

中国清洁与非清洁能源的替代弹性估计 及结构优化研究

刘自敏 马靓靓 张 娅*

摘要:在不断攀升的能源消费需求与碳减排约束日益矛盾的现状下,如何通过能源消费清洁化,或是利用清洁能源替代非清洁能源以促进碳减排是社会各界面临的难题。本文基于2012—2019年中国30个省市的面板数据,采用似不相关回归方法估计了清洁能源与非清洁能源的CPE弹性和MES弹性,同时在清洁能源与非清洁能源可替代性的基础上,利用碳夹点方法预测碳减排约束下“十四五”期末的中国最优清洁能源量。主要研究结论如下:清洁能源与非清洁能源的自价格弹性较低,整体缺乏弹性。清洁能源与非清洁能源的CPE替代弹性和MES替代弹性均为正数,总体来看清洁能源与非清洁能源之间呈现替代关系。分地区来看,西部地区的非清洁能源自价格弹性绝对值与东中部地区相比差距较大,此外三个地区的清洁能源与非清洁能源均存在替代关系。不同资源禀赋地区的替代弹性存在异质性,在资源型地区,非清洁能源替代清洁能源的替代弹性较小,非资源型地区则相反。中国2020年清洁能源消费量为12.10亿吨标准煤,占据能源总量的23.4%,折合为3546.56万TJ,距离实现2025年单位GDP碳排放下降18%的目标,还需要再增加3076.84~3369.77万TJ。机制分析发现,能源间替代可以通过能源价格以及有偏技术进步实现碳减排。本研究为政策制定者制定相关能源政策提供了有益参考。

关键词:清洁能源;非清洁能源;MES替代弹性;碳夹点;碳减排

*刘自敏(通讯作者),西南大学经济管理学院,邮政编码:400715,电子邮箱:ziminliu@126.com;马靓靓,西南大学经济管理学院,邮政编码:400715,电子邮箱:majingjing620@126.com;张娅,重庆三峡水利电力(集团)股份有限公司,邮政编码:404100,电子邮箱:zya15926@163.com。

本文系国家自然科学基金一般项目“碳达峰碳中和目标下的电碳关联市场设计与资源配置机制创新研究(21BJL080)”的阶段性成果。感谢匿名审稿人的意见,文责自负。

一、引言

随着温室气体的持续排放,全球环境遭受了严重破坏,各国逐渐开始重视碳排放对经济发展、生态环境的影响。人类的生存和发展对能源的依赖性随着经济社会的持续发展逐渐增强,其中占据主导地位的便是非清洁能源如煤炭、石油、天然气等的大量消耗。中国作为碳排放大国,在全球节能减排进程中有着至关重要的作用。据统计,2020年中国化石能源消费量占据能源消费结构的84.1%,说明中国经济发展在一定程度上依然依赖煤炭、石油等化石能源,而对于煤炭的消费更是占据化石能源消费的67.5%,在以“贫油、少气、相对富煤”为能源资源特征的中国,煤炭的主体能源地位短时间内难以改变^①。此外,2020年中国的能源消费量是全球能源消费量的四分之一以上,并且中国二氧化碳排放量为98.99亿吨,占全球碳排放总量的30.7%,远远超过占全球总排放量13.8%的美国^②。自2020年联合国大会将碳减排目标从“碳达峰”提升至“碳中和”以来,中国不断推进“双碳”任务的落实。能源资源的有限性和因能源使用引起的环境生态问题是中国当前面临的严峻挑战,如何在满足能源消费需求以及碳排放约束的前提下保持经济持续发展是当下亟待解决的问题。

相关数据表明,能源消费不断攀升和二氧化碳排放约束的矛盾日益凸显。因此分析不同种类能源替代互补关系及其对碳排放的作用机制,进而利用清洁能源替代非清洁能源具有重要意义。本文尝试为缓解节能减排与促进经济发展提供可能的解决方法,进而为政策制定者深入推进能源结构优化、能源清洁化进程提供可能的有益参考。

国内外有关要素替代弹性的研究内容丰富、范围广泛,既往相关研究主要分为以下三个方面:一是利用不同模型测度要素替代弹性的相关研究;二是衡量能源和非能源(主要是资本和劳动)间替代弹性的相关研究;三是评估能源种类间替代弹性的相关研究。

一是利用不同模型测度要素间替代弹性的相关研究。从实证角度来看,超越对数函数是使用最多的模型(艾明晔、李呈祥,2017;张静宇、周宏,2019;吴丽丽等,2021),其次是常弹性生产函数(韩彪等,2018;曹孜、吴朝阳,2020),其中主要是嵌套的常弹性生产函数(邓明,2017)。Christensen等(1973)通过限制不同投入要素间的替代互补关系以构建超越对数生产函数来研究要素间替代弹性。一些学者在生产达到均衡的条件下,利用对偶理论将要素价格纳入模型构建同时包含要素投入与价格的超越对数成本函数。Pindyck(1979)利用超越对数成本函数测度了美国、欧洲、日本和加拿大能源与非能源替代弹性与能源种类替代弹性,结果表明资本、劳动和能源存在相互替代关系,并且资本对能源的替代强于劳动的替代。虽然超

^① 数据来源:《中国能源统计年鉴(2021年)》。

^② 数据来源:《BP世界能源统计年鉴(2021年)》。

超越对数函数被广泛应用于计算要素替代弹性,但是仍然存在一定缺陷,因此学者们修正了超越对数生产函数测度替代弹性的公式,并且解释了超越对数成本函数所计算的替代弹性的含义。超越对数成本函数测度替代弹性,为后续计算要素替代弹性提供了一定的参考(郝枫、盛卫燕,2014)。综上分析,超越对数生产或成本函数在计算要素替代弹性中更具优势。

二是衡量能源和非能源间替代弹性的相关研究。从中国整体层面看,中国的能源与劳动、资本之间均呈现替代关系(杨福霞等,2011);但是就短期来看能源与资本存在互补关系,长期存在替代关系(杨冕等,2021)。从不同行业视角来看,机械行业的能源、资本、劳动三者间存在显著的替代关系(林伯强、杜克锐,2014),但是制造业的能源与资本呈现替代关系,与劳动却呈现互补关系(杨中东,2007;张纪凤、黄萍,2011);而在石化行业中资本对能源的替代要强于能源对资本替代(艾明晔等,2017)。能源与非能源的替代效应强弱在同一行业中存在异质性,如工业生产部门中能源对于劳动的替代程度要高于对资本的替代程度(吴力波,2011)。还有从地域来看,山西省能源要素与非能源要素之间存在替代效应,但是替代效应较弱(丁利春等,2022)。此外,也存在将超越对数生产函数和CES生产函数相结合计算工业部门的能源外部替代弹性的做法,总体上能源与资本呈现较为稳定的替代关系,但是能源与劳动之间的替代关系不明朗(查冬兰等,2016)。

三是评估能源种类间替代弹性的相关研究,主要从实证角度对煤炭、石油、天然气以及电力之间的替代关系进行相关研究。从整体上看,中国电力和石油均与煤炭呈现较为稳定的替代关系(黄磊、周勇,2008)。而就行业层面探讨,不同能源种类间替代互补关系存在行业异质性,如在中国制造业中,基于能源需求替代弹性发现石油与煤炭和电力可以相互替代,但是煤炭与电力的替代互补关系却无法确定(郑晓理等,2012),而在英国制造业中,煤炭、石油和天然气的替代程度较强(Steinbuks, 2012)。此外,从理论和经验两个层面切入并结合标准化系统方程分析要素替代弹性,发现中国工业部门整体的要素替代弹性为2.906(陆菁、刘毅群,2016)。除了上述针对非清洁能源种类间替代弹性的估计,学界还研究了清洁与非清洁能源的替代弹性,在26个国家及地区生产部门清洁能源与非清洁能源间替代弹性都大于1,表明清洁能源与非清洁能源之间存在替代关系(Papageorgiou et al., 2017)。Emir等(2018)在Papageorgiou等(2017)的基础上,利用更灵活的非参数方法放宽了限制性生产函数假设,测度了同一样本组的清洁能源与非清洁能源间的替代弹性,但是却得出与之相反的结论,从而在一定程度上否定了清洁能源和非清洁能源之间的替代弹性大于1是长期绿色经济增长的关键条件之一。此外,还有学者重点研究电力和其他能源之间转换的潜力,尤其是电力与化石能源的替代弹性的研究。Halvorsen(1977)研究发现,电力通常是其他能源(如煤、石油和天然气)的弱替代品(Jones, 1996; Stern, 2012)。

通过对要素替代弹性相关文献研究梳理,发现学者们大多关注能源与非能源(主要是资

本和劳动)间替代弹性的测度,而对于能源内部替代弹性的研究较少。能源内部替代弹性的相关研究主要对煤炭、石油以及天然气的替代弹性进行测算,即测度化石能源间替代弹性,缺乏根据能源性质进行分类来测度不同类型能源的替代弹性。不同种类能源的替代被认为是应对气候变化有利措施之一,尤其是清洁能源对非清洁能源的有效替代,通过清洁能源替代实现能源结构优化,进一步推动减排目标的达成。

综上所述,本文可能的创新之处在于:第一,测度了中国清洁能源与非清洁能源间替代弹性,推动了不同能源品种间替代弹性测度在国内进一步应用研究。第二,基于清洁能源可替代性的定量测算,利用碳夹点分析法确定如何在能源需求之间分配不同的能源资源,以满足指定的碳排放限制,从而对优化能源结构具有一定的参考价值。

本文剩余部分结构安排如下:第二节是理论分析与方法介绍,包含要素替代弹性、超越对数成本函数、似不相关回归和碳排放夹点分析;第三节是数据说明与变量定义;第四节是清洁能源与非清洁能源替代弹性估计以及要素替代影响碳排放可能的机制解释;第五节是“十四五”期末最优清洁能源数量与能源结构优化分析;最后是本文的研究结论和政策建议。

二、理论分析与方法介绍

本节首先从要素的自价格弹性、交叉价格弹性和 Morishima 替代弹性入手,对比分析其优缺点。其次,引入本文的估计模型——超越对数成本函数,推演清洁能源与非清洁能源的成本份额方程,并且推导超越对数成本函数下的三种替代弹性测度形式。之后,介绍似不相关回归方法。似不相关回归是对超越对数成本函数估计的实证方法,利用似不相关回归的实证结果测算清洁能源与非清洁能源间的替代弹性。最后,介绍以能源可替代性为核心的碳夹点分析的计算步骤,即利用线性规划的方式计算碳排放约束下最优清洁能源量,以优化能源结构。

(一)要素替代弹性

要素替代弹性是指一种投入要素价格变化所引起另一种生产要素相对投入量的变化比例。主要的要素替代弹性分为四类:一是希克斯替代弹性(Hicks Elasticity of Substitution,简称 HES 替代弹性);二是艾伦-乌兹瓦替代弹性(Allen-Uzawa Elasticity of Substitution,简称 AES 替代弹性);三是自价格与交叉价格弹性(Cross-price Elasticity,简称 CPE 替代弹性);四是 Morishima 替代弹性(Morishima Elasticity Substitution,简称 MES 替代弹性)。与考察外生要素价格变化对两种生产要素比例变化的影响不同,政策制定者感兴趣的是要素价格变化对要素本身和其他相关生产要素需求的影响程度的变化(FrondeI, 2011)。因此本文将首先估计自价格弹性与 CPE 替代弹性,然后在此基础上进行 MES 替代弹性的估计。

由于决策者通常对外生价格变化对其他生产要素需求的影响比对要素价格变化对要素

投入份额的影响更感兴趣, CPE 替代弹性分析了一种生产要素的价格变化对其他生产要素需求的影响, 公式如下:

$$CPE_{X_i, P_j} = \frac{\partial \ln(X_i/X_j)}{\partial \ln(P_j/P_i)} \quad (1)$$

与 CPE 替代弹性一样, 要素本身价格变化所引起的要素本身需求量的影响指的是在一定价格下的一种单一要素替代, 主要分析一种生产要素的价格变动对自身需求变动的影响程度。具体公式可表示为:

$$CPE_{X_i, P_j} = \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_j} \quad (2)$$

CPE 替代弹性测度当一种要素价格相对变化时, 另一种要素投入量的变化情况, 即 CPE 替代弹性是单要素—单价格替代弹性, 无法考察两种要素投入比例或是相对价格变化时, 其中一种要素价格或是投入量的变化情况。由此引申出双要素—单价格的 MES 替代弹性。MES 替代弹性具体形式可表现如下:

$$MES_{X_i, P_j} = \frac{\partial \ln(X_i/X_j)}{\partial \ln P_j} = \beta_{X_i, P_j} - \beta_{X_j, P_j} \quad (3)$$

