

低碳转型背景下煤炭消费率先达峰的路径与政策研究

袁惊柱

(中国社会科学院工业经济研究所, 北京 100006)

摘要:促进煤炭消费率先达峰是实现低碳转型发展的可行路径,使用能源消费弹性法和情境法分析煤炭消费率先达峰的路径。研究表明:低碳技术促进产业结构低碳化转型升级的速度越快,煤炭就能越早实现消费达峰;实施加快煤炭消费节能增效改造等措施和煤炭定位调整的产业政策配套,有利于有序引导煤炭消费退出或减量。

关键词:低碳转型;煤炭消费率先达峰;碳减排

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2023)02-0012-11

Research on the path and policy of coal consumption peaking first under the background of low-carbon transformation

YUAN Jingzhu

(Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100006, China)

Abstract: In order to achieve the low-carbon transformation and development, to promote coal consumption to peak first is a feasible path. Based on this, this paper uses the energy consumption elasticity method and the situational method to analyze the path for coal consumption to reach its peak first. Studies have shown that the faster low-carbon technology promotes the low-carbon transformation and upgrading of the industrial structure, the sooner coal can achieve peak consumption. The implementation of measures such as accelerating the energy-saving and efficiency improvement of coal consumption, and the industrial policy of coal positioning adjustment, is conducive to orderly guiding the withdrawal or reduction of coal consumption.

Key words: low-carbon transformation; coal consumption peaking first; carbon emission reduction

未来 40 年,低碳转型已成中国的发展大势。煤炭消费行业作为中国二氧化碳排放最多的来源,在能源消费结构中仍占到近 60% 的比例,其消费率先达峰对于中国实现低碳转型发展具有重要的支撑作用,是中国产业实现低碳转型的基础保障。目前,中国已经进入经济高质量发展的新阶

段,绿色低碳发展理念下的产业结构调整升级已经成为重要内容,主导煤炭消费的煤电、冶金、化工、建材等“三高”产业将成为减污降碳的先锋部队。国家已经出台了相关行业清洁改造的实施方案。这些煤炭消费行业率先达峰,对于拥有“三高”行业占比较高的产业结构基础的低碳转型,具

收稿日期:2022-09-28 修回日期:2023-02-08

基金项目:国家社会科学基金重点项目“促进能源转型的能源体制改革理论框架与实现机制研究”(18AGJ016);中国社会科学院登峰战略优势学科(产业经济学)项目(2023);中国社会科学院青年学者资助项目“碳中和目标下的我国能源转型的机理和路径”。

作者简介:袁惊柱(1987—),男,湖北宜昌人,中国社会科学院工业经济研究所助理研究员,管理学博士、中国国际经济交流中心博士后,研究方向为资源定价与能源转型。

有重要的战略支撑意义,有利于中国统筹推进产业结构绿色低碳调整升级与能源绿色低碳转型,转换成经济高质量发展的新动能。同时,在“富煤贫油少气”的能源禀赋情况下,煤炭对于中国经济社会发展具有重要的安全保障作用,煤炭消费率先达峰对于保障中国能源安全和经济安全具有十分重要的兜底作用。新的形势下,煤炭消费率先达峰不仅能够为能源转型和防范可再生能源不稳定、不安全带来的能源系统风险,提供兜底保障,还能平抑中美贸易摩擦深化、新冠病毒感染疫情延续和俄乌冲突激化综合影响下的断链风险、价格风险等带来的经济冲击。2021年中央经济工作会议指出,要立足于以煤为主的基本国情,抓好煤炭清洁高效利用,狠抓绿色低碳技术攻关,加快建设能源强国。中国共产党第二十次次全国代表大会报告也指出,要加强煤炭清洁高效利用,加快规划建设新型能源体系。如何统筹煤炭对经济社会发展的支撑作用和煤炭消费的碳减排引领作用是一项具有重大理论和现实意义的研究。基于此,本文从煤炭消费率先达峰的角度开展研究。结构安排如下:第一部分为文献综述部分,主要梳理已有的影响煤炭消费需求的因素及预测方法的研究,以及低碳转型对煤炭消费需求的影响及可能路径研究;第二部分为研究方法和理论模型介绍;第三部分为分析结果及解释;第四部分为低碳转型背景下煤炭率先达峰的路径及促进中国煤炭率先达峰的政策建议。

一、文献综述

(一)煤炭消费需求的影响因素

影响中长期煤炭消费需求变化的因素主要有3类:一是从需求侧的角度研究最终能源使用在总量、利用方式和消费结构等方面的变化,二是从生产侧的角度研究替代能源的技术进步和规模扩大对煤炭产生的挤出和替代效应,三是政府在生态文明建设和应对气候变化等方面的政策约束对煤基能源开发和利用的限制^[1]。现有的研究绝大多数是从供需的角度对煤炭消费总量、消费结构、消费增长进行影响因素分析。如张伟等^[2]分析表明,经济增长、产业结构、能源消费结构和能源效率是影响中国煤炭消费增加的四大因素;魏楚

等^[3]研究发现,地区煤炭资源禀赋、农村居民住房面积与供暖用煤需求量存在显著的正相关关系;王长建等^[4]构建供给侧的LMDI模型和需求侧的IO-SDA模型,分析了中国煤炭消费的供给侧与需求侧演变特征。除此之外,还有从能源替代的视角分析天然气价格和风能利用导致煤炭消费需求下降的研究^[5]。

