

引用格式: 严良, 熊伟伟, 王小林, 等. 供需错配下能源替代路径优化[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1655-1664. [Yan L, Xiong W W, Wang X L, et al. Energy substitution path optimization under supply and demand mismatch[J]. Resources Science, 2019, 41(9): 1655-1664.] DOI: 10.18402/resci.2019.09.07

供需错配下能源替代路径优化

严良^{1,2}, 熊伟伟¹, 王小林^{1,2}, 王腾²

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心, 武汉 430074)

摘要: 中国的产业结构升级需求和能源消费现状之间的矛盾愈发凸显, 能源供给结构和需求变化的不平衡制约了能源产业对国民经济发展的支持, 因此, 形成一套从底层引导供给端价格形成和产能更替机制的政策工具势在必行。本文在系统视角下, 基于能源间需求的价格替代机制及各能源内部的产能更替机制建立动力学模型, 模拟了2017—2050年中国能源替代趋势并作为基准情景, 在此基础上从供给端设定了价格、市场、成本、补贴、碳交易等情景。结果表明, 基准情景下煤炭依旧为主要消费能源, 且结构调整和减排压力较大, 而在补贴策略和碳交易策略下, 清洁能源利用水平得以显著提升。因此, 必须提振天然气激励水平保障平稳过渡并降低新能源获取成本, 增进能源定价机制改革, 拓宽碳交易价格变化空间, 以便有效达成供需协同的能源替代路径。

关键词: 能源替代; 供需错配; 弹性-粘性(putty-clay)理论; 系统动力学; 能源消费; 情景分析

DOI: 10.18402/resci.2019.09.07

1 引言

能源清洁高效化转型是供给侧结构性改革、能源革命和“两个一百年”奋斗目标顺利达成的必由之路, 且至少在三个层面对中国国民经济影响深远。其一, 清洁能源的替代路径保证了中国能源供给和消费的安全要求; 其二, 清洁能源的利用能够推动产业从下游向上游的高速整合; 其三, 清洁能源产业的发展可以充分发挥市场配置资源的效用。目前来看中国能源领域的问题主要在于传统化石能源产能严重过剩、能源结构不合理、能源产业体系高能耗低效率、能源安全压力日增等方面^[1]。煤炭长期处于中国能源利用的主导地位, 2016年一次能源消费中煤炭消费占比仍高达62%, 石油占比则为18.3%, 天然气和一次电力(指水电、风电、核电和太阳能发电)及其他消费占比未超过20%; 而同期全球一次能源消费结构中煤炭比重只有28.1%, 天然气和一次电力及其他消费占比则分别为24.1%

及14.5%, 中国能源消费结构与全球平均水平差异明显^[2]。2015—2025年是中国能源结构转型的关键时期, 需要抓准时机优化产业结构并提升经济发展质量, 从而为能源结构转型提供动力保障^[3]。

随着中国经济发展对能源需求的日益增加, 需要绿色、高效的能源利用结构, 但煤和油等高污染型能源在能源消费结构中比重过高不利于环境保护和经济绿色发展。虽然中国已在大力发展天然气和水电等清洁能源, 如“油改气”“煤改气”等政策和北方地区清洁取暖工程的逐步推进, 水电、风电、光伏发电装机规模和核电在建规模也均居世界第一, 清洁能源替代高污染能源的工作正在稳步开展, 使得能源结构得以持续优化^[4]。但目前来看, 这些努力对中国能源供给的整体格局影响不够强劲, 且存在消费结构调整的深层次矛盾凸显、供需市场不能形成良好配合、替代能源产能供给跟进乏力等问题。

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2019-01-27

基金项目: 国家社会科学基金项目(12BJL074); 国家自然科学基金项目(71874166); 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心开放基金项目(H2018008B)。

作者简介: 严良, 男, 湖北大悟人, 教授, 博士生导师, 主要从事可持续发展研究。E-mail: ylyzb@cug.edu.cn

党的十九大报告指出“我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾”,主要表现在消费升级而供给端产业结构不平衡和资源利用不充分的结构性失衡,供需错配则集中体现了这一矛盾^[5]。能源行业的供需错配体现在传统化石能源产能虽严重过剩,产能结构却又无法适配消费端的需求升级,从而造成能源系统的效率低下和市场有效供给不足。虽然中国能源供需结构匹配程度有所改善,但目前仅处于勉强均衡状态,且部分区域濒临失衡^[6]。供需结构均衡对经济发展能产生正向影响,但处于错配局面下的能源市场无法充分实现这一目标,不断升级的能源消费和路径依赖下能源供给调整缓慢也使供需矛盾加剧,产能供给与市场需求有效匹配方能解决冲突^[7-9]。因此,在处理好供需错配矛盾的基础上有效配置能源市场产能要素,通过政策引导和市场驱动提升供应结构对需求升级的适应性,加速中国能源结构调整清洁高效化替代,是值得探究的问题。

2 相关研究梳理

能源替代包括能源结构优化以及生产要素(包括资本和能源)的优化配置,其途径包括提高清洁能源占比、开发利用新能源和可再生能源及提升能源效率等^[10]。对能源替代的研究首先从能源的自然存在形式探讨其替代的可行性和长期可用性^[11,12],之后许多学者将能源利用和社会发展相结合,从经济价值和环境约束等视角来看待能源替代过程,并构建了“能源-经济-环境”系统的能源替代研究范式^[13,14],在该范式下的研究主要关注于经济增长与环境政策、技术进步、新能源开发间的关系及相关机制。

