; p 为人口规模; n_{ij} 、 m_{ij} 、 q_i 、 r_i 、 g 、 p 为 6 个影响因素。

根据扩展的 Kaya 模型,利用 LMDI 中的加法分解模型建立碳排放因子分解方程:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_{n_{ij}} + \Delta C_{m_{ij}} + \Delta C_{q_i} + \Delta C_{r_i} + \Delta C_g + \Delta C_p \quad (3)$$

各影响因素的分解公式为

$$\Delta C_{n_{ij}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \frac{n_{ij}^t}{n_{ij}^0} \quad (4)$$

$$\Delta C_{m_{ij}} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \frac{m_{ij}^t}{m_{ij}^0} \quad (5)$$

$$\Delta C_{q_i} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{q_i^t}{q_i^0} \quad (6)$$

$$\Delta C_{r_i} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{r_i^t}{r_i^0} \quad (7)$$

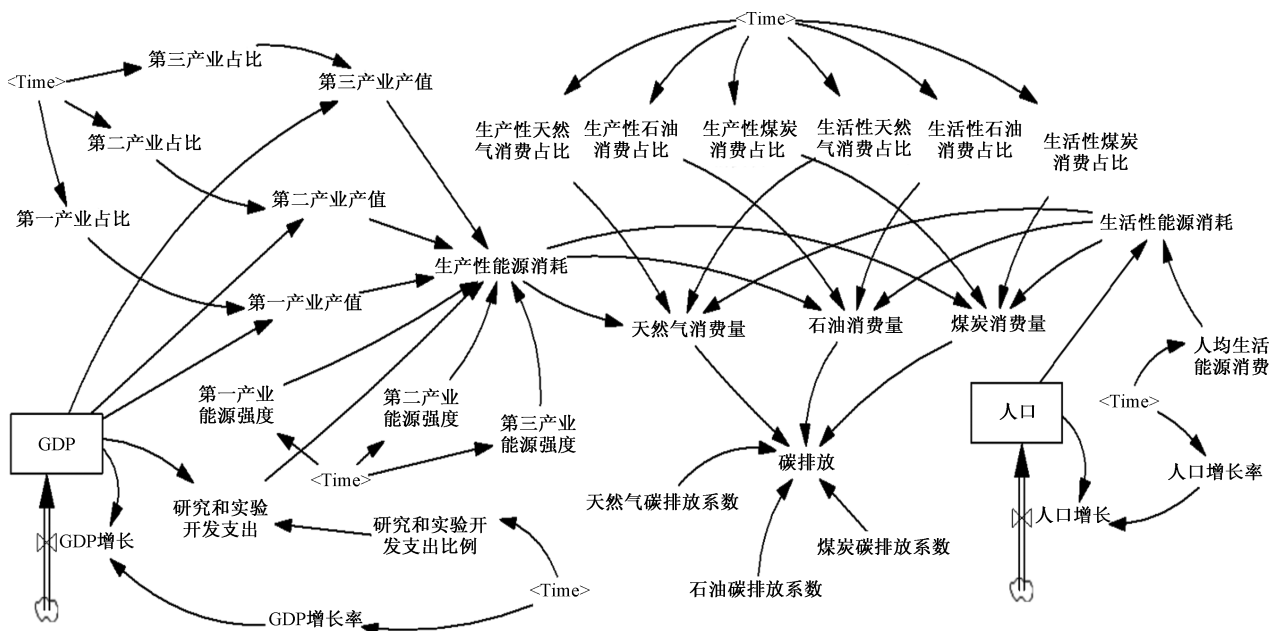


图2 碳排放系统存量流量图

$$\Delta C_g = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \frac{g^t}{g^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_p = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \frac{p^t}{p^0} \quad (9)$$

式中： C^0 和 C^t 分别为初始年和第 t 年的碳排放量； ΔC 为 t 年中碳排放量的差异； $\Delta C_{n_{ij}}$ 为碳排放系数的影响，由于能源的碳排放系数是一个常数，因此 $\Delta C_{n_{ij}}$ 始终为 0； $\Delta C_{m_{ij}}$ 为能源消费结构效应； ΔC_{q_i} 为技术创新效应； ΔC_{r_i} 为产业结构效应； ΔC_g 为经济发展效应； ΔC_p 为人口效应。排除碳排放系数为 0 的影响因素，式(3)可简化为

$$\Delta C = \Delta C_{m_{ij}} + \Delta C_{q_i} + \Delta C_{r_i} + \Delta C_g + \Delta C_p \quad (10)$$

