

# 中国提前碳达峰情景及其宏观经济影响

鲁传一 陈文颖\*

**摘要:**第75届联合国大会上中国提出了2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标,引领了全球应对气候变化的进程,引起了国内外的广泛关注和热评。因此,对强化的提前碳达峰目标的实现路径及其宏观经济影响研究,具有重要的现实意义和学术价值。本文采用动态可计算一般均衡模型TECGE定量分析了强化碳达峰承诺对我国未来宏观经济的影响。设定了四个情景包括2030、2027、2025和2023年碳达峰,峰值分别为108亿吨、107亿吨、105.8亿吨和103.6亿吨,考察提前碳达峰情景与2030年碳达峰情景相对宏观经济的影响。研究表明,提前碳达峰情景相比2030年基准情景,越早碳达峰,要求碳税价格越高,GDP和其他宏观经济变量如总消费、总进出口等都下降,但是第三产业占比有所上升。越早碳达峰,宏观经济变量下降越多,第三产业占比上升得越多。根据CGE模型对宏观经济影响的定量分析,本文为提前实现碳达峰目标、推进经济高质量发展提出了相关的政策建议。

**关键词:**提前碳达峰;一般均衡模型;碳税;宏观经济

## 一、引言

随着全球应对气候变化进程的推进,国际社会为气候变化设定了长期目标,即到2100年温度上升幅度较工业化前控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 以内,并努力控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以内。中国作为世界上最大的能源消费国和温室气体排放国,一直积极参与全球应对气候变化的进程。在2015年巴黎气候大会上,我国提出到2030年单位国内生产总值 $\text{CO}_2$ 排放比2005年下降60%~65%的目标,非化石能源在一次能源消费中的占比提升到20%左右,到2030年前实现二氧化碳排放达峰并努力早日碳达峰。党的十九大提出到2050年我国社会主义现代化建设的两阶段奋斗目标,

---

\*鲁传一(通讯作者),清华大学核能与新能源技术研究院,邮政编码:100084,电子邮箱:lu-cy@mail.tsinghua.edu.cn; 陈文颖,清华大学能源环境经济研究所,邮政编码:100084,电子邮箱:chenwy@mail.tsinghua.edu.cn。

本文系国家重点研发计划课题“我国应对气候变化与经济社会环境协同治理路径模拟研究”(2018YFC1509006)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家提出的宝贵建议,文责自负。

第一阶段是2020—2035年,从全面建成小康社会到基本实现现代化,也是中国落实《巴黎协定》下的国家自主贡献目标的实施阶段。

在全球应对气候变化方面,中国将气候治理与经济社会可持续发展、区域环境污染治理结合起来,坚持绿色低碳发展,取得了巨大的成就。随着美国退出《巴黎协定》,中国在国际社会应对气候变化方面的重要性在提升,最近十多年中国在一定程度上扮演着引领者的角色。

在2020年9月22日联合国大会一般性辩论上,中国国家主席习近平宣布: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。这是中国在《巴黎协定》之后第一个长期气候目标,也是第一次提到碳中和,碳达峰时间也确定性地承诺到2030年前。

中国提前碳达峰,对国内外具有积极而深远的意义。2030年前碳达峰是基本条件,中国只有实现了碳达峰目标,才能够在2060年前实现碳中和;而实现碳达峰目标的时间越早,就越有利于实现碳中和目标。中国提前碳达峰对未来高质量发展具有深远的影响。明确了提前碳达峰目标,就为我国生态环境保护和高质量发展提供了清晰的碳排放约束,更有力地促进了中国的低碳发展进程。同时对全球应对气候变化、推进《巴黎协定》目标的实现意义重大。提前碳达峰和碳中和的宣示,体现了我国的国际责任和大国担当,提振了国际社会应对气候变化的雄心,推进了国际气候协同治理的进程(潘家华,2020)。

中国碳达峰、碳中和的承诺目标,引起了国内外各界的广泛关注。新的碳达峰路径,包括具体的碳达峰时间和碳达峰峰值,以及实现不同碳达峰路径的成本及其宏观经济影响,成为社会各界广泛关注和热议的话题。碳达峰、碳中和路径,以及我国正在进行的“十四五”规划,促使社会各界在不断思考,我国各地、各行各业都纷纷探讨碳达峰和碳中和。本文的目的是探讨2030年前不同时间提前碳达峰的峰值水平及其对经济系统和碳价的影响。

## 二、文献综述

关于我国碳达峰的研究,最近十年来研究文献较多。大多数研究采用情景分析法、环境库茨涅兹曲线分析法、最优经济增长模型分析法、解耦分析方法、基于投入产出数据的模型分析法等,研究中国碳排放达峰的时间和峰值水平。许广月(2019)对我国二氧化碳排放峰值的研究进行了较详细的评述。何建坤(2013)根据Kaya模型研究认为中国将在2030年前后达到碳排放峰值,峰值将会控制在110亿吨,人均碳排放量在8吨左右。王志轩(2014)对与能源有关产业的碳排放峰值进行了预测,认为在不考虑土地利用、土地利用变化及森林覆盖(LULUCF),忽略钢铁和水泥等生产过程排放以及其他较小的影响因素情况下,当GDP增速平均为6%,能源消费弹性系数为0.35时,中国二氧化碳排放将在2030年实现碳达峰,峰值为113亿吨。刘长松(2015)通过Kaya模型分解和世界各国之间的比较,认为中国将在

2030年达到碳排放峰值,峰值为115~120亿吨,人均碳排放量为8吨左右。柴麒敏和徐华清(2015)采用IAMC模型分析了中国总量控制和排放峰值,认为中国在2030年实现碳达峰的峰值为109.2亿吨,并在“十五五”末是中国实现碳达峰的重要机会,此时峰值为120亿吨,人均碳排放量为8.5吨左右。Zhang等(2016)采用情景分析法分析了中国未来的排放趋势,认为我国2030年碳达峰,峰值为100亿吨。马丁和陈文颖(2016)采用能源系统优化模型(China TIMES),构建了碳排放达峰路径模型体系,认为中国可实现2030年碳排放峰值100~108亿吨。姜克隽等(2016)利用中国能源环境政策综合评估(IPAC)模型研究了我国能源活动的CO<sub>2</sub>排放途径,探讨了2025年之前碳达峰的可能性,认为2020—2022年可实现能源活动的碳达峰,但需要强有力的气候变化和能源政策支持。Elzen等(2016)运用FAIR/TIMER模型综合分析了能源系统和土地使用导致的二氧化碳排放,认为中国二氧化碳排放可以在2030年之前碳达峰。Green和Stern(2017)基于Kaya等式研究认为中国可在2025年或之前碳达峰。Mi等(2017)利用构建的IMEC(Integrated Model of Economy and Climate)模型研究中国二氧化碳排放,认为将在2026年碳达峰,峰值为112亿吨。其他类似绿色转型路径的研究还有吴力波(2016)、齐绍洲和张振源(2017)、石敏俊和徐瑛(2018)。2020年7月清华大学气候变化与可持续发展研究院发布了《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告,认为我国2025年前后二氧化碳排放进入排放峰值平台期,可以争取2030年前实现稳定碳达峰,化石能源消费的二氧化碳排放峰值控制在110亿吨之内,到2035年二氧化碳排放将比峰值年份显著下降。

一些学者对碳排放的影响因素进行了研究,多数学者研究显示产业结构、技术进步和经济增长是影响碳排放增加的因素。许士春等(2012)运用LMDI模型研究中国碳排放的驱动因子,驱动因子包括经济产出、人口规模和能源结构等,其中贡献率最大的是经济产出效应;碳排放的抑制因子为能源结构效应和产业结构效应,其中贡献率最大的是能源结构效应。张兵兵等(2014)基于DEA模型测算了中国30个省市的技术进步,检验了技术进步对碳排放强度的影响。

还有一些研究分析了碳达峰对中国宏观经济的影响。Wang和Zou(2014)运用构建的中国区域CGE模型,分析了不同政策对峰值及GDP的影响,认为峰值控制政策将使GDP下降2.96%~8.23%。与此类似,刘宇等(2014)运用动态GTAP-E模型分析了中国分别在2025年、2030年和2040年碳达峰对宏观经济和产业部门的影响,认为在2025年和2040年碳达峰,中国GDP分别累积下降20.9%和8.7%。王勇等(2017)构建了包含气候保护函数的CGE模型,模拟中国在2025、2030和2035年实现碳达峰的经济影响,认为碳达峰时间越早,对中国造成的经济影响越大。李季和杨天泓(2019)基于CGE模型模拟了辽宁在不同情景碳达峰和不同碳强度减排目标下的政策影响。莫建雷等(2018)采用中国能源-经济-环境系统集成模型(CE3METL),对实现《巴黎协定》的碳达峰目标、非化石能源比例目标和碳强度目标所需的政