(二)煤炭消费需求预测的方法及模型

从目前实证分析煤炭需求的文献看,采用的预测方法可分为3类,即直接预测法、间接预测法、综合预测法。直接预测法是根据煤炭需求的历史数据,找出其随时间变化的规律,建立预测模型,然后再根据模型进行预测。间接预测方法是对煤炭需求及其影响因素的因果关系分析,并以这些关系为依据进行预测。在实证预测中,找出煤炭需求量与影响因素的相关关系,并用确定的函数关系进行描述,进而预测煤炭需求量。综合预测法主要是指用各种方法组合完成预测。如邹绍辉等^[6]使用基于指数退火的自适应蝙蝠算法(ABAE-SA算法)预测了2020年和2030年中国煤炭需求量分别为30.01亿t标准煤和44.41亿t标准煤。林伯强等^[7]利用动态投入产出模型,分析了技术进步、煤炭质量变动和电源结构变动对煤炭需求的影响。谢和平等^[8]测算了2025年中国煤炭消费需求为28亿~29亿t标准煤。Qiao等^[9]研究表明,依靠煤炭发展的地区还没有达到煤炭消费峰值,其他地区煤炭消费已与国内生产总值脱钩。Shi等^[10]预测2030年中国煤炭消费量将为21.95亿t~36.99亿t。还有的研究是从对能源结构预测的角度来预测煤炭消费需求。如Zeng等^[11]研究表明,到2030年,中国煤炭消费占比将下降到46.56%。

(三)低碳转型对煤炭消费需求的影响及可能路径

在低碳转型约束下,中国煤炭需求的发展环境已经发生改变,不论是对经济增长、能源安全,还是对完备产业链体系和应对疫情等突发事件等的支撑,都增加了一个碳排放约束条件。有研究认为低碳转型下煤炭消费需求会分阶段性发生变化。如谢和平等^[12]认为,低碳转型目标下,煤炭会

经历基础能源(2021—2030 年)—保障能源(2031—2050 年)—支撑能源(2051—2060 年)的发展阶段。有研究使用情境法分析“双碳”目标下的煤炭消费需求变化。如 Liu 等^[13]对碳达峰目标下中国电力部门的煤炭消费需求进行了分析,结果表明,如果“十三五”和“十四五”期间燃煤电厂继续增加,中国将在 2025—2035 年左右达到二氧化碳排放峰值;如果燃煤电厂以更高的利用率运行,则排放峰值可能出现在 2030 年至 2035 年之间;如果在可再生能源优先上网并以更高利用率运行的情况下,将会在 2025 年至 2030 年之间达到峰值排放量;如果对煤炭产能进行更严格的控制,大量增加可再生电厂,可能在 2020 年到 2025 年间达到峰值。还有研究着重分析煤炭消费总量减少的可能路径。如张宏^[14]认为,“双碳”目标下应推动煤炭数字化、智能化、专业化、定制化、集群化和绿色化发展。王国法等^[15]指出,在“双碳”目标下,煤炭工业发展的可能路径包括提升以智能化为支撑的煤炭柔性生产供给保障能力、降低煤炭开发利用能源消耗强度、推动煤炭从燃料向燃料和原料转变、研发实用的碳捕集封存和利用技术。

(四)评述

现有的许多研究基于煤炭消费需求与经济社会发展特征的关系对煤炭消费需求进行了单线性关系的模拟预测,但如果经济发展阶段、技术发展水平、产业结构、能源转型进程等发生了变化,这种单线性关系的预测则会出现偏差。除了主要变量与煤炭消费需求之间存在相关关系,一些主要变量的组合效应也存在相关关系,但大多数组合预测忽视了这些组合效应,预测的结果是有偏的。情境分析是一种主流的低碳转型研究方法,它展现的是基于作者研究逻辑的可行路径的一种自圆其说,与基于预测而得到可行路径的研究范式是不同的。不论是清洁化利用,还是低碳化利用,都是一种影响煤炭消费需求的政策安排,是煤炭优化路径中的约束条件。现有的研究大多将约束条件作为目标函数,基于这样的路径安排是一种非理性的服务于政策考核的做法,它没有遵守经济社会发展的客观规律,最终达不到动态均衡状态,

即使短暂地达到了政策目标,必然是以经济社会发展损失为代价,不能形成有利于经济社会可持续发展的长效机制。与已有研究不同,本文的研究创新性地提出煤炭消费率先达峰的研究视角,先从理论层面建立一个低碳转型目标下煤炭需求的分析框架,厘清不同发展阶段煤炭的战略定位与角色,从煤炭需求与经济增长关系、低碳转型战略下的政策目标与约束两个方面去探索煤炭消费率先达峰的路径,具有更高的客观性与科学性。本文使用能源消费弹性法和情境法相结合的方法,试图界定煤炭消费达峰的时间边界与角色定位,与已有的基于假设条件的煤炭消费的预测估计研究相比,更符合现实发展实情及政策需求导向,具有更高的可操作性和政策指导价值。

二、分析及理论模型

(一)低碳转型目标下煤炭消费需求的分析逻辑

要科学分析“双碳”目标下煤炭消费需求的变化,必须首先厘清低碳转型目标的基础、任务和可行路径,然后再分析煤炭消费需求在不同阶段中的变化。

1. 低碳转型目标的实施基础

低碳转型目标的实施基础是现有二氧化碳排放规模及来源。从排放规模来看,2020 年,中国二氧化碳排放量已达 103.76 亿 t。从来源来看,燃煤电厂排放量为 35.39 亿 t,占比 34.11%;其次是钢铁和水泥行业,分别排放了 15.98 亿 t 和 11.12 亿 t 二氧化碳,占比 15.4% 和 10.71%。从行业大类来看,第一是工业,排放了 51.63 亿 t 的二氧化碳,占比 50%;第二是电力,排放了 36.66 亿 t 二氧化碳,占比 35%;第三是汽油车、燃油车、非道路机械等移动源,排放了 9.08 亿 t 二氧化碳,占比 9%;第四是民用行业,排放了 6.4 亿 t 二氧化碳,占比 6%^①。

2. 煤炭消费需求的变化

从现有的碳排放情况来看,煤炭消费是最大的排放源,因此促进煤炭消费达峰对于低碳转型目标实现具有重大的现实意义。已有的低碳转型目标政策主要明确了 2025 年、2030 年以及 2060