能源替代的基本驱动力在于追求能源利用方式的高效率,同时各能源由于其禀赋差异也具有不同的替代性,充分提升替代能源的利用效率并进而增强不同能源之间的可替代性,能更有效实现替代^[15,16]。作为一个系统调整过程,能源产出率是决定相应能源在替代中能否占据主导的关键^[17]。环境问题也使能源替代受到研究者和政府的广泛关注,对能源需求施加环境约束,从市场侧加强对污染型能源的监管,能倒逼能源结构升级^[18]。随着能源品种的多元化,各能源虽能相互替代但具有有限性^[19],这也决定了多种能源共存于能源消费结构中,不同

能源产业博弈所导致的能源间替代将长期存在。

在对能源替代的定量研究中,鲁成军等^[20]从外部替代角度研究了工业部门能源与资本等要素的关系,发现资本和能源间的替代呈现不确定性;赫永达^[21]分析得出能源消费资本对能源替代具有空间异质性。Lin等^[22]从内部角度分析了石油和电力间替代潜力,表明两者能相互替代,而采用竞争性定价政策能推动工业增加电力消费;张玉卓^[19]也发现共存于市场上的两种能源能通过价格博弈实现替代均衡;后勇等^[23]引入可再生能源所占比例作为能源替代率构建替代模型,并指出可再生能源产能投资增速应远高于经济增速;郭扬等^[24]得出新能源对于化石能源的替代效应达到0.14;于立宏等^[25]指出中国能源市场上煤炭和石油互为补充,而电力则与二者存在替代关系但目前替代弹性略小。这些研究探究了资本在能源替代过程中的部分特性,测度了不同能源之间的替代性,并发现市场力量在整个替代过程中有重要作用。

在中性技术进步条件下,要素投入比在产能形成之前可随时发生更改,而一旦投入生产则保持固定比例,因此产能资本投入在短期和长期显现的特征有所差异,使得产能资本也具有时间异质性^[26,27],但既有能源替代研究中较少考虑这一特性对于能源替代的影响。能源市场作为一个复杂系统,不同要素配置下能源间及能源内部的相互反馈和动态变化需要加以系统考虑,而当前从系统角度开展的能源替代研究主要关注能源需求侧,难以在全面把握能源系统内部动态作用机制的基础上协调供需。因此,依托已有研究基础,考虑供需错配和产能资本的时间异质性对于能源替代机制的影响,通过合理的生产要素配置推进能源供给侧改革下利用结构调整的路径优化,为妥善解决结构不均衡的扭曲局面提供依据,也可加快实现能源替代高效清洁化的目标。

3 研究设计及模型构建

Moxnes^[28]将弹性-粘性(putty-clay)理论嵌入化石能源需求趋势研究,以分析新旧产能行为差异对于能源需求的影响,可较好地描述能源替代系统的非线性和复杂性特点。本文借鉴这一理论框架,进而运用系统动力学构建分析模型,目的是模拟中国未来中长期能源消费结构演化趋势并关注供给端

要素调整引起的产能变化对能源结构的变动,从而找出优化路径以实现清洁高效化的能源替代。在影响模型演化的要素中,市场价格以及能源消费总量作为外生变量,而建设投资、市场份额、各能源消费量和能源利用效率被视为内生变量^[29,30],并假定随着技术水平提升和市场平稳,在模型仿真期内能源市场不会出现枯竭和极端波动情况。

本文动力模型的因果关系如图1所示。通过以下10个公式构建出本文系统动力学模型基本框架:

令 i 表示为第 i 种能源,因此能源 i 的总生产成本 C_i 可以表示为:

$$C_i = \frac{CC_i}{PBT_i} + OO_i + \frac{P_i + Q_{ico_2} \times P_{co_2}}{E_i} - PR_i \quad (1)$$

式中: CC_i 为固定成本; PBT_i 表示资本投资回收期; OO_i 为可变成本; P_i 为市场价格; Q_{ico_2} 为 i 能源的 CO_2 排放系数, P_{co_2} 为市场碳交易价格,二者相乘描述了其造成的 CO_2 排放量在碳交易市场上所需付出的成本; E_i 为能源 i 的燃烧效率,该部分用于计算不考虑能源燃烧效率差异的情况下能源使用成本及其造成的环境成本; PR_i 为溢价水平,衡量了除常规成本外的其余影响总成本的要素,其中包括市场偏好和政策导向等对产能投资的激励特性,该参数需要基于能源市场的历史情况计算得出。

各能源在不同生产成本下的市场选择行为决定了其在市场竞争过程中的投资份额,本文采用被广泛应用于不确定性下消费者决策选择行为离散评估的logit方程刻画成本 C_i 与投资份额 S_i 的关

系,具体表达如下:

$$S_i = \frac{e^{-\alpha C_i}}{\sum_i e^{-\alpha C_i}} \quad (2)$$

式中: α 为描述关系曲线变化程度的参数($\alpha \geq 0$)。投资份额决定了新增产能分配比例,记 I 表示为当年新增产能投资,则第 i 种能源的投资 I_i 为:

$$I_i = S_i \times I \quad (3)$$

不同于传统的增长理论,putty-clay理论强调资本的异质性及技术特征,可用于描述资本由于短期粘性和长期弹性而表现出的行为差异^[26,27]。根据其指出的阶段性差异,将能源生产过程中的产能资本分为当期新增设备的产能(即新产能 KN)和当期既有设备的产能(即旧产能 KO)两阶段,当年投入资本 I_i 经建设并投产成为新产能 KN_i ,而已有的新产能也会进入折旧流程而转化为旧产能 KO_i ,最后在达到产能的生命周期 T_i 之后,此产能进而转变为淘汰产能 DO_i 。为确保两阶段平稳转化,各阶段的时期分布应当足够宽^[28],因此设定产能资本的新旧阶段各占其 T_i 的一半,各类产能的计算如下:

$$\frac{dKN_i}{dt} = I_i - \frac{KN_i}{T_i/2} \quad (4)$$

$$\frac{dKO_i}{dt} = \frac{KN_i}{T_i/2} - \frac{KO_i}{T_i/2} \quad (5)$$

$$\frac{dDO_i}{dt} = \frac{KO_i}{T_i/2} \quad (6)$$

记 K_i 为每种能源的当年总产能,且 $K_i = KN_i + KO_i$,由此得到整个能源系统中的总产能 $K = \sum_i K_i$,当年所有能源产生的淘汰产能为 $DO = \sum_i DO_i$ 。能源供需是否平衡决定了产能投资

