

碳中和背景下中国能源中短期预测研究

毛亚林

(国家能源集团技术经济研究院,北京102211)

摘要:2020年9月,中国政府在第75届联合国大会上提出碳达峰和碳中和目标。“2060年实现碳中和”愿景将对中国能源结构转型产生深刻影响。运用CHINAGEM模型,针对当前政策情景(基准情景)和碳中和情景(政策情景)进行模拟分析,预测分析了2020—2040年中国能源发展状况,包括一次能源消费总量及其构成、终端能源消费量及其构成和发电量及其构成。基于分析结果,提出了实现碳中和总目标下,中短期内各项宏观指标的阶段性目标。

关键词:碳中和;能源消费;可计算一般均衡模型

中图分类号:F426 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2021)08—0107—09

一、引言

2020年9月,习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上宣布: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。2020年12月,在气候雄心峰会上,习近平总书记进一步宣布:到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,森林蓄积量将比2005年增加60亿立方米,风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。2020年中央经济工作会议明确将做好碳达峰、碳中和工作确定为2021年八大重点任务之一。“2060年实现碳中和”愿景将对中国能源结构转型产生深刻影响。为此,本文运用递归动态可计算一般均衡模型,即CHINAGEM模型,针对当前政策情景(基准情景)和碳中和情景(政策情景)进行模拟分析,探讨2020—2040年中国未来中短期的能源发展变化趋势。

二、文献综述

传统上有关能源部门预测的研究方法主要包括时间序列分析模型、非线性灰色多变量模型和神经网络预测模型等,这类测算方式存在一定的局限性(陈师等,2014;韩松等,2016;Wang和Ye,2017;Wei et al, 2019;Niu et al,2020)。能源部门预测等方面的研究不应仅局限于单一的能源系统,而是涉及经济、环境、社会等多个系统的相互作用。因此多数学者选取能源综合评估模型对能源部门进行系统性分解和预测。能源综合评估模型在考虑能源技术进步的基础上,对不同情景模拟下的能源消费需求、能源结构转型、碳排放趋势等因素进行预测,该模型可分为自上而下型、自下而上型和混合模型三种类型(Luderer et al,2016)。

第一,自上而下型研究方法主要围绕可计算一般均衡模型(Computable general equilibrium,CGE)进行拓展,可以将核心模型划分为生产模块、消费模块、出口模块、动态机制模块等部分,并根据能源、经济、环境等部门主体的生产函数和需求函数进行耦合,在历史数据和参数设定的基础上研究不同能源政策条件下能源需求、碳排放量等因素的变化。其中,国内学者们开发的代表性拓展模型包括:北京大学能源环境经济与政策研究室的能源-环境-经济可持续发展综合评价模型(IMED-CGE模型),主要用于中国空气污染减少(Dong et al,2015)、能源预测(Dai et al,2016;Li et al,2019)和应对气候变化政策评估(Dai et al,2011;Dong et al, 2017;Wang et al,2018)等方面的研究;中国科学院科技战略咨询研究院基于GEMPACK(General Equilibrium Modelling PACKage)构建的CASGEM(Chinese Academy of Sciences General Equilibrium Modelling)模型,能够

收稿日期:2021—04—13

基金项目:国家能源集团2030重大项目先导项目“国家中长期碳减排路径与能源结构优化战略研究”(GJNY2030XDXM-19-20.1)

作者简介:毛亚林,硕士,国家能源集团技术经济研究院科研发展部主任(中共国家能源集团党校第2期优秀年轻干部培训学员),高级工程师,研究方向:能源政策、能源规划与能源战略。

对中国煤炭资源税改革、能源清洁替代、节能等能源和环境政策的中长期影响进行综合评价(Lu et al, 2017; Liu and Zhou, 2018);同样的,国家信息中心基于GEMPACK平台构建了SICGE(State Information Center General Equilibrium)模型,主要为经济发展、能源需求、碳排放强度等国家层面的指标自上而下分解提供决策支持(李继峰等, 2017; 李继峰等, 2019)。第二,自下而上型研究方法主要指的是能源系统优化模型,该方法能够充分考虑能源技术、成本等因素,其中应用较为广泛的是由瑞典斯德哥尔摩国际环境研究院开发的LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning System)模型。在该模型软件平台的基础上,Zhou et al(2013)构建了自下而上的中国终端能源消费模型,评估中国现有能源环境政策对碳减排目标的影响,同时对未来中国能源需求和碳排放潜力进行预测。同样的,Lin et al(2019)构建了DREAM(Demand Resources and Energy Analysis Model)模型,分析了中国各部门碳排放的驱动因素,以及在大规模采用成本效益更高的减排计划时中国到2050年的碳排放预测。第三,混合模型是根据自上而下型和自下而上型两种方法组合后得到,包括预测范围为全球尺度的DNE21(Dynamic New Earth 21)模型(Akimoto et al, 2004)、AIM/CGE(Asia-Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium)模型(Fujimori et al, 2017)、REMIND(REGional Model of Investment and Development)模型(Leimbach et al, 2010)和WITCH(World Induced Technical Change Hybrid)模型(Bosetti et al, 2007)等,这些模型主要由国外机构开发并应用。以中国尺度进行研究预测的方法有中国能源-经济-环境系统集成模型(段宏波和汪寿阳, 2019),该模型由中国科学院开发,将中国能源、经济与环境系统集成后得到,在考虑了化石能源、清洁能源和碳排放移除技术等因素变化的基础上将温控目标对能源系统转型的中长期影响进行预测;此外,蔡博峰等(2021)构建了包括国家-区域-部门层面的CAEP-CP(Chinese Academy of Environmental Planning Carbon Pathways)模型,并基于中国2060年碳中和的目标对2020—2060年二氧化碳排放路径和空间格局趋势进行预测。