① 资料来源:网易研究局碳中和报告——颠覆认知!燃油车只贡献 9% 的碳排放。

年的碳排放强度以及非化石能源消费比例,对于煤炭行业如何助力低碳转型目标实现没有明确的约束和安排。在这种背景下,要分析煤炭消费需求的变化,必须统筹好不同发展阶段煤炭消费对于经济社会发展的支撑作用与对于碳减排的贡献作用的关系。主要的情境有两种:一是煤炭部门率先消费达峰,充分发挥煤炭消费促进经济增长和保障经济社会安全的兜底功能,按照煤炭消费能替则替的原则,对于产业结构调整升级具有重大意义的煤炭消费,可以先放开碳排放约束,让高耗能、大规模使用煤炭资源且对完备产业链发挥重要支撑作用的项目尽快上,优先使用煤炭等化石能源,保障经济社会按照无碳排放约束的规律发展升级,在低碳技术安全、稳定的基础上,推动产业结构、能源结构低碳调整,实施新能源对煤炭的有序替代发展;二是煤炭部门后达峰,新能源大规模快速发展,其他工业部门减排、能源替代,煤炭发挥调峰和兜底功能,保障电网灵活性和安全性。本文只分析第一种情境。

在碳达峰阶段,碳排放成为新的约束条件,在实现经济高质量发展目标的同时,还要协同实现碳排放达峰和生态文明建设取得阶段性成就等目标,需要充分考虑煤炭由主体能源向基荷能源转变的过程。在此阶段,主要采取“先立不破”的原则,让煤炭等化石能源优先发挥支撑经济高质量发展目标和完备的产业链体系建设的功能,在保障国家产业和经济安全的前提下,对煤炭消费进行科学合理的替代和控制。在存量上,主要通过能源利用效率提升、清洁低碳利用的化石能源和安全可靠新能源替代,来降低煤炭消费需求;在增量上,随着工业化和城市化进程的推进,煤炭消费需求会持续增长,对于新能源无法安全替代煤炭的项目,可以进行化石能源的优化替代,或是按照已有的煤炭清洁低碳利用标杆进行布局,对于新能源能够实现部分替代或全部替代煤炭的项目,要加快促进煤炭消费功能的转变,发挥基荷能源或备用能源的作用。

在碳中和阶段,当煤炭消费率先达峰,在化石能源低碳利用技术、新能源技术和碳捕集、储存和

利用技术没有取得突破的情况下,煤炭消费会处于峰值平台期。一旦相关技术取得突破性进步,煤炭消费会持续下降到较低比例,直至被替代或成为备用能源。

(二)低碳转型目标下煤炭消费需求的分析方法

首先,本文从能源消费系统总体论的角度,对碳排放和污染排放等约束条件下能源消费结构优化分析。理论上,能源消费结构优化的目标函数及约束条件如下:

$$U = \text{Max}[U(C_{\text{coal}}), U(C_{\text{oil}}), U(C_{\text{gas}}), U(C_{\text{new}})] \quad (1)$$

$$U(C_{\text{energy}}) = U(C_0) + \alpha U(C_{\text{growth}}) + \beta U(C_{\text{pollution}}) + \gamma U(C_{\text{emission}}) \quad (2)$$

$$U(C_{\text{growth}}) > 0 \quad (3)$$

$$U(C_{\text{pollution}}) < 0 \quad (4)$$

$$U(C_{\text{emission}}) < 0 \quad (5)$$

$$V_{\text{pollution}} < V_1 \quad (6)$$

$$V_{\text{emission}} < V_2 \quad (7)$$

式(1)是能源消费系统效用最大化的目标函数。式(2)代表能源消费的效用价值表达。其中,能源消费支撑经济增长的效用为正,见式(3);能源消费带来污染排放和碳排放的效用为负,见式(4)、式(5);能源消费带来的污染排放和碳排放规模都受到限制,见式(6)、式(7)。根据现有政策文件,2025年的碳排放约束应小于2020年碳排放强度的0.82倍,2030年的碳排放约束应小于2005年碳排放强度的0.35倍。

其次,从能源消费结构的角度,剖析能源消费变化的阶段性特征。根据目前消费结构的变化,能源消费主要存在3个阶段性特征:一是化石能源消费主导的无排放限制,二是化石能源消费主导的污染物排放限制,三是化石能源消费主导的污染物和碳排放限制。进入“碳达峰”阶段,能源消费结构将会呈现出一个新的阶段性特征,即化石能源消费主导的污染物和碳排放限制;进入“碳中和”阶段,能源消费结构将会呈现出两个新的阶段性特征,即一个是新能源消费和化石能源消费共同主导的污染物和碳排放限制,二个是新能源消

费主导、化石能源备用的污染物和碳排放限制。而不论是处于哪个阶段,影响能源消费结构变化的重要因素主要来自两个方面:一是对经济社会发展的支撑作用,二是对实现污染排放和碳排放目标的贡献作用。理论上,存在能效水平最大化、能源排放强度最小化两个目标函数,即:

$$\max_t \frac{GDP}{D_{energy}} = \frac{GDP}{D_{coal} + D_{oil} + D_{gas} + D_{new}} \quad (8)$$

$$\min_t \left\{ \frac{V_{pollution}}{GDP}, \frac{V_{emission}}{GDP} \right\} \quad (9)$$