在对比了二者的定义之后, Blackorby 等(2007)发现 MES 替代弹性和 CPE 替代弹性有如下关系:

$$MES_{X_i, P_j} = \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_j} - \frac{\partial \ln X_j}{\partial \ln P_j} = CPE_{X_i, P_j} - CPE_{X_j, P_j} \quad (4)$$

由此可见 MES 替代弹性是 CPE 替代弹性与价格变动的生产要素的自价格弹性的差值。通过这种改进, 研究者可以分析一种要素价格波动对两种生产要素投入比例的影响。

通过对 CPE 替代弹性和 MES 替代弹性的对比分析(如表 1 所示), 从而得到两个替代弹性的特点、替代互补关系的判断以及优缺点。

表 1 要素替代弹性对比分析

替代弹性	表达式	对称性	关系判断	优点	缺点
CPE	$CPE_{ij} = \frac{\partial \ln(X_i/X_j)}{\partial \ln(P_j/P_i)}$	$CPE_{ij} \neq CPE_{ji}$	$CPE_{ij} > 0$, 替代 $CPE_{ij} < 0$, 互补	能够分析一种投入要素价格波动对其他投入要素需求量的冲击程度, 为生产者和政策制定者提供参考	只描述了绝对替代效应, 无法测度相对替代效应
MES	$MES_{ij} = \frac{\partial \ln(X_i/X_j)}{\partial \ln P_j}$	$MES_{ij} \neq MES_{ji}$	$MES_{ij} > 0$, 替代 $MES_{ij} < 0$, 互补	本质上刻画了 MES 替代弹性, 即要素投入相对变化对要素价格变动的反应	由于存在收入效应, 导致 MES 替代弹性与其他替代弹性可能呈现相反的结果

CPE 替代弹性能够分析一种投入要素价格波动对其他投入要素需求量的冲击程度, 为生

产者和政策制定者提供参考,但是无法描述相对替代效应。相反地,MES替代弹性则能够更加准确地反映要素之间相对比例的变化情况;MES替代弹性考虑了CPE替代弹性所忽略的要素收入效应是更加重要的变化点(鲁成军、周端明,2008)。但正因如此,由于存在收入效应从而导致MES替代弹性与CPE替代弹性可能呈现相反的结果。可能的原因是就MES替代弹性而言,即使两种生产要素的CPE替代弹性为负,但是如果对应生产要素的自价格弹性数值(绝大多数情况下生产要素为正常品,其自价格弹性为负)相对较大时,导致CPE替代弹性减去自价格弹性的最终结果为正数,即MES替代弹性大于零,说明这两种生产要素之间存在替代关系(Fronedel,2011)。此时,在CPE替代弹性下呈现互补关系;而在MES替代弹性下却呈现替代关系。从而验证由于存在收入效应,导致MES替代弹性与CPE替代弹性呈现相反的结果。因此本文选择自价格替代弹性、CPE替代弹性和MES替代弹性作为测度清洁能源与非清洁能源间替代关系的衡量工具。

(二)超越对数成本函数

基于超越对数函数(Translog Function)具有形式灵活、涵盖范围广、便于度量等特点,因此在描述要素替代互补关系和变动特性方面表现出更大的优越性。从既往研究来看,利用超越对数生产函数测算生产要素替代弹性并不理想,因而从对偶理论出发引申出的超越对数成本函数成为研究生产要素替代弹性时较理想的方法。另外考虑到超越对数成本函数有不受可供选择的弹性恒定假设条件限制等优势,所以本文采用了超越对数成本函数为模型进行研究。

假定成本函数为 $C=F[P_k, P_l, P_e(P_{ce}, P_{nce}), Y, t]$,其中 C 为成本, P_k 为资本价格, P_l 为劳动价格, P_e 为能源价格, P_{ce} 表示清洁能源合计类价格, P_{nce} 表示非清洁能源合计类价格, Y 代表产出, t 表示随时间趋势变换的技术。通过对超越对数生产函数二阶可微性质的研究,可以得到对应的超越对数成本函数同样是二阶可微的,那么通过对成本函数进行二阶泰勒展开,得到下列超越对数成本函数:

$$\ln C = \beta_0 + \sum_{i=1}^{ce} \beta_i \ln P_{ii} + \sum_{i=1}^{ce} \beta_{iy} \ln Y_i \ln P_i + \sum_{i=1}^{ce} \beta_{ii} \ln P_{ii} + \sum_{i=1}^{ce} \sum_{j=1}^{ce} \beta_{ij} \ln P_i \ln P_j + 0.5 \sum_{i=1}^{ce} \beta_i (\ln P_i)^2 + 0.5 \beta_{yy} (\ln Y_t)^2 + 0.5 \beta_{tt} t^2 \quad (5)$$

在式(5)^①中, $i, j=1, k, nce, ce$,分别表示劳动、资本、非清洁能源和清洁能源, $P_i, P_j = P_l, P_k, P_{nce}, P_{ce}$,分别代表劳动、资本、非清洁能源以及清洁能源的价格, \ln 代表自然对数。

通过谢泼德引理(Shepherd Lemma),对上述要素价格的自然对数求偏导,得到各生产要素的成本份额方程:

$$S_i = \frac{X_i P_i}{P_i} = \frac{\partial C}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{C} = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} = \beta_i + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \ln P_{jt} + \beta_{iy} \ln Y_t + t \beta_{it} \quad (6)$$

① 公式(5)—(9)的展开式详见附录一。

对式(6)展开,可以得到具体要素的成本份额方程,如式(7)所示:

$$S_i = \beta_i + \beta_{ii} \ln P_{it} + \beta_{il} \ln P_{lt} + \beta_{ik} \ln P_{kt} + \beta_{ince} \ln P_{ncet} + \beta_{ice} \ln P_{cet} + \beta_{iy} \ln Y_t + t\beta_{it} \quad (7)$$

基于成本份额方程加总法则以及成本函数关于要素价格线性齐次性的约束条件,该方程参数符合对称性、一次齐次性以及加总性质,即存在:

$$\beta_{ij} = \beta_{ji}, \sum_{j=l}^{ce} \beta_{ij} = \sum_{i=l}^{ce} \beta_{ij} = \sum_{i=l}^{ce} \beta_{it} = 0, \sum_{i=l}^{ce} \beta_i = 1 \quad (8)$$

对上述方程组系数进行估计时,因为要素份额方程之和为1,每一份额方程的随机干扰项之和为0。为避免奇异性,需要去掉一个要素份额方程,在此为保证结果不受人为因素干扰,我们去掉清洁能源要素份额方程,结合式(7)并利用式(8)中各参数之间数量关系,把以上方程变换为式(9),然后估算其余要素份额方程。通过 stata16 软件可以得到对应的要素替代弹性参数,由此根据参数的性质得到清洁能源要素份额方程的各参数,并在此基础上计算各要素之间的替代弹性。

$$S_m = \beta_m + \beta_{mk}(\ln P_{kt} - \ln P_{cet}) + \beta_{ml}(\ln P_{lt} - \ln P_{cet}) + \beta_{mnce}(\ln P_{ncet} - \ln P_{cet}) + \beta_{my} \ln Y_t \quad (9)$$

在式(9)中, $m=l, k, nce$ 。结合要素替代弹性测度方法,在超越对数成本函数形式下,要素 X_i 和要素 X_j 的CPE替代弹性如下:

$$CPE_{X_i, P_j} = \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_j} = \frac{\beta_{ij}}{S_i} + S_j \quad (10)$$

当要素 X_i 和要素 X_j 相同时,上式则自行转化为要素的自价格弹性,可表示为:

$$CPE_{X_i, P_i} = \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_i} = \frac{\beta_{ii}}{S_i} + S_i - 1 = \frac{\beta_{ij}}{S_i} - \frac{\beta_{ij}}{S_j} + 1 \quad (11)$$

上式表明:要素 j 的价格变动导致的要素 i 对要素 j 的相对消耗量的变动是由两个部分因素综合作用,一是要素 j 的价格变动引起的要素 i 的消耗量的变化,二是要素 j 的价格的变动所导致的自身消耗量的变动,而MES替代弹性的数值是CPE替代弹性和自价格弹性的差值。由此可表示为式(12):

$$MES_{X_i, P_j} = CPE_{X_i, P_j} - CPE_{X_j, P_j} = S_j + \frac{\beta_{ij}}{S_j} - 1 \quad (12)$$

同样地, MES_{X_i, P_j} 数值也具有非对称性,即 $MES_{X_i, P_j} \neq MES_{X_j, P_i}$ 。

表2反映了CPE替代弹性和MES替代弹性的关系。当CPE和MES均大于0时,要素之间存在替代关系;当CPE和MES均小于0时,要素之间存在互补关系,而当CPE小于0而MES大于0时或是CPE大于0而MES小于0,要素之间的替代互补关系不确定。

表 2 CPE 替代弹性和 MES 替代弹性的关系

类型	CPE	MES	分析	关系
1	$CPE < 0$	$MES < 0$	MES 和 CPE 均为互补	互补
2	$CPE < 0$	$MES > 0$	CPE 互补, MES 替代	不确定
3	$CPE > 0$	$MES < 0$	CPE 替代, MES 互补	不确定
4	$CPE > 0$	$MES > 0$	MES 和 CPE 均为替代	替代

(三)似不相关回归

由于经济系统中涉及到许多变量,因此要建立各种方程,由此形成一个方程组。同一系统内各方程被解释变量间可能有一定内在联系,如资本成本、劳动成本和能源成本等一起组成总成本,即资本份额方程、劳动份额方程以及能源份额方程的被解释变量资本份额、劳动份额以及能源份额之间存在联系,这可能导致各方程的扰动项之间存在同期相关关系。此时经典的普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)不能很好地解决这一问题,因此考虑使用似不相关回归(Seemingly Unrelated Regression Estimation, SUR)予以修正。SUR是一种能够对方程扰动项之间存在同期相关的方程组进行参数估计的方法,原假设为各方程的扰动项之间不存在同期相关,若在一定显著性水平上拒绝原假设则表示方程组的扰动项之间存在同期相关关系,即使用SUR对方程组进行回归,进而提高估计效率。因此在利用SUR对方程组进行回归时,需要先检验方程组的扰动项之间是否存在同期相关关系。基于此, Breusch 和 Pagan (1980)提出 LM 统计量来检验方程组扰动项之间的相关性, LM 统计量的具体表达式如下:

$$\lambda_{LM} = T \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} r_{ij}^2 \xrightarrow{d} \chi^2 \left(\frac{n(n-1)}{2} \right) \quad (13)$$

在式(13)中, T 表示每个方程的观测值个数, n 为方程个数, $r_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}}$ 表示由残差测算的扰动项 ε_i 和 ε_j 的同期相关系数, $\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} r_{ij}^2$ 即为同期相关系数矩阵主对角线下的每项平方和。

因此本文使用SUR对要素份额方程组进行参数估计,以确保无论去掉哪一个方程,结果都能保持一致性,在求得资本投入、劳动力投入和清洁能源投入的份额方程的参数之后,非清洁能源份额方程中的参数可以通过式(8)来获得,最后结合参数间的数量关系求出计算生产要素间替代弹性所需的全部参数数值。

(四)碳夹点分析

碳夹点分析(Carbon Emission Pinch Analysis,简称CEPA方法)是利用清洁能源替代高碳能源,以实现碳减排目标,CEPA方法涉及到清洁能源与高碳能源间替代关系。Marchetti (1977)首次提出了一种全面分析能源替代的综合模型,以经济发展、社会效率以及矿产资源等变量为核心,并且研究表明能源间的转换具有一定规律性,但是其间的替代进程较为缓慢。Tan 和 Foo(2007)首次将能源规划夹点图(Energy Planning Pinch Point Diagram,简称EP-

PD)引入到CEPA方法,用来说明一个国家或地区如何通过引入零碳能源来实现预定的二氧化碳排放目标。EPPD后来扩展到增加低排放能源而达到规划目标(Lee et al., 2009)。Matteo等(2021)将CEPA方法应用到英国发电部门,发现碳捕获技术可以显著减少碳排放,有效缓解温室效应,而实现负排放技术与碳捕获技术同样重要。此外,CEPA方法已被各地区用来分析碳减排目标下的能源规划,包括欧盟(Su et al., 2020)、爱尔兰(Crilly & Zhelev, 2008)和阿拉伯(Lim et al., 2018)用于发电部门的气候-能源-水关系研究,波兰(Pekala et al., 2010)和中国(Jia et al., 2016)电力部门可持续发展规划的多维夹点分析。EPPD是CEPA方法的重要图形表示工具,其解决的是在碳约束下如何获得满足区域能源需求的最小能源需求。因此,基于能源间的可替代性,减排目标下的中国能源结构优化问题可以描述为确定满足碳排放约束下的最优清洁能源量。