综合对比能源预测的3种研究类型,本文基于CGE模型的自上而下型研究方法可以充分反映社会经济发展和能源转型过程中各宏观因素和微观因素的相互作用,并且能够对能源需求预测和碳排放量测算模块进行定制化处理。为了更详细地刻画不同终端能源产品的构成,更深入地针对能源需求、碳排放量及电力部门进行分析,本文基于CHINAGEM(China General Equilibrium Modelling)(Mai et al, 2010)平台构建自上而下的模型方法,对中国中短期能源和经济发展状况进行预测分析,以补充现有研究。

三、模型框架

本文采用CHINAGEM-E(China Energy General Equilibrium Modelling)模型进行分析。CHINAGEM-E是针对中国经济发展特征设计的一个递归动态可计算一般均衡(CG E)模型,并附加能源和二氧化碳排放模块。核心模型基础是通用的CHINAGEM模型,包括投入产出结构、生产者理论、最终需求机制、劳动和资本动态演化特征及各种耦合方程。核心数据库为2017年投入产出表。在核心模型和数据库的基础上,本文进行了3类与能源相关的开发工作,包括:一是能源部门的分解;二是能源相关的CHINAGEM模型的修改;三是能源与碳排放模块的构建。具体的研究工作如下。

(一)模型数据库拆分

本文对原始数据库进行了分类,以便能更好地代表能源部门。原始的CHNGEM(China General Equilibrium Modelling)数据库有149个行业。本文将其分为157种产品和159种行业。这使得模型能详细刻画能源类型,更深入地针对能源和碳排放情况进行相关分析。特别地,将油气、电力两个原始部门进行了进一步拆分。具体来说,①将油气部门分为原油和天然气两个独立部门;②将国内天然气部门分为常规和非常规天然气生产部门;③将输配电部门分为发电部门和配电部门;④通过8种特定的发电技术,将电力部门分解为煤电、气电、核电、水电、太阳能发电、陆上风力发电、海上风力发电和生物质能源发电,并在发电中引入能源间的替代。

(二)CHNGEM模型的修改

本文进一步修改了CHNGEM模型,引入了以下能源相关发展的特征:①考虑到常规和非常规天然气相对供应成本的响应性变化;②考虑到陆上风力发电和海上风力发电相对供应成本的响应性变化;③确定了两

种天然气来源——管道天然气和液化天然气(LNG);④确定了两种进口石油来源——管道石油和船运石油;⑤定义了价格响应的替代机制,允许管道天然气和液化天然气需求之间的替代;⑥定义了价格响应的替代机制,允许管道石油和船运石油之间的替代。

(三)能源与碳排放模块

本文引入了新的能源和碳排放模块,新模块在设计模拟场景时具有更大的灵活性。这个新模块主要包括3个部分:能源及碳排放账户、多层嵌套的投入结构及碳定价机制。

一是能源及碳排放账户模块的设定。①一次能源。一次能源有煤炭、石油、天然气、水电、核电、风电、太阳能发电、生物质发电8大类型。本文将这8种一次能源的消费总量分配给160种用户(159个工业用户和1个居民用户)。一次能源的计量单位为百万吨煤当量(Mtce)。②终端能源。终端能源有煤炭、石油、天然气、焦炭、煤电、气电、水电、核电、风电、光伏发电、生物质发电、供气共13种。本文将这13种终端能源的总使用量分配给160种用户。终端能耗采用煤发热量算法(ccc),以百万吨煤当量(Mtce)为单位。③二氧化碳排放。排放二氧化碳的化石能源有4种,分别是煤、天然气、石油和供气。本文将这4种能源的二氧化碳排放量分配给160种燃料使用者。二氧化碳排放量以百万吨为单位。

二是多层嵌套的能源投入结构的设定。传统的CGE模型不允许生产要素和不同类型的能源之间进行投入替代。本文创建了一个新的多层嵌套的能源投入结构,允许生产要素和不同类型的能源之间的替代。例如:①劳动力、土地和资本-能源的组合构成顶层的生产结构,以不变替代弹性生产(CES)函数进行嵌套;②K-E组合是资本和能源的组合;③能源组合通过电力部门和非电力部门以CES函数方式嵌套。