再次,从能源消费结构调整的角度,分析煤炭对于经济社会发展的支撑作用与对于污染排放控制、碳减排的贡献作用的关系及优化。基于能源安全、清洁低碳等不同目标考虑,能源消费结构内部会发生不同程度的替代,目前正在经历石油、天然气、新能源对煤炭的替代。石油和天然气受对外依存度高的限制,替代到一定程度会停止。新能源受技术成熟和经济性限制,在一定的阶段也只能实现一定比例的替代。煤炭消费总量与污染物排放、碳排放量之间也存在类似关系,符合库兹涅茨曲线规律,当煤炭消费需求经过了峰值平台期之后,污染物排放和碳排放量都会逐渐减少。煤炭消费结构主要为:煤电、工业和民用,其中,工业用煤包括制造业用煤、供热(暖)用煤等。除了煤炭消费被其他能源替代,煤炭消费内部的节能减排也是一种消费减量的路径。概括之,煤炭消费需求在能源消费需求中的占比对于经济社会发展的支撑作用主要体现在特定阶段的发展需求,而对于污染排放控制、碳减排的贡献作用主要体现在特定阶段的政策安排。因此,从“十四五”时期到 2030 年,甚至到 2060 年,至少需要考虑工业化、城市化和现代化进程推进中煤炭的支撑作用,以及对于煤炭消费带来的污染物排放和碳排放的政策安排。从现有政策文件来看,2025 年、2030 年和 2060 年新能源消费比重应分别大于等于 20%、25% 和 80%。

最后,综合以上分析,运用情境法和模型拟合法预测煤炭消费达峰的时间及规模。煤炭消费变化的阶段性特征主要体现在煤炭的功能变化上,即从主体能源向基荷能源、备用能源的转变。煤

炭消费主要经历 3 个发展阶段,即主体能源阶段(2021—2030 年)、基荷能源阶段(2031—2050 年)和备用能源阶段(2051—2060 年)。根据煤炭功能的变化,主要分为以下 3 种情境。

1. 煤炭作为主体能源阶段(2021—2030 年)

作为主体能源,煤炭在能源消费结构中始终保持第一的位置,煤炭消费量与经济增长呈现出明显的正相关关系。随着工业化、城市化和现代化进程的推进,煤炭消费会持续增长,同时煤炭消费量还受污染排放和碳排放政策安排影响。当煤炭消费量与国民生产总值之间的关系出现拐点的时候,煤炭消费达到峰值点。此时,煤炭消费量会进入一个峰值平台期。拐点出现的时间早晚取决于经济发展与降污减碳政策的统筹成效。

2. 煤炭作为基荷能源阶段(2031—2050 年)

作为基荷能源,煤炭在能源消费结构中的比例已经小于 50%,煤炭消费量与经济增长呈现出负相关关系,开始与国民生产总值脱钩。新能源快速替代化石能源与化石能源内部清洁低碳优化使得煤炭消费量快速下降,能源消费逐渐由化石能源和新能源共同主导的清洁低碳发展阶段,转向由新能源主导的清洁低碳发展阶段,煤炭在能源消费结构中的比例降至 25% 左右。煤炭消费量的变化取决于新能源替代化石能源速度和化石能源内部清洁低碳替代速度。

3. 煤炭作为备用能源阶段(2051—2060 年)

作为备用能源,煤炭在能源消费结构中的比例已经小于 10%,煤炭消费量与经济增长不再相关,与国民生产总值完全脱钩。新能源成为主体能源,在能源消费结构中的占比达到 80%。煤炭消费量取决于新能源系统的风险性。

(三) 低碳转型目标下煤炭消费需求预测

首先,运用能源消费弹性法拟合能源消费总量与国民生产总值之间的关系,从而预测 2030 年、2060 年经济增长带来的能源需求变化。

$$D_{energy-t} = \theta_{t1} GDP_t + \theta_{t2} GDP_t^2 + \delta_t \quad (10)$$

$$\frac{(D_{energy_t} - D_{energy_{t-1}}) / D_{energy_{t-1}}}{(GDP_t - GDP_{t-1}) / GDP_{t-1}} = \omega_t \quad (11)$$

已有研究表明,GDP 是能源消费需求增长的主要影响因素,因此,通过式(10)可以拟合它们之间的关系。式(11)为能源消费弹性系数的表达式。通过换算,可以得到:

$$D_{energy_t} = (\omega_t \times \mu_t + 1) \times D_{energy_{t-1}} \quad (12)$$

式(12)中, μ_t 为经济增长率,通过能源消费弹性系数和经济增长率,则可以预测未来能源消费需求。

其次,结合能源消费结构和能源消费效用两个角度分情境使用不同方法预测不同阶段的煤炭消费需求。

1. 煤炭作为主体能源阶段(2021—2030 年)

要实现 2030 年前碳排放达峰的目标,必须统筹好产业结构低碳化调整与产业转型升级的关系,其中,产业结构低碳化调整主要取决于能源消费结构的调整,而产业转型升级主要取决于所处阶段的发展需求。未来 10 年,中国将处于后工业化深入推进、城市化渐趋成熟、现代化初步发展阶段,能源消费总量将保持增长趋势,在现有的能源资源禀赋和技术水平情况下,为了保障产业安全和能源安全,煤炭将继续作为主体能源。因此,要促进煤炭率先达峰,必须在能源消费总量中推动煤炭消费比例进一步下降,并在各细分行业的能源消费结构中进一步优化调整,从而实现能源消费的效用集合最大化。则存在:

$$D_{coal-t} = D_{energy-t} - D_{oil-t} - D_{gas-t} - D_{newenergy-t} \quad (13)$$

$$U(C_{growth}) = F(C_{industrialization}, C_{urbanization}, C_{modernization}) \quad (14)$$

$$D_{coal-t} = D_{industry-t} + D_{life-t} = D_{power-t} + D_{heat-t} + D_{life-t} \quad (15)$$

其中,式(13)为能源消费总量中的煤炭消费量,式(14)为能源消费的效用合集,式(15)为细分行业的煤炭消费需求。由于石油和天然气资源有限,为了将对外依存度控制在一定比例,石油和天然气的消费需求存在一定的限制。同时,在现有技术水平下,新能源的消费需求也存在一定的限制。在 2030 年前达峰之前,能源消费总量会持续上涨,煤炭、石油、天然气、新能源也会以不同的幅