基于能源内部替代,CEPA方法可以通过线性规划模型来解决碳排放约束下低碳能源替代高碳能源问题。碳排放约束下的线性规划表示为在某区域内,既定能源需求总量和CO₂排放限制目标,确定清洁能源的最优供给量。碳排放约束下的能源替代表示为计算满足区域能源需求和碳排放限制双重约束的最优清洁能源供给量,即 $\min N$ 。CEPA方法的约束条件如式(14)~(17)所示。

$$\text{能源供给平衡: } S_i = M_i + F_i \quad (14)$$

其中 S_i 为能源供给量; M_i 为 i 能源的剩余供给量,表示本区域的总能源供给量中除了 i 能源以外的其他能源的供给总量; F_i 为满足区域内能源需求的 i 能源供给量。

$$\text{能源需求平衡: } D_i = N + F_i \quad (15)$$

其中 D 是区域能源总需求量; N 为满足区域能源需求的清洁能源量, F_i 同上。这表明 i 能源供给量等于 i 能源需求量,因此 F_i 可以同时出现在能源供给平衡与能源需求平衡。

$$\text{碳排放限制: } \sum_i C_{out,i} F_i \leq C_{in} D_i \quad (16)$$

其中 $C_{out,i}$ 为能源 i 的供给碳排放因子; C_{in} 为区域能源需求碳排放因子;式(16)表示能源供给的碳排放量不能超过能源需求的碳排放量。

$$\text{非负限制: } M_i, F_i, N \geq 0 \quad (17)$$

碳夹点的分析步骤如图1所示:

(1)将各种能源按碳排放因子升序绘制在碳排放-能源量图上(水平坐标为能源能量,垂直坐标为二氧化碳排放量),形成复合能源供应曲线。将全国的能源需求和最大CO₂排放限制绘制在同一碳排放-能源量图上,绘制出能源需求复合曲线。(2)由于能源供给必须满足能源需求,所以当复合能源供给曲线在复合能源需求曲线的左侧或上方时,此时不满足碳排放限制。这就需要将复合能源供给曲线向右平移,直到复合能源需求曲线完全移到复合能源供

给曲线的左侧,此时两者形成切点即碳夹点,此时绘制的图形称作EPPD。(3)复合能源需求曲线末端所对应的能源以外的复合能源供给曲线是多余的能源量,这部分能源供给可以通过能源替代进行消除。复合能源需求曲线末端垂直线上的复合能源供给曲线与复合能源需求曲线之间的排放量为通过能源替代减少的碳排放量。复合能源供给曲线移动的水平距离就是满足区域二氧化碳排放限制的清洁能源量。

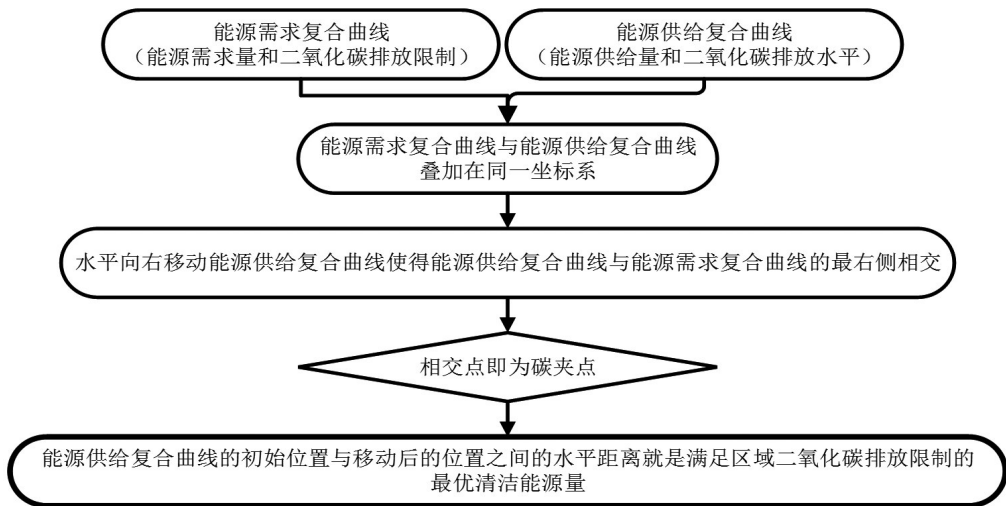


图1 CEPA方法步骤

CEPA方法的内在机理是基于能源间可替代性计算在满足能源需求以及碳排放约束下的最优清洁能源量,从而优化能源结构,为地方政府制定合理的碳减排限制下的最优能源供应量提供科学依据。以可再生能源和生物质能等为代表的清洁能源,取代以煤炭、石油、天然气等为代表的非清洁能源是目前中国节能降耗的重要途径之一。然而,实际消费中清洁能源的成本和价格比非清洁能源要昂贵得多,并且在开发与应用技术上没有非清洁能源成熟。因此在能源规划问题中,既能满足能源需求又能够达到减排目标,使用最少的清洁能源满足区域能源需求显得非常有必要。

三、数据说明与变量定义

本节介绍研究所使用的变量、数据来源以及相应的计算方式。从能源属性上进行分类,将能源划分为清洁能源与非清洁能源,介绍相应能源投入价格的计算方式,并进行变量的描述性统计分析,最后分析清洁与非清洁能源成本占比的变化。

(一)数据说明

本文所使用的数据主要包括四个部分:总产出、资本投入以及资本价格、劳动投入以及劳动价格、能源投入以及能源价格,其中能源投入及能源价格划分为清洁能源投入、清洁能源价格及非清洁能源投入、非清洁能源价格。其中总产出、资本投入以及劳动投入来自《中国统计

年鉴》，资本价格来自《中国金融年鉴》，劳动价格来自《中国劳动统计年鉴》，能源以及能源价格来自《中国能源统计年鉴》《中国电力统计年鉴》《中国价格统计年鉴》以及 Wind 数据库。具体变量的数据以及计算方式如表 3 所示。

变量	数据	计算方式
总产出	实际 GDP	以 2012 年=100 进行平减来计算各省市区的实际 GDP
资本投入	固定资产投资总量	采用永续盘存法来计算各省区市的资本存量,借鉴张军等(2004),将各省区市 2012 年固定资产投资总量除以 10% 作为初始资本存量,再以 2012 年=100 进行平减,从而得到实际初始资本存量
资本价格	实际利率	由名义利率、通胀率和折旧率进行计算,而名义利率由金融机构 1 至 3 年的中长期贷款利率表示,折旧率取全国平均水平 9.3%
劳动投入	每年就业人数	每年就业人员数的年初与年末的简单平均
劳动价格	实际工资	实际劳动平均工资用职工平均工资(在岗)计算,并且以 2012 年=100 进行平减
能源投入	终端能源消耗量	将各能源先按其能源折标准煤参数计算为标准煤,再计算出清洁能源与非清洁能源的终端消耗量
能源价格	加权能源价格	以不同能源种类的占比为权重进行加权平均 ^①

(二)变量定义

目前,学界对清洁能源的含义众说纷纭,主要可以分为以下三种观点:一是清洁能源即是可再生能源,包括风能、水能、潮汐能、太阳能、地热能、生物质能等以及由可再生资源产生的生物燃料和氢气等。二是清洁能源包括可再生能源与非可再生能源,其中非可再生能源是经过清洁能源技术净化后的化石能源,包括洁净油、洁净煤等。三是清洁能源包括可再生能源、经过净化的非可再生能源和核能,尽管核能是不可再生能源,但其具有污染小废气排放量低的特点,应该将其纳入清洁能源范畴(张锐、寇静娜,2020)。由此看来,学术界对清洁能源的涵盖范围还存在争论,但是一致认可可将可再生能源纳入清洁能源范畴。

因此,结合本文的研究主题,本文将清洁能源定义为不排放污染物的能源,主要以是否排放二氧化碳为区分。这里不是严格排放二氧化碳,实际上清洁能源生产过程也会排放二氧化碳,但是相比于非清洁能源如化石能源而言排放要相对较少,从碳排放因子也可以得到验证。此外,囿于数据可得性,本文清洁能源的范畴包括:水电、风电、核电以及太阳能发电,而非清洁能源包括天然气、石油、煤炭和火电。

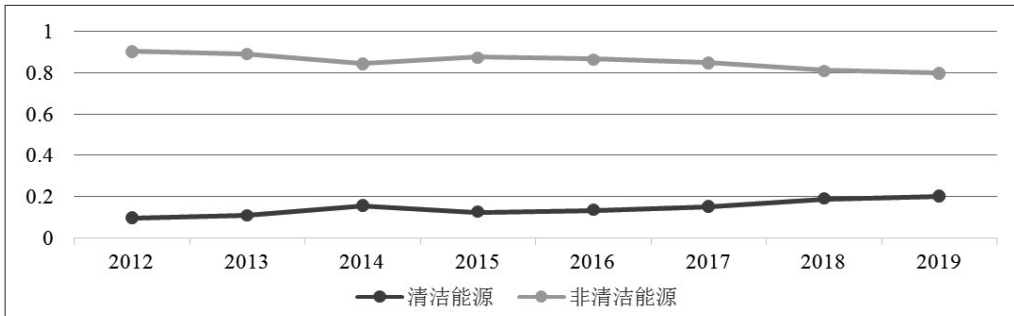
由于在 2012 年以前缺少省区市的能源价格数据,为确保数据的一致性,本研究的时间跨度为 2012—2019 年,包含 30 个省市区(西藏、台湾、香港和澳门除外)的面板数据。

^① 加权能源价格是指以不同能源在各个分类能源总量中所占比重为权重,例如石油在非清洁能源中所占比重即为石油价格与非清洁能源价格中的权重,进而对能源价格进行加权平均。

在进行实证分析之前,先对变量进行描述性统计,掌握变量的基本特征,针对本文变量的描述性统计如表4所示。

表4 变量描述性统计

变量	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
ln(GDP)	240	9.7600	0.9720	6.5530	11.4600
ln(资本价格)	240	4.6200	0.0248	4.5660	4.6790
ln(劳动价格)	240	1.7570	0.2650	1.2920	2.6670
ln(清洁能源价格)	240	4.5920	0.0640	4.1070	4.8210
ln(非清洁能源价格)	240	4.5430	0.1550	3.7600	5.0040
资本份额	240	0.9450	0.0669	0.0148	0.9960
劳动份额	240	0.0006	0.0006	0.0002	0.0035
清洁能源份额	240	0.0122	0.0644	0.0003	0.9840
非清洁能源份额	240	0.0418	0.0253	0.0004	0.1600



数据来源:《中国能源统计年鉴》《中国电力统计年鉴》《中国价格统计年鉴》。

图2 中国清洁能源与非清洁能源种类成本比重

从图2中的能源种类成本结构表可知,非清洁能源的消费成本占能源消费总成本的比重由2012年的90.4%下降到2019年的79.7%,减少约10.7%,该比重每年以1.536%速度下降,其消费成本占能源总成本的比重呈现递减趋势。清洁能源的消费比重恰恰与之相反,清洁能源消费成本在能源消费总成本的比重由2012年的9.6%上升到2019年的20.3%,增加约111.46%,每年约以15.92%的速度增加。通过统计数据来看,中国能源消费的结构比较符合中国现今的发展方向,增加清洁能源消费、优化能源消费结构从而降低化石能源消费,进而减少碳排放。

四、清洁能源对非清洁能源的替代弹性估计

本节主要是对似不相关回归结果进行讨论。首先从中国整体层面上分析似不相关回归结果并根据结果计算整体要素替代弹性;其次从地理区位层面和资源禀赋层面进行似不相关回归,并根据结果计算替代弹性,从而分析不同地理区位与资源禀赋的地区之间替代弹性是否存在异质性,并给出可能的原因;最后通过理论解释要素替代影响碳排放可能的作用机制。