2.4 数据来源

运用系统动力学模型和 LMDI 模型研究中国碳减排路径。从上述模型的介绍可以看出，构建中国碳排放系统动力学模型所需的数据包括中国能源消费数据、各行业产值和人口数据等。研究涉及数据来源于 2000—2020 年《中国统计年鉴》和《中国

能源统计年鉴》的直接数据或间接计算。根据数据可得性，选取原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃油和天然气 8 种主要能源消费类型进行碳排放研究，并统计我国农业、工业、建筑业、交通运输、餐饮等 6 大行业的能源消费数据。各类能源折算标准煤的系数来源于《中国能源统计年鉴》，不同能源类型的碳排放系数来源于 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南。

3 中国碳排放峰值系统动力学模型预测

3.1 系统动力学模型有效性测试

在对我国碳达峰情况进行预测前，需要首先检验已建立的系统动力学模型的预测有效性。现选择 GDP、人口、生产性能源消耗、生活性能源消耗以及碳排放作为检验变量，对中国碳排放系统动力学模型预测有效性进行检验，其模拟情况如图 3 所示。5 个指标均通过有效性检验，相对误差率均在 10% 以内，表明模型的预测结果与实际情况相符合。因此，通过对关键参数的调整和模拟不同情景，该碳

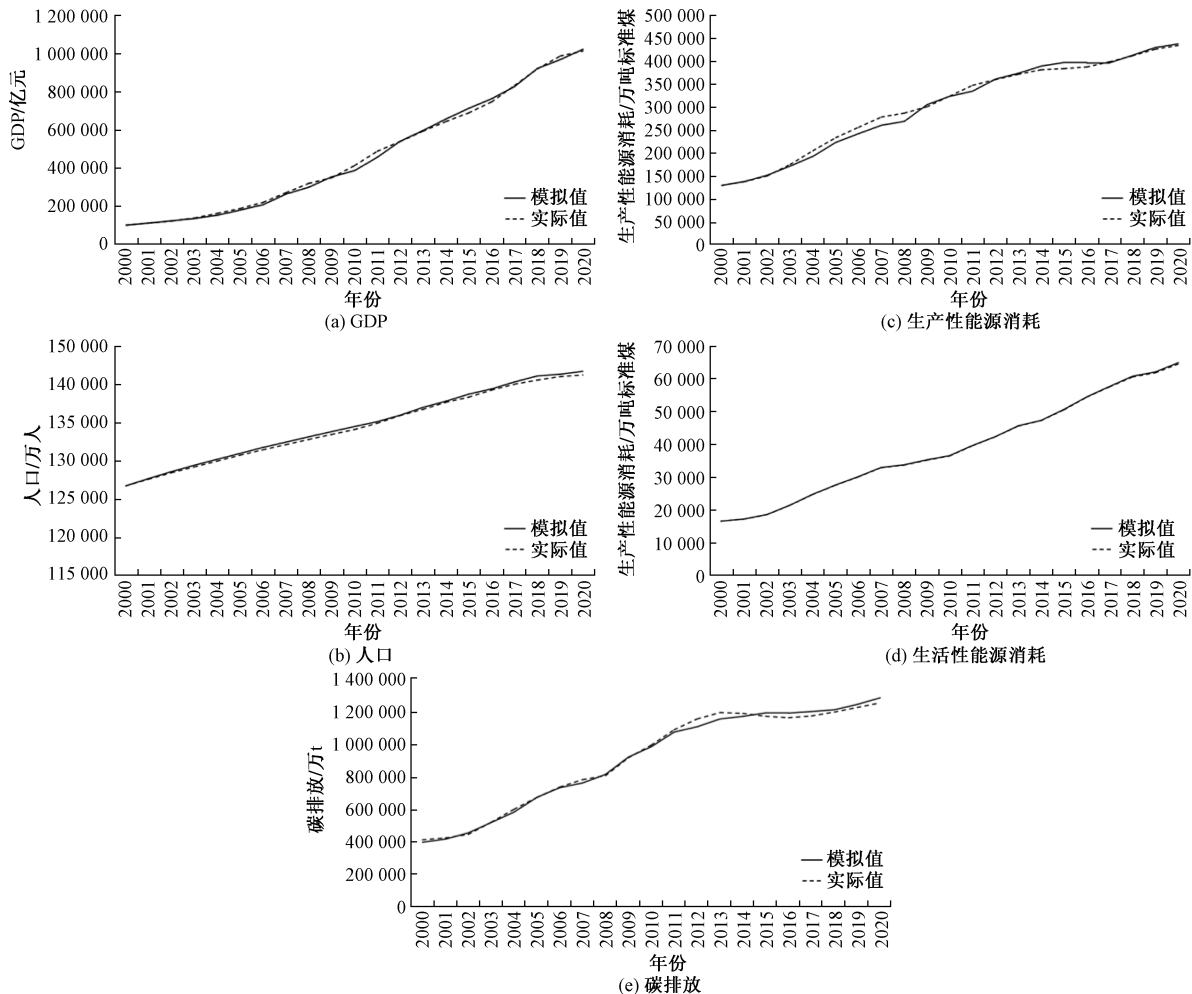


图 3 2000—2020 年 5 个指标的模拟值与实际值对比

排放系统动力学模型能够准确预测中国的碳排放峰值,这意味着可以利用该模型来评估不同政策和措施对中国碳排放的影响,并预测未来的碳排放趋势。

3.2 参数设置

以2020年为基准年,通过设置人口增长率、GDP增长率、产业结构、能源消费结构和研发支出比例等变量的参数,对中国2050年的碳排放趋势进行预测。

1)设置人口增长率。根据中国政府发布的《国家人口发展规划(2016—2030年)》,设定2020—2050年中国的人口增长率。根据规划,由于育龄妇女数量减少和人口老龄化等因素,中国人口增长将放缓。但随着“二孩政策”等鼓励生育政策的实施,出生率将略有上升。根据预测,中国人口的自然增长率将呈现倒“U”形曲线,到2030年,中国人口将达到一个均衡发展的趋势,人口、经济、社会、资源和环境之间的协调性将进一步提高。中国人口已经达到峰值,约为14.5亿人,到2031年,人口自然增长率可能会出现负增长。此外,联合国人口司(UNPD)预测,到2050年中国的人口将减少到约13亿人。为了实现中国政府设定的人口发展目标,2020—2030年,中国人口的平均增长率需要保持在约0.36%。因此,假设中国人口将在2030年达到峰值,2030年后出现负增长,到2050年将降至约13亿人。