度增加其消费量,直至消费达峰。假设它们的增长率分别为 τ_{e-t} 、 τ_{c-t} 、 τ_{o-t} 、 τ_{g-t} 、 τ_{n-t} 。则煤炭消费量、石油消费量和天然气消费量的增长率在 2030 年前都会下降为 0,分别达峰。新能源消费量则会保持一定的增长率,直至碳中和目标实现。则存在:

$$D_{coal-t+1} = (1 + \tau_{c-t+1}) D_{coal-t} \quad (16)$$

$$D_{oil-t+1} = (1 + \tau_{o-t+1}) D_{oil-t} \quad (17)$$

$$D_{gas-t+1} = (1 + \tau_{g-t+1}) D_{gas-t} \quad (18)$$

$$D_{new-t+1} = (1 + \tau_{n-t+1}) D_{newenergy-t} \quad (19)$$

$$(1 + \tau_{c-t+1}) D_{coal-t} = (1 + \tau_{e-t+1}) \theta_t GDP_t - (1 + \tau_{o-t+1}) D_{oil-t} - (1 + \tau_{g-t+1}) D_{gas-t} - (1 + \tau_{n-t+1}) D_{newenergy-t} \quad (20)$$

设煤炭、石油、天然气、新能源的能源消费占比分别为 ρ_{c-t} 、 ρ_{o-t} 、 ρ_{g-t} 、 ρ_{n-t} ,则存在:

$$\rho_{c-t} = \frac{D_{coal-t}}{D_{energy-t}} \quad (21)$$

$$\rho_{o-t} = \frac{D_{oil-t}}{D_{energy-t}} \quad (22)$$

$$\rho_{g-t} = \frac{D_{gas-t}}{D_{energy-t}} \quad (23)$$

$$\rho_{n-t} = \frac{D_{newenergy-t}}{D_{energy-t}} \quad (24)$$

$$\tau_{c-t+1} - \tau_{e-t+1} = (\tau_{c-t+1} - \tau_{o-t+1}) \rho_{o-t} + (\tau_{c-t+1} - \tau_{g-t+1}) \rho_{g-t} + (\tau_{c-t+1} - \tau_{n-t+1}) \rho_{n-t} \quad (25)$$

从发展趋势来看,在碳达峰目标实现之前,能源消费量会持续增长,当化石能源全部碳达峰时,总体碳达峰目标才会实现。细分能源消费的发展趋势是:煤炭、石油、天然气消费均增长,消费增长幅度逐渐变小,新能源消费增长保持较大幅度。当化石能源消费达峰时,存在:

$$\rho_{c-t+1} = \frac{\rho_{c-t}}{1 + \tau_{e-t+1}} \quad (26)$$

$$\rho_{o-t+1} = \frac{\rho_{o-t}}{1 + \tau_{e-t+1}} \quad (27)$$

$$\rho_{g-t+1} = \frac{\rho_{g-t}}{1 + \tau_{e-t+1}} \quad (28)$$

2. 煤炭作为基荷能源阶段(2031—2050 年)

煤炭率先达峰以后,会经历一个峰值平台期,然后在能源消费总量中的占比逐渐下降,直到跌

破 50%, 进入基荷能源阶段。同期, 非化石能源消费占比已经达到 25%。随着非化石能源消费占比逐渐增加, 煤炭消费占比会逐渐减少。除了发挥给可再生电力调峰的功能外, 煤炭在一些产业发展中供给能源的地位仍不能替代, 甚至还承担着备用能源功能。因此存在:

$$D_{coal-t} = D_{energy-t} - D_{oil-t} - D_{gas-t} - D_{newenergy-t} \quad (29)$$

$$U(C_{growth}) = F(C_{modernization}) \quad (30)$$

$$D_{coal-t} = D_{industry-t} = D_{power-t} + D_{heat-t} \quad (31)$$

从能源消费总量结构来看, 煤炭消费的表达式(13)没有改变, 只是消费占比发生了改变。从阶段来看, 到 2030 年, 中国的工业化进程基本完成, 城市化已经发展成熟, 现代化初期进程基本完成, 正在向现代化强国迈进。因此, 现代化进程的深入推进是能源消费增长的主要动力, 即为式(30)。在此阶段, 散煤利用已全部被淘汰, 煤炭消费仅在一些必要的产业领域提供电力和热能, 即为式(31)。

3. 煤炭作为备用能源阶段(2051—2060 年)

经历了现代化进程的推进, 中国现代产业体系基本完善, 能源消费已经完全与经济发展脱钩。在能源消费结构方面, 国家能源转型已经取得重大进展, 以新能源为主体的新型电力系统已经建成, 非化石能源消费占比已经达到 80%。随着技术的成熟, 煤炭不再需要为可再生电力调峰, 在能源消费方面只发挥备用启动的功能。

三、分析结果

使用 2001—2020 年国家统计局的 GDP 和能源消费总量数据, 使用 SPSS 19.0 对数据进行标准化处理, 然后对式(10)进行拟合, 回归结果见表 1。

表 1 回归结果

R ² = 0.975		调整 R ² = 0.972	
变量	系数	T 值	Sig.
常量	0.313	5.355	0.000
GDP	1.064	25.506	0.000
GDP ²	-0.330	-6.969	0.000

模型拟合度较好, 两者存在明显的曲线关系, 即:

$$D_{energy-t} = 1.064 GDP_t - 0.330 GDP_t^2 + \delta_t \quad (32)$$

这表明, 能源消费与经济发展还没有进入完全脱钩阶段。进一步根据模型(11)计算能源消费与经济增长的弹性指数, 结果表明, 从 2007 年开始, 能源消费与经济增长进入了相对脱钩状态, 到碳中和目标实现之前, 这种相关关系会持续存在, 且呈逐渐弱化的趋势。而化石能源消费在碳达峰目标实现时, 会进入与经济发展开始完全脱钩的阶段。因此, 煤炭消费达峰的快慢取决于新能源消费增长以及其他化石能源对煤炭的消费替代的速度, 而低碳技术的发展是核心影响因素。