策措施与成本进行了量化评估,并分析了三种目标和两种政策的协同关系。段宏波和汪寿阳(2019)采用CE3METL模型,从碳排放路径、能源重构和经济影响三个维度对比分析了全球温控目标从2°C到1.5°C的战略调整对中国的长期影响。朱佩誉和凌文(2020),构建动态CGE模型模拟了不同碳达峰情景对于产业结构的影响。这些研究结论基本一致,即碳排放达峰时间越早,减排目标越严格,GDP损失越大。

现有的大部分研究存在三点局限:第一,大部分研究工作,主要探讨我国碳排放峰值的年份、峰值水平及其影响因素,对实现碳达峰的经济影响研究较少,特别是分析2030年前不同年份碳达峰的宏观经济影响。第二,大部分减排的经济影响研究基于国家或省级CGE模型,采用的不是最新年份的投入产出数据,而我国经济发展和结构转型速度较快,需要采用最新的数据进行研究。第三,大多数研究基准情景是采用计量经济方法和趋势外推法进行模拟,这种设置对于新的政策影响研究是必要的,但是比较最近提出的强化碳达峰承诺影响,需要我国在巴黎气候大会上自主承诺的基础上更进一步,因此需要考虑强化承诺的经济影响,采用2030年碳达峰作为基准情景更合适。为克服以上所述局限,本文将采用基于OECD的GREEN模型(Lee et al., 1994)构建的中国动态可计算一般均衡模型TECGE(鲁传一,2018),分析强化碳达峰承诺对我国宏观经济的影响。

本文将解决的主要问题是:我国若在2023、2025和2027年二氧化碳排放达到峰值,与2030年碳达峰相比对经济发展有哪些影响?碳达峰时间和峰值水平不同对我国宏观经济影响存在多大差异?本文剩余部分如下:第三部分介绍动态CGE模型TECGE,第四部分介绍模型参数并设定情景方案,第五部分分析模型模拟结果,第六部分是结论并提出相关政策建议。

### 三、研究方法

本文在设置未来经济增长率、不同年份二氧化碳排放限额等参数时,采用了文献调研和专家咨询法。在研究我国碳达峰的宏观经济影响时,采用了情景分析和可计算一般均衡模型(CGEM)方法,CGEM模型中的部分参数采用计量经济学方法和校准法。

本文采用课题组基于OECD发展中心的GREEN模型构建和不断更新版本的中国递推动态可计算一般均衡模型(TECGE)。该模型的主要特色是考虑了能源种类之间的替代及能源与增加值之间的替代、化石电力和清洁电力的中间投入差别,各个部门的全要素生产率和能源效率、商品的进出口贸易和国际资本流动;采用递推动态方式,新增投资分配考虑了各个部门资本收益率、投资的惯性和政府投资政策等因素。

多年来该模型的不同版本已广泛应用于中国及区域能源和气候政策模拟工作中,如Lu等(2010a)研究了我国西部能源投资对区域经济和二氧化碳排放的影响;Lu等(2010b)则研



究了碳税及其补充政策对中国经济发展的影响。随着研究主题的不断拓展,模型结构也不断演进和细化,如鲁传一等(2019)应用该模型研究了现代化建设中的产业结构转型对经济发展与碳排放的影响。

TECGE模型将整个国民经济划分为12个部门即农业、重工业、轻工业、设备制造业、建筑业、交通运输业、其他服务业、煤炭、石油、天然气、化石电力和清洁电力,还包括四类行为主体和三种生产要素。行为主体分别为家庭、企业、政府及国外,其中家庭包括农村家庭和城镇家庭,生产要素分别为劳动、资本和能源。

(一)生产模块核心方程

TECGE模型的生产模块描述了各个生产部门的生产过程和要素流动,包括多层嵌套组合。其中能源由煤炭、石油、天然气、化石电力和清洁电力组成,它们之间具有不同的替代弹性。石油和天然气组合为油气投入  $EOG$ ; 油气组合与煤组合为化石能源  $FE$ ; 清洁电力和化石电力(火电)组合为电力  $ELE$ ; 化石能源与电力组合为能源投入  $E$ 。资本和劳动之间具有替代性,组合为增加值  $VA$ ; 能源与增加值之间具有替代性,组合为  $KEL$ 。其他非能源中间投入之间没有替代性,它们与能源增加值组合一起用于部门生产活动。模型生产结构如图1和图2所示。图1表示TECGE模型非能源部门的生产模块的要素流动;图2表示TECGE模型能源部门的生产模块的要素流动。能源部门与非能源部门在生产模块中主要区别在于能源与资本、劳动的替代性。在能源部门的生产活动中,能源主要用作中间投入,与资本、劳动不存在替代关系。

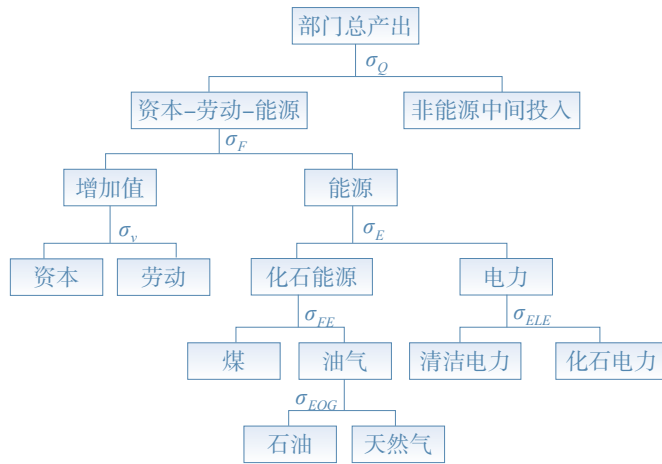


图1 TECGE模型非能源部门的生产模块

TECGE模型的生产函数一般采用能源、资本、劳动的多层嵌套结构。对于非能源部门,总产量由资本-劳动-能源组合投入和非能源中间投入构成。

$$Q_i(t) \times (1 - itax_i) = \sum_{j=1}^7 a_{ji}(t) Q_j(t) + KEL_i(t) \tag{1}$$

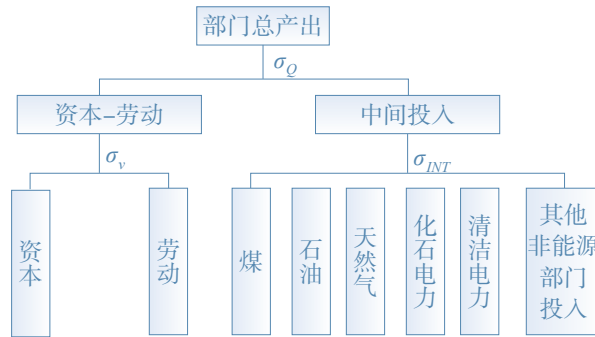


图2 TECGE模型能源部门的生产模块

上式中  $Q_i(t)$  表示第  $i$  部门的总产量,  $KEL_i(t)$  表示第  $i$  部门资本-劳动-能源的合成投入数量,  $a_{ji}(t)$  表示第  $i$  部门单位产出所消耗的第  $j$  种非能源中间投入的数量,  $itax_i$  表示第  $i$  部门间接税税率。

对于能源部门,总产量由资本-劳动组合投入和中间投入构成<sup>①</sup>。

$$Q_i(t) \times (1 - itax_i) = \sum_{j=1}^{12} a_{ji}(t) Q_i(t) + KEL_i(t) \quad (2)$$

资本-劳动合成投入与能源投入,通过CES函数合成资本-劳动-能源投入  $KEL$ 。

$$KEL_i(t) = A_{F_i} e^{\theta_i(t) \times (t-t_0)} [\omega_{E_i} E_i(t)^{-\rho_{F_i}} + (1 - \omega_{E_i}) VA_i(t)^{-\rho_{F_i}}]^{-\frac{1}{\rho_{F_i}}} \quad (3)$$