2)设置GDP增长率。作为世界上最大的发展中国家,中国的GDP增速自2017年以来逐渐下降,2021年回弹。随着GDP增速的放缓,中国经济发展逐渐步入一个新阶段。中国政府发展研究中心对未来的经济增长进行了预测,指出从2020年到2030年,中国的GDP年增长率将保持在4%~6%,而2030年之后,GDP年增长率将逐渐降至1%~4%,并呈现逐步下降的趋势。此外,根据中国政府 and 世界知名投资银行高盛的预测,到2050年,中国的国内生产总值将达到400万亿元。基于此,将中国2020—2025年、2026—2030年、2031—2035年、2036—2040年、2041—2045年和2046—2050年的平均GDP增长率分别设定为5.5%、4.5%、4%、3.5%、3%和2.5%。

3)设置产业结构。根据中国能源研究院和联合国发展司发布的《中国工业研究报告》,预计到2050年,中国第二产业的比重将达到35%~37%。根据中国产业结构的发展历史,第三产业在2014年

首次成为中国经济的最大产业,随后第三产业的比重持续增长,2015年首次超过50%,2020年达到54.5%,第三产业已成为中国经济增长的主要动力。在“十四五”规划中,中国政府注重提高产业创新能力,加快发展现代服务业,并不断优化产业结构,因此,预计第二产业在未来将继续下降。多项研究结果显示,在国家产业结构中,第二产业比重的最佳比重为35%,第三产业的最佳比重为62%。根据中国产业结构变化数据,中国第二产业占比从2000年的45.5%下降到2020年的37.8%,年均下降0.003。根据下降率,2033年中国第二产业比重将达到理想的35%,第三产业比重将达到理想的62%。2033—2050年,预计中国的产业结构将保持不变。

4)设置能源消耗结构。根据中国石油经济技术研究院发布的《2050年世界与中国能源展望》的预测,到2050年,中国的能源消耗结构将发生重要变化。预测结果显示,中国煤炭的消费比重将降至17%,天然气将升至15%,石油将保持在20%左右,而非化石能源将占到50%左右。这一变化意味着中国将逐渐减少对煤炭的依赖,增加对石油和天然气的消耗。基于这些预测结果,假设未来中国的能源结构将发生调整。从目前的状况来看,中国的能源结构中煤炭占比65.19%、石油占比28.63%、天然气占比6.18%,根据预测结果,将其调整为煤炭占比32.69%、石油占比38.46%、天然气占比28.85%。