方向,其缺口状况向市场透露信号并引导投资调整^[31],引入参数 TI 以衡量产能投资对能源市场变化的响应速度,能源系统中能源的总需求记为 ED ,由此得出投资、折旧产能、总需求与总产能之间的联系:

$$I = DO \times f\left(\frac{ED - K}{TI \times DO}\right) \quad (7)$$

其中 $f(x)$ 是一个如下的分段连续函数:

$$f(x) = \begin{cases} x+1, & x \geq 0 \\ e^{\beta x}, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: β 为常数($\beta \geq 0$)。如总产能 K 高于总需求 ED 则表明能源市场供过于求,根据市场表现将降

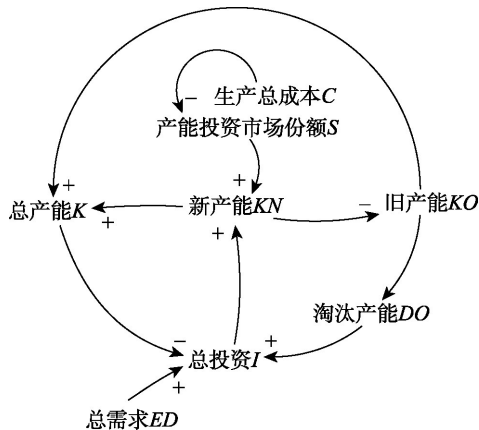


图1 能源替代系统因果关系图

Figure 1 Causality diagram of energy substitution system

低下一年的投资,此时 $I < DO$ 但为稳定生产需保证 $I > 0$; 若总产能 K 低于总需求 ED 时,则供给难以满足市场消费水平,能源需求对外依赖增加,因此需要增加更多投资来提升产能填补市场缺口并平衡供需矛盾,即 $I > DO$ 。

引入产能利用率 U 衡量能源总产能和总需求之间的平衡程度,以追踪能源供需波动对于各能源产能和需求的影响,并据此估计不同能源的市场需求,其计算过程如下:

$$U = \frac{ED}{K} \quad (9)$$

本文假定每种能源的产能利用率与能源市场总体水平相似^[28,29],即对于第 i 种能源而言 $U_i = U$, 因此能源 i 的模拟需求值 \hat{D}_i 为:

$$\hat{D}_i = U_i \times K_i = \frac{ED}{K} \times K_i \quad (10)$$

4 数据获取、模型校准及检验

本文选取的样本数据期为1980—2016年,研究对象为煤炭、石油、天然气以及一次电力及其他等能源消费市场上主要的四种能源。数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《BP世界能源统计年鉴》及国家统计局、国家能源局、IEA等机构,各能源的消费量采用发电煤耗法计算,并将能源数据统一折算为标准煤单位(表1)。

根据产能投资和能源供需关系,投资函数 $f(x)$

的系数 β 设定为0.231^[27,28],投资响应时间 $TI=1$ 。模型中 PR_i 和 α 等参数根据历史数据并利用粒子群算法求解得出,适应度函数设定为使每种能源的需求实际值与拟合值间误差 $e = \sum_i \sum_t |D_i^t - \hat{D}_i^t|^2$ 最小,同时为避免出现过拟合采用了线性递减惯性权重法,求解后各能源新旧产能数值及 PR_i 和 α 参数值见表2。

根据表2,一次电力及其他的溢价为四种能源中最高(3580.87元/tce),说明中国对清洁电力生产有强烈投资意愿,每年的能源建设投资很大一部分也进入电力行业中,一次电力及其他虽在中国能源消费结构中的占比尚低,但在未来极有可能实现后来居上。石油溢价也达871.97元/tce,表明石油市场对于投资者也有一定吸引力。中国虽正大力推进煤炭去产能,但煤炭的价格优势和路径依赖仍较强劲,使得煤炭溢价高达1696.70元/tce。而天然气激励意愿只有-1461.98元/tce,为四种能源中最低,尽管政府鼓励天然气消费行为并积极开拓国内气源,加快从国外大量进口天然气,但显然消费市场对其接受度并不高。

同时对模型系统结构进行了行为检验,经检验所有变量量纲一致,模型很好地反映了能源供给与消费间的反馈机制,系统结构合理。为评价模型拟合效果,本文对各能源需求拟合值和真实值作比较,并采用预测误差检验法(MAPE)评估(表3),模

表1 中国四种主要能源各指标的具体内容

Table 1 Key indicator values of the four primary energy types in China

	时间范围	煤炭	石油	天然气	一次电力及其他
固定成本/(元/tce)	All	46.63	105.15	489.19	2086.76
变动成本/(元/tce)	All	167.30	332.30	359.85	2337.69
投资回收期/a	All	10	8	8	10
CO ₂ 排放系数	All	7.36	5.82	4.43	0.01
市场价格/(元/tce)	All	588.99	1651.90	1728.42	5234.58
燃烧效率/%	All	42	41	50	96