(一)全国层面的结果分析

1. 全国层面的联合估计

通过似不相关回归(SUR)方法,我们对中国30个省市2012—2019年的数据进行回归,从而得到表5的回归结果。

表5 总体似不相关回归结果

S_k		S_l		S_{nce}	
β_{kk}	0.0235 (0.0909)	β_{lk}	-0.0035*** (0.0004)	β_{ncek}	0.0144 (0.0330)
β_{kl}	0.0397** (0.0201)	β_{ll}	0.0023*** (0.0000)	β_{ncel}	-0.0351*** (0.0073)
β_{knce}	-0.0417 (0.0300)	β_{lnce}	0.0004*** (0.0001)	β_{ncence}	0.0295*** (0.0109)
β_{ky}	0.0085* (0.0044)	β_{ly}	0.0001*** (0.0000)	β_{ncey}	-0.0033** (0.0016)
β_{kt}	-0.0034 (0.0024)	β_{lt}	-0.0001*** (0.0000)	β_{nct}	0.0024*** (0.0009)
常数项	7.8480 (4.8830)	常数项	0.1460*** (0.0232)	常数项	-4.9330*** (1.7710)
样本量	240	样本量	240	样本量	240
R ²	0.0400	R ²	0.7250	R ²	0.1320
Breusch-Pagan test		23.138*** P<0.0001			

注:①***、**、*分别表示参数估计在1%、5%及10%的临界水平上统计显著;②Breusch-Pagan服从 χ^2 (3)分布。

由表5所示的参数估计结果可以看出, B-P 检验的P值小于0.0001,说明在1%的显著性水平上可以拒绝原假设,所以使用SUR方法对方程组进行估计。对资本份额方程、劳动份额方程和非清洁能源份额方程的拟合效果不同,其R²值分别是0.040、0.725和0.132。从可获得的结果来看,在资本份额方程中,整体系数均不显著,但是在5%的水平上显著;在劳动力份额方程中,所有系数均在1%的水平上显著,这说明SUR方法估计效果较好;在非清洁能源份额方程中,除却第一个系数不显著以外,其他参数均在1%或5%的水平上显著。由于剔除了清洁能源份额方程,因此清洁能源份额方程参数的显著性无法计算获取,但从上述的估计结果来看,利用SUR估计要素份额方程的估计效果较为理想。

2. 全国层面的清洁能源与非清洁能源替代弹性估计

基于上述似不相关回归结果,利用参数间的加总性、对称性以及线性齐次性计算清洁能源份额方程各参数,进而计算要素的自价格弹性(CPE_{ii})、CPE替代弹性(CPE_{ij})以及MES替代弹性(MES_{ij}),如表6和表7所示。

表6 中国各生产要素间自价格弹性及CPE替代弹性

	总体	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
CPE_{kk}	-0.029	-0.267	-0.128	-1.287	-0.032	-0.416	-0.114	-0.059	-0.083
CPE_{kl}	0.043	0.022	0.033	0.022	0.034	0.059	0.056	0.046	0.041
CPE_{knce}	0.003	0.018	0.227	0.126	0.028	0.257	0.071	0.015	0.016
CPE_{kce}	0.011	0.312	0.132	1.139	0.030	0.100	0.128	0.002	0.027
CPE_{lk}	-0.932	-0.191	-0.237	-0.677	-0.631	-0.985	-0.796	-0.956	-0.914
CPE_{ll}	-0.802	-0.656	-0.659	-0.658	-0.683	-0.676	-0.652	-0.593	-0.652
CPE_{lnce}	0.672	1.177	3.032	3.512	4.173	2.294	1.451	1.130	0.896
CPE_{lce}	1.338	2.978	5.506	4.403	0.335	1.041	3.828	2.036	0.258
CPE_{ncek}	1.293	4.149	3.488	5.055	0.594	7.894	0.113	0.527	0.235
CPE_{ncel}	-0.846	-0.406	-0.633	-0.548	-0.865	-1.120	-0.538	-1.358	-1.200
CPE_{ncece}	-0.247	-0.115	-0.176	-0.112	-0.149	-0.117	-0.104	-0.103	-0.158
CPE_{ceck}	0.200	0.568	1.022	0.426	0.122	2.858	0.233	1.989	1.322
CPE_{cel}	1.881	-0.381	3.448	3.161	1.356	6.642	3.342	8.499	7.368
CPE_{cence}	0.563	0.605	1.183	1.035	0.424	-1.166	0.162	0.114	0.074
CPE_{cece}	1.011	1.150	1.072	1.167	1.371	1.203	1.381	1.337	1.224
CPE_{cece}	-0.198	-0.178	-0.195	-0.198	-0.195	-0.196	-0.195	-0.192	-0.103

表6展示了各要素的自价格弹性和CPE替代弹性。由表6的结果可知,资本以及劳动的自价格弹性表现为负数,这与价格和需求量之间呈反向变动是相一致的,符合现实情况。进一步,资本的自价格弹性绝对值在0~1之间的,只有2014年的自价格弹性大于1,从而表明资本市场缺乏弹性的产品,受价格的影响较小。劳动的自价格弹性绝对值取值范围均在0~1之间。

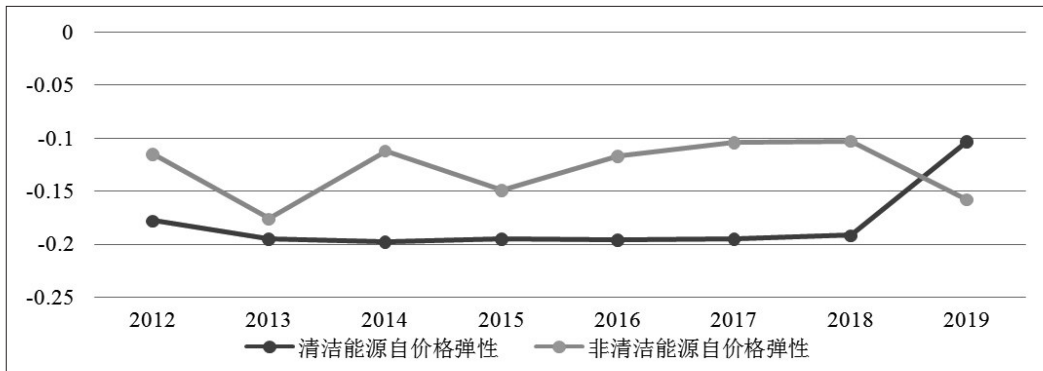


图3 2012—2019年清洁能源与非清洁能源自价格弹性变化趋势图

就能源间替代弹性而言,如图3所示,不论是清洁能源还是非清洁能源的自价格弹性都是负数,但是二者自价格弹性随时间变化不相同。清洁能源的自价格弹性随时间变化基本保持稳定,但是在2019年出现上升;而非清洁能源自价格弹性出现随时间上下波动。此外清洁能源的自价格弹性绝对值要远远大于非清洁能源。可能的解释是相比于非清洁能源如煤炭、石油、天然气等能源的丰富储量而言,现阶段清洁能源储量较低,开发利用不完全;并且开发

和储存技术也并不成熟,从而导致清洁能源价格较高,由此清洁能源小幅度上涨会导致其消费量大幅下降。

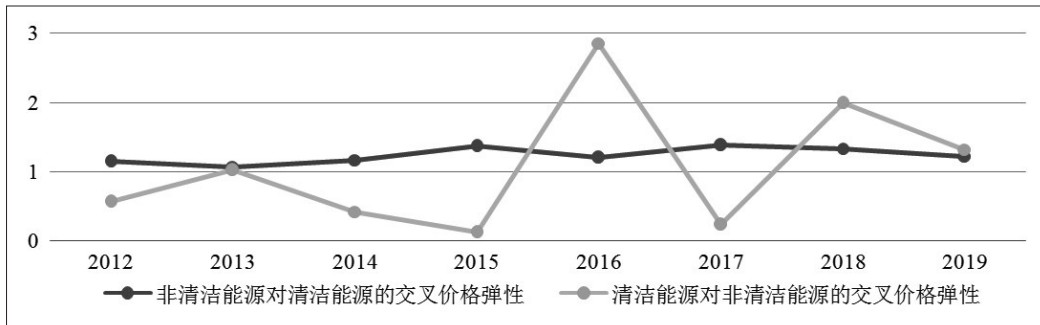


图4 2012—2019年清洁能源与非清洁能源交叉价格弹性变化趋势图

根据图4,清洁能源与非清洁能源间的CPE替代弹性均为正数,处于0.2~3.0之间,这表明清洁能源与非清洁能源之间是替代关系。换言之,可以通过调整非清洁能源价格,从而促使企业使用清洁能源,减少二氧化碳排放。但是非清洁能源替代清洁能源的稳定性强于清洁能源替代非清洁能源,即 CPE_{cence} 随时间变化幅度较小而 CPE_{ncece} 随时间趋势上下波动幅度较大,可能的原因是清洁能源大多是水电、风电以及核电等,受到气候变化的影响较大,存在发电周期性、季节性等问题导致发电不稳定。

通过对数据进行分年度回归,获得各个年度的似不相关回归结果,并根据自价格弹性、CPE替代弹性和MES替代弹性之间的关系,从而计算MES替代弹性,结果见表7所示。

表7 中国各生产要素间MES替代弹性

	总体	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
MES_{kl}	0.845	0.678	0.692	0.680	0.717	0.735	0.708	0.639	0.693
MES_{knce}	0.249	0.133	0.403	0.238	0.178	0.374	0.176	0.119	0.173
MES_{kce}	0.208	0.489	0.327	0.520	0.225	0.296	0.323	0.194	0.130
MES_{lk}	-0.903	0.076	-0.109	0.610	-0.600	-0.569	-0.682	-0.897	-0.830
MES_{lnce}	0.919	0.370	0.517	0.498	0.604	0.994	0.845	1.233	1.054
MES_{lce}	1.232	0.881	1.326	1.277	1.219	1.238	1.225	1.254	1.168
MES_{ncek}	1.010	0.707	1.083	2.212	0.626	1.371	1.078	1.029	0.966
MES_{ncel}	-0.044	0.251	0.026	0.110	-0.182	-0.444	0.113	-0.765	-0.548
MES_{ncece}	0.398	0.745	0.555	0.624	0.317	0.611	0.428	0.683	0.492
MES_{cek}	1.151	1.222	1.087	2.255	1.329	1.412	1.379	1.188	1.355
MES_{cel}	1.365	1.261	0.752	1.693	1.107	1.161	0.814	0.707	0.726
MES_{cence}	1.258	1.266	1.249	1.279	1.520	1.320	1.486	1.440	1.382

表7展示了各生产要素间MES替代弹性。由测算结果可知,当资本替代劳动时,MES替代弹性为负数,表明二者之间呈现互补关系,但是当劳动替代资本时,MES替代弹性为正数,

这表明二者呈现替代关系,由此得到劳动与资本之间的关系根据替代要素种类的变化呈现不同的替代关系。通过对公式的分析,不难得到出现这种差异变化的原因的资本以及劳动的自价格弹性差异大。资本与清洁能源、资本与非清洁能源、劳动与清洁能源之间均呈现替代关系,但是劳动与非清洁能源存在互补关系,这与部分学者的观点相一致(王班班、齐绍洲,2014;董春诗,2021)。

此外,重点分析清洁能源与非清洁能源的MES替代弹性。从表7得到无论是清洁能源替代非清洁能源还是非清洁能源替代清洁能源时,二者的MES替代弹性均为正数,这表明二者间呈现替代关系,但是取值范围存在差异: $MES_{ncece} \in (0.30, 0.75)$ 而 $MES_{cence} \in (1.20, 1.52)$, 这表明二者间的替代程度存在差异,非清洁能源更容易替代清洁能源,这与现实情况较为相符,因为非清洁能源主要是煤炭、石油等化石能源,储量较大,开发较完全,因此价格较为便宜;与此相反的是,清洁能源大多是水电、风电、核电等可再生能源,会存在季节性、周期性的影响,开发利用不完全,因此相对价格较高。由此,使用非清洁能源对于企业而言更加符合“经济人”的假设,非清洁能源更加容易替代清洁能源。

(二)异质性分析

1. 地区异质性分析

按照每个省市的地理区位将30个省市划分为东部、中部和西部地区^①,分地区之后进行似不相关回归,回归结果如附表1所示,相关的BP检验如附表2所示。

根据附表1可知,不同地区的资本、劳动和非清洁能源份额方程的拟合效果存在异质性,其中东、中、西部的劳动份额方程相较于资本份额方程和清洁能源份额方程而言,拟合效果最好,效果从好到差依次是:东部、中部和西部。根据附表2,东部和西部地区的要素成本份额方程的BP检验的P值小于0.0001,而中部地区的P值小于0.0003,表明均在1%的显著性水平上可以拒绝原假设,因此使用SUR方法对东、中、西部的要素成本份额方程组进行估计。