式(3)中  $KEL_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期资本-劳动-能源的合成投入数量,  $A_{F_i}$  表示第  $i$  部门资本-劳动-能源投入的转换系数,  $\theta_i(t)$  为  $(t-t_0)$  期第  $i$  部门投入使用效率的提高速度,  $VA_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期投入的资本-劳动数量,  $E_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期合成能源的投入量,  $\omega_{E_i}$  为在资本-劳动-能源合成函数中能源投入的份额参数,  $\rho_{F_i}$  为资本-劳动-能源合成函数中的替代参数。

资本和劳动要素通过CES函数合成资本劳动组合投入,即增加值。

$$VA_i(t) = A_{v_i} e^{\lambda_i(t) \times (t-t_0)} [\delta_{v_i} K_i(t)^{-\rho_{v_i}} + (1 - \delta_{v_i}) L_i(t)^{-\rho_{v_i}}]^{-\frac{1}{\rho_{v_i}}} \quad (4)$$

式(4)中,  $VA_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期资本劳动的组合投入的数量。  $K_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期资本的投入数量。  $L_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期投入的标准劳动力数量。  $A_{v_i}$  为第  $i$  部门资本-劳动合成投入函数中的转换系数,  $\delta_{v_i}$  为资本-劳动合成投入函数中的份额参数,  $\rho_{v_i}$  为资本-劳

①当  $j=1, \dots, 7$  时,表示非能源部门,分别指农业、轻工业、重工业、设备制造业、建筑、交通、服务业部门;当  $j=8, \dots, 12$  时,表示能源部门,其中部门8、9、10分别为煤炭、石油、天然气部门,部门11和12分别为化石电力和清洁电力部门。

动合成投入函数中的替代参数,  $\lambda_i(t)$  为在  $(t-t_0)$  期第  $i$  部门投入使用效率的提高速度。

石油和天然气之间组合为油气能源投入  $EOG$ ; 油气能源投入与煤炭组合为化石能源投入  $FE$ ; 化石电力和清洁电力之间组合为电力投入  $ELE$ ; 化石能源投入和电力组合为能源投入  $E$ 。具体方程如下:

$$E_i(t) = A_{E_i} e^{AEI_i(t) \times (t-t_0)} [\delta_{E_i} FE_i(t)^{-\rho_{E_i}} + (1-\delta_{E_i}) ELE_i(t)^{-\rho_{E_i}}]^{-\frac{1}{\rho_{E_i}}} \quad (5)$$

$$ELE_i(t) = A_{ELE_i} e^{AELEI_i(t) \times (t-t_0)} \left[ \sum_{j=11}^{12} \delta_{ji} VE_{ji}(t)^{-\rho_{ELE_i}} \right]^{-\frac{1}{\rho_{ELE_i}}} \quad (6)$$

$$FE_i(t) = A_{FE_i} e^{AFEI_i(t) \times (t-t_0)} [\delta_{8i} VE_{9i}(t)^{-\rho_{FE_i}} + (1-\delta_{8i}) EOG_i(t)^{-\rho_{FE_i}}]^{-\frac{1}{\rho_{FE_i}}} \quad (7)$$

$$EOG_i(t) = A_{EOG_i} e^{AEOGI_i(t) \times (t-t_0)} \left[ \sum_{j=9}^{10} \delta_{ji} VE_{ji}(t)^{-\rho_{EOG_i}} \right]^{-\frac{1}{\rho_{EOG_i}}} \quad (8)$$

上式中,  $E_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期合成能源的投入量;  $A_{E_i}$  为第  $i$  部门第  $t$  期合成能源函数的转换系数;  $e$  为指数函数的底数;  $AEI_i(t)$  为在  $t$  期第  $i$  部门能源使用效率的提高速度;  $\delta_{E_i}$  为第  $i$  部门合成能源投入中化石能源投入的份额系数,  $\rho_{E_i}$  为能源合成函数中的替代参数,  $\rho_{E_i} = (1-\sigma_{E_i})/\sigma_{E_i}$ ,  $\sigma_{E_i}$  是化石能源与电力之间的替代弹性。  $ELE_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期电力总投入量;  $A_{ELE_i}$  为第  $i$  部门第  $t$  期电力合成函数的转换系数;  $AELEI_i(t)$  为在  $t$  期第  $i$  部门电力使用效率的提高速度;  $\delta_{ji}$  为第  $i$  部门电力投入中第  $j$  种电力投入的份额系数,  $\sum_{j=11}^{12} \delta_{ji} = 1$ 。  $VE_{ji}(t)$  为第  $i$  部门第  $t$  期能源  $j$  的中间投入。  $FE_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期化石能源组合投入量;  $EOG_i(t)$  表示第  $i$  部门第  $t$  期石油和天然气的组合投入量;  $A_{FE_i}$  为第  $i$  部门第  $t$  期化石能源合成函数的转换系数;  $\delta_{8i}$  为第  $i$  部门化石能源投入中煤炭投入的份额系数。

## (二) 对外贸易模块核心方程

大部分商品都存在着进出口的双向贸易。对于进口商品,可采用阿密顿(Armington)假设,即进口品与国内生产的商品并不具有完全替代性,存在着产品差异。对于出口商品,采用不变转换弹性函数(CET函数)来描述,即国内生产的商品,可以在国内和国际两个市场进行销售,为达到收益最大化,国内销售和出口量之间存在着转换。

商品的国内总需求函数为:

$$S_i(t) = \psi_i \times [\mu_i M_i(t)^{-\zeta_i} + (1-\mu_i) D_i(t)^{-\zeta_i}]^{-1/\zeta_i} \quad (9)$$

其中,  $S_i(t)$  表示商品  $i$  的复合总需求,  $\psi_i$  表示商品  $i$  总需求函数中的转换系数,  $\mu_i$  表示商品需求函数中进口需求的份额参数,  $M_i(t)$  表示进口需求的数量,  $D_i(t)$  表示商品  $i$  国内生产用于满

足国内需求的数量,  $\zeta_i$  阿密顿因子, 即  $\zeta_i = (1 - \vartheta_i)/\vartheta_i$ ,  $\vartheta_i$  为阿密顿弹性。

商品的进口需求为:

$$M_i(t) = [\mu_i/(1 - \mu_i)]^{\vartheta_i} \times [PD_i(t)/PM_i(t)]^{\vartheta_i} \times D_i(t) \quad (10)$$

其中,  $PD_i(t)$  表示国内生产和消费的商品  $i$  的价格,  $PM_i(t)$  表示进口商品  $i$  的国内价格,  $\vartheta_i$  表示进口品和国产品之间的价格替代弹性。

商品出口和国内销售的总供给函数为:

$$Q_i(t) = \phi_i \times [\tau_i X_i(t)^{\varphi_i} + (1 - \tau_i) D_i(t)^{\varphi_i}]^{1/\varphi_i} \quad (11)$$

其中,  $Q_i(t)$  表示国内商品  $i$  的总产出,  $X_i(t)$  表示出口供给数量,  $D_i(t)$  表示国内生产和销售的商品数量,  $\phi_i$  表示总供给函数的转换系数,  $\tau_i$  表示出口供给商品的份额参数,  $\varphi_i$  为 CET 因子, 即  $\varphi_i = (1 + \eta_i)/\eta_i$ ,  $\eta_i$  为出口转换弹性。

商品出口量函数为:

$$X_i(t) = [(1 - \tau_i)/\tau_i]^{\eta_i} \times [PX_i(t)/PD_i(t)]^{\eta_i} \times D_i(t) \quad (12)$$

其中,  $PD_i(t)$  表示国内生产的商品价格,  $PX_i(t)$  表示出口商品的国内价格,  $\eta_i$  为出口和国内销售之间的价格转换弹性。

### (三) 消费需求模块核心方程

该模型假定居民的商品消费函数为线性支出系统, 商品消费量通过预算约束下 Stone-Geary 效用函数最大化得到。

$$C_{hi}(t) = cles_{hi}(t) \times [1 - mps_h(t)] \times YD_h(t)/PC_i(t) \quad (13)$$

上式中  $C_{hi}(t)$  为家庭  $h$  消费的商品  $i$  的数量;  $cles_{hi}(t)$  为家庭  $h$  消费的商品  $i$  的份额;  $mps_h$  为家庭  $h$  的边际储蓄率;  $YD_h(t)$  为家庭  $h$  的可支配收入;  $PC_i(t)$  为商品  $i$  的销售价格。

### (四) 能源环境模块核心方程

能源环境模块包括温室气体二氧化碳的排放量的计算方程和碳税收入的计算方程。具体如下:

生产过程化石能源使用征收的碳税收入:

$$RCT_E(t) = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=9}^{12} rct(t) \times \varepsilon_j \times (1 - fcc_j) \times tran_j \times VE_{ji}(t) \times \alpha_j \quad (14)$$

其中,  $RCT_E(t)$  为对生产过程使用化石燃料征收的碳税收入,  $rct(t)$  为碳税, 即每吨二氧化碳排放所征收的税额,  $\varepsilon_j$  为能源  $j$  燃烧的二氧化碳排放系数,  $fcc_j$  为能源  $j$  燃烧过程的固碳系数,  $tran_j$  为将能源  $j$  的燃烧量由价值型转化为实物型的转换因子, 如 kJ/元,  $\alpha_j$  为能源  $j$  燃烧过程的碳氧化率,  $VE_{ji}(t)$  为部门  $i$  生产过程使用能源  $j$  的数量。

对居民消费化石燃料燃烧排放征收的碳税收入:



$$RCT_{hc}(t) = \sum_{j=9}^{12} rct(t) \times \varepsilon_j \times tran_j \times CI_{hj}(t) \times ox_j \quad (15)$$

其中,  $RCT_{hc}(t)$  为对居民  $h$  消费化石燃料燃烧排放所征收的碳税收入,  $CI_{hj}(t)$  为居民消费第  $j$  种燃料的数量。这里假定居民消费能源的燃烧率为 100%。

不同生产部门生产过程的单位产值税价:

$$CTR_i(t) = \frac{\sum_{j=9}^{12} (1 - fcc_j) \times rct(t) \times \varepsilon_j \times tran_j \times ox_j \times VE_{ji}(t)}{PS_i(t) \times Q_i(t)}, j=9, \dots, 12 \quad (16)$$

消费端不同类型能源消费的碳价:

$$CTC_j(t) = rct(t) \times \varepsilon_j \times tran_j \times ox_j, j=9, \dots, 12 \quad (17)$$

部门生产排放量为:

$$ESI_i(t) = \sum_{j=9}^{12} \varepsilon_j \times (1 - fcc_j) \times tran_j \times VE_{ji}(t) \times ox_j \quad (18)$$

其中,  $ESI_i(t)$  为部门  $i$  生产过程消耗化石能源产生的排放量。

居民消费的排放量为:

$$ESC_h(t) = \sum_{j=9}^{12} \varepsilon_j \times tran_j \times CI_{hj}(t) \times ox_j \quad (19)$$

其中,  $ESC_h(t)$  为经济中居民消费化石能源产生的总排放量。

整个经济能源消费产生的总排放量为:

$$EST(t) = \sum_i ESI_i(t) + \sum_h ESC_h(t) \quad (20)$$

其中,  $EST(t)$  为整个经济能源消费产生的总排放量。

从能源环境模块可以看出,设定二氧化碳的排放价格即碳税后,可以得到不同部门产品的价格变化量和终端能源消费的价格变化量,从而影响产品的生产成本和供给量、居民消费量,也影响各个生产部门的排放量和居民消费的排放量,最终影响整个经济的碳排放量。该影响过程是可逆的,设定整个经济的排放量上限,也能够内生得到二氧化碳的排放价格。同时,由于碳排放量存在价格,增加了政府收入,也相应地增加了政府的支出,包括企业技术更新改造和新能源创新的补贴和居民补贴等。

### (五)动态模块核心方程

模型采用动态递推的方式,实现资本存量的动态变化。各个部门的资本量等于上一年资本存量减去折旧,再加上新增的投资量。每一年各个部门新增投资量按照各个部门生产活动的资本效率、资本存量的比例等进行分配。

$$DKI_i = DK \times \frac{K_i}{\sum_j K_j} \times [1 + \varepsilon \times (\frac{YK_i}{K_i} \times \frac{\sum_j K_j}{\sum_j YK_j} - 1)] \quad (21)$$

上式中,  $DKI_i$  为部门  $i$  的新增投资量;  $DK$  为整个经济的固定资产投资总量;  $K_i$  为部门  $i$  的资本存量;  $YK_i$  为产业部门  $i$  的资本收益;  $\varepsilon$  为按照资本收益率进行分配的权重系数。

#### (六) 宏观闭合和求解

本文运用TECGE模型模拟中国不同提前碳达峰情景的宏观经济影响,采取了新古典闭合规则,即储蓄推动投资,经济发展是由储蓄驱动的。

模型求解是使用GAMS平台,基于PATH和CONOPT等求解软件。在具体的建模过程中,基于基准年2017年的数据,使用校准方式,校准生产函数、效用函数、进出口合成函数的参数。

### 四、数据来源、模型参数及情景设置

#### (一) 社会核算矩阵(SAM)的编制

TECGE模型的社会核算矩阵(SAM),是基于我国国家统计局编制的2017年149部门的投入产出表(国民经济核算司,2019)、《中国统计年鉴2018》(国家统计局,2019)等数据归并而成的。将整个经济划分为12个产业部门,其中能源部门包括煤炭、石油、天然气、化石电力和清洁电力5个部门。我国投入产出表中只有“电力、热力的生产和供应”,并没有把化石电力和清洁电力进行区分。本文首先根据2017年火电与可再生能源的发电量比例对总发电量进行拆分,然后通过双比例平衡法、结合清洁电力的中间消费比例,对投入产出表进行调平,最后得到12个部门的微观SAM表。

#### (二) 参数设定

TECGE模型中的参数通过校准的方法设置,包括投入产出系数、各种税率、劳动和资本在要素收入分配上的份额、各种函数的份额参数等。校准的目的是使计算得到的参数能够重复基期的均衡数据,这样通过SAM表计算得到的参数,能使基期SAM表数据成为CGE模型的一个解。

模型的弹性参数,包括生产函数的替代弹性、进出口函数中的阿明顿弹性和转换弹性等参数。本文对于这些弹性的选取,主要参考有关的研究文献,如贺菊煌等(2002)、赵永和王劲峰(2008)、Willenbockel(2006)、Zhai和Herter(2005)、Zhang(2002)以及郭正权等(2014)等文献。弹性参数取值如表1所示。

碳排放系数主要通过化石能源的标准煤折算系数和各类能源的碳排放系数计算得到。化石能源的标准煤折算系数来自2018年《中国能源统计年鉴》,各类能源碳排放系数参考《2006年IPCC国家温室气体排放清单指南》。

模型动态模块的参数主要包括不同年份人口增长率、居民储蓄率、全要素生产率的增长

表 1 TECGE 模型的弹性参数取值选择

弹性定义	弹性值
$KL$ 与 $E$ 间替代弹性	0.5
$K$ 与 $L$ 间替代弹性	0.8
化石能源与电力间替代弹性	0.5
煤炭与油气间替代弹性	0.5
石油与天然气间替代弹性	0.8
进口品与国产品间的阿密顿弹性	2.0
国内消费与出口间转换弹性	4.0

率和能源效率变化率等参数。人口增长率参考联合国对我国人口增长率的预测数据,对模拟时期内的人口增长率进行设定。对于居民储蓄率,主要参考发达国家的居民储蓄变化规律,并结合参考文献如李平等(2017)的相关数据进行计算。全要素生产率一般采用索罗余值法计算,大多数学者也采用计量经济学的方法对全要素生产率、能源效率变化率进行研究和推算。本文通过相关计算分别取2%为我国2017—2035年的全要素生产率增长率和能源效率变化率。

### (三)情景设置

本文结合清华大学的2020年最新研究成果《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》,在考虑2000—2019年我国能源消费产生的二氧化碳排放基础上,设置了我国未来2020—2035年能源消费产生的二氧化碳排放路径。根据不同的碳排放峰值年份和峰值水平,设定了四个情景,分别为基准情景(2030年碳达峰,记为S1)、节能减排情景(2027年碳达峰,记为S2)、强化节能减排情景(2025年碳达峰,记为S3)、超强节能减排情景(2023年碳达峰,记为S4),其中后三个情景为强化政策情景,分别设定我国在2027年、2025年和2023年提前碳达峰,并与基准情景进行比较,考察我国2030年提前碳达峰相比2030年碳达峰的宏观经济影响。

在四个情景的设置中,主要区别在于能源消费产生的二氧化碳排放路径,即碳达峰时间和峰值水平不同,因此不同年份的碳排放量有差别。不同年份能源有关的碳排放量是外生变量,经济系统中二氧化碳的排放价格是内生的,也各自不同。图3显示了四种情景下的二氧化碳排放路径。