表2 模型各参数求解结果

Table 2 Results of parameter estimation of the model

	煤炭	石油	天然气	一次电力及其他
KN/亿 tce	13.31	3.84	1.79	3.27
KO/亿 tce	14.32	3.68	0.90	1.90
PR/(元/tce)	1696.70	871.97	-1461.98	3580.87
α			0.00035	

表3 模型中主要参数的MAPE验证结果

Table 3 Mean absolute percent error (MAPE) verification results of the main parameters in the model

变量	MAPE值/%	结论
煤炭需求	3.5	高精度预测
石油需求	7.1	高精度预测
天然气需求	14.1	良好预测
一次电力及其他需求	8.3	高精度预测

型仿真行为与现实相比的精确程度检验结果如图2所示。

图2表明总体而言模型拟合水平非常贴近实际。1994年之后由于石油价格和国际接轨且国内石油需求转旺等缘故,石油消费的模拟值与实际出现差异。对天然气的模拟偏差可能源于2005年之后西气东输工程一期竣工投产,四大气区的天然气有了新消费市场进而推动天然气需求攀升。

表3的验证结果表明各观测变量的误差均较小,煤炭、石油和一次电力及其他能源需求MAPE值都显著低于10%,达到高精度拟合;天然气需求MAPE值则低于20%,也实现了良好拟合,说明优化效果较好,该模型有效把握了各主要能源的消费变化特征。

5 能源替代过程仿真及情景研究

5.1 仿真情景参数设定

本文以2016年为模型仿真基准年,并结合《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《能源发展“十三五”规划》等要求,模拟既有机制下能源发展基准情景,以把握中国能源市场的整体走向。根据能源价格波动的历史行为,结合其波动的不确

定性,本文设定各能源的市场价格变动幅度均不高于5%,即 $P_{it} \in [0.95P_{it-1}, P_{it-1}]$,得到随机生成的各能源价格变动序列^[30,32]。考虑到中国经济发展正处于从高速向高质量转型的阶段,中国政府有能力也有信心平稳地完成这一过程,因此设定中国经济长期发展路径为2017—2020年均增速为6.5%,2021—2035年均增速5%,2035—2050年均增速3.5%^[33],并通过指数方程拟合1980—2016年能源强度变化从而设定其趋势,表4则为部分外生变量在系统动力学模型中的表达。

利用模型及相关设定模拟出了基准情景下中国中长期能源消费结构变动情况,图3是该情景中2030及2050年和基准年能源消费结构的对比,该结果将作为下文情景策略调整效度的参考依据。

总体而言,煤炭虽然在观察边界内依旧作为主导能源存在于消费市场中,但在天然气和一次电力及其他能源的快速的发展过程中煤炭份额不断下降,而石油的消费份额相对没有较大变动,但2030年前后即被一次电力及其他能源超越。

从图3所展示的不同时期能源消耗的结构来看,按照预设的经济发展增速和能源消耗强度,一

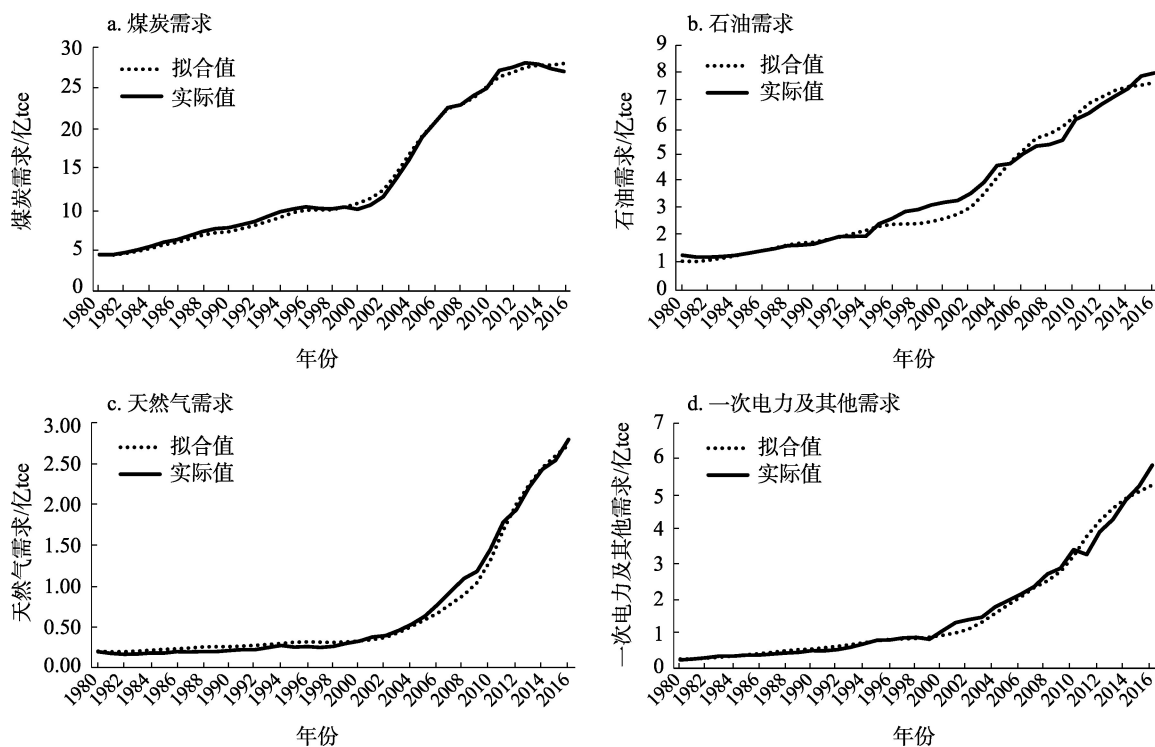


图2 1980—2016年中国主要能源需求实际值与模拟值

Figure 2 Actual and simulated values of China's primary energy consumption, 1980-2016