5)设置研发支出的比例。国家发改委提出,“十四五”期间中国研发支出将超过国内生产总值的2.4%,到2025年,中国研发总支出将达到37582亿元。此外中国科技部在新闻发布会上提到,中国计划在2035年进入科技创新型国家前列,到2050年成为世界科技强国,这表明中国的科技投资呈现出逐步增加的上升趋势。2020年韩国、瑞典、日本、奥地利、德国和美国的研发资金占GDP的比例分别为4.81%、3.53%、3.26%、3.20%、3.14%和3.45%,均超过3%。基于此,假设在未来的时间段内,中国的研发支出占国内生产总值的比例将稳定增加,从2020年的2.4%增加到2050年的4%。

3.3 碳排放峰值预测结果

中国碳排放预测结果如图4所示。根据预测结果,中国的碳排放量在2020—2050年呈现出倒“U”形发展曲线,先增长后下降。碳排放量将从2020年的1263188万t增加到2035年的1842720万t,

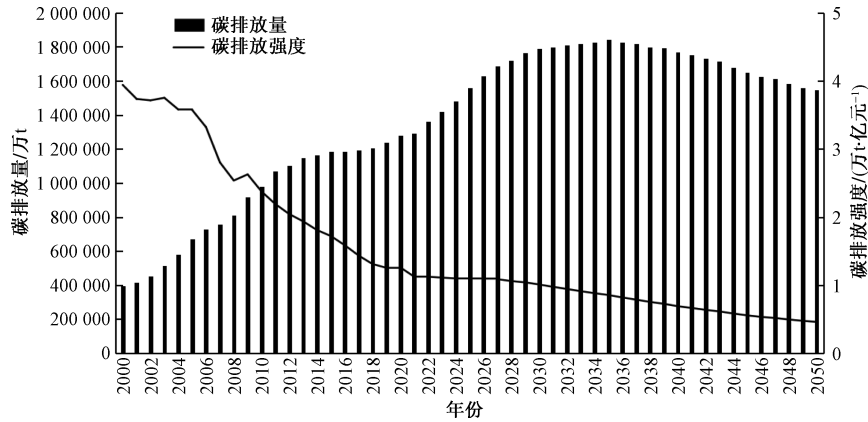


图4 2000—2050年碳排放的模拟图

然后在2050年降低到1 545 420万t。碳排放峰值将出现在2035年，无法履行2030年达到峰值的碳减排承诺。此外，中国在2005年、2020年和2030年的碳排放强度分别为3.57万、1.26万、0.91万t/亿元，相较于2005年，2020年和2030年的碳排放强度分别降低64.7%和74.5%。这些预测数据表明，中国在2020年和2030年降低碳排放强度的承诺将按时兑现。然而，按照目前的发展趋势，中国未来的碳减排形势仍然面临严峻挑战。

4 中国碳排放因素LMDI模型分析

4.1 LMDI加法模型计算

根据LMDI中的加性分解模型，即式(10)，将中国2000—2020年的碳排放影响因素分解为能源结构碳排放、技术创新碳排放、产业结构碳排放、经济发展碳排放和人口规模碳排放。考虑了相邻年份之间的微小变化，并根据现有的研究结果将其分解为每5年一个时间段。各影响因素对中国碳排放变化的贡献值和贡献率如表1和图5所示。

总体而言，中国的碳排放量从2000年的410 012万t增加到2020年的1 277 930万t。尽管自2011年以来，碳排放增速逐渐下降，但由于中国碳排放基数巨大，碳减排任务依然十分严峻。2000—2020年，中国碳排放量增加了867 918万t，其中能源结构的调整使碳排放减少75 439万t；技

术创新对碳减排效果最好，累计减少碳排放量达到1 043 350万t；产业结构调整减少碳排放362 655万t；而经济发展和人口规模是促进碳排放增加的因素，分别增加碳排放2 240 284万t和109 078万t。根据计算的结果，5个影响因素对中国碳排放增长的绝对贡献率从大到小依次是经济发展(258.12%)、技术创新(-120.21%)、产业结构(-41.78%)、人口规模(12.57%)和能源结构(-8.69%)。

4.2 碳排放影响因素分析

1) 经济发展因素对中国碳排放量的影响呈现出显著的递增效应。经济发展对中国碳排放的影响从271 224万t上升到751 937万t，增长177.24%，经济发展的贡献率大于其他因素。从发展的角度来看，21世纪以来，中国经济发展迅速，然而，基于资源消耗的粗略经济发展模式严重依赖能源消耗，因此经济发展一直是促进中国碳排放增长的主要因素。目前，中国的城镇化建设还未结束，居