图3中,基准情景(S1),中国二氧化碳排放在2030年达峰,峰值为108亿吨,2030年后排放逐渐下降,2035年排放量为106.9亿吨。节能减排情景(S2),中国二氧化碳排放在2027年达峰,峰值为107亿吨,2027年后排放回落,2035年排放量为104.2亿吨。强化节能减排情景(S3),中国二氧化碳排放在2025年达峰,峰值为105.8亿吨,2025年后排放回落,2035年回落到102亿吨。超强节能减排情景(S4),中国二氧化碳排放在2023年达峰,峰值为103.6亿吨,2023年后排放回落,2035年回落到99.4亿吨。

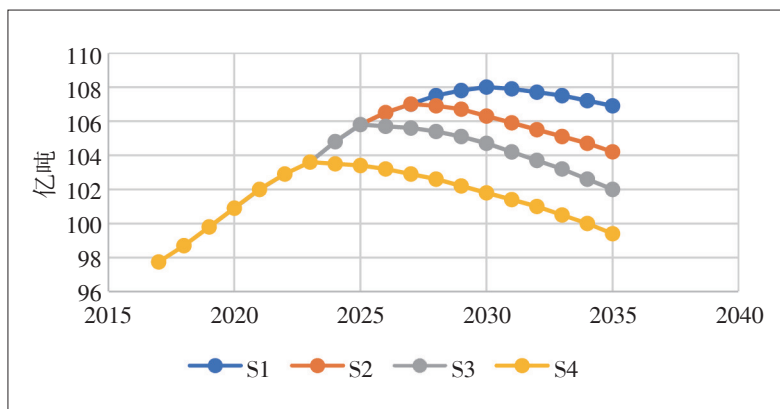


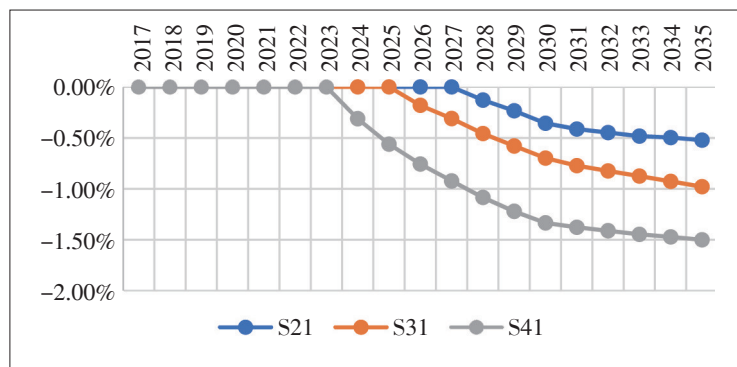
图3 不同达峰情景下能源消费产生的CO<sub>2</sub>排放路径

在模型模拟中,不同年份的排放量是外生的冲击变量,因此二氧化碳的排放价格是内生变量,在模型中通过内生不同年份的政府征收碳税,来实现碳排放达峰的时间和排放水平。由于碳价的变化,不同部门生产的商品价格发生变化,使经济系统偏向于非能源密集型部门。由于商品价格的变化,部门资本收益率也随之变化,从而影响第二年新增投资在部门之间的分配,使投资偏向于非能源密集型部门。通过价格的作用,市场自动调整了经济系统的产业结构和能源结构,使能源结构和产业结构更加清洁化。

## 五、模拟结果分析

### (一)提前碳达峰对GDP的影响

不同时间我国能源二氧化碳排放达到峰值,都会对经济增长产生影响,降低国内生产总值(GDP)的增速。下面以2030年二氧化碳排放达峰为基准情景,分别将2027、2025和2023年能源二氧化碳排放达峰情景与基准情景比较,得到不同碳达峰情景对GDP的影响。图4显示了不同提前碳达峰情景相对2030年碳达峰情景使GDP受到的影响。



注:S21是指情景S2与情景S1比较,其他符号类似。下同。

图4 提前碳达峰情景相对2030年碳达峰情景对GDP的影响

从图4可以看出,2023、2025、2027年碳达峰情景中,碳达峰的第二年开始,GDP相对于2030年碳达峰情景中对应年份的GDP都出现下降。随着时间的延伸,相比基准情景的不同年份GDP,下降的比例逐渐增大。如2023年碳达峰情景,相对于2030年碳达峰的基准情景,2024年GDP下降了0.31%,2025年GDP下降了0.56%,2030年GDP下降了1.34%,而2035年下降了1.50%。这种结果可应用经济学理论得到较好的解释。随着碳达峰时间点的设置,后续年份能源消费的二氧化碳排放必然低于峰值,这种要求实际上给经济系统形成了倒逼机制,为二氧化碳排放设置了外生的约束,使经济系统中二氧化碳的价格为正,化石能源密集型产业的成本上升,生产产量将下降,使整个经济系统GDP出现下降。同时,由于碳达峰路径的特点决定了后续年份的二氧化碳排放空间将逐渐减少,排放配额越来越稀缺,二氧化碳的排放价格逐渐上升,化石能源密集型的产业商品成本逐渐增大,产量逐渐下降,整个经济系统GDP相比基准情景下降的比例更大。

从图4可以看出,2023、2025、2027年碳达峰情景,相比基准情景,碳达峰时间越往后,对GDP的影响越小。如相比2030年基准情景,2023年碳达峰情景GDP下降1.34%,2025年碳达峰情景GDP下降0.7%,而2027年碳达峰情景GDP下降0.36%。这种结果可以用碳排放的影子价格来解释。2023年碳达峰情景中,随着碳达峰行动的实施,经济系统的二氧化碳排放的影子价格逐渐上升,到2030年二氧化碳的影子价格已经达到了较高的水平。二氧化碳影子价格越大,排放空间越稀缺,二氧化碳排放成本越高,能源密集型的产业生产成本上升,单位产品的GDP随之下降。碳达峰时间点越延后,排放空间越大,二氧化碳排放的影子价格上升越慢,从而对经济系统GDP的影响越小。

## (二)提前碳达峰对碳税的影响

在CGE模型动态模拟中,将不同年份的二氧化碳排放量作为外生变量,不同年份的碳税作为内生变量,因此,考察不同碳达峰情景下的二氧化碳排放路径,可以模拟得到不同年份碳税变化路径,如图5所示。

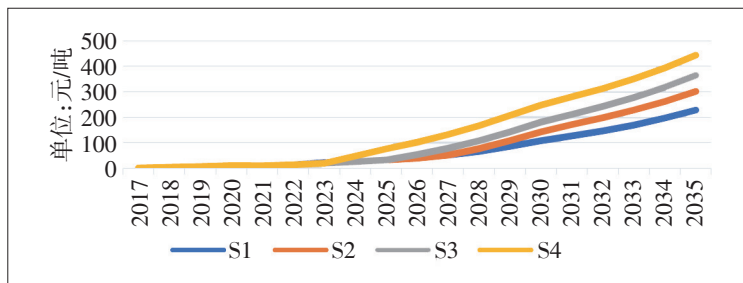


图5 不同碳达峰情景下不同年份碳税变化

从图5可以看出,对于每种碳达峰情景,从2017年开始不同年份就要求有一定的碳税,只是碳税价格较小,低于10元/吨二氧化碳;从碳达峰年份开始,碳税价格逐渐上升,上升速度逐



渐增快。比较不同碳达峰情景,越早碳达峰情景,相同的对应年份碳税价格越高。如在2030年,四种碳达峰情景下碳税分别为107、142、180、247元/吨二氧化碳,而在2035年,四种碳达峰情景下碳税分别为227、301、364、443元/吨二氧化碳。不同碳达峰情景下不同年份碳税的变化,与经济学的理论和规律是相符合的。因为越早碳达峰,整个经济系统排放空间越稀缺,二氧化碳排放空间价值越大,碳税越高。对于同一种碳达峰情景,碳达峰前的排放空间仍在增大,碳排放的稀缺性存在,但不是最大,而碳达峰后的每一年,排放空间在逐渐缩小,碳排放空间越来越稀缺,因此碳排放空间的价格逐渐上升,碳税的价格逐渐升高。纵观四种排放情景路径,发现每种情景在达峰前每年的碳税不为零,说明作为外生变量设置的四种情景的每年排放量小于经济系统不采取任何减排措施的排放量,也说明2030年达峰的基准情景的排放路径,也是需要努力减排的,只是四种达峰情景中最晚达峰的一种减排路径而已。