三是碳定价机制。本文假定碳价是一种特定的税收。由于投入产出(IO)数据库是基于数值型的,本文将二氧化碳排放的从量税转化为与模型数据库一致的从价税。

四、当前政策情景和碳中和情景设定

(一)当前政策情景(基准情景)参数设定

基准情景是中国经济在2018—2040年间正常发展的情景。本文假设除了已经宣布的政策之外,其他不会有变化。本文也称这种情景为当前政策情景(CPS)。更具体地说,对于宏观变量,基准情景是在以下假设下制定的:①根据国际货币基金组织(IMF)发布的《世界经济预测》,受新冠肺炎影响,2020年中国经济的实际GDP将增长1.85%。2021年强劲复苏之后,经济将以8.25%的速度增长,然后从2022年恢复到正常增长趋势。实际GDP将继续强劲增长,但整体增长将缓慢下降。②增长方式偏向于消费和消费相关的产业,而投资和投资相关产业则受到负向影响。③进口增长将超过出口增长。④服务业增长将超过工业增长。⑤工业增长将高于农业增长。

表1显示了实际国内生产总值、就业及国内生产总值组成部分的假定增长率。外生就业变量的增长率是根据劳动年龄人口增长率和总劳动力参与率计算的。在当前政策情景中,假设到2040年总劳动力参与率将保持在2015年的水平。劳动年龄人口增长率来自于Zuo et al(2020)的人口预测的中位数。将这些数据作为对CHINAGEM-E模型的冲击,得出2020—2040年全要素生产率、资本存量、进口和三个宏观部门的增长,用于预测模拟(表1)。由表1可知,人口快速老龄化导致就业下降,中国必须依靠资本存量增长和全要素生产率提高来维持经济增长。

在当前政策情景中,本文在模型中输入了给定的能源部门的参数,该情景描述了在碳中和目标设定之前可能发生的变化。当前政策情景(CPS)是碳中和情

表1 当前政策情景:各宏观经济变量增长率

特定外生变量	各宏观经济变量增长率(%)					
	2020年	2021年	2025年	2030年	2035年	2040年
实际GDP	1.85	8.24	5.49	4.03	3.25	3.16
就业人数	-0.55	-0.51	0.04	-0.81	-1.4	-1.11
居民消费	2.61	8.96	6.14	4.59	3.75	3.65
投资	1.96	8.37	5.68	4.29	3.58	3.57
出口	2.45	8.81	5.92	4.28	3.33	3.06
模型模拟结果	各宏观经济变量增长率(%)					
	2020年	2021年	2025年	2030年	2035年	2040年
全要素生产率	-0.82	5.29	2.67	2.02	1.95	1.94
资本存量	6.58	6.1	6.2	5.63	4.85	4.28
进口	4.85	10.9	8.04	6.29	5.29	5.12
农业	-0.27	4.95	2.53	1.22	0.63	0.66
工业	1.52	7.75	5.04	3.70	2.96	2.89
服务业	2.28	8.74	5.91	4.40	3.55	3.42

资料来源:国家统计局2018—2019年实际GDP增速;国际货币基金组织《世界经济展望》(2020—2025);参考国际能源署的《世界能源展望》。就业数据来自Zuo et al(2020)。居民消费、投资和出口的增长是作者的假设。

景发展的一个基准,本文将两者进行对比分析。本文在当前政策情景下控制了10组能源相关的变量。有些变量是外生的,本文对其进行直接冲击;有些变量是内生的,本文需要找到相应的外生变量,并根据方程改变其内外生性质。

本文根据不同的数据来源对不同年份的当前政策情景进行了设置。其中,当前政策情景(CPS)设置的时间段为基础数据年份(2017年)到预测年份(2040年)。就2018年和2019年的参数而言,本文尽可能依赖现有统计数据。对于2020年的参数,本文使用前三个季度的数据作为参考。对于2021年,本文取两种可能情况的平均值,即完全反弹和不反弹情况(详情请参考Feng et al, 2020)。对2022—2040年期间的参数,本文主要以国际能源署(IEA)的《2020年世界能源展望》(World Energy Outlook, 2020)作为数据来源。

与能源相关的假设分别包括:①煤炭、石油、天然气等一次能源消费量;②排放二氧化碳的终端能源消费;③各发电类型的发电量水平;④发电行业资本存量的变化;⑤可再生能源发电单位资本成本的降低;⑥向电网供应的可再生能源发电的价格变化;⑦煤炭、石油进口的数量和价格;⑧碳价;⑨能效提高;⑩家庭“煤改气”。

(二)碳中和情景(政策情景)参数设定

在碳中和情景中,所有内生的宏观经济变量都保持其内生性。具体来说,本文在碳中和情景中做了10组与能源相关的假设。分别是:①从2026年开始产生强烈的缓解排放效应;②到2060年实现二氧化碳净零排放的路径;③化石燃料进口价格;④太阳能、陆上风能和海上风能单位成本的降低;⑤太阳能和海上风力发电价格的进一步降低;⑥能效的提高;⑦在居民能源消费中用天然气替代煤炭;⑧部分行业和居民中用煤改气实现供暖;⑨在铁路和公路运输中以电力取代石油;⑩居民的能源消费会逐渐用电替代石油。