(一) 情境分析

根据低碳技术的发展, 本文分为两种边界情境分析碳达峰之前煤炭消费的变化。

情境一: 低碳技术维持现状, 没有取得突出性发展, 产业结构低碳化调整较缓慢。

情境二: 低碳技术取得突出性发展, 产业结构快速实现低碳化转型升级, 成为经济发展的新动能。

1. 情境一

在现有的技术水平下, 受中美贸易摩擦深化和新冠病毒感染疫情持续影响, 中国经济增长将进一步回落。假设在碳达峰之前按照 5% 的平均水平增长^②, 在 2029 年实现碳达峰目标, 且能源消费按照 2% 的平均水平增长^[16], 根据目前的碳减排政策, 高载能工业将率先进行碳达峰实践。

根据式(27)~式(29), 煤炭消费将在 2026 年率先达峰, 峰值为 280 414.4 万 t 标准煤, 随后进入峰值平台期, 直到 2030 年, 消费量开始下降; 石油将在 2026 年达峰, 峰值为 109 361.6 万 t 标准煤, 随后进入峰值平台期, 到 2030 年消费量

② 国家发改委预测“十四五”GDP 潜在增长率为 5%~5.5%, 按照 2035 年基本实现社会主义现代化的目标, 中国每年的 GDP 增速需要保持在 4.7% 以上。因此, 本文以 5% 的平均增长水平作为经济低增长情境的增速。来源于: 国家发改委预测“十四五”GDP 潜在增长率为 5% 至 5.5%, 腾讯网, 2021-05-14。

开始下降;天然气在 2029 年达峰,峰值为 62 542.56 万 t 标准煤,从 2030 年开始消费量逐渐下降(见图 1)。

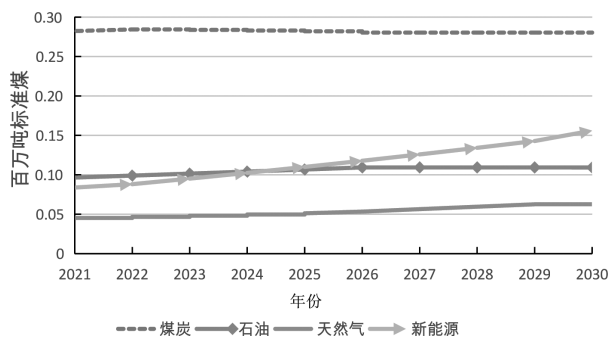


图1 低经济增长情境下的2030年前煤炭率先达峰

2. 情境二

在低碳技术取得突出性发展的情况下,产业结构低碳化转型升级迅速推进,国家能源转型进程进入新的阶段,新能源在能源消费中的占比快速提升(见图2)。假设在碳达峰之前,产业转型升级助推经济进入新一轮高速发展,以年均10%的增长率水平增长^③。在实现碳达峰目标后,能源消费按照3%的平均水平增长^④。

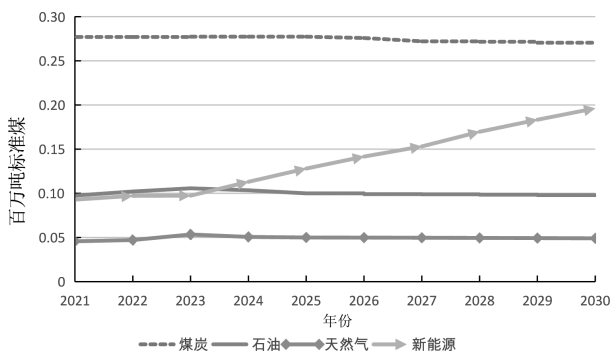


图2 高经济增长情境下的2030年前煤炭率先达峰

根据式(27)~式(29),煤炭消费将在2023年率先达峰,峰值为277 295.36万t标准煤,随后进入平台期,直到2026年,消费量开始下降;石油将在2023年达峰,峰值为105 665.23万t标准煤,随后消费逐渐下降;天然气在2023年达峰,峰值为53 366.28万t标准煤,随后消费逐渐下降。

(二)分析性结论

1. 中国的碳达峰目标较易实现,碳中和目标实现难度较大,越早实现碳达峰目标越有利于碳中和目标实现

中国要在40年的时间里实现低碳转型目标,碳达峰目标较容易实现,碳中和目标难度较大。根据本文的分析,中国煤炭消费将在2023—2026年之间达峰,石油消费将在2023—2026年之间达峰,天然气消费将在2023—2029年之间达峰,煤炭消费达峰之后的平台期较长。碳达峰阶段,碳减排主要依靠化石能源清洁低碳技术和节能技术的发展及应用,特别是煤炭资源的清洁低碳利用技术;在碳中和阶段,碳减排主要依靠去碳技术和固碳技术的发展及应用。除此之外,新技术的安全、稳定及经济性也是重要的考量因素。目前,风、光、生物质能发电等新能源技术具有一定的发展基础,化石能源清洁利用达到了一定水平,化石能源低碳利用还需进一步攻关,要想实现新能源对化石能源的大规模替代仍面临技术、体制和经济等多方面的挑战。因此,只有通过各种碳减排路径与政策的设计与实施,促进以煤炭率先达峰引领化石能源碳排放达峰,才能加快促进碳达峰目标的实现,从而为碳中和目标实现提供更多的时间与基础。

2. 碳达峰目标实现的关键是化石能源碳排放达峰,而煤炭碳排放达峰是重中之重

碳排放的主要来源为化石能源消费,因此要实现碳达峰目标,必须促进化石能源碳排放达峰。2021年,化石能源消费在中国能源消费总量中占比仍高达83.4%,其中,煤炭占比56.0%,石油占比18.5%,天然气占比8.9%。中国油气资源贫乏,对外依存度较高,考虑到中国与伊朗全面战略合作带来的石油资源供应,以及中国与俄罗斯等周边国家在天然气资源上的合作,未来油气消费存在一定的增长空间。总体看来,煤炭消费仍是中国碳排放的主要来源,将成为2030年前实现碳