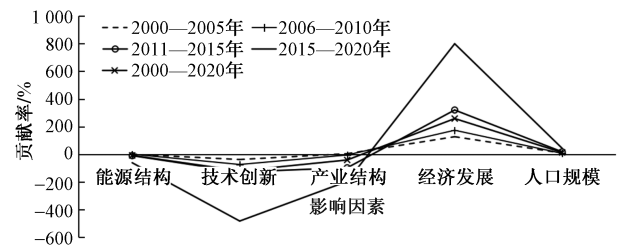


图5 2000—2020年碳排放各影响因素贡献率

表1 2000—2020年碳排放各影响因素贡献值

时间段	贡献值/万t					合计
	能源结构	技术创新	产业结构	经济发展	人口规模	
2000—2005年	-841	-82 097	8 228	271 224	17 465	213 979
2006—2010年	939	-291 299	-21 524	680 848	23 349	392 313
2011—2015年	-17 440	-215 071	-164 485	536 275	28 305	167 584
2015—2020年	-58 097	-454 883	-184 874	751 937	39 959	94 042
2000—2020年	-75 439	-1 043 350	-362 655	2 240 284	109 078	867 918

民生活水平有待进一步提高,经济发展仍然是中国的首要任务。为了实现更大的经济增长和更低的碳排放,中国在快速发展经济的同时需要保证经济质量的提高。中国的低碳发展还有很长的路要走,只有在坚持以绿色低碳为导向的发展理念下,中国才能取得可持续经济增长和碳减排的双赢局面。

2)技术创新因素对中国的碳排放一直呈现出显著的减少作用。2000—2020年,技术创新因素共减少碳排放1 043 350万t,碳减排贡献率远高于其他影响因素,这表明技术创新是实现中国碳减排目标的最佳途径。进入21世纪以来,由于高能耗对环境和经济可持续发展提出的挑战,中国制定了相对严格的生态环境保护政策,提高能源效率已成为减少碳排放和能源依赖的关键措施。在中国加快调整重工业、减少产能过剩和淘汰技术落后工业企业的政策推动下,中国经济发展逐步减少了对能源的依赖,并形成了低污染、低能耗、高产值的经济发展模式。中国的能源强度从2000年的1.46下降到2020年的0.49。尽管取得了显著的进展,中国仍有很大的发展空间。未来,中国应主动向技术强国学习,采取更多措施降低能源强度,进一步推动技术创新,加快绿色低碳技术的研发和应用。

3)产业结构因素对中国碳排放的影响主要是减少效应,其贡献率呈由正到负的变化趋势。自2000年以来,中国加快城镇化建设,着力发展产业,凭借独特的地理位置和人口优势,成为世界经济发展大国。为了快速发展,许多工业企业在过去依赖传统工艺和大量能源消耗,导致碳排放量迅速增长。然而,随着发展的逐步深入,中国逐渐意识到,为经济发展消耗大量能源并不是最佳选择。因此,制定了一系列产业结构优化政策,推动第三产业比重的提高,这些政策使得产业结构对碳减排的贡献率逐渐提高。中国开始鼓励高技术产业和服务业的发展,减少对能源消耗较高的传统工业的依赖,这种转型使得中国的产业结构更加环保和低碳,有助于减少碳排放。

4)人口规模因素对中国的碳排放产生了一定的增加作用,但其影响程度相对稳定且贡献率较低。2000—2020年,人口规模因素增加了中国的碳排放109 078万t,贡献率为12.57%。尽管人口规模对碳排放有一定的增加作用,但相对来说影响相对较小。未来,人口规模对中国碳排放的影响将是有限的。首先,中国长期实施独生子女政策导致自然出生率逐渐下降,人口增长缓慢,新生人口所带来的碳排放正在逐渐减少。其次,现阶段中国居民越来越注重生活质

量的提高和精神世界的建设,消费倾向于高科技等第三产业,这也会减弱对碳排放的增加影响。因此,虽然人口规模因素在一定程度上对碳排放的增长有影响,但随着中国的人口发展趋势和居民消费结构的变化,其对碳排放的影响将趋于减弱。中国需要继续关注人口问题,并采取适当的政策来平衡经济发展和碳减排的关系,实现可持续发展目标。