假设①和假设②是根据政策背景提出的。假设③~⑥以2020年IEA可持续发展情景(SDS)为主要数据来源。其中SDS情景大致相当于0.75度情景,也大致相当于本文的碳中和情景。假设⑦~⑩在当前政策情景和碳中和情景下都可能发生。但是,本文只在碳中和情景中对它们进行建模。这是因为当前政策情景下的能源使用量是外生的,本文假设所有这些因素都在当前政策情景下被潜在地考虑了。下面详细介绍这10个假设的设定。

(1)从2026年开始产生强烈的缓解排放效应。碳中和情景的起始年份是2026年。这反映了在2019冠状病毒影响期间和之后保持经济增长和就业的必要性。它还反映了这样一个事实,即可再生能源发电项目可能需要几年的时间才能获得批准、完成并完全融入整体能源系统。

(2)到2060年实现二氧化碳净零排放的路径。在碳中和情景下,本文设定了2026—2040年的二氧化碳排放路径。本文假设,为达到2060年净零排放,中国仍将有30亿吨二氧化碳排放量的预算。碳捕获与封存(CCS)、林业碳汇及二氧化碳负排放技术将抵消这一排放量。本文没有明确地建立CCS或其他碳汇模型,因假设这些技术在2040年之前不会做出有显示度的贡献。本文假设从2025—2060年,中国每年将减少等量的二氧化碳排放,根据计算每年约2.04亿吨二氧化碳。到2040年,当前模拟结束时,碳中和情景中的排放水平为70.81亿吨二氧化碳。在碳中和情景下,碳价原本是外生的,然而为了促进对二氧化碳排放的外生控制,本文将碳价设定为内生变量。碳价在一定程度上间接反映了国家缓解二氧化碳排放的努力水平,并且假定政府所有碳税收入都以转移支付的方式进入居民部门。

(3)煤炭、天然气进口价格。在整个碳中和情景(2026—2040年)下,本文控制煤炭和天然气进口价格的变化。相关数据的设定参考了国际能源署2020年对中国进口价格的预测。因此,本文设定煤炭进口价格以每年0.57%的固定速率下降,天然气进口价格以每年0.43%的固定速率上升。

(4)可再生能源发电单位成本的降低。除了当前政策情景之外,本文还进一步考虑政策情景下可再生能源发电单位成本的降低。根据IEA的《2020年世界能源展望》(World Energy Outlook, 2020)中可持续发展情景(Sustainable Development Scenario, SDS)的数据,三个可再生能源发电行业单位成本的降低幅度将超过其在当前政策情景下的下降幅度。

(5)太阳能和海上风力发电价格的进一步降低。除当前政策情景外,本文还进一步降低了碳中和情景中

可再生能源的发电价格。根据IEA(2020)的报告,两种可再生能源发电行业(太阳能和风能)将以低于其当前政策情景的发电价格向电网供应。然而,陆上风力发电并不享受额外的价格下降。

(6)能效的提高。在当前政策情景的基础上,本文对碳中和情景进行了能源效率提高的假定。根据IEA(2020)的数据,造纸、水泥、钢铁和铝(有色金属)等行业能效的提高速度将比IEA既定政策情景(STEPS)的预测结果更快。本文认为中国也会有类似的技术进步。碳中和情景下能源效率的提高是不可忽视的,特别是在造纸和铝生产方面(Feng et al, 2020)。对于所有其他行业,本文假设在当前政策情景的基础上,每年额外提高0.5%的能效。所有提高能源效率的措施都不涉及成本因素。

(7)在居民能源消费中用天然气替代煤炭。在整个碳中和情景的时期内,本文每年将额外的5%煤炭消费量(作为终端能源)替换为等量的天然气消费量(也作为终端能源)。成本中性的需求变化再次促进了这种替代。

(8)在部分行业和居民中用煤改气实现供暖。本文选择了44个同时使用煤炭和天然气作为终端能源的非能源行业。本文将这些行业和居民每年5%的煤炭消费量替换为提供等量终端能源的天然气消费量。成本中性的需求转移促进了工业和居民部门煤炭和天然气需求的变化。

(9)在铁路和公路运输中以电力取代石油。本文用电力取代铁路和公路运输部门使用石油总量的5%,以提供相同数量的终端能源。成本中性的需求变化为这种替代提供了便利。

(10)居民的能源消费会逐渐用电力替代石油。本文每年用电力替代居民使用石油总量的5%,以提供相同数量的最终能源。成本中性的需求变化为这种替代提供了便利。

五、两种情境下的模拟结果

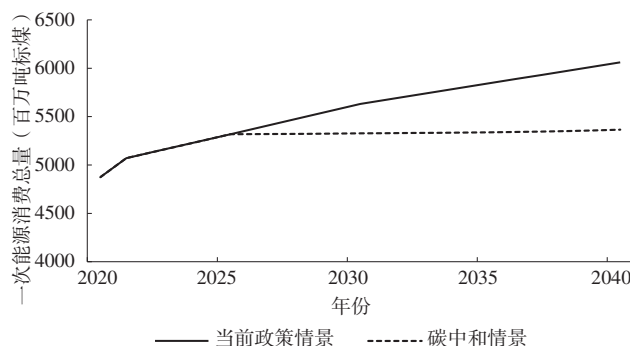
本文从能源、宏观经济及产业部门的角度来展现模型的结果,采用与当前政策情景差值的累计百分率方式来呈现。当前政策情景和碳中和情景下能源消费和就业的变化,本文给出了总量的估计。