③ 2021年,中国经济增长率为8.1%,综合考虑低碳技术形成新动能和各种影响因素,本文将高经济增长情境的增速设定为10%。

④ 根据美国类似发展阶段的能源需求弹性变化经验,本文取0.3作为此情境的能源需求弹性系数,因此能源消费增长率为3%。

达峰目标的主要着力点。从近两年的数据来看,煤炭消费结构中,煤炭消费主要集中于煤电和钢铁、化工等高耗能行业,这些产业大多处于工业产业链体系的上游,是工业发展的产业基础。要促进煤炭消费率先达峰,必须在保障产业基础安全的基础上进行能源消费结构调整减排,这就要充分认清煤炭在保障产业基础安全中不可替代的消费和不同发展阶段可以替代的消费。

3. 能源低碳利用技术进步是促进碳达峰目标尽早实现的关键因素

能源低碳利用技术主要包括新能源发展技术和化石能源低碳利用技术。前者的进步对碳减排的效用更大。新能源对化石能源的替代能够有效促进“双碳”目标的实现,但技术创新的不成熟带来的稳定性与安全性的风险也较高,如目前的大电网并不能保障对大规模可再生电力并网接入后的稳定性与安全性。从现有的发展来看,中国已经在风能、太阳能、生物质能发电技术及产业发展上具有一定的基础,但这些新能源发电的电量规模与系统成本相比煤电仍不具有竞争力,仍处于产业生命周期的成长期,而新能源产业上游所需的大量矿产品绝大多数依赖进口,难以保障产业链、供应链的稳定和安全。对于现阶段的中国,发展仍是第一要务,因此只能在保障能源安全的基础上实施新能源对化石能源的替代。在碳达峰阶段,更有效的方法是促进化石能源低碳利用技术的发展,从而实现减量替代或循环利用。

4. 煤炭率先达峰需要高效统筹产业结构转型升级与能源转型进程推进

煤炭作为中国的主体能源,是国家产业安全和能源安全的重要保障之一,但同时也是中国碳排放的最大来源。如何平衡煤炭对经济发展的贡献作用与对碳减排贡献作用的关系,是一项十分重要且具有重大挑战性的难题。在经济发展贡献作用方面,要促进产业结构转型升级,煤炭率先达峰则需要在保障产业发展安全的情况下进行。对于不涉及产业安全和能源安全的煤炭消费,可以加快替代;对于保障产业安全和能源安全的煤炭消费,要实施科学有序的替代。在碳减排贡献作

用方面,促进煤炭率先达峰,不仅需要煤炭消费结构内部进行碳减排优化,还需要在现有约束条件下,有其他更低碳的能源对煤炭进行替代。如民用散煤的淘汰,煤层气对煤炭的替代等。通过能源低碳技术与产业发展的深度融合,促进产业结构低碳化转型,在产业结构转型升级的过程中协同推进能源转型,平衡好产业结构转型升级和能源转型的关系,逐渐推动煤炭由主体能源向基荷能源再向备用能源的梯级过渡,实现煤炭消费达峰乃至碳中和的目标。

四、低碳转型目标下煤炭消费率先达峰的路径与政策建议

基于上述分析,为了如期实现“双碳”目标,中国需要在路径选择和政策安排上统筹好碳达峰与碳中和发展阶段的碳减排目标,促进煤炭消费率先达峰,尽早实现碳达峰目标,为碳中和目标实现争取更多的时间。

(一) 低碳转型目标下煤炭消费率先达峰的路径

要实现煤炭消费率先达峰,必须选择合适的路径,并按照一定顺序来实施减排。

1. 优先对煤炭消费行业实施节能增效改造减排

通过过剩产能淘汰、加强能效管理、运用节能技术、发展循环经济等方式对煤炭消费行业实施节能增效改造,减少煤炭消费总量,从而达到碳减排的目的。可选的路径:一是加快进行产业体系梳理和调整,促进产能过剩行业尽快完成淘汰,节约煤炭消费;二是通过数字化、智能化管理加强煤炭消费监管,提升能效水平,从而减少煤炭消费;三是运用节能技术,减少煤炭消费,如被动式建筑;四是发展循环经济,充分利用工业余热等资源,通过节约资源而减少碳排放。

2. 提高终端能源消费电气化比例

持续提高工业、交通、建筑和居民能源消费电气化比例,缩短工业流程,促进可再生和零碳电力对煤电的替代。可选的路径:一是全面提升工业电气化水平,应用传统工业电能替代技术,促进电锅炉替代燃煤工业锅炉、电窑炉替代燃煤或燃气

工业窑炉等,优先对钢铁等高载能产业实施电能替代,发展短流程工艺;二是重点发展蓄热式电暖气等电供暖技术,替代燃煤或燃气供暖,特别是对散煤燃烧进行替代;三是重点发展电动汽车、电气化基础设施以及大容量电池,对陆上、海上和空中交通实施电气化水平提升,发展船舶高压岸电、机场空港陆电等电能替代技术。

3. 实施新能源替代或化石能源内部替代

坚持“先立不破”的原则,加快发展风、光、生物质等可再生能源技术及应用,有序挖掘水、核等新能源发展潜力,在技术成熟和安全性有保障的情况下,对煤炭等化石能源实施替代。在新能源技术未成熟阶段,促进低碳排放的化石能源替代高碳排放的化石能源,如石油或天然气替代煤炭。可选的路径:一是围绕源、网、荷、储,尽可能提高新能源的渗透率,加快形成以新能源为主体的新型电力系统;二是加大钢铁等高载能行业的能源替代,率先完成重点行业煤炭消费替代。

4. 加快促进保障产业安全和能源安全的煤炭消费达峰

不论是碳达峰阶段,还是碳中和阶段,煤炭都是保障中国产业安全和能源安全的兜底能源。因此,在促进煤炭率先达峰之前,必须先明确哪些产业或哪些领域的煤炭消费是无法替代的,先促进这些必要的煤炭消费增量达峰。如推进工业化进程中,为了促进工业转型升级,必须新上一些需要大规模消费煤炭的项目,以及为了维护大电网的安全和稳定,必须保持一定比例的煤炭消费。可选的路径:一是加快完善煤炭储备体系建设,提高其为风、光等可再生能源电力调峰的灵活性;二是科学跟踪监测能源安全水平,促进企业建立风险响应的煤炭保障机制。