5)能源结构因素对中国的碳排放有轻微的减少作用,其贡献率呈由负到正,再由正到负的变化趋势。这主要与中国“富煤、贫油、少气”的能源储备有关。2000—2005年,中国加快了经济社会建设,消耗了大量的煤炭和石油,导致能源结构呈现出增长效应。自2005年后,中国加快了能源结构升级的步伐,加大了对天然气的消费,同时煤炭和石油消费的比重有所下降,能源结构正在朝着更加低碳的方向发展。然而,由于中国受所拥有的能源资源影响较大,能源结构在减少碳排放方面只呈现出轻微的缩减作用。要实现碳减排目标,中国需要进一步优化能源结构,增加清洁能源的使用,如电力、天然气、风能和太阳能等,这将有助于降低碳排放并推动中国向更加可持续的能源发展方向迈进。

5 中国碳排放情景预测及路径分析

5.1 情景设定

为了确定实现中国碳排放目标的最佳路径,基于中国碳排放因素的分析结论,根据各因素的影响方向和大小,设定中国碳减排的5条发展路径。5条路径分别是减缓经济增长、加快技术创新、优化产业结构、减少人口规模和调整能源结构。在经济增长放缓的路径上,中国GDP将从自然发展路径中的4 000 000亿元调整到2050年的3 500 000亿元。在加快技术创新的道路上,中国研发支出占GDP的比例将从自然发展道路上的4%调整到2050年的4.5%。在优化产业结构的道路上,中国的产业结构将比自然发展道路提前5年达到理想结构。在减少人口规模的路径上,中国人口规模将从自然发展路径上的13.3亿人调整到2050年的12.6亿人。在能源结构调整路径上,2050年中国能源结构将由自然发展路径中的煤炭(32.69%)、石油(38.46%)、天然气(28.85%)调整为煤炭(25.14%)、石油(40.05%)和天然气(34.81%)。

5.2 不同路径的碳排放分析

将5条发展路径的参数用于中国碳排放的系统动力学模型,以预测中国在不同路径下的碳排放趋势。结果如图6和表2所示。

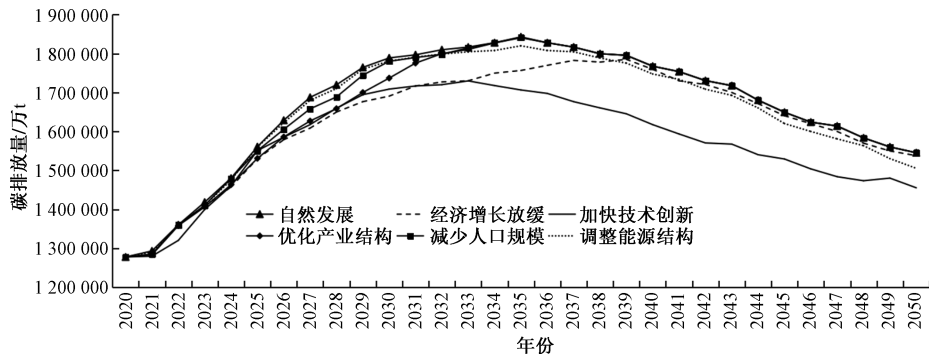


图6 2020—2050年不同路径的碳排放量预测

表2 不同路径的碳排放峰值及碳排放强度

路径	峰值年份	碳排放峰值/万 t	累计碳排放量/万 t	碳排放强度/(万 t · 亿元 ⁻¹)		
				2020 年	2030 年	2050 年
自然发展	2035	1 842 720	51 538 800	1.26	0.91	0.39
经济增长放缓	2039	1 785 060	50 415 905	1.26	0.93	0.44
加快技术创新	2033	1 729 740	48 641 360	1.25	0.88	0.36
优化产业结构	2035	1 840 600	51 146 620	1.26	0.89	0.39
减少人口规模	2035	1 841 550	51 376 279	1.26	0.91	0.39
调整能源结构	2035	1 819 850	51 067 400	1.26	0.90	0.38

从图6和表2可以看出,在预测范围内,中国的碳排在5种发展路径下都能达到峰值。然而,不同发展路径下中国碳排放峰值的大小和时间存在差异。首先,相较于自然发展路径,经济增长放缓的路径可以降低中国碳排放的峰值和总量,但该路径并不会提前碳排放峰值的到达时间,反而会推迟碳排放峰值的出现,并增加碳排放强度。其次,加快技术创新路径相较于自然发展路径,可以减少中国的碳排放峰值和总量,并且能够提前碳排放峰值的到达时间,降低碳排放强度。最后,优化产业结构、减少人口规模和调整能源结构的路径相较于自然发展路径,可以减少中国的碳排放峰值和总量,但减排效果有限,并不会加速碳排放峰值的到达。