一次能源消费总量及其构成。在碳中和情景中,总能耗持续上升,但逐渐趋于平缓。图1展示了在当前政策情景和碳中和情景下能源消费量的差异。在当前政策情景和碳中和情景下,2020—2040年间能源消费总量的平均年增长率分别为1.1%和0.48%,2040年能源消费总量分别为61亿和54亿吨标准煤。2040年,碳中和情景下的一次能源消费总量比当前政策情景低11%。

图2对两种情景下的煤炭消费量进行了对比。结果表明,两种情景下的煤炭消费量将在2025年达到峰值,约为29亿吨标准煤。在当前政策情景和碳中和情景下,2020—2040年间煤炭消费量的平均年增长率分别为-0.5%、-1.9%。此外,2040年碳中和情景下的煤炭消费总量比当前政策情景低25%。

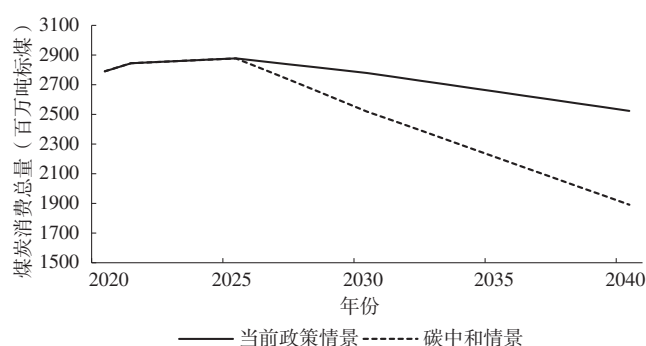
图3对两种不同情景的一次能源构成进行了对比。两种情景下,石油和天然气的占比均低于20%,且趋于一致。煤炭和非化石能源占比变化较为显著。当前政策情景下,煤炭占比在模拟期均高于非化石能源。而在碳中和情景下,2040年非化石能源占比超过煤炭。

终端能源消费量及其构成。两种情景下终端能源消费量持续上升。图4对比了两种情景下最终能源消费情况。在当前政策情景和碳中和情景下,2020—2040年间,终端能源消费的年均增长率分别为1.8%、



数据来源:基于假设和CHINAGEM-E模拟结果

图1 2020—2040年一次能源消费总量



数据来源:基于假设和CHINAGEM-E模拟结果

图2 2020—2040年煤炭消费总量

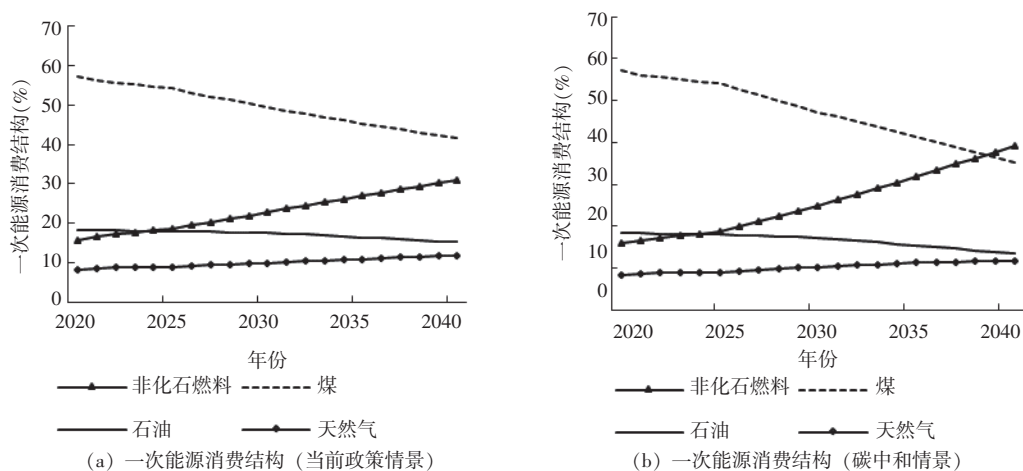
1.3%。2040年,当前政策情景和碳中和情景下的终端能源消耗总量分别为51亿、46亿吨标准煤,碳中和情景的终端能源消费量比当前政策情景低10%。

两种情景下的电力消费在终端能源消费中的占比都持续上升。2040年,碳中和情景下的电力消费占比达到39.4%,比当前政策情景高出5.2%(图4)。

发电量及其构成。两种情景的发电量十分接近(图5)。2040年,碳中和情景的发电量为12.2万亿千瓦时,比当前政策情景高1.8%。当前政策情景和碳中和情景下,2020—2040年发电量的年均增长率分别为2.5%、2.6%。