### (三)提前碳达峰对主要宏观经济变量的影响

不同情景下一些宏观经济变量的变化如表2所示。表2显示了不同碳达峰情景相比基准情景2030年的宏观经济变量的变化。从表2可以看出,农村居民消费、城镇居民消费、总投资、总进口、总出口、总产出和总需求等宏观经济变量,相比基准碳达峰情景,都有所下降。同一年份,越早碳达峰的情景宏观经济变量下降比例越大;如总产出,2030年情景S4比情景S1下降1.458%,而情景S2比情景S1下降0.39%。这些宏观经济变量的变化,与经济学理论是一致的。由于存在碳达峰约束,整个经济系统的成本在上升,经济趋于萎缩,一些主要宏观经济变量趋于下降。越早碳达峰,经济系统越早面临制约,宏观经济变量变化幅度越大。

表2 不同情景下宏观经济变量的变化 (单位:%)

	2030年		
	S21	S31	S41
农村居民消费	-0.491	-0.959	-1.826
城镇居民消费	-0.411	-0.804	-1.531
总投资	-0.404	-0.793	-1.520
总进口	-0.300	-0.587	-1.116
总出口	-0.279	-0.546	-1.038
总产出	-0.390	-0.764	-1.458
总需求	-0.393	-0.771	-1.472

### (四)提前碳达峰对产业结构的影响

不同碳达峰情景下产业结构的变化如表3所示。表3列出了不同情景相比基准情景在2030年三大产业的变化趋势。从表3可以看出,三种提前碳达峰情景相比基准情景,第一产业占比下降,第二产业占比下降,第三产业占比上升。越早碳达峰情景,第一产业、第二产业

占比下降得越多,第三产业占比上升得越多,越有利于产业结构转型和优化。这些模拟结果的变化趋势,与经济学判断是一致的。碳排放越早达峰,碳排放的约束越早,越早进行清洁能源的投资和经济结构的转型,第一、二产业的占比下降得越多,第三产业占比上升得越快。

表3 不同情景下产业结构的变化 (单位:%)

	2030年		
	第一产业	第二产业	第三产业
S21	-0.0028	-0.0109	0.0136
S31	-0.0054	-0.0214	0.0268
S41	-0.0104	-0.0412	0.0517

### (五)提前碳达峰对能源需求和结构的影响

不同碳达峰情景下不同年份能源需求量的变化,也是广泛关注的话题。本文将不同情景下的不同年份能源需求量与基准情景下对应年份的能源需求量进行了比较,如表4所示。

表4 不同情景下能源需求量的变化 (单位:%)

年份	S21	S31	S41
2023	0.00	0.00	0.00
2024	0.00	0.00	-1.18
2025	0.00	0.00	-2.15
2026	0.00	-0.71	-2.93
2027	0.00	-1.23	-3.62
2028	-0.53	-1.84	-4.30
2029	-0.96	-2.35	-4.89
2030	-1.48	-2.87	-5.39

从表4可以看出,相对基准情景,即2030年二氧化碳排放达峰情景,三种提前碳达峰情景下不同年份的能源需求量,都有所减少。提前碳达峰情景,在碳达峰年份以前,不同情景下能源需求量相同;碳达峰年份的第二年,能源需求量相比对应年份就开始减少,越往后延续,减少的比例逐渐增大。三种提前碳达峰情景中,2023年碳达峰情景S4中,能源需求量下降得最多,2024年相比基准情景S1下降1.18%,而2030年下降5.39%。主要原因是碳达峰约束,提高了经济中碳排放的影子价格,提高了经济的成本,导致了经济总量的下降,相应的能源需求下降。同时,碳排放价格水平的提高,促进了节能和能效提升,加快了清洁能源的替代,促进了产业技术进步和产业结构转型,导致能源总需求量下降得更多。如2030年情景4与情景1比较即S41,总产出下降1.458%(见表2),而能源需求下降5.39%(见表4)。

碳排放达峰时间的提前,驱动了能源结构的转型,不同情境下清洁能源占比也出现差异,

如表5所示。表5显示了不同提前碳达峰情景相对基准情景、同一年份清洁能源在总能源需求中的占比出现的差异。

表5 不同提前碳达峰情景相对基准情景清洁能源的占比差异

年份	S21	S31	S41
2030	0.02%	0.03%	0.06%
2035	0.11%	0.21%	0.32%

从表5可以看出,不同提前碳达峰情景相对基准情景,2030年清洁能源在总能源需求中的占比差异从0.02%提高到0.06%;而2035年清洁能源在总能源需求中的占比差异从0.11%提高到0.32%。时间越往后延伸,清洁能源在总能源需求中的占比差异逐渐增大;碳达峰时间越提前,相对于基准情景清洁能源在总能源需求中的占比越高。

#### (六)模拟结果的参数敏感性分析

由于模型中部分参数的外生设定会给模拟结果和模型的稳定性带来影响,为分析关键参数的影响程度,本文选取对经济增长和二氧化碳排放影响较大的部分关键参数,进行了敏感性分析。关键参数敏感性分析的情景设计见表6。表6显示了对全要素生产率、不同要素之间的替代弹性的变化设置。

表6 敏感性分析的情景设计

参数	变化范围	所有变动都相对于基准情景
TFP	↑10% ↓10%	各个部门的全要素生产率提高或降低10%
ELA-KL-E	↑20% ↓20%	能源与资本劳动组合间的替代弹性提高或降低20%
ELA-KL	↑20% ↓20%	资本与劳动间的替代弹性提高或降低20%
ELA-FE	↑20% ↓20%	化石能源与电力之间的替代弹性提高或降低20%
ELA-C-OG	↑20% ↓20%	煤炭与石油天然气组合间的替代弹性提高或降低20%
ELA-OG	↑20% ↓20%	石油与天然气间的替代弹性提高或降低20%

注:↑n%表示提高n%,↓n%表示降低n%。TFP表示部门全要素生产率,ELA-KL-E表示资本劳动组合KL与能源E间的替代弹性,ELA-KL表示资本与劳动间的替代弹性,ELA-FE表示化石能源与电力间的替代弹性,ELA-C-OG表示煤炭与石油天然气组合间的替代弹性,ELA-OG表示石油与天然气间的替代弹性。

敏感性分析的结果如表7所示。从表7可以看出,全要素生产率的提高(或降低)能大大提高(或降低)经济增长的幅度,同时带来二氧化碳排放量和能源消费量的增加(或减少)。替代弹性相比TFP的影响则相对较小,能源之间替代弹性的影响程度要小于能源与资本劳动力复合品之间的替代弹性的影响。可见,各个部门全要素生产率的提高,对经济增长的作用很大。加快研究和开发,促进技术进步,推动各个部门全要素生产率的提高,是抵消二氧化碳减排对经济负面效应的重要选项。而生产过程不同种类的弹性变化影响较小,因此,模型模拟

结果的敏感性较小,具有较大的稳定性。

表7 不同情景下的GDP、能源消费与二氧化碳排放相对基准情景的变化率 (单位:%)

变化范围	GDP	能源消费	CO <sub>2</sub> 排放
TFP ↑ 10%	11.82	10.67	5.83
TFP ↓ 10%	-11.45	-10.49	-5.61
ELA-KL-E ↑ 20%	0.035	-0.041	-0.023
ELA-KL-E ↓ 20%	-0.024	0.032	0.013
ELA-KL ↑ 20%	0.011	-0.001	-0.001
ELA-KL ↓ 20%	-0.013	0.001	0.001
ELA-FE ↑ 20%	0.016	-0.024	-0.085
ELA-FE ↓ 20%	-0.012	0.023	0.079
ELA-C-OG ↑ 20%	0.009	-0.011	-0.017
ELA-C-OG ↓ 20%	-0.002	0.007	0.009
ELA-OG ↑ 20%	0.004	-0.003	-0.007
ELA-OG ↓ 20%	-0.002	0.002	0.005