结合中国的经济社会发展政策和实际情况,重点阐述了优化产业结构、减少人口规模和调整能源结构3条路径的结果。首先,中国自2006年开始意识到通过大量能源消耗实现快速经济发展存在的问题,并采取了一系列优化产业结构的措施。第三产业的比重逐步增加,产业结构越来越合理,中国的产业结构已经发生了转变。其次,中国进行了数年的能源结构调整,天然气消费量大幅增加。然而,由于中国“富煤、贫油、少气”的能源禀赋,能源结构的调整幅度有限。第三,长期实施的计划生育政策导致中国的自然出生率逐渐下降,甚至出现负增长。近年来,中国居民越来越注重提高生活质量和享受精神文化享受,消费倾向于高科技等第三产

业,中国人均碳排放量也在下降。因此,优化产业结构、减少人口规模和调整能源结构对中国的碳减排影响有限。然而,这并不意味着可以忽视这些因素,而是需要综合考虑其他因素和灵活调整策略,以促进低碳发展和可持续发展。

综上所述,技术创新是中国实现碳减排承诺的关键路径。中国要达到“双碳”承诺,应该加快经济增长的速度,这将有助于增加技术创新投资,提高第三产业的能源强度,降低产品能耗,提高能源利用率。同时,经济增长和生态进步可以相互促进。通过技术创新和经济增长的方式,可以实现经济的可持续发展,在减排的同时保持经济的繁荣,有助于中国实现低碳转型和可持续发展目标。

6 结论与建议

关注“双碳”目标下中国的碳达峰及减排路径问题。首先,介绍了中国碳减排现状及减排必要性,梳理总结关于中国碳排放的影响因素、碳达峰预测和峰值方面的相关研究。其次,建立中国碳排放峰值系统动力学模型和碳排放因素分解的LMDI加法模型,在系统动力学模型通过有效性测试的基础上,对模型进行包括人口增长率、GDP增长率、产业结构、能源消费结构和研发支出比例等参数的设置,以2020年为基准期,预测2050年前中国的碳排放情况,随后针对中国的碳排放因素进行了LMDI模型分析。最后对中国碳排放进行了减缓经济增长、加快技术创新、优化产业结构、减少人口规模和

调整能源结构5种情景预测及路径分析。

6.1 研究结论

1)中国的碳排放量呈现出倒“U”形发展曲线,在2035年达到碳排放峰值,无法履行2030年达到峰值的碳减排承诺,未来中国的碳减排形势仍然严峻。

2)碳排放影响因素包括能源结构、技术创新、产业结构、经济发展和人口规模,其中经济发展及人口规模对中国的碳排放起增加作用,技术创新、能源结构以及产业结构起减少作用。经济发展对中国碳排放的贡献率最大(258.12%),其次是技术创新(-120.21%)、产业结构(-41.78%)、人口规模(12.57%)和能源结构(-8.69%)。

3)5种碳排放路径预测中,经济增长放缓推迟了碳达峰时间,技术创新路径提前了碳达峰时间,优化产业结构、减少人口规模和调整能源结构的路径并不会加速碳排放峰值的到达,技术创新是中国实现碳减排承诺的关键路径。

6.2 加速中国碳达峰进程的对策建议

1)坚持发挥技术创新的引领作用,引导和鼓励技术升级。①政府应该在加大技术创新投入的同时,鼓励企业和社会组织加大技术创新投资,并充分利用民间资本,为技术创新提供更多的资源和支持。②媒体应引导社会形成以技术创新为荣的环境,增强科技创新人才的自豪感,激发全社会对技术创新的积极态度和参与热情。③技术创新成功的关键是政府建立技术创新平台,设立科技创新基金,为创新提供良好的环境。政府支持创新企业和科研机构的科技孵化器、技术转移中心和联合研究实验室等平台的建设,促进技术创新的转化和应用。④鉴于中国区域发展不平衡的现状,中国需要加强区域合作,提升技术创新的合作效果。通过推动技术创新的跨地区合作和资源共享,加强各地区的优势互补,进一步提高技术创新的效率和成果。

2)注重经济发展质量,实现经济与环境双赢。

①完善政府绩效评价指标体系,不能仅仅通过GDP来评价政府绩效,需要认识到美好的生活不仅依赖物质消耗,还需要保护美丽的自然环境。因此,中国政府应该在政府绩效考核体系中增加环境保护、生态治理等指标的权重,使之成为评价政府绩效的重要依据。②政府在引进外资时应严格评估企业的环境保护情况,并将环境保护作为一项重要的评估指标。对于那些污染严重的企业,需要设定更高的投资准入要求。在发展经济的同时,积极吸引技