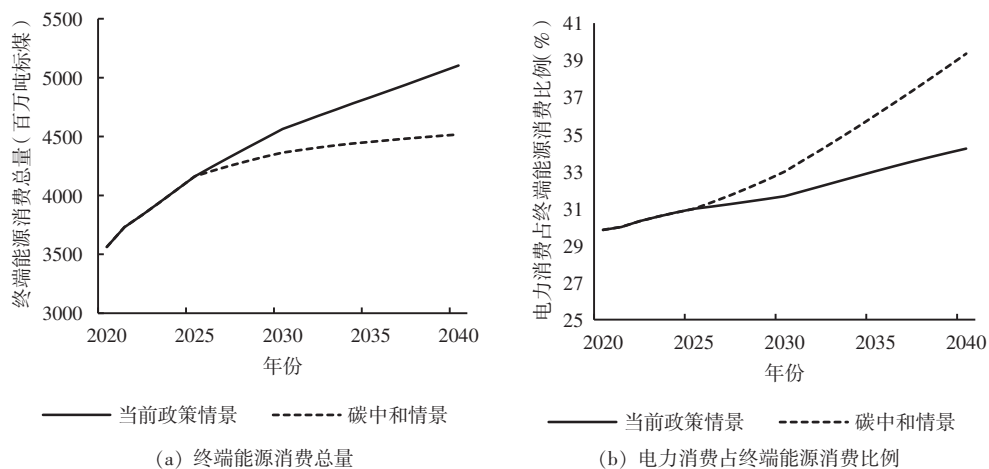
燃煤发电量。两种情景下燃煤发电量均在2025年达到峰值(图5),约为5.2万亿千瓦时。当前政策情景下,2025年后燃煤发电量逐渐下降,2040年约为5.0万亿千瓦时,高于2020年燃煤发电量。然而,碳中和情景下,2040年燃煤发电量约为4.4万亿千瓦时,低于2020年的燃煤发电量。当前政策情景和碳中和情景在2020—2040年间,燃煤发电量的年均增长率分别为0.5%和-0.1%。

风能和太阳能发电量。碳中和情景下风能和太阳能发电量增速均高于当前政策情景(图5)。2040年,碳中和情景下风能和太阳能发电量分别为1.8万亿千瓦时,2.2万亿千瓦时,分别比当前政策情景高18%和22%。



数据来源:通过CHINAGEM-E模拟得出

图3 2020—2040年一次能源消费构成(%)

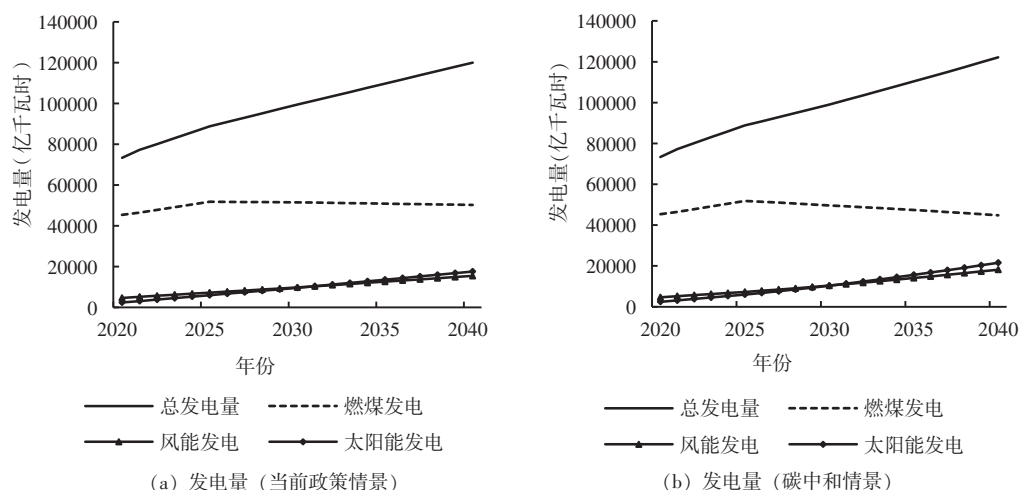


数据来源:基于假设和CHINAGEM-E模拟结果

图4 2020—2040年终端能源消费总量和电力消费占终端能源消费比例

两种情景下实际GDP增长率相近(图6)。2020—2040年,碳中和情景下的GDP增长率比当前政策情景累计低0.37%。这意味着在2040年,碳中和情景下的实际GDP要比当前政策情景低。特别要注意,碳中和情景下2035年的实际GDP比2020年高100.4%。这表明在达到碳中和目标的同时,中国也可以实现GDP翻一番的目标。

碳中和情景下就业人数低于当前政策情景(图6)。2040年碳中和情景下的就业人数比当前政策情景低0.4%,就业人数约为6.67亿人,当前政策情景约为6.60亿人。碳中和情景下的就业人数比当前政策情景下低263万人。本文考虑了一般均衡的影响,碳中和情景中严格的二氧化碳减排需求增加了碳价,并提升了整个社会的成本。这种抑制效应是通过投入产出表中展现出来的经济体之间的联系造成的,并最终达到新的均衡,在这种新的均衡中,就业人数会下降。