根据附表1可以计算出三个地区的自价格弹性、CPE替代弹性和MES替代弹性,计算结果见表8所示。

表8 中国地区清洁能源与非清洁能源CPE替代弹性和MES替代弹性

	CPE_{cece}	CPE_{ncece}	CPE_{cence}	CPE_{ncece}	MES_{cence}	MES_{ncece}
东部	-0.197	-0.418	0.032	0.003	0.450	0.200
中部	-0.193	-0.408	0.043	0.007	0.451	0.200
西部	-0.198	-0.034	0.050	0.024	0.016	0.221

^① 东部地区包括河北省、北京市、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省、海南省、辽宁省;中部地区包括吉林省、黑龙江省、山西省、河南省、安徽省、湖北省、江西省、湖南省;西部地区包括陕西省、四川省、云南省、贵州省、广西壮族自治区、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、重庆市。

从表8可知,东、中、西部的清洁能源的自价格弹性基本上一致,取值范围 $[-0.198, -0.193]$,针对非清洁能源的自价格弹性而言,东部地区与中部地区的非清洁能源自价格弹性相差不大,但是西部地区的非清洁能源自价格弹性绝对值为0.034,与东中部地区相比差距较大,主要原因是西部地区受到国家相关能源政策支持,对能源价格给予一定的政策补贴,因此价格变化对消费量的影响较小。此外,东、中、西部地区非清洁能源对清洁能源的替代与清洁能源对非清洁能源的替代相差较大,其中非清洁能源与清洁能源的CPE替代弹性在0.03~0.05之间;而清洁能源与非清洁能源的CPE替代弹性最小的只有0.003,最大的也只有0.024。这说明清洁能源替代非清洁能源的难度较大,清洁能源的价格每上涨1个百分点,非清洁能源的需求量会上涨0.003~0.024个百分点;与此相反的是,非清洁能源的价格每上涨1个百分点,清洁能源的需求量上涨0.032~0.050个百分点,这意味着随着非清洁能源的涨价,如近期石油价格上涨,消费者会转向消费清洁能源或是新能源,从而推动新能源汽车行业的发展,进而减少碳排放。另外,东、中、西部地区的CPE替代弹性和MES替代弹性的正负号保持一致,说明东、中、西部地区清洁能源与非清洁能源是替代关系,只是替代程度上存在区域异质性。

2. 资源禀赋异质性分析

不同资源禀赋地区,清洁能源与非清洁能源的替代程度也有所不同,因此本节将中国30个省份划分为资源型地区和非资源型地区来探究不同资源禀赋地区清洁能源与非清洁能源间替代弹性的差异,具体划分标准参照附录三。

划分不同资源禀赋地区后,似不相关回归结果如附表5所示,相关的BP检验如附表6所示。根据附表5可知,不同资源禀赋地区的资本、劳动和非清洁能源份额方程的拟合效果存在异质性,其中两地区的劳动份额方程拟合效果最好。根据附表6,资源型地区和非资源型地区的要素成本份额方程的BP检验的P值均小于0.0001,表明均在1%的显著性水平上可以拒绝原假设,因此使用SUR方法对不同资源禀赋地区的要素成本份额方程组进行估计是合适的。

根据附表5可以计算出不同资源禀赋地区的清洁能源与非清洁能源的替代弹性,测算结果如表9所示。

表9 中国地区清洁能源与非清洁能源CPE替代弹性和MES替代弹性

	CPE_{cece}	CPE_{ncece}	CPE_{cenc}	CPE_{ncece}	MES_{cenc}	MES_{ncece}
资源型	-0.207	-0.320	0.1148	0.036	0.2999	0.550
非资源型	-0.325	-0.157	0.2908	0.033	0.1857	0.737

从表9可知,资源型地区的清洁能源自价格弹性绝对值要低于非资源型地区,表明资源型地区清洁能源变动受到价格因素的影响较小。但是就非清洁能源自价格弹性的绝对值而言,资源型地区要高于非资源型地区,这是因为资源型地区往往是能源丰富、污染严重的地

区,而使用非清洁能源就意味着要付出一定的代价,比如污染处理费等。因此,资源型地区的非清洁能源替代清洁能源的CPE替代弹性要低于非资源型地区的CPE替代弹性,而清洁能源替代非清洁能源的CPE替代弹性与此相反。就MES替代弹性而言,不同能源间的替代存在较为显著差异,不论是资源型地区还是非资源型地区,非清洁能源替代清洁能源的MES替代弹性均低于清洁能源替代非清洁能源的MES替代弹性,这表明清洁能源的价格变动对于非清洁能源需求量变动的的影响较大。

(三)要素替代影响碳排放可能的机制解释

第(一)、(二)部分通过实证测算了2012—2019年各生产要素间替代弹性并进行相应的异质性分析,而本部分主要通过文字分析要素替代弹性影响碳排放可能的作用机制,主要是从以下两点展开,具体如图5所示。

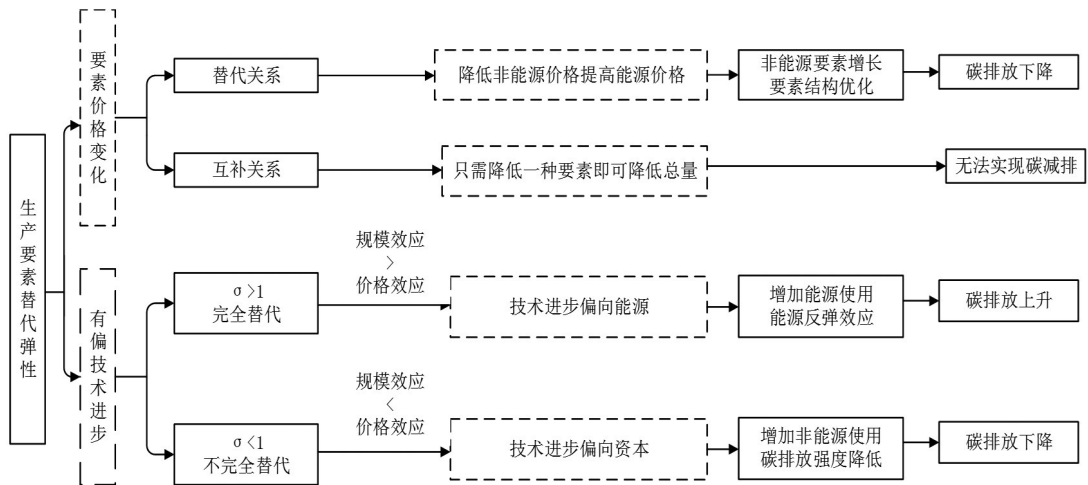


图5 能源要素与非能源要素替代对碳排放的机制分析

一是要素替代弹性通过影响要素价格,优化资源配置,从而实现碳减排。能源与资本和劳动之间存在替代或互补关系,因此可以通过调整要素价格,实现非能源要素替代能源要素,从而实现节能减排。进一步说,若能源与非能源要素之间呈现替代关系,则可以通过提高能源要素价格或是降低非能源要素价格,从而促使非能源要素消费的增长,实现要素结构优化,进而减少二氧化碳排放量。其次,若能源与非能源要素存在互补关系,这表明两种商品需要相互配合,才能满足消费者的同一种需求,也就是说能源和非能源要素需要互相配合使用,才能满足企业生产需要,即只需要降低一种要素即可实现总量的减少,但是这种观点存在一定的不符合现实之处,原因在于非能源要素主要是劳动力和资本,一个企业要实现生产,就必须至少投入这两种要素中的一种,进而投入能源要素,从而导致能源需求量的增大,进而导致二氧化碳排放。因此要素替代弹性会影响政府对要素价格的制定,进而影响要素结构,最终影响碳减排的实现。

二是要素替代弹性是衡量技术进步偏向的有效指标,两个要素之间的替代弹性的变化也会改变对碳排放的影响。假设能源对资本的替代弹性为 σ , $\sigma>1$ 意味着能源价格上涨的影响可以被大量投入的资本抵消,资本和能源要素是完全可以替代。由于资本和能源是可替代的,经济发展受到能源价格波动的限制,整个社会扩大了对能源要素的使用,随着技术进步向能源转移,企业通过规模经济扩大生产,导致社会的能源消费和能源反弹效应增加。当 $\sigma<1$ 时,能源资源是稀缺的,这意味着即使能源价格发生变化,能源也不能被资本完全替代,资本和能源要素之间存在互补关系,价格效应对经济产出的影响比规模经济更大。研发资源被分配到昂贵的能源要素上,以实现利润最大化,而低碳技术则需要技术可行性和低成本的研发来减少温室气体排放。此时,替代效应下降,但由于资本是更便宜的生产要素,企业会增加对资本要素的使用,技术进步呈现出向资本转移的特点,由于能源要素的使用减少,碳排放的强度降低。从以上可以看出,规模效应和价格效应都会影响要素使用偏向,哪种效应的影响更大,取决于要素丰富程度和要素替代弹性的大小。

五、“十四五”期末碳减排约束下能源结构优化分析

在验证清洁能源替代非清洁能源具备可行性后,利用CEPA方法分析同时满足能源需求与碳减排双重约束的能源结构优化问题。根据“十四五”规划,中国政府承诺将于2025年实现单位GDP碳排放相较2020年的排放量下降18%,降低煤炭在中国能源结构中的比重,提升清洁能源或是非化石能源比重,以实现碳减排的目标。在当前的碳排放形势下,优化以煤炭为主的能源结构是当务之急。因此,本节基于第四节清洁能源与非清洁能源间呈现替代关系,利用以能源可替代性为核心的碳夹点方法分析2025年中国能源结构的优化问题^①。

(一)“十四五”期末的中国能源消费及二氧化碳排放水平预测

首先利用既有研究设定GDP增速,预测中国“十四五”期末GDP水平;其次利用相关数据库和统计数据确定2020年中国二氧化碳排放水平;最后结合“十四五”规划,设定2025年单位GDP碳排放下降18%,从而预测“十四五”期末中国能源消费碳排放总量。

1. “十四五”期末的中国能源消费预测

2025年是中国第十四个五年计划的收官年,为此本文根据“十四五”规划中的各项目标,结合多位学者的研究预测2025年中国GDP水平和能源消费总量以及各类能源消费量。

张峰玮(2015)根据中国能源消费现状及主要特征,利用能源弹性系数法和人均能源消费法综合预测了“十三五”以及未来中长期中国能源消费需求,研究发现中国2025年的能源消

^① 依据研究需要,本文所指的清洁能源是指除煤炭、石油、天然气和火电以外的其它能源,包括水电、核电、太阳能发电。此外,为了简化问题的分析,本文将清洁能源的碳排放水平设定为0。

费量为50.9~52.0亿吨标准煤。此外赵志成和柳群义(2019)利用ARIMA模型预测中国短期的能源消费量和能源生产量,再利用马尔科夫链预测中国能源消费结构的变化情况,预测中国2025年中国能源消费量为56.81亿吨标准煤,其中煤炭消费占比为49.6%,天然气消费比重为10.9%,同时非化石能源消费占比为18.8%。谢和平等(2019)采用弹性系数法预测了2025年中国能源消费总需求,提出各分能源增量对于能源消费弹性系数贡献值的概念及其计算公式。结合新闻资料以及统计数据,本文将2025年的能源消费量设定在55~56亿吨标准煤,其中煤炭为28~29亿吨标准煤,石油为11亿吨标准煤,天然气为6亿吨标准煤,最后是清洁能源为10亿吨标准煤,得出如表10所示的中国2025年能源消费预测。

表10 2025年中国能源需求预测

	预测需求量(亿吨标准煤)	能量热值(万TJ)	占总需求量比(%)
煤炭	28~29	8205.96~8499.03	50.91~51.79
石油	11	3223.77	19.64~20.00
天然气	6	1758.42	10.71~10.91
清洁能源	10	2930.70	17.86~18.18
总计	55~56	16118.85~16411.92	100

李洪兵和张吉军(2021)基于过去20年中国经济增长与能源消耗等因素的变动形式,利用能源消费弹性系数预测了2030年中国能源消费量,研究发现在高质量发展阶段(2020年—2030年),由于受到新型冠状病毒肺炎疫情的冲击,中国GDP增速将保持在5%左右,因此本文将GDP的年均增速设定为5%。根据《中国统计年鉴(2021)》,2020年中国的GDP为1008782.5亿元,结合5%的增速,预测2025年中国GDP为1287490.55亿元。