术先进、无环境污染的产业入驻,减少环境污染。应改变过去“先发展经济、后治理环境”的旧模式,探索经济与环境协调发展的新模式。

3)继续调整能源结构,优化产业结构,稳定人口规模发展。①中国需要加快优化产业发展结构,取消对高碳排放企业的优惠政策,取缔低能效企业,升级工业企业,合并或关闭高碳排放企业,并促进第二产业的逐步发展以降低碳排放。政府应加大对高技术产业的支持力度,提高高技术制造业在工业企业中的比重。②继续扩大油气消费比重,同时降低煤炭消费比重。考虑到中国自身能源禀赋的情况,中国可以积极发展太阳能、风能等清洁能源,减少对煤炭的依赖。③关注人口问题和人口结构变化,将人口结构指标和相关经济社会指标纳入碳排放体系中,研究人口与碳排放的关系,促进低碳经济的发展。通过调整能源消费结构、优化产业结构和稳定人口规模的发展,可以降低碳排放峰值和总量,推动我国的碳减排工作。这些措施将有助于加快中国的低碳经济转型和可持续发展。

参考文献

- [1] NAWAZ M A, HUSSAIN M S, KAMRAN H W, et al. Trilemma association of energy consumption, carbon emission, and economic growth of BRICS and OECD regions: quantile regression estimation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 1-15.
- [2] WANG K, WU M, SUN Y, et al. Resource abundance, industrial structure, and regional carbon emissions efficiency in China[J]. Resources Policy, 2019, 60: 203-214.
- [3] 张晨露, 张凡. 生态保护、产业结构升级对碳排放的影响: 基于长江经济带数据的实证[J]. 统计与决策, 2022, 38(3): 77-80.
- [4] 揭俐, 王忠, 余瑞祥. 中国能源开采业碳排放脱耦效应情景模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 47-56.
- [5] 王建雄, 吕沅姝, 李晨曦. LMDI法与STIRPAT模型下京津冀碳排放影响因素研究[J]. 中国经贸导刊(中), 2021(1): 114-116.
- [6] 马明义, 郑君薇, 马涛. 多维视角下新型城市化对中国二氧化碳排放影响的时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2474-2486.
- [7] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [8] 张颂心, 王辉, 徐如浓. 科技进步、绿色全要素生产率与农业碳排放关系分析: 基于泛长三角26个城市面板数据[J]. 科技管理研究, 2021, 41(2): 211-218.
- [9] 张静, 申俊, 徐梦. 碳排放交易是否促进了产业结构转型升级?: 来自中国碳排放交易试点政策的经验证据[J]. 经

- 济问题,2023(8):84-91.
- [10] LI F,XU Z,MA H. Can China achieve its CO₂ emissions peak by 2030? [J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 337-344.
- [11] 余碧莹,赵光普,安润颖,等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(2):17-24.
- [12] 杜焱,胡鑫杨. 我国 2030 年实现碳达峰路径研究:基于经济、能源、碳排放系统的 SD 模型[J]. 资源与产业,2022,24(5):19-28.
- [13] 马兆良,梅加兰. 多情境视角下中国中部六省碳达峰预测[J]. 科技管理研究,2022,42(13):216-222.

Research on China's Carbon Peak Prediction and Emission Reduction Path under the "Dual Carbon" Goal

YE Aishan¹, LI Xiaohua¹, DENG Yangyang¹, GONG Li²

(1. School of Business, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, Jiangsu, China;
2. School of Marxism, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract: Exploring China's carbon peak prediction and emission reduction path under the "dual carbon" goal is of great practical significance. Based on the system dynamics model, the logarithmic mean Divisia index (LMDI) method is used to conduct research. It is found that China's carbon emissions follow an inverted U-shaped curve and will reach the carbon peak in 2035. Among the influencing factors of carbon emissions, economic development has the largest contribution, followed by technological innovation, industrial structure, population size, and energy structure. In terms of the carbon reduction path, technological innovation is the key path to achieve carbon reduction commitments, and a slow-down in economic growth will delay the peak of China's carbon emissions. Based on the results of the emission reduction path, targeted suggestions are proposed in terms of technological innovation, economic quality, energy structure, industrial structure, and population size, in order to accelerate China's carbon peak process.

Keywords: carbon peak; system dynamics; logarithmic mean Divisia index (LMDI); emission reduction path