表4 外生变量系统动力学方程

Table 4 System dynamics equations for exogenous variables

指标	单位	方程
GDP	万亿元	INTEG(74.41,GDP年增长)
GDP年增长率	%	WITH LOOKUP (Time, [(2016, 0)-(2050,0.1)], (2016,0.065),(2020, 0.05),(2035,0.035)))
GDP年增长	万亿元	年增长率×GDP
能源强度	tce/万元	$0.586 \times 0.943^{(\text{Time}-2016)}$
能源总需求	亿 tce	GDP×能源强度

次电力及其他能源的消耗结构出现明显改善,而天然气虽平稳提升但后期不够强劲,其作为保障中国能源转型过程平稳的重要过渡能源并没有出现实质性突破,这种趋势不能够支持“十三五”规划中天然气占比达到10%的目标,也与“巴黎协定”中,中国对全球承诺的减排目标不相符。这说明基准情景不足以推动能源替代目标的实现,有必要考虑通过政策杠杆和市场交易工具来推进能源消费结构的变化,例如产业补贴政策和碳交易市场的形成。基于此,本文从能源建设投资供给调整角度,根据影响能源产能投资的要素设定了五种策略情景,表5及表6为各情景的详细内容。

(1)价格策略。能源供求关系变化影响能源价格,价格变化又促使能源结构随之调整,为了解市场价格变动对能源结构的影响大小,本文模拟了价格在两种变动方向下的能源消费结构变化情况:①变动幅度增大。将价格波动范围在基准情景的基础上分别扩大1%及2%;②变动幅度缩小。将价格波动范围在基准情景的基础上缩小1%。通过随机分布模拟生成各情景的价格序列随机值,以测度能

源市场的反应。

(2)碳交易策略。碳交易机制能激励市场改变生产消费结构,当碳价高于临界水平时,市场倾向于清洁能源的生产和消费^[34]。如果公共部门能够精准地测度不同行业对能源消费结构趋势的差异,就会在市场均衡的水平上实现对能源替代方案的有效引导。《2017年中国碳价调查》结果显示,消费者预期碳交易价格在50~200元/t区间内,且当前较低且稳定的交易价格对于企业而言也不具有实际压力,因此根据消费者预期水平模拟了两个不同定价水平下能源结构调整趋势。

(3)补贴策略。有效的能源补贴能激励清洁能源发展和高污染能源替代,本文设定了各能源的溢价水平,目的是在清洁发展目标下优先提升天然气的市场激励并降低高污染能源的吸引力。

(4)市场策略。产能的投资决策需要充分衡量市场机遇和投资环境,本文通过调整投资回收期以反映市场环境状况的变化,并得出同等市场机遇下能源结构的调整趋势。

(5)成本策略。能源投产所需建设成本不同,新产能进入市场的意愿也不一样,通过随机改变能源生产过程中的建设成本,确定成本调整能否有效引导产能建设清洁化。

5.2 策略情景结果分析

表7表明给予市场交易价格更大的自由调整空间对能源消费结构优化调整有显著的正向影响。当市场价格变动幅度增加时能源消费结构清洁平衡化加速,且变动范围每增加1%,2030年煤炭的占比将减少约0.5%,石油则增加约0.1%,天然气仅增

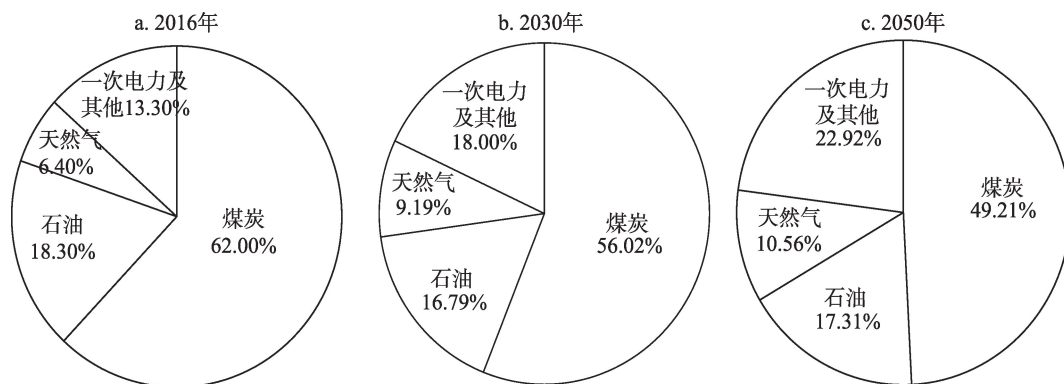


图3 2016、2030及2050年能源消费结构变动对比

Figure 3 Comparison of changes in energy consumption structure in 2016, 2030, and 2050

表5 价格模拟情景平均调整情况

Table 5 Average adjustment of price simulation scenario

能源	价格策略						
	基准情景/ (元/tce)	价格波动增加1%		价格波动增加2%		价格波动减少1%	
		价格/(元/tce)	变动百分比/%	价格/(元/tce)	变动百分比/%	价格/(元/tce)	变动百分比/%
煤炭	380.42	351.73	-7.54	326.15	-14.27	412.68	8.48
石油	1051.55	967.55	-7.99	892.36	-15.14	1145.54	8.94
天然气	1168.21	1085.17	-7.11	1009.63	-13.57	1259.55	7.82
一次电力及其他	3515.89	3261.72	-7.23	3030.65	-13.80	3795.74	7.96