2. “十四五”期末的中国能源消费二氧化碳排放预测

单位GDP碳排放指能源消费燃烧和水泥生产过程中产生的CO₂排放量。依据国家能源局的统计数据,我国2020年二氧化碳排放量减少了17.9亿吨,结合中国碳排放数据库(Carbon Emission Accounts & Datasets,简称CEADs)统计的2019年中国通过能源消费与水泥生产排放的CO₂为104.35亿吨,2020年的二氧化碳排放量为86.45亿吨,以及本文对于2025年GDP的估算,进而预测了2025年中国能源消费的CO₂排放。其次根据贺晋瑜等(2022)研究发现“十四五”期间,中国水泥熟料产量将保持在到 $16.2 \times 10^8 \sim 16.5 \times 10^8$ 吨,本文将2025年水泥熟料产量设定为 16.2×10^8 吨(魏丹青等,2012)。最后,利用2025年中国CO₂排放总量目标减去2025年中国水泥生产碳排放预测量得到2025年能源消费碳排放目标。详细的预测步骤及结果见图6所示。

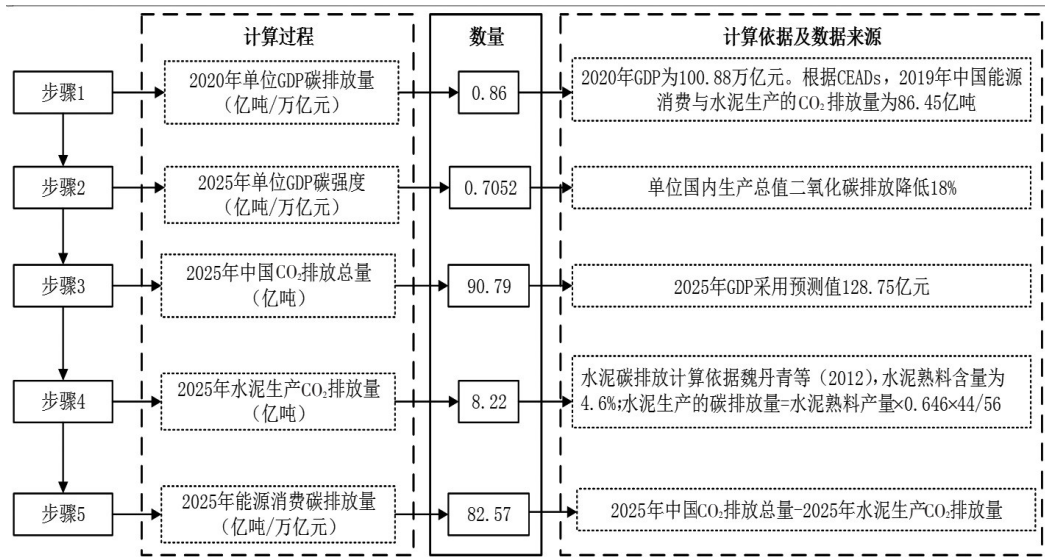


图6 2025年中国能源消费 CO₂ 排放水平预测

(二)“十四五”期末的最优清洁能源数量预测

根据中国2025年预测的能源需求和各能源碳排放系数,从而计算出“十四五”期末中国能源可供量及CO₂排放量,如表11所示。

表11 “十四五”期末中国能源供给以及碳排放情况

能源供给	CO ₂ 排放因子(t/万 TJ)	可供量(万 TJ)	排放量(亿吨)
煤炭	95×10^{-4}	8205.96~8499.03	77.96~80.74
石油	75×10^{-4}	3223.77	24.17
天然气	55×10^{-4}	1758.42	9.67
清洁能源	0	2930.70	0
合计		16118.85~16411.92	111.8~114.58

注:TJ是能源单位,是terajoule的缩写,表示万亿焦耳。

根据表10和表11可以绘制出反映“十四五”期末中国能源供给与碳排放水平之间关系的复合能源需求曲线和复合能源供给曲线,如图7和图8所示。在图7中,横坐标表示的是累计能源供给量,其中1758.12、4982.19以及10976.5分别表示的是“十四五”期末天然气供给量、天然气和石油供给量以及天然气、石油、煤炭三者的总供给量;纵坐标表示的是累计碳排放量,其中9.67、33.84以及111.8表示的“十四五”期末横坐标能源供给所排放的二氧化碳量,包括天然气供给的碳排放量、天然气与石油供给的碳排放量以及天然气、石油、煤炭三者总供给的碳排放量。在图8中,横坐标16118.85是“十四五”期末能源需求量,纵坐标82.57表示“十四五”期末能源需求的碳排放总量。

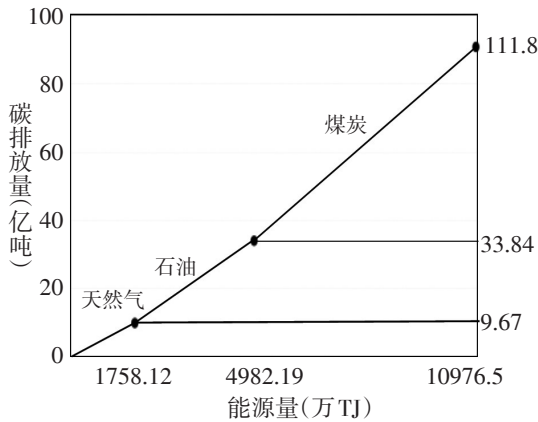


图7 复合能源供给曲线

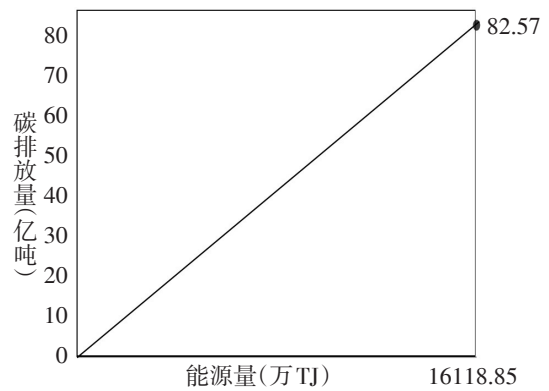


图8 复合能源需求曲线

由表11可知,“十四五”期末预测的能源消费碳排放水平为111.8~114.58亿吨,高于“十四五”规划既定减排目标90.79亿吨,由于既定减排目标与预测碳排放之间有差额,因此需要通过增加低碳能源消费、减少高碳能源消费的方式实现既定减排目标。这里假定清洁能源的二氧化碳排放量为0,同时由于煤炭的边际减排成本在煤炭、石油以及天然气三者之间最低,并且单位煤炭排放的二氧化碳量最多。因此,本文利用清洁能源代替煤炭,这样既能满足能源需求又兼顾碳排放约束。

假设从中国整体的碳排放约束限制出发,为满足2025年能源消费需求和碳排放强度下降18%的双重约束,“十四五”期末中国能源结构及碳排放情况见表12所示。

表12 “十四五”期末中国能源结构及碳排放量

情景	单位	煤炭	石油	天然气	清洁能源	合计
情景一： 低碳能源结构	能源量(万TJ)	5129.12	3223.77	1758.42	6007.54	16118.85
	排放量(亿吨)	48.73	24.17	9.67	0	82.57
情景二： 高碳能源结构	能源量(万TJ)	5129.56	3223.77	1758.42	6300.47	16411.92
	排放量(亿吨)	48.73	24.17	9.67	0	82.57

由表12可知,由于使用清洁能源替代高碳能源煤炭,煤炭的使用由8205.96~8499.03万TJ下降至5129.12~5129.56万TJ,分别减少了3076.84~3369.47万TJ,折算为10.50~11.50亿吨标准煤,煤炭供给量下降了37.50%~39.65%,实现中国能源消费碳排放量从111.8~114.58亿吨下降至82.57亿吨的减排目标。

这里结合表12中以情景一为例并结合复合能源供给曲线、复合能源需求曲线绘制EPPD,如图9所示。在图9中,A表示清洁能源供给量为6007.54万TJ,B表示天然气、石油以及煤炭的总供给量为10111.31万TJ,C表示需要减少的煤炭供给量为3076.84万TJ。由图8可

知,碳夹点的坐标为(16118.85, 82.57), 分别对应“十四五”期末的总能源需求和既定碳排放量。复合供给曲线移动的水平距离即是满足“十四五”期末碳排放约束所需的清洁能源6007.54万TJ。与此相关的, 由于减少了高碳能源煤炭的消费量, 二氧化碳排放水平下降了21.01亿吨。碳夹点的右上方为需要减少的煤炭消费量3076.84万TJ。

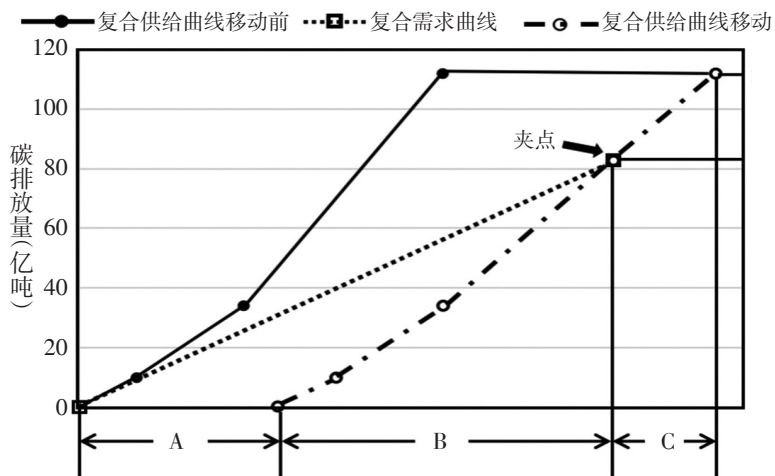


图9 “十四五”期末中国EPPD

利用CEPA方法来确定满足区域二氧化碳排放限值所需的最低数量清洁能源是有意义的, 利用清洁能源替代, 从而实现既定减排目标, 并且满足能源需求。表12和图9所展现的是既定减排目标下中国能源结构的理想状态。通过清洁能源对煤炭替代实现碳减排目标, 清洁能源消费量需占据中国能源消费总量的37.27%~38.39%。中国2020年清洁能源消费量为12.10亿吨标准煤, 占据能源总量的23.4%, 折合为3546.56万TJ, 距离实现2025年单位GDP碳排放下降18%的目标, 还需要再增加3076.84~3369.77万TJ。

六、结论与政策建议

本文首先根据谢泼德引理, 将超越对数成本函数转变为要素份额方程, 之后通过似不相关回归方法, 分别对要素份额方程的参数进行估计。利用估计的参数对要素间的替代弹性进行测算, 并基于此展开清洁能源与非清洁能源间的替代弹性对碳减排影响效果的探究分析, 并在此基础上分析了要素替代弹性对碳排放可能的作用机制。其次, 结合学者们的现有研究, 利用CEPA方法, 分析碳排放约束下中国能源结构优化问题。在现有碳排放和能源消费的基础上, 分析中国如何利用清洁能源代替高碳能源从而实现2025年单位GDP碳排放下降18%的目标。最后本文的研究结论和政策建议主要包括:

首先, 从自价格弹性角度来看, 清洁能源与非清洁能源的自价格弹性均为负数, 处于

0.10~0.25之间,但是清洁能源的自价格弹性绝对值远大于非清洁能源。原因在于现阶段清洁能源开发利用不完全,相比于非清洁能源如煤炭、石油、天然气等的丰富储量而言,清洁能源储量较低,并且开发和储存技术也并不成熟,从而导致清洁能源价格较高,清洁能源小幅度上涨会导致其消费量大幅下降。因此,需要有效促进清洁能源开发、储存、推广和利用等技术的创新,并推进相关能源向规模化、产业化发展。就目前而言,与清洁能源相关的技术远不如非清洁能源技术成熟,因此应加大对核能的安全开采和使用的力度;主动突破风力发电的不合理消纳;努力突破可再生能源随机间歇特性等缺点。当下,由于核电安全、风电水电错峰等问题的存在,清洁能源的技术还有待发展。同时,也应当聚焦于太阳能、页岩气等清洁能源的发展,促进此类清洁能源的高效利用,让清洁能源在能源结构调整与二氧化碳减排进程中发挥更大的作用。

其次,分地区来看,东、中、西部地区清洁能源与非清洁能源间的替代弹性存在地区异质性,但是差距较小。不同资源禀赋地区的替代弹性也存在差异,因此需要根据当地的实际情况因地制宜,根据地域空间和发展阶段制定清洁能源发展的战略布局。考虑不同地域经济发展水平和能源差异性,这就要求政府不能千篇一律地制定发展战略,更不能制定超越地区现实参考条件的能源战略计划。需要因地制宜,制定科学的战略。推动清洁能源的跨地区发展,完善资源配置,清楚认识清洁能源的不同发展阶段。比如,推进化石能源的清洁利用,在自然能源丰富的地方建立研发中心等措施。