数据来源:基于假设和CHINAGEM-E模拟结果

图5 2020—2040年发电总量、燃煤发电总量、风能和太阳能发电总量

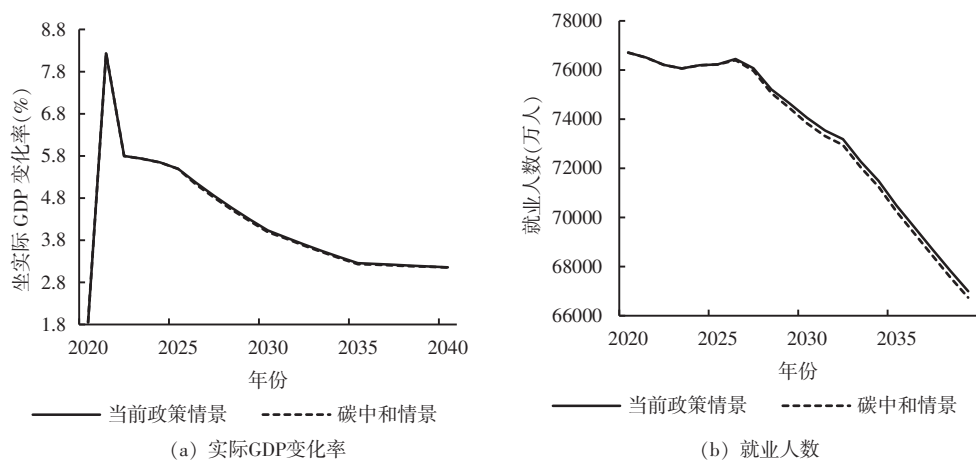


图6 2020—2040年实际GDP变化率和就业人数

六、结论与政策启示

本文的分析结论及政策启示。①二氧化碳排放:二氧化碳排放量将在2025年达到峰值。在当前政策情景下,2023—2028年间为碳排放峰值平台期。2025年的绝对碳排放峰值为101亿吨二氧化碳。碳中和情景下,预计2030年和2035年的碳排放量将分别降至91亿吨和81亿吨。这表明中国2030年之前达到碳排放峰值的自主决定贡献(NDC)目标是合理的。②碳排放强度:中国更新的自主决定贡献(NDC)目标是到2030年单位GDP二氧化碳排放将比2005年减少65%以上,这是一个温和的目标。碳中和情景下的模拟结果显示,

若要在 2060 年达到碳中和目标,在同一时期单位 GDP 二氧化碳排放应减少 72% 以上。③能源强度:根据本文的模拟结果显示,“十四五”期间中国能源强度降低合理值为-19%。④非化石燃料占能源消费总量的比例:中国更新的 NDC 目标显示 2030 年非化石能源占一次能源消费比重将提高到 25%。在本文的碳中和情景下,该目标的实现将有助于在 2060 年实现碳中和目标。⑤能源消费总量上限:碳中和情景下,2025 年起中国能源消费总量将趋于稳定。2025 年之后,可考虑将能源消费总量控制在 54 亿吨标准煤以内。⑥煤炭消费总量上限:根据本文的碳中和情景下的预测结果,到 2025 年煤炭消费总量上限为 29 亿吨标准煤。⑦天然气消费在能源消费总量中的比重:2017 年中国发布了《能源生产与消费革命战略(2016—2030)》,目标是在 2030 年将天然气在一次能源消费总量中的比重提高到 15%。截至 2019 年底,这一比例仅为 7.6%。在本文的碳中和情景中,2030 年和 2035 年相关比例分别只有 10.4% 和 11.3%。因此,建议相关规划目标向下修正。⑧燃煤发电量的上限:根据本文的碳中和情景下的模拟结果,2025 年燃煤发电量的上限为 5200 太瓦时(TWh)。⑨风电发电量:根据本文的碳中和情景下的模拟结果,2025 年风电发电量的目标为 720 太瓦时(TWh)。⑩光伏发电量:根据本文的碳中和情景下的模拟结果,2025 年光伏发电量的目标为 600 太瓦时(TWh)。为了实现 2060 年达成碳中和的总目标,本文基于模拟分析结果,在表 2 中提出了中短期内各项宏观指标的阶段性实现目标。

表 2 各项宏观指标的阶段性实现目标

目标	2025 年	2030 年	2035 年
二氧化碳排放(亿吨二氧化碳)	101	91	81
碳排放强度(% ,基于 2005 年)	-61	-72	-79
能源强度(% ,基于 2020 年)	-19	-35	-45
非化石燃料占能源消费总量的比例(%)	18.5	25	32
能源消费总量上限(亿吨标准煤)	53	53	53
煤炭消费总量上限(亿吨标准煤)	29	25	22
天然气消费占能源消费总量的比例(%)	9.1	10.4	11.3
燃煤发电量的上限(太瓦时)	5200	5000	4700
风电发电量(太瓦时)	720	1040	1410
光伏发电量(太瓦时)	600	1030	1560