(二)促进煤炭消费率先达峰的政策建议

要顺利实现低碳转型目标,必须综合考虑碳达峰阶段与碳中和阶段的任务,促进煤炭消费率先达峰来促进碳达峰目标早日实现,为碳中和目标实现争取更多的时间和奠定更好的基础。基于上述分析,为了促进煤炭消费率先达峰,需要在以下4个方面进行政策支持。

1. 从政策上统筹煤炭在能源转型和产业结构转型升级中的定位和功能

要促进碳达峰目标早日实现,必须早日促进化石能源消费达峰,特别是煤炭消费达峰。通过政策统筹指导煤炭在整个过程中的发展定位和功能变化,是非常有必要的。一方面,通过高碳能源向低碳能源转型的过程需要充分考虑煤炭的定位,各地如果不理性布局,极端控煤或去煤,不仅不能推进能源转型进程,还会危及地方能源安全和产业安全;另一方面,经济高质量发展要求产业结构不断转型升级,绿色低碳是一个重点发展方向,自主可控的产业链体系是未来产业调整的一个重要目标,可再生能源对煤炭等化石能源的替代能够实现产业结构绿色低碳化,但可再生能源目前还不具有煤炭的稳定性和灵活性,盲目地替代可能会对产业安全带来断供冲击。

2. 出台鼓励提高能效,多种方式促进节能增效的产业政策

要实现煤炭消费率先达峰,除了考虑必要的增量外,还要根据减排贡献率顺序对存量进行优化调整。必须在政策上鼓励产业进行节能增效改造。目前,中国一些产业还存在产能过剩的问题,很多产业的能效与发达国家相比还有较大差距,通过提高能效进而节约能源消费,能够达到较好的碳减排目的。首先,中国需要出台促进过剩产能自动退出或转移的产业政策,避免无效率的煤炭消费;其次,中国需要出台促进各个产业节能增效的产业政策,对先进的技术、工艺、管理进行奖励和推广,降低煤炭消费量;最后,对于必须保留的煤炭消费项目,需要在余热利用、信息化改造、低碳技术应用等方面出台产业政策加以引导。

3. 优化煤炭等化石能源低碳技术和新能源技术攻坚运用的政策环境

新技术的研发、运用及推广都需要有好的政策环境来解决旧技术发展的惯性及制度变革问题。因此,必须构建新技术研发、运用及推广的政策体系,为各细分能源品种形成低碳技术自我迭代的机制。如在煤炭消费方面,可以出台政

策促进煤炭清洁高效利用和原料化利用的技术研发及运用,引导煤电、工业燃烧煤、煤化工低碳发展的技术研发及应用;在石油和天然气消费方面,可以出台加大炼油、石油化工、天然气化工及工业燃料低碳的技术研发及运用的政策;在新能源消费方面,可以出台促进新能源发电及并网接入的技术研发和运用的政策。

4. 完善和细化积极使用非化石能源的政策体系

促进煤炭消费率先达峰,需要在非化石能源使用方面出台完善和细化的政策,引导非化石能源实现快速发展,从而对煤炭等化石能源替代。如出台降低“弃风、弃光、弃水”和促进风电、光伏发电、生物质能发电等新能源电力上网的政策。

参考文献:

- [1]姜大霖,程浩. 中长期中国煤炭消费预测和展望[J]. 煤炭经济研究, 2020,40(7): 16-21.
- [2]张伟,张金锁,孙再罗. 基于 LMDI 指数分析的中国煤炭消费增长分解研究[J]. 中国矿业, 2014,23(8): 42-44.
- [3]魏楚,王丹,吴宛忆,等. 中国农村居民煤炭消费及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 178-185.
- [4]王长建,汪菲,叶玉瑶,等. 基于供需视角的中国煤炭消费演变特征及其驱动机制[J]. 自然资源学报, 2020, 35(11): 2708-2723.
- [5] HARRISON F, DANIEL T K. The fall of coal: joint impacts of fuel prices and renewables on generation and emissions [J]. American economic journal: economic policy, 2018, 10(2): 90-116.
- [6]邹绍辉,丁治立. 基于 ABA-ESA 的中国煤炭需求预测模型[J]. 中国煤炭, 2018, 44(7): 9-14,20.
- [7]林伯强,吴微. 中国现阶段经济发展中的煤炭需求[J]. 中国社会科学, 2018(2): 141-162.
- [8]谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [9] QIAO Hui, CHEN Siyu, DONG Xiucheng, et al. Has China's coal consumption actually reached its peak? national and regional analysis considering cross-sectional dependence and heterogeneity [J]. Energy economics, 2019(84): 1-12.
- [10] SHI Mengshu, HUANG Yuansheng, XU Xiaofeng, et al. China's coal consumption forecasting using adaptive differential evolution algorithm and support vector machine [J]. Resources policy, 2021(74): 1-11.
- [11] ZENG Sheng, SU Bin, ZHANG Minglong, et al. Analysis and forecast of China's energy consumption structure [J]. Energy policy, 2021(159): 1-12.
- [12]谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [13] LIU Junling, WANG Ke, ZOU Ji, et al. The implications of coal consumption in the power sector for China's CO₂ peaking target [J]. Applied energy, 2019(253): 1-14.
- [14]张宏. 在 2030 年碳排放达峰、2060 年碳中和背景下——构建煤炭发展新格局与碳减排行动路径[N]. 中国煤炭报, 2021-01-12(3).
- [15]王国法,任世华,庞义辉,等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
- [16]廖华,向福州,魏一鸣. 我国“十四五”能源需求预测与展望[R]. 北京:2021: 1-6.

(本文责编:辛 城)