最后,中国2020年清洁能源消费量为12.10亿吨标准煤,占据能源总量的23.4%,折合为3546.56万TJ,距离实现2025年单位GDP碳排放下降18%的目标,还需要再增加3076.84~3369.77万TJ。因此大力发展清洁能源,开发利用非化石能源(或是清洁能源)是实现碳减排的主要途径之一。从“十四五”规划中不难看出,清洁能源的发展是中国的能源战略布局重要举措,逐步推广使用低碳能源,支持发展清洁能源,加快研发高碳能源清洁化利用技术,从而有效减少碳排放。主要措施有支持太阳能技术的研发,以技术进步、完善体系为指导,推进太阳能的利用技术发展。同时完善对水能、风能以及核能的支持措施,注意发展过程中的生态问题。以开发与保护并重,建设与监管并举的原则推进水电、核电等绿色发展;因地制宜发展地热能 and 海洋能等生物质能,从而有效减少人类二氧化碳的净排放量,降低温室效应。

本文估计了清洁能源与非清洁能源间替代弹性,进一步地基于清洁能源可替代性利用CEPA方法得出了最优清洁能源量,并且对于要素替代影响碳减排的作用机制给出可能的文字解释,未进行相应的实证验证。因此本文的后续研究是利用相关数据验证中介机制的可行性,进一步挖掘本研究的学术价值与现实意义。

附录：

附录一：相关公式

针对论文中的部分公式,进行相应的展开说明,主要针对式(5)—(9),其中式(5)可以展开如下：

$$\begin{aligned} \ln C = & \beta_0 + \beta_l \ln P_{lt} + \beta_k \ln P_{kt} + \beta_{nce} \ln P_{ncet} + \beta_{ce} \ln P_{cet} + 0.5\beta_{ll} (\ln P_{lt})^2 + \\ & \beta_{lk} \ln P_{lt} \ln P_{kt} + \beta_{lnce} \ln P_{lt} \ln P_{nce} + \beta_{lce} \ln P_{lt} \ln P_{ce} + 0.5\beta_{kk} (\ln P_{kt})^2 + \beta_{knce} \ln P_{kt} \ln P_{nce} + \\ & \beta_{kce} \ln P_{kt} \ln P_{ce} + 0.5\beta_{nce} (\ln P_{nce})^2 + \beta_{ncece} \ln P_{nce} \ln P_{ce} + 0.5\beta_{ce} (\ln P_{ce})^2 + \beta_y \ln Y_t + \quad ① \\ & 0.5\beta_{yy} (\ln Y_t)^2 + \beta_t t + 0.5\beta_{tt} t^2 + \beta_{ly} \ln Y_t \ln P_{lt} + \beta_{ky} \ln Y_t \ln P_{kt} + \beta_{ncey} \ln Y_t \ln P_{nce} + \\ & \beta_{cey} \ln Y_t \ln P_{ce} + \beta_{lt} t \ln P_{lt} + \beta_{kt} t \ln P_{kt} + \beta_{ncet} t \ln P_{ncet} + \beta_{cet} t \ln P_{cet} + \beta_{yt} t \ln y_t \end{aligned}$$

其中, l 、 k 、 nce 、 ce 分别表示劳动、资本、非清洁能源和清洁能源, P_l 、 P_k 、 P_{nce} 、 P_{ce} 分别代表劳动、资本、非清洁能源以及清洁能源的价格, \ln 代表自然对数。

由式(6)的要素成本份额方程可以分别求得劳动、资本、非清洁能源以及清洁能源的成本份额方程,如式②—⑤所示：

$$S_l = \beta_l + \beta_{ll} \ln P_{lt} + \beta_{lk} \ln P_{kt} + \beta_{lnce} \ln P_{ncet} + \beta_{lce} \ln P_{cet} + \beta_{ly} \ln Y_t + t\beta_{lt} \quad ②$$

$$S_k = \beta_k + \beta_{kk} \ln P_{kt} + \beta_{kl} \ln P_{lt} + \beta_{knce} \ln P_{ncet} + \beta_{kce} \ln P_{cet} + \beta_{ky} \ln Y_t + t\beta_{kt} \quad ③$$

$$S_{nce} = \beta_{nce} + \beta_{ncece} \ln P_{ncet} + \beta_{ncecl} \ln P_{lt} + \beta_{ncek} \ln P_{kt} + \beta_{ncece} \ln P_{cet} + \beta_{ncey} \ln Y_t + t\beta_{ncet} \quad ④$$

$$S_{ce} = \beta_{ce} + \beta_{cece} \ln P_{cet} + \beta_{cel} \ln P_{lt} + \beta_{cek} \ln P_{kt} + \beta_{cence} \ln P_{ncet} + \beta_{cey} \ln Y_t + t\beta_{cet} \quad ⑤$$

对各种要素间的替代弹性参数也就是上述方程组系数进行估计时,因为要素份额方程之和为1,每一份额方程的随机干扰项之和为0。为了解决多重共线性问题,我们需要去掉一个要素份额方程,在此为保证结果不受人为因素干扰,我们去掉清洁能源要素份额方程,在得到式②—⑤的要素成本份额方程和式(11)的参数间数量关系的条件下,将上述方程转变为式⑥—⑧,再对剩余的要素份额方程组进行估计。

$$S_l = \beta_l + \beta_{lk} (\ln P_{kt} - \ln P_{cet}) + \beta_{ll} (\ln P_{lt} - \ln P_{cet}) + \beta_{lnce} (\ln P_{ncet} - \ln P_{cet}) + \beta_{ly} \ln Y_t + t\beta_{lt} \quad ⑥$$

$$S_k = \beta_k + \beta_{kk} (\ln P_{kt} - \ln P_{cet}) + \beta_{kl} (\ln P_{lt} - \ln P_{cet}) + \beta_{knce} (\ln P_{ncet} - \ln P_{cet}) + \beta_{ky} \ln Y_t + t\beta_{kt} \quad ⑦$$

$$S_{nce} = \beta_{nce} + \beta_{ncek} (\ln P_{kt} - \ln P_{cet}) + \beta_{ncecl} (\ln P_{lt} - \ln P_{cet}) + \beta_{ncece} (\ln P_{ncet} - \ln P_{cet}) + \beta_{ncey} \ln Y_t + t\beta_{ncet} \quad ⑧$$

附录二：地区异质性分析

东部、中部和西部地区的似不相关回归结果如附表1所示,相关BP检验如附表2所示。

附表 1 分地区似不相关回归结果

	东部			中部			西部		
	S_k	S_l	S_{nce}	S_k	S_l	S_{nce}	S_k	S_l	S_{nce}
β_{ik}	-0.0018 (0.0197)	-0.0047*** (0.0007)	0.0129 (0.0203)	0.2540 (0.1580)	-0.0004 (0.0002)	0.0073 (0.0824)	-0.0186 (0.294)	-0.0003 (0.0006)	0.0934 (0.0898)
β_{il}	0.0218*** (0.0048)	0.0026*** (0.0002)	-0.0212*** (0.0049)	-0.0972 (0.0608)	0.0004*** (0.0001)	0.0104 (0.0318)	0.113 (0.104)	0.0013*** (0.0002)	-0.127*** (0.0319)
β_{ice}	-0.0224*** (0.0072)	0.0007*** (0.0002)	0.0183** (0.0072)	-0.1140*** (0.0346)	-0.0001 (0.0000)	0.0249 (0.0181)	-0.0329 (0.0894)	-0.0001 (0.0002)	0.0502* (0.0273)
β_{ince}	-0.0062*** (0.0015)	0.0001 (0.0000)	0.0070*** (0.0016)	0.0064 (0.0109)	0.0005*** (0.0000)	-0.0202*** (0.0057)	0.0100 (0.0140)	0.0001 (0.0000)	-0.0105** (0.0043)
β_{iy}	-0.0006 (0.0007)	-0.0001 (0.0000)	-0.0001 (0.0007)	0.0033 (0.0042)	0.0001 (0.0000)	-0.0003 (0.0022)	-0.0087 (0.0097)	-0.0001 (0.0000)	0.0112*** (0.0030)
β_{it}	2.268 (1.383)	0.0773 (0.0484)	0.178 (1.424)	-6.0740 (8.6870)	-0.0085 (0.0151)	0.9580 (4.5410)	18.73 (19.64)	0.0672* (0.0402)	-22.74*** (6.001)
样本量	88	88	88	64	64	64	88	88	88
R ²	0.361	0.770	0.372	0.166	0.759	0.218	0.016	0.558	0.173

注:①其中 $i=k, l, ce, nce$; ②***、**及*分别表示参数估计在 1%、5%及 10%的临界水平上统计显著。

附表 2 分地区 Breusch-Pagan 检验

地区	χ^2	P 值
东部	85.0030***	P<0.0001
中部	19.1893***	P<0.0002
西部	26.6472***	P<0.0001

注:①***、**、*分别表示参数估计在 1%、5%及 10%的临界水平上统计显著; ②Breusch-Pagan 服从 χ^2 (3)分布。

附录三:资源禀赋异质性分析

参考邓小乐和孙慧(2016)对于资源型省份和非资源型省份的划分方法,将煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业、黑色金属矿采选业、有色金属矿采选业、非金属矿采选业、石油加工及炼焦业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业、金属制品业以及电力、热力的生产和供应业这 11 个行业作为资源型产业,而资源型产业在城市经济中所占比重为 50%,劳动就业人口在资源及初级加工业中就业比例占全社会就业人口的 40% 以上符合上述任意一个标准则定义为资源型省份。借鉴上述方法,由于本研究的时间跨度为 2012—2019 年,所以选择中间年份 2016 年为基准来划分资源型和非资源型地区。通过对 2016 年的相关数据进行计算,得到 2016 年 10 个省份的资源型产业从业人员占该省份从业人员总数的比重超过 40%,如附表 3 所示; 13 个省份的资源型产业产值占总产值的比重超过 50%,如附表 4 所示。

附表3 资源型省份一览表(以2016年从业人员数据计算得出)

序号	省份	全部从业人员 年平均数合计(万人)	资源型产业就业人员 年平均人数(万人)	占比
1	天津	902.42	361.15	40.02%
2	河北	4223.95	1873.74	44.36%
3	山西	1832.00	144.40	78.82%
4	内蒙古	1326.00	76.23	57.49%
5	辽宁	2301.20	92.74	40.30%
6	山东	5728.00	223.88	40.13%
7	河南	5052.00	226.12	44.76%
8	陕西	2111.00	1378.27	65.29%
9	青海	324.28	194.51	59.98%
10	宁夏	369.20	17.65	47.81%

注:数据来源于《中国工业统计年鉴(2017)》和《中国统计年鉴(2017)》。

附表4 资源型省份一览表(以2016年工业产值数据计算得出)

序号	省份	工业总产值(亿元)	资源型产业产值(亿元)	占比
1	天津	17885.39	9685.12	54.15%
2	河北	32070.45	23011.13	71.75%
3	山西	13050.41	9636.06	73.84%
4	内蒙古	18128.10	12544.97	69.20%
5	江西	18499.00	11463.06	61.97%
6	山东	68024.49	42459.29	62.42%
7	河南	40471.79	28147.40	69.55%
8	贵州	11776.73	5997.59	50.93%
9	陕西	19399.59	10658.92	54.94%
10	甘肃	7200.37	4574.44	63.53%
11	青海	2572.49	1733.53	67.39%
12	宁夏	3168.59	2352.57	74.25%
13	新疆	9649.70	4995.59	51.77%

注:数据来源于《中国工业统计年鉴(2017)》和《中国统计年鉴(2017)》。

结合产业产值占比与从业人员占比标准,最终确定资源型省份为天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、江西、山东、贵州、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆14个省份,其余16个省份为非资源型省份。综上所述,最终确定了14个资源型省份所在地区为资源型地区,从而将中国划分为资源型地区与非资源型地区两大区域来研究清洁能源与非清洁能源间替代弹性异质性。