数据来源:通过 CHINAGEM-E 模拟得出。

参考文献

- [1] 蔡博峰,曹丽斌,雷宇,等,2021.中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J].中国人口·资源与环境,31(1):7-14.
- [2] 陈师,郑欢,方行明,2014.中国中长期煤炭需求预测[J].技术经济,33(5):79-85.
- [3] 段宏波,汪寿阳,2019.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,35(10):50-63.
- [4] 韩松,张宝生,唐旭,等,2016.基于正交试验的“十三五”中国能源强度情景预测与分析[J].技术经济,35(12):97-104.
- [5] 李继峰,顾阿伦,张成龙,等,2019.“十四五”中国分省经济发展、能源需求与碳排放展望——基于 CMRCGE 模型的分析[J].气候变化研究进展,15(6):649-659.
- [6] 李继峰,张亚雄,蔡松峰,2017.中国碳市场的设计与影响:理论、模型与政策[M].北京:科学文献出版社.
- [7] AKIMOTO K, TOMODA T, FUJII Y, et al, 2004. Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE21[J]. Energy Economics, 26(4): 635-653.
- [8] BOSETTI V, MASSETTI E, TAVONI M, 2007. The WITCH model: Structure, baseline, solutions[J]. Working Papers, 10: 1-37.
- [9] DAI H, MASUI T, MATSUOKA Y, et al, 2011. Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM/CGE model[J]. Energy Policy, 39(5): 2875-2887.
- [10] DAI H, MISCHKE P, XIE X, et al, 2016. Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions[J]. Applied Energy, 162(15): 1355-1373.
- [11] DONG H, DAI H, DONG L, et al, 2015. Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: A provincial leveled analysis[J]. Applied Energy, 144(15): 165-174.
- [12] DONG H, DAI H, GENG Y, et al, 2017. Exploring impact of carbon tax on China's CO₂ reductions and provincial disparities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77: 596-603.
- [13] FENG S, ADAMS P, ZHANG K, et al, 2020. Economic implications of global energy interconnection[J]. Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers, 307: 1-29.
- [14] FUJIMORI S, HASEGAWA T, MASUI T, 2017. AIM/CGE V2.0: Basic feature of the model[M]. Singapore: Springer.
- [15] LEIMBACH M, BAUER N, BAUMSTARK L, et al, 2010. Mitigation costs in a globalized world: Climate policy analysis with REMIND-R[J]. Environmental Modeling & Assessment, 15(3): 155-173.
- [16] LI Z, DAI H, SONG J, et al, 2019. Assessment of the carbon emissions reduction potential of China's iron and steel industry based on a simulation analysis[J]. Energy, 183: 279-290.
- [17] LIN J, KHANNA N, LIU X, et al, 2019. China's non-CO₂ greenhouse gas emissions: Future trajectories and mitigation options and potential[J]. Scientific Reports, 9(1): 16095.

- [18] LIU Y, ZHOU M, 2018. The impact of coal resource tax reform on the Chinese economy: A CGE analysis[J]. The Singapore Economic Review, 63(3): 555-565.
- [19] LU Y, LIU Y, ZHOU M, 2017. Rebound effect of improved energy efficiency for different energy types: A general equilibrium analysis for China[J]. Energy Economics, 62(2): 248-256.
- [20] LUDERER G, BERTRAM C, CALVIN K, et al, 2016. Implications of weak near-term climate policies on long-term mitigation pathways[J]. Climatic Change, 136(1): 127-140.
- [21] MAI Y, DIXON P B, RIMMER M, 2010. CHINAGEM: A Monash-styled dynamic CGE model of China[J]. Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers, 201: 1-57.
- [22] NIU D, WANG K, WU J, et al, 2020. Can China achieve its 2030 carbon emissions commitment? Scenario analysis based on an improved general regression neural network[J]. Journal of Cleaner Production, 243(10): 1-14.
- [23] WANG H, DAI H, DONG L, et al, 2018. Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China[J]. Journal of Cleaner Production, 174: 1096-1113.
- [24] WANG Z X, YE D J, 2017. Forecasting Chinese carbon emissions from fossil energy consumption using non-linear grey multivariable models[J]. Journal of Cleaner Production, 142(2): 600-612.
- [25] WEI Y, XIA L, PAN S, et al, 2019. Prediction of occupancy level and energy consumption in office building using blind system identification and neural networks[J]. Applied Energy, 240(15): 276-294.
- [26] ZHOU N, FRIDLEY D, KHANNA N Z, et al, 2013. China's energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model[J]. Energy Policy, 53: 51-62.
- [27] ZUO X, PENG X, YANG X, et al, 2020. Population ageing and the impact of later retirement on the pension system in China: An applied dynamic general equilibrium analysis[J]. Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers, 303: 1-41.

Research on China's Short and Mid-term Energy Forecasting under the Background of Carbon Neutrality

Mao Yalin

(CHN ENERGY Technology & Economics Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: In September 2020, the Chinese government proposed carbon peak and carbon neutral targets at the 75th UN General Assembly. The vision of "Achieving Carbon Neutrality by 2060" will have a profound impact on the transformation of China's energy structure. The CHINAGEM model is used to simulate and analyze the current policy scenario (baseline scenario) and carbon neutral scenario (policy scenario), and predict China's energy development status from 2020 to 2040, including the total primary energy consumption, terminal energy consumption, and electricity generation and their composition. Based on the results of the analysis, this article puts forward the phased goals of achieving various macro indicators in the short and mid-term under the overall goal of China's carbon neutrality.

Keywords: carbon neutrality; energy consumption; computable general equilibrium