表6 市场、补贴、成本及碳交易策略具体内容

Table 6 Specifics of market, subsidy, cost, and carbon trading strategies

能源	市场策略/a		补贴策略/(元/tce)		成本策略/(元/tce)		碳交易策略/(元/tce)		
	基准情景	模拟情景	基准情景	模拟情景	基准情景	模拟情景	基准情景	模拟情景	模拟情景
煤炭	10	5	1696.70	-126.30	46.63	45.80	50.00	100.00	150.00
石油	8	5	871.97	232.39	105.15	75.90			
天然气	8	5	-1461.98	608.27	489.19	247.36			
一次电力及其他	10	5	3580.87	4123.79	2086.76	1536.94			

表7 价格策略下能源消费结构变动状况

Table 7 Changes in energy consumption structure of price strategy (%)

能源	基准情景		变动范围增加1%		变动范围增加2%		变动范围减少1%	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
煤炭	56.02	49.21	55.54	47.93	55.09	46.78	56.30	49.97
石油	16.79	17.31	16.93	17.61	17.04	17.86	16.99	18.02
天然气	9.19	10.56	9.22	10.63	9.25	10.68	9.11	10.36
一次电力及其他	18.00	22.92	18.31	23.83	18.62	24.68	17.60	21.65

0.03%,而一次电力及其他增加0.31%,长期来看各能源调整幅度放缓,但清洁能源消费所占市场份额将超过1/3。相反,变动范围减少1%对清洁能源比重的调整有更大抑制影响,价格依旧具有优势的煤炭更得到消费者青睐,2050年其使用比例反升至49.97%,石油比重也增至18.02%;相应地,天然气以及一次电力及其他能源的消费比重不升反降,不利于能源消费结构的调整和生态环境可持续发展。

表8为五种策略下2030年和2050年中国能源结构的变化情况。在市场策略下投资市场回收周期缩短,资本流动的意愿更强,但与此同时成本的分摊年限也缩短,2030年煤炭消费占比反增0.46%,天然气和石油无明显变化;在对清洁能源的政策性补贴激励导向下,天然气和一次电力及其他能源的市场份额有显著提升,其中天然气相比期初增长8.23%,一次电力及其他的消费占比也增至22.31%,

表8 各策略下能源消费结构变动状况

Table 8 Changes in energy consumption structure under other strategies (%)

能源	基准情景		市场策略		补贴策略		成本策略		CO ₂ 100元/t		CO ₂ 150元/t	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
煤炭	56.02	49.21	56.48	49.96	44.10	31.55	55.87	48.96	53.34	44.98	50.51	40.60
石油	16.79	17.31	16.91	17.54	16.16	15.77	16.76	17.24	16.52	16.67	16.13	15.86
天然气	9.19	10.56	9.21	10.62	17.42	22.87	9.22	10.61	9.56	11.03	9.84	11.35
一次电力及其他	18.00	22.92	17.40	21.88	22.31	29.81	18.15	23.19	20.58	27.31	23.52	32.20

而煤炭和石油占比则分别减少至44.10%和15.77%;成本策略下各能源的固定建设成本都降低,相比于基准情景,2030年各种能源在整个能源结构中的比重变动幅度均不超过0.15%,长期来看最大变动也仅为0.27%。在碳交易策略中随着碳交易价格的上升,天然气和一次电力及其他等清洁能源在能源消费结构中的占比增长明显,2030年总计分别达到30.14%和33.36%,亦推动煤炭在整个能源消费结构的比重下降2.68%及5.51%,而当碳交易价格达到150元/t时2050年一次电力及其他能源更超过30%,清洁能源消费水平也达到了43.55%,而石油的市场份额在两种碳交易价格水平下均较为稳定。总体来看,补贴策略和碳交易策略的要素调整均能推动清洁能源在近期实现30%的利用水平,而市场策略和成本策略下能源利用结构清洁高效化调整优化力度并不显著。

横向比较各模拟情景的结果可以发现,只有价格波动范围缩小和市场情景下造成煤炭消费比重略有上升,故此能源消费中煤炭占比下降已成必然,且不太会出现反弹;使其比重下降的各情景中补贴策略最为有效,而各策略均未对石油的消费造成明显冲击,表明石油市场对各要素调整的响应相对稳健。在除价格变动幅度减少1%时略有下降外,天然气消费份额在其余设定中均有所提升,但市场和成本策略中天然气消费比重增量微小,而补贴情景中天然气消费在总体能源利用结构中超越石油。对于一次电力及其他能源而言,成本策略和市场价格变动幅度减少1%均使其份额略有降低,补贴策略和碳交易策略的要素调整更是使其在中期就突破20%,长期来看也有望达到30%的份额。

6 结论及政策建议

本文利用系统动力学模型,对中国能源消费结构演化的中长期趋势以及不同情景下结构变化进行仿真模拟。结果表明:在设定的经济发展水平和能源消耗强度约束下,煤炭作为主要消费能源,其下降趋势与天然气和一次电力及其他能源占比的速度提升相一致,但是变动幅度有限,与中国能源产业供给侧改革和减排目标不相符。在各模拟情境中,成本变动和市场调整下能源消费结构与基准情景相似,故对能源替代无显著推动效果,而政策性补贴和碳交易工具的实施能在短期内抢占高污

染行能源的市场份额,撬动中国能源消费的替代路径。特别是市场激励策略和价格调整机制,其对当前清洁能源产业的发展有着至关重要的作用。

基于以上结论,本文提出如下建议:

(1)完善市场引导机制,提升天然气激励水平,加快培育清洁型能源产能。考虑环境成本下的中国一次电力及其他能源的市场激励程度较高,而天然气吸引力严重不足抑制了其对于中国能源结构调整的过渡作用。为替代煤炭和石油,天然气市场偏好不应低于二者,扭转这一局面最直接的方法是针对性提升天然气和一次电力及其他能源的有效补贴,补贴的方式可以专注于上游生产端,也可以向下覆盖消费端和加工端,加速产能向清洁型能源转移,推进清洁能源市场的快速崛起。