### (七)本文模拟结果与现有研究的比较

下面将本文研究结果与现有的研究结果进行比较,以证明研究结果的可信度。Wang和Zou(2014)构建了中国多区域CGE模型并模拟分析了13种政策及组合对碳排放峰值和GDP的综合影响,认为越早碳达峰,碳排放控制得越好,但成本不可忽视,峰控政策将使GDP下降2.96%至5.92%。刘宇等(2014)运用动态GTAP-E模型分析了中国分别在2025年、2030年和2040年碳达峰对宏观经济和产业部门的影响,认为碳达峰时间越早对宏观经济的影响越大,在2025年、2030年和2040年碳达峰,中国2050年累积GDP分别下降20.86%、14.79%和8.68%,据此估算可得到基于2040年基准情景,2025年、2030年碳达峰情景下GDP年均下降率为0.931%和0.797%。Mi等(2017)运用能源气候综合模型(IMEC)以2030年碳达峰为基准情景,分析了中国二氧化碳排放2030年前碳达峰的社会经济影响,研究认为2026—2029年不同年份碳达峰情景累计GDP损失为2.93%~16.45%。据此估算2026—2029年不同年份碳达峰情景下年均GDP损失约为0.49%~1.98%。朱佩誉和凌文(2020)运用动态CGE模型研究了不同碳排放达峰情景对产业结构的影响,设置了减排情景(2035年碳达峰)、强减排情景(2030年碳达峰)、强强减排情景(2025年碳达峰)三种情景,不同情景下对2030年GDP的影响分别为-0.4757%、-0.5725%和-0.6577%。卓骏等(2018)运用动态CGE模型研究了碳排放约束对我国经济的影响,设置了基准情景(2040年碳达峰)、节能排情景(2030年碳达峰)、强节能情景(2025年碳达峰)三种情景,不同情景下对2030年GDP的影响分别为-0.4710%、-0.5668%

和-0.6512%。Yuan等(2020)运用CGE模型对能源和碳排放目标的协同效应进行了研究,设置了基准情景、多种碳价和能源投资情景,从2020年开始到2050年不同情景下GDP累计损失分别为-0.29%、-1.19%、-1.82%和-2.43%;相应年均GDP损失分别为-0.15%、-0.6%、-0.93%和-1.23%(采用贴现率5%)。

与上述现有研究类似,本文采用动态CGE模型,运用最新的2017年投入产出表数据,以2030年碳排放达峰为基准情景,模拟了2023、2025、2027年前不同碳达峰情景下2030、2035年的宏观经济影响,对2030年GDP的相对损失分别为-0.31%、-0.56%和-1.34%;对2035年GDP的相对损失分别为-0.53%、-0.98%和-1.52%。通过与上述现有研究结果比较,并考虑情景设置、模型采用的投入产出数据、基准情景设置以及比较GDP的年份差别,可以看出本论文的研究结果具有较高的可信度。

## 六、结论及政策建议

随着全球应对气候变化进程的不断推进、中国经济社会高速发展的同时受到能源环境约束,中国积极应对气候变化,成为国际应对气候变化的引领者。自巴黎气候大会上中国提出自主贡献承诺后,2020年9月联合国大会上中国又提出了力争2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标,引起了国内外的广泛关注。中国碳排放提前达峰,对国内外具有积极而深远的意义。中国在2030年前碳达峰是基础,中国只有实现了碳达峰目标,才能够实现2060年前碳中和;而实现达峰的时间越早,越有利于实现碳中和目标。中国明确了提前达峰目标,为我国生态环境保护和高质量发展提供了清晰的碳排放约束,更有力地促进了中国的低碳发展进程。同时提前达峰和碳中和的宣示,体现了我国的国际责任和大国担当,提振了国际社会应对气候变化的雄心,推进了国际气候协同治理的进程。

本文在广泛研究国内外现有的二氧化碳排放达峰文献的基础上,采用动态可计算一般均衡模型TECGE,运用最新的2017年投入产出数据,设置了几种可能的二氧化碳达峰时间及排放峰值水平等情景,定量分析我国强化碳达峰承诺对未来经济的影响。具体目标是分析我国若在2023、2025和2027年二氧化碳排放达峰,与2030年碳达峰相比,对我国宏观经济发展及碳排放价格的影响。

根据不同的排放峰值年份和峰值水平,设定了四个情景,分别为2030、2027、2025、2023年碳达峰,峰值分别为108亿吨、107亿吨、105.8亿吨和103.6亿吨。再分别考察我国2030年前碳达峰情景,与2030年碳达峰情景相比对我国宏观经济的影响。

研究表明,各个提前碳达峰情景相比基准情景,碳达峰的第二年开始对应年份的GDP都出现下降。随着时间的延伸,GDP下降的比例逐渐增大。碳达峰时间越往后,对GDP的影响越小。四种碳达峰情景从2017年开始不同年份就要求有一定的逐渐上升的碳税;从碳达峰



年份开始碳税上升速度增快。比较不同碳达峰情景,越早碳达峰情景,相同的对应年份税率越高。农村居民消费、城镇居民消费、总投资、总进口、总出口、总产出和总需求等宏观经济变量,相比基准情景,都有所下降。越早碳达峰情景,各自年份的宏观经济变量下降比例越大。三种提前碳达峰情景相比基准情景,第一产业占比下降,第二产业占比下降,第三产业占比上升。越早碳达峰,第一产业占比和第二产业占比下降得越多,第三产业占比上升得越多,越有利于产业结构转型和优化。中国提前碳达峰,对经济高质量发展、提振国际社会应对气候变化的雄心具有积极而深远的意义。实现达峰时间越早,越有利于未来实现碳中和目标,但对整个经济增长的影响具有越大的负面效应。因此,需要将碳达峰目标 and 经济增长目标有机结合起来,统筹考察,协调行动。

通过CGE模型的定量分析,结合中国的能源环境状况,为实现提前碳达峰目标并保持经济增长路径,本文提出如下政策建议:

第一,加快落实主要能源消费和碳排放行业的排放达峰规划和行动方案。我国能源、工业、建筑、交通等领域的高能耗行业,需要超前制定行业绝对减排及就业人员分流的专项规划,特别是煤炭、钢铁、建材、石油化工等行业基本已过了排放峰值,不仅需要大幅度消减过剩产能,而且要逐渐转向低碳或零碳。电力部门需要减少碳排放,增大绿色电力比例,直至完全脱碳,同时需要大规模扩大电力应用,在尽可能多的经济部门实现电气化。交通部门需要逐步形成绿色低碳交通运输体系,实现铁路的全面电气化,普及城市轨道交通。我国碳达峰行动方案还需要与优化产业结构和能源结构紧密结合,大力发展低能耗的先进制造业、高新技术产业、现代服务业,大力发展清洁能源。

第二,从经济各部门的技术进步、资本、劳动和管理效率等角度推动经济增长。不仅采用先进高效的能源效率技术和二氧化碳排放技术,而且积极采用各部门先进的生产技术,提高各个部门的全要素生产率,提高资本和劳动等生产要素的边际产出,优化利用资本和劳动等资源,提高各部门生产、流通和消费过程的管理效率,使经济系统的可持续增长与二氧化碳减排有机结合起来。

第三,促进消费绿色低碳转型。要全方位稳步推进低碳进程,消费者的消费行为方式的改变,将是一个至关重要的因素。由于消费形式的变化,偏向于绿色低碳型,产品需求结构将发生变化,对产业链、产品链、价值链、能源链的延伸和融合有重大的推动意义。同时,加速全社会电能替代,将推进城乡居民消费电气化,有利于减少能源消费和碳排放。

第四,增大新能源和低碳产业的投资和进出口贸易。增加科技研发的投入,推动新能源、低碳产业领域的技术研发、产品的创新和市场的拓展,有效地开发各类绿色技术,不断突破高端瓶颈技术,使国际发明专利申请量快速上升,逐步建成世界规模最大的国内绿色技术市场,推动经济绿色低碳持续发展。加强低碳和先进类产品的进出口贸易及技术的国际合作。在

低碳类产品、先进类产品的进出口方面,继续保持开放的态势,积极参与国际贸易和合作,降低成本,提高能源效率和经济效率,提高资源的利用效率。

第五,积极推进我国碳市场的建设和运营,并尽快补充征收碳税。确保碳排放的价格信号在生产和消费决策中的核心作用,同时明确能源有关的资源税、环境税等税种,使各种税种的碳排放价格信号一致和相互协同。参与我国碳市场的主体主要是各个行业的大型排放企业,而中小型排放企业,由于管理成本较大,一般不会参与碳市场,因而需要尽快开始对中小型排放企业补充征收碳税,使全社会的企业主体在生产决策时都能够充分考虑碳排放价格的影响。