对不同资源禀赋地区进行似不相关回归,结果如附表5所示,BP检验如附表6所示。

附表5 不同资源禀赋地区似不相关回归结果

	资源型地区				非资源型地区			
	S_k	S_l	S_{nce}	S_{ce}	S_k	S_l	S_{nce}	S_{ce}
β_{ik}	0.3260*** (0.1230)	0.0005** (0.0003)	0.0217*** (0.0834)	-0.3482	-0.1221 (0.0784)	-0.0034*** (0.0010)	0.0403 (0.0729)	0.0851
β_{il}	0.0339* (0.0324)	0.0001* (0.0001)	0.0294 (0.0370)	-0.0634	0.0272*** (0.0086)	0.0026*** (0.0001)	-0.0208*** (0.0080)	-0.0009
β_{ice}	-0.1909	-0.0003	-0.2331	0.4243	-0.0222	0.0001	0.0337	0.0002
β_{ince}	-0.1690* (0.0993)	-0.0004* (0.0002)	0.1820 (0.1135)	-0.0126	0.1174 (0.0734)	0.0005 (0.0010)	-0.0532 (0.0682)	-0.0643
β_{iy}	0.0294*** (0.0046)	-0.0002*** (0.0000)	-0.0118** (0.0053)	-0.0176	-0.0046 (0.0031)	0.0002 (0.0002)	0.0051* (0.0029)	-0.0007
β_{it}	-0.0048*** (0.0017)	0.0001*** (0.0000)	0.0033* (0.0012)	0.0015	-0.0007 (0.0013)	-0.0001*** (0.0000)	0.0005 (0.0013)	0.0003
常数项	0.5904*** (0.0989)	0.0006*** (0.0002)	0.3040*** (0.113)	0.1054	1.0863*** (0.0453)	0.0086*** (0.0006)	-0.0775* (0.0421)	-0.0171
样本量	112	112	112	—	128	128	128	—
R ²	0.430	0.589	0.265	—	0.115	0.851	0.104	—

注:①***、**及*分别表示参数估计在1%、5%及10%的临界水平上统计显著;②Breusch-Pagan服从 χ^2 (3)分布。

附表6 不同资源禀赋地区 Breusch-Pagan 检验

地区	χ^2	P值
资源型	111.2965***	P<0.0001
非资源型	114.5473***	P<0.0001

注:①***、**及*分别表示参数估计在1%、5%及10%的临界水平上统计显著;②Breusch-Pagan服从 χ^2 (3)分布。

参考文献:

[1] 艾明晔,李呈祥.要素替代及回弹效应视角下中国钢铁行业能源消费研究[J].软科学,2017,31(07):6-10.

[2] 艾明晔,刘桂希,孙薇.中国石化行业能耗为何持续增加?——回弹效应及要素替代视角[J].北京理工大学学报(社会科学版),2017,19(05):1-9.

[3] 曹孜,吴朝阳.技术进步偏向的生态效应研究[J].科研管理,2020,41(02):193-201.

[4] 邓明.基于嵌套CES生产函数的多要素Morishima替代弹性估计[J].数量经济技术经济研究,2017,34(07):145-161.

[5] 邓小乐,孙慧.中国区域碳排放、经济增长与福利关系比较研究[J].生态经济,2016,32(07):34-39+55.

[6] 丁利春,周佳琦,李瑞.山西能源偏向型技术进步的实证分析——基于二重嵌套的CES生产函数[J].经济问题,2022,(05):111-118.

[7] 董春诗.偏向技术进步有利于可再生能源转型吗——基于要素替代弹性的证据[J].科技进步与对策,2021,38(15):28-36.

- [8] 韩彪,王云霞,段杰鑫. 中国物流产业要素替代弹性的分解[J]. 统计与决策, 2018, 34(24): 134-137.
- [9] 郝枫,盛卫燕. 中国要素替代弹性估计[J]. 统计研究, 2014, 31(07): 12-21.
- [10] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,范永斌,石红卫,蔡博峰,严刚. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(02): 347-355.
- [11] 黄磊,周勇. 基于超越对数生产函数的能源产出及替代弹性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, (01): 134-138.
- [12] 李洪兵,张吉军. 中国能源消费结构及天然气需求预测[J]. 生态经济, 2021, 37(08): 71-78.
- [13] 林伯强,杜克锐. 理解中国能源强度的变化: 一个综合的分解框架[J]. 世界经济, 2014, 37(04): 69-87.
- [14] 鲁成军,周端明. 中国工业部门的能源替代研究——基于对 ALLEN 替代弹性模型的修正[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, (05): 30-42.
- [15] 陆菁,刘毅群. 要素替代弹性、资本扩张与中国工业行业要素报酬份额变动[J]. 世界经济, 2016, 39(03): 118-143.
- [16] 王班班,齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度[J]. 经济研究, 2014, 49(02): 115-127.
- [17] 魏丹青,赵建安,金迁致. 水泥生产碳排放测算的国内外方法比较及借鉴[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1152-1159.
- [18] 吴力波. 中国工业生产的劳动、资本和能源的替代分析[J]. 电力与能源, 2011, 32(03): 173-176.
- [19] 吴丽丽,连梦娇,邓灵璨. 要素禀赋变化对农业生产要素投入与技术选择的影响[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(06): 223-230.
- [20] 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(07): 1949-1960.
- [21] 杨福霞,杨冕,聂华林. 能源与非能源生产要素替代弹性研究——基于超越对数生产函数的实证分析[J]. 资源科学, 2011, 33(03): 460-467.
- [22] 杨冕,徐江川,杨福霞. 能源价格波动、高效率资本动态累积与资本-能源替代关系[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(09): 2284-2299.
- [23] 杨中东. 对我国制造业的能源替代关系研究[J]. 当代经济科学, 2007, 29(03): 1-6.
- [24] 查冬兰,司建松,周德群,薛晨. 中国工业部门能源与非能源替代弹性研究——基于多弹性测度方法[J]. 管理评论, 2016, 28(06): 180-191.
- [25] 赵志成,柳群义. 中国能源战略规划研究——基于能源消费、能源生产和能源结构的预测[J]. 资源与产业, 2019, 21(06): 1-8.
- [26] 张峰玮. 未来中长期全国能源消费需求预测研究[J]. 中国煤炭, 2015, 41(06): 18-20.
- [27] 张纪凤,黄萍. 中国制造业能源与非能源要素替代关系的实证研究[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2011, 21(04): 37-44.
- [28] 张静宇,周宏. 全程机械化背景下水稻生产环节劳动力与机械的替代弹性分析——基于江苏省水稻种植户调查数据[J]. 南方农业学报, 2019, 50(02): 432-438.
- [29] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, 2004, (10): 35-44.
- [30] 张锐,寇静娜. 全球清洁能源治理的兴起: 主体与议题[J]. 经济社会体制比较, 2020, (02): 182-191.
- [31] 张玉卓. 中国清洁能源的战略研究及发展对策[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(04): 429-436.
- [32] 郑晓理,鲍庆,关昊. 中国制造业能源需求替代弹性的动态估计[J]. 能源技术经济, 2012, 24(04): 33-38.
- [33] Blackorby, C., D. Primont, and R. R. Russell. The Morishima Gross Elasticity of Substitution[J]. Journal of Productivity Analysis, 2007, 28(3): 203-208.
- [34] Bodger, P. S., S. P. Moutter, and P. T. Gough. Spectral Estimation and Time Series Extrapolation of Prime

Indicators of Society[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 1986, 29(4): 367–386.

[35] Breusch, T. S. and A. R. Pagan. The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification in Econometrics[J]. *Review of Economic Studies*, 1980, (1): 239–253.

[36] Christensen L. R., D. W. Jorgenson, and L. J. Lau. Transcendental Logarithmic Production Frontiers[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1973, 55(1): 28–45.

[37] Cossutta, M., D. C. Y. Foo, and R. R. Tan. Carbon Emission Pinch Analysis (CEPA) for Planning the Decarbonization of the UK Power Sector[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 25: 259–270.

[38] Crilly D. and T. Zhelev. Emissions Targeting and Planning: An Application of CO₂ Emissions Pinch Analysis (CEPA) to the Irish Electricity Generation Sector[J]. *Energy*, 2008, 33(10): 1498–1507.

[39] Emir, M., K. Sun, and S. C. Kumbhakar. Nonparametric Estimates of the Clean and Dirty Energy Substitutability[J]. *Economics Letters*, 2018, 168: 118–122.

[40] Frondel, M. Modeling Energy and Non-Energy Substitution: A Survey of Elasticities[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(8): 4601–4604.

[41] Halvorsen, R. Energy Substitution in U.S. Manufacturing[J]. *Review of Economics and Statistics*, 1977, 59(4):381–388.

[42] Hefner III, R. A. The Age of Energy Gases[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27(1): 1–9.

[43] Jia, X. P., Z. W. Li, F. Wang, D. C. Y. Foo, and R. R. Tan. Multi-Dimensional Pinch Analysis for Sustainable Power Generation Sector Planning in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(4): 2756–2771.

[44] Jones, C. T. A Pooled Dynamic Analysis of Interfuel Substitution in Industrial Energy Demand by the G-7 Countries[J]. *Applied Economics*, 1996, 28(7): 815–821.

[45] Lee, S. C., D. K. Ng, D. C. Y. Foo, and R. R. Tan. Extended Pinch Targeting Techniques for Carbon-Constrained Energy Sector Planning[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(1): 60–67.

[46] Lim, X. Y., D. C. Y. Foo, and R. R. Tan. Pinch Analysis for the Planning of Power Generation Sector in the United Arab Emirates: A Climate-Energy-Water Nexus Study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 180(10):11–19.

[47] Matteo, C., D. C. Y. Foo, and R. R. Tan. Carbon Emission Pinch Analysis(CEPA) for Planning the Decarbonization of the UK Power Sector[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 25: 259–270.

[48] Marchetti, C. Primary Energy Substitution Models: On the Interaction between Energy and Society[J]. *Technological Forecast Social Change*, 1977, 10(4): 345–356.

[49] Papageorgiou, C., M. Saam, and P. Schulte. Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2017, 99(2): 281–290.

[50] Pekala, L. M., R. R. Tan, D. C. Y. Foo, and J. M. Jeżowski. Optimal Energy Planning Models with Carbon Footprint Constraints[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(6): 1903–1910.

[51] Pindyck, R. S. Interfuel Substitution and the Industrial Demand for Energy: An International Comparison[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1979, 61(2): 169–179.

[52] Stern, D. I. Interfuel Substitution: A Meta-Analysis[J]. *Journal of Economic Surveys*, 2012, 26(2): 307–331.

[53] Steinbuks, J. Interfuel Substitution and Energy Use in the U.K. Manufacturing Sector[J]. *The Energy Journal*, 2012, 33(1): 1–29.

[54] Su, W. H., Y. J. Ye, C. H. Zhang, T. Baležentis, and D. Štreimikienė. Sustainable Energy Development in the Major Power-Generating Countries of the European Union: The Pinch Analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 4–10.

[55] Tan, R. R. and D. C. Y. Foo. Pinch Analysis Approach to Carbon-Constrained Energy Sector Planning[J]. *Energy*, 2007, 32(8): 1422–1429.

Estimation of Substitution Elasticity and Structural Optimization of Clean and Non-clean Energy in China

Liu Zimin^a, Ma Jingjing^a, Zhang Ya^b

(a: School of Economics and Management, Southwest University;

b: Chongqing Three Gorges Water Conservancy and Electric Power Co., Ltd)

Abstract: Under the current situation of increasing energy consumption demand and the increasingly contradictory carbon emission reduction constraints, how to promote carbon emission reduction through clean energy consumption or the use of clean energy to replace non-clean energy is a difficult problem faced by all sectors of society. Based on the panel data of 30 provinces and municipalities in China from 2012 to 2019, this paper estimates the cross-price elasticity and Morishima substitution elasticity between clean energy and non-clean energy using the seemingly uncorrelated regression method, and then uses the carbon emission pinch analysis to predict the optimal amount of clean energy in China until the end of the "14th Five-Year Plan" period under the emission constraints. The main research conclusions are as follows. The self-price elasticity of clean energy and non-clean energy is low, and the overall elasticity is inelastic. The cross-price elasticity of clean energy and non-clean energy is positive, so clean energy and non-clean energy are substitutive, but there are differences in the degree of substitution. In terms of sub-regions, there is regional heterogeneity in the substitution elasticity between clean energy and non-clean energy in the eastern, central and western regions, but also in different resource endowment areas. China's 2020 clean energy consumption is 1.210 billion tons of standard coal, accounting for 23.4% of the total energy, equivalent to 3546.56 trillion joules. To achieve the goal of reducing carbon emissions per unit of GDP by 18% in 2025, an additional 3076.84 to 3369.77 trillion joules are needed. Mechanism analysis found that inter-energy substitution can achieve carbon emission reduction through energy prices and biased technological progress. This study provides a useful reference for policy makers to formulate relevant energy policies.

Keywords: Clean Energy; Dirty Energy; MES Substitution Elasticity; Carbon Emission Pinch Analysis; Carbon Reduction

JEL Classification: Q40 , Q50

(责任编辑:卢玲)