(2)改革能源市场交易价格定价机制。煤炭和石油的市场价格相对低廉,会迟滞清洁能源的消费需求和投资意愿。为了避免这种情况长期影响能源市场的平衡,应逐步提振清洁能源的价格优势,但中国政府对于重要能源的价格管制依旧比较严格,价格要素对于能源替代的驱动作用难以发挥。能源交易价格不但要以市场为重要观测指标,同时还要从政策约束和税负杠杆入手,降低高污染型能源在终端市场的竞争力,并给予清洁能源更大的价格调整空间,同时依托技术升级凸显清洁能源规模效应,以使其价格降低至消费者可接受的替代临界点以下。

(3)全面推进碳交易体系市场化,实现能源市场价格改革和碳价形成机制融合。碳交易价格越高,对于能源清洁高效利用的推动越明显,然而当前价格水平不足以发挥其对于引导市场消费低碳能源的作用,因此利用碳交易手段推动能源利用结构优化的核心在于提升碳价格上行空间。同时为尽快促进碳定价的能源结构优化成效,需要继续推进碳交易市场由点到面全面成型,并将碳交易核算有效融入能源价格改革的工作中,实现碳交易定价与能源市场状况紧密结合。

参考文献(References):

- [1] 岳立,严珺文.新常态下中国能源供给侧改革:国际借鉴与路径探究[J].当代经济管理,2017,39(10):94-97. [Yue L, Yan J W. Reform of China's energy supply side under the new normal: Inter-

2019年9月

- national reference and path exploration[J]. Contemporary Economic Management, 2017, 39(10): 94-97.]
- [2] Dudley B. BP Statistical Review of World Energy[C]. London: World Petroleum Congress, 2017.
- [3] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015-2050): 可再生能源发展与可行路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 8-18. [Ma L M, Shi D, Pei Q B. Low-carbon transformation of China's energy in 2015-2050: Renewable energy development and feasible path[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 8-18.]
- [4] 中国能源研究会. 中国能源发展报告 2018[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018. [China Energy Research Association. China Energy Development Report 2018[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018.]
- [5] 何怡瑶, 潘士远, 施康, 等. 破解“供需错配”是高质量发展的关键[J]. 国家治理, 2018, (5): 34-39. [He Y Y, Pan S Y, Shi K, et al. Cracking the “mismatch between supply and demand” is the key to high quality development[J]. National Governance, 2018, (5): 34-39.]
- [6] 李百吉, 张倩倩. 中国区域能源供需结构均衡度及经济影响分析[J]. 经济问题探索, 2017, (4): 39-46. [Li B J, Zhang Q Q. Equilibrium degree of regional energy supply and demand structure and economic impact analysis[J]. Exploration of Economic Issues, 2017, (4): 39-46.]
- [7] 林卫斌, 苏剑. 理解供给侧改革: 能源视角[J]. 价格理论与实践, 2015, (12): 8-11. [Lin W B, Su J. Understanding supply side reform: Energy perspective[J]. Price Theory and Practice, 2015, (12): 8-11.]
- [8] 岳立, 杨帆. 新常态下中国能源供给侧改革的路径探析: 基于产能、结构和消费模式的视角[J]. 经济问题, 2016, (10): 1-6. [Yue L, Yang F. Path analysis of China's energy supply side reform under the new normal: Based on the perspective of capacity, structure and consumption model[J]. Economic Issues, 2016, (10): 1-6.]
- [9] 邓若冰, 吴福象. 供给侧结构性改革背景下提升中国经济增长质量的战略选择[J]. 天津社会科学, 2016, (6): 108-114. [Deng R B, Wu F X. Strategic choices for improving the quality of China's economic growth under the background of supply-side structural reform[J]. Tianjin Social Science, 2016, (6): 108-114.]
- [10] 黄光晓, 林伯强. 中国工业部门资本能源替代问题研究: 基于元分析的视角[J]. 金融研究, 2011, (6): 86-96. [Huang G X, Lin B Q. Research on the capital-energy substitution in the Chinese industrial sector: Based on the perspective of Meta-analysis[J]. Financial Research, 2011, (6): 86-96.]
- [11] Marchetti C. Primary energy substitution models: On the interaction between energy and society[J]. Technological Forecasting and Social Change, 1977, 10(4): 345-356.
- [12] Goeller H E, Weinberg A M. The age of substitutability[J]. Science, 1976, 191(4228): 683-689.
- [13] Stiglitz J E, Dasgupta P. Market structure and resource depletion: A contribution to the theory of intertemporal monopolistic competition[J]. Journal of Economic Theory, 1982, 28(1): 128-164.
- [14] Park S C. A study on renewable energy policy and sustainable development strategy: German model and implication[J]. Environmental and Resource Economics Review, 2016, 25(1): 61-87.
- [15] 熊焰. 能源替代的驱动力: 高效能源替代低效能源[J]. 能源, 2017, (7): 90-92. [Xiong Y. The driving force of energy substitution: High efficiency energy instead of low energy[J]. Energy, 2017, (7): 90-92.]
- [16] 孙鹏, 聂普焱. 动态视角下可再生对不可再生能源的替代[J]. 系统工程, 2014, 32(3): 92-98. [Sun P, Nie P Y. The substitution of renewable energy for depletable energy under dynamic perspective [J]. System Engineering, 2014, 32(3): 92-98.]
- [17] 蔡福安. 世界一次能源替代的系统动力学模型[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(5): 141-144. [Cai F A. Dynamic model of substitution systems of primary energy in the world[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1994, 18(5): 141-144.]
- [18] 林伯强, 李江龙. 环境治理约束下的中国能源结构转变: 基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J]. 中国社会科学, 2015, (9): 84-107. [Lin B Q, Li J L. Transformation of China's energy structure under environmental governance constraints: A peak value analysis of coal and carbon dioxide[J]. Social Sciences in China, 2015, (9): 84-107.]
- [19] 张玉卓. 共存市场中的能源替代博弈研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 232-236. [Zhang Y Z. Energy substitution game in the common market[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 232-236.]
- [20] 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, (5): 30-42. [Lu C J, Zhou D M. The positive demonstration of energy substitution in China: Based on the revision of the model of Allen substitution[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008, 25(5): 30-42.]
- [21] 赫永达. 基于能源消费的资本与能源替代效应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. [He Y D. Econometric Study on the Effects of Capital-Energy Substitution: From the Perspective of Energy Consumption[D]. Changchun: Jilin University, 2015.]
- [22] Lin B, Atsagli P. Energy consumption, inter-fuel substitution and economic growth in Nigeria[J]. Energy, 2017, 120: 675-685.
- [23] 后勇, 徐福缘, 程纬. 基于可再生能源替代的经济持续发展模型[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(9): 67-72. [Hou Y, Xu F Y, Cheng W. Sustainable growth model based on the substitution of renewable energy[J]. Systems Engineering- Theory & Practice, 2008, 28(9): 67-72.]
- [24] 郭扬, 李金叶. 我国新能源对化石能源的替代效应研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 762-770. [Guo Y, Li J Y. The substitution effect on new energy research and fossil energy in China[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 762-770.]
- [25] 于立宏, 贺媛. 能源替代弹性与中国经济结构调整[J]. 中国工业经济, 2013, (4): 30-42. [Yu L H, He Y. The elasticity of energy substitution and restructuring of China's economy[J]. China Industrial Economy, 2013, (4): 30-42.]
- [26] Lindh T. Productivity slowdown due to scarcity of capital to scrap