### 参考文献:

- [1] 柴麒麟,徐华清. 基于IAMC模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 37-46.
- [2] 段宏波,汪寿阳. 中国的挑战:全球温控目标从2℃到1.5℃的战略调整[J]. 管理世界, 2019, 35(10): 50-63.
- [3] 郭正权,郑宇花,张兴平. 基于CGE模型的我国能源-环境-经济系统分析[J]. 系统工程学报, 2014, 29(5): 581-591.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴2018[M]. 北京:中国统计出版社, 2019.
- [5] 国民经济核算司. 2017年中国投入产出表[J]. 北京:中国统计出版社, 2019.
- [6] 何建坤. CO<sub>2</sub>排放峰值分析:中国的减排目标与对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 1-9.
- [7] 贺菊煌,沈可挺,徐嵩龄. 碳税与二氧化碳减排的CGE模型[J]. 数量经济技术经济研究, 2002, 19(10): 39-47.
- [8] 姜克隽,贺晨旻,庄幸等. 我国能源活动CO<sub>2</sub>排在2020—2022年之间达到峰值情景和可行性研究[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 167-171.
- [9] 李季,杨天泓. 碳减排政策对辽宁经济和产业竞争力的影响——基于CGE模型的模拟分析[J]. 东北财经大学学报, 2019, (3): 91-96.
- [10] 李平,娄峰,王宏伟. 2016—2035年中国经济总量及其结构分析预测[J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 13-20.
- [11] 刘长松. 我国实现碳排放峰值目标的挑战与对策[J]. 宏观经济管理, 2015, (9): 46-50.
- [12] 刘宇,蔡松峰,张其仔. 2025年、2030年和2040年中国二氧化碳排放达峰的经济影响——基于动态GTAP-E模型[J]. 管理评论, 2014, 26(12): 3-9.
- [13] 鲁传一. 能源环境一般均衡分析[M]. 北京:经济科学出版社, 2018.
- [14] 鲁传一,陈文颖,刘滨. 现代化建设中的产业转型对经济发展与碳排放影响研究[C]//钱小军,周剑,吴金希. 新时代绿色低碳发展与转型:清华大学绿色经济与可持续发展研究中心政策研究报告2018. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [15] 马丁,陈文颖. 中国2030年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 1-4.
- [16] 莫建雷,段宏波,范英,汪寿阳. 《巴黎协定》中我国能源和气候政策目标:综合评估与政策选择[J]. 经济研究, 2018, 53(9): 168-181.

- [17] 潘家华. 压缩碳排放峰值 加速迈向净零碳[J]. 环境经济研究, 2020, 5(4): 1-10.
- [18] 齐绍洲, 张振源. 经济增长与贸易隐含碳——基于生产侧与消费侧碳排放的视角[J]. 环境经济研究, 2017, 2(2): 1-17.
- [19] 石敏俊, 徐瑛. 中国经济绿色发展的现状与实现路径[J]. 环境保护, 2018, 46, (10): 14-18.
- [20] 许广月. 中国二氧化碳排放峰值研究述评[J]. 重庆工商大学学报(社会科学版), 2019, 36(4): 11-24.
- [21] 许士春, 习蓉, 何正霞. 中国能源消耗碳排放的影响因素分析及政策启示[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 2-12.
- [22] 王勇, 王恩东, 毕莹. 不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于CGE模型的分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1896-1908.
- [23] 王志轩. 我国能源消费碳排放峰值水平估计及影响分析[J]. 中国电力企业管理, 2014, (12): 28-29.
- [24] 吴力波. 新常态下上海市绿色转型发展路径与2015—2030情景研究[J]. 上海节能, 2016, 3: 117-125.
- [25] 张兵兵, 徐康宁, 陈庭强. 技术进步对二氧化碳排放强度的影响研究[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 567-576.
- [26] 赵永, 王劲峰. 经济分析CGE模型与应用[M]. 北京: 中国经济出版社, 2008.
- [27] 卓骏, 刘伟东, 丁文均. 碳排放约束对我国经济的影响——基于动态CGE模型[J]. 技术经济, 2018, 37(11): 102-108.
- [28] 朱佩誉, 凌文. 不同碳排放达峰情景对产业结构的影响——基于动态CGE模型的分析[J]. 财经理论与实践, 2020, 41(5): 110-118.
- [29] Elzen, M. D., H. Fekete, N. Höhne, et al. Greenhouse Gas Emissions from Current and Enhanced Policies of China until 2030: Can Emissions Peak before 2030?[J]. Energy Policy, 2016, 89: 224-236.
- [30] Green, F. and N. Stern. China's Changing Economy: Implications for Its Carbon Dioxide Emissions[J]. Climate Policy, 2017, 17: 423-442.
- [31] Lu, C. Y., Q. Tong, and X. M. Liu. The Impacts of Carbon Tax and Complementary Policies on Chinese Economy[J]. Energy Policy, 2010a, 38(11): 7278-7285.
- [32] Lu, C., X. Zhang, and J. He. A CGE Analysis to Study the Impacts of Energy Investment on Economic Growth and Carbon Dioxide Emission: A Case of Shaanxi Province in Western China[J]. Energy, 2010b, 35(11): 4319-4327.
- [33] Lee, H., J. O. Martins, and D. Mensbrugge. The OECD Green Model: An Updated Overview[R]. 1994.
- [34] Mi, Z., Y. M. Wei, B. Wang, et al. Socioeconomic Impact Assessment of China's CO<sub>2</sub> Emissions Peak Prior to 2030[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 42: 2227-2236.
- [35] Wang, Y. and L. L. Zou. The Economic Impact of Emission Peaking Control Policies and China's Sustainable Development[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, (5): 162-168.
- [36] Willenbockel, D. Structural Effects of a Real Exchange Rate Revaluation in China: A CGE Assessment[EB/OL]. (2006-12-25)[2021-04-05]. [https://mpr.ub.uni-muenchen.de/920/1/MPRA\\_paper\\_920.pdf](https://mpr.ub.uni-muenchen.de/920/1/MPRA_paper_920.pdf).
- [37] Yuan, Y., et al. Synergizing China's Energy and Carbon Mitigation Goals: General Equilibrium Modeling and Policy Assessment[J]. Energy Economics, 2020, 89: 104787.
- [38] Zhang, X. L., V. J. Karplus, T. Qi, et al. Carbon Emissions in China: How Far Can New Efforts Bend the Curve[J]. Energy Economics, 2016, 54, 388-395.
- [39] Zhai, F. and T. Herter. Impacts of the Doha Development Agenda on China: The Role of Labor Markets and Complementary Education Reforms[R]. 2005.
- [40] Zhang, H. The Impact on China's Economy of Its Accession to the WTO: A Computable General Equilibrium (CGE) Analysis[D]. New York: Northern Illinois University, 2002.

nomics, as well as its expanded interpretation from the perspective of emerging economics branches. Then, this paper summarizes the research methods of rebound effect, discusses the application range, the advantages and disadvantages, as well as the improvement of different methods. And finally points out the existing problems in the study of energy rebound effect and proposes the issues that deserve attention in the future.

**Keywords:** Rebound Effect; Energy Efficiency; Energy Demand; Neoclassical Economics; Emerging Economics

**JEL Classification:** P18; Q41; Q43

(责任编辑:朱静静)

---

(上接第30页)

## The Scenarios of China Reaching the Peaking of Carbon Emission Before 2030 and Its Macroeconomic Implications

Lu Chuanyi<sup>a</sup> and Chen Wenyong<sup>b</sup>

(a: Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University;

b: Institute for Energy, Environment and Economy, Tsinghua University)

**Abstract:** At the 75th session of UN General Assembly, China proposed the goals of carbon emission peaking before 2030 and becoming carbon neutral by 2060, which led the global response to climate change and attracted wide attention and praise all over the world. It is important for the research on the realization path and its economic impact of reaching the peak before 2030. In this paper, the dynamic computable general equilibrium model TECGE is used to analyze the macroeconomic impact of enhanced peaking commitment of China. Four scenarios are set for the CO<sub>2</sub> emission peaks in 2030, 2027, 2025 and 2023, with the peaks of 10.8, 10.7, 10.58 and 10.36 billion tons respectively. The impact of the earlier peaking compared with the peaking in 2030 is simulated respectively. The results show that compared with the benchmark scenario, the earlier for the peak year, the higher the carbon price is for the corresponding year. The GDP and other macroeconomic variables such as total consumption, total imports and exports, etc. are declined, but the proportion of tertiary industry are increased. The earlier is the peaking year, the more declined for the macroeconomic variables, and the more increased for the proportion of tertiary industry. After the quantitative analysis using the CGE model, some policy suggestions are put forward to achieve the goal of reaching the carbon emission peak earlier and promote high quality economic development.

**Keywords:** Carbon Emission Peak Earlier; CGE; Carbon Tax; Macro-economy

**JEL Classification:** E17, O13, Q40

(责任编辑:卢 玲)