- in a putty-clay model[J]. *Economics Letters*, 2000, 69(2): 225–233.
- [27] 朱绍格, 鲁成军, 王元凯. 能源价格对中国工业资本存量的冲击效应[J]. *统计教育*, 2009, (6): 8–13. [Zhu S G, Lu C J, Wang Y K. The influence of energy price on the industrial fixed capital stock in China[J]. *Statistical Education*, 2009, (6): 8–13.]
- [28] Moxnes E. Interfuel substitution in OECD–European electricity production[J]. *System Dynamics Review*, 1990, 6(1): 44–65.
- [29] Abada I, Briat V, Massol O. Construction of a fuel demand function portraying interfuel substitution, a system dynamics approach [J]. *Energy*, 2013, 49: 240–251.
- [30] Gómez C R, Arango A S, Larsen E R. Construction of a Chilean energy matrix portraying energy source substitution: A system dynamics approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 903–913.
- [31] 许泉贵. 浅析固定资产投资与能源供需的关系[J]. *中国能源*, 1991, (7): 37–40. [Xu Q G. A brief analysis of the relationship between investment of fixed assets with energy supply and demand [J]. *Energy of China*, 1991, (7): 39–42.]
- [32] 郭正权, 张兴平, 郑宇花. 能源价格波动对能源–环境–经济系统的影响研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(11): 22–30. [Guo Z Q, Zhang X P, Zheng Y H. Impacts of energy price fluctuations on energy–environment–economy system in China[J]. *China Management Science*, 2018, 26(11): 22–30.]
- [33] 连平, 周昆平, 唐建伟, 等. 新时代中国经济发展趋势展望[J]. *科学发展*, 2018, (1): 14–20. [Lian P, Zhou K P, Tang J W, et al. Prospects of China's economic development trend in the new era [J]. *Scientific Development*, 2018, (1): 14–20.]
- [34] 李军, 王善勇, 范进, 等. 个人碳交易机制对消费者能源消费影响研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(1): 77–85. [Li J, Wang S Y, Fan J, et al. Study on the effect of personal carbon trading scheme on consumers' energy consumption[J]. *Systems Engineering–Theory & Practice*, 2016, 36(1): 77–85.]

Energy substitution path optimization under supply and demand mismatch

YAN Liang^{1,2}, XIONG Weiwei¹, WANG Xiaolin^{1,2}, WANG Teng²

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Research Center of Resource and Environmental Economics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The conflict between the demand of upgrading industrial structure and the condition of energy consumption in China is becoming increasingly more prominent. The imbalance of energy supply and demand structure restricts the support of energy industry for national economic development. It is imperative to form a set of policy tools to guide the formation of supply-side price and capacity replacement mechanism from the bottom. Based on the price substitution mechanism of inter-energy demand and the capacity substitution mechanism within each energy source, this study simulates the trend of energy substitution in China from 2017 to 2050 and takes it as a benchmark scenario. On this basis, the scenarios of price, market, cost, subsidy and carbon trading are set from the supply side. The results show that under the benchmark scenario, coal is the main energy consumption for a long time, and the pressure of structural adjustment and emission reduction is greater. Under the subsidy strategy and carbon trading strategy, the level of clean energy utilization has been significantly improved. Therefore, we must boost the incentive level of natural gas to ensure a smooth transition and reduce the cost of new energy acquisition, improve the reform of energy pricing mechanism, and broaden the scope of carbon trading price change in order to effectively achieve a supply-demand coordinated energy substitution path.

Key words: energy substitution; supply-demand mismatch; putty-clay; system dynamics; energy consumption; scenerio analysis