

中国能源转型路径选择的影响因素： 理论检验与实证分析

刘平阔, 卢存禹

(上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090)

摘要:中国能源转型正处于关键阶段,识别转型路径选择的影响因素并测算其作用效果具有重要理论价值和现实意义。基于“能源转型”的新定位,构建能源转型路径选择与轨迹跃迁的理论架构;定义能源转型的路径依赖性、脆弱性和创新性,并进行时空特征分析;建立多元回归模型,对不同区域和发展阶段的主要影响因素进行机理分析。实证研究表明:空间维度,中国八大综合经济区能源转型路径选择虽有区域性差异,但均呈现出较为明显的“依赖性增强、脆弱性减小、创新性震荡”特征;时间维度,中国能源转型路径选择呈现出“平稳期依赖性突出、换挡期脆弱性明显、加速期创新性增强”的特点,且各阶段的主要影响因素类型存在明显差异;因素维度,影响因素作用过程在不同阶段呈现不同的作用方向,部分因素的影响效果具有连续性、部分具有互斥性、部分具有随机性。

关键词:能源转型;路径属性;路径选择影响因素;影响机理分析

中图分类号:F407.2;F426

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2022)06-0051-11

Influencing Factors of the Pathway Selection for China's Energy Transition: Theoretical Verification and Empirical Analysis

LIU Pingkuo, LU Cunyu

(College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: China's energy transition is in the key stage. It is of great theoretical value and practical significance to identify the influencing factors of energy transition pathway selection, and measure their effect. Firstly, the new definition of "energy transition" is clarified and discussed through literature reviews, while the theoretical framework for both pathway selection and trajectory transition of energy transition is constructed. Secondly, the path dependence, vulnerability and creation of energy transition are defined for the spatiotemporal characteristics analysis. Finally, the Multiple Regression Model is established to analyze the effect of factors, and then nine main influencing factors of both eight comprehensive economic regions and three development stages are chosen for the influence mechanism analysis. The empirical research results show that: From the spatial dimension, although there are regional differences in energy transition pathway selection, China's eight comprehensive economic regions all show obvious characteristics of "increased

收稿日期:2021-09-10 修回日期:2022-05-26

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“绿色低碳发展中能源转型的路径匹配选择机制:产业激励的视角”(72103128);上海市“科技创新行动计划”软科学研究领域重点项目;“‘新基建’与‘产业数字化’框架下长三角电力行业‘多站融合’的业务场景匹配策略与可行性评估”(21692109400)。

作者简介:刘平阔(1989—),男,内蒙古赤峰人,博士,上海电力大学经济与管理学院副教授,研究方向为能源转型与产业发展动力机制、能源数字化转型与系统优化。

dependence, reduced vulnerability and fluctuated creation". From the time dimension, China's energy transition pathway selection shows clear attributes of "*prominent dependence in stationary period, obvious vulnerability in shifting period, and increased creation in acceleration period*" with big differences in the main influencing factors of each stage. From the factor dimension, the influencing process of factors presents different effect directions in different stages, and some factors are continuous with respect to the influence effects, some are mutually exclusive, and others are random.

Key words: energy transition; path attributes; influencing factors of pathway selection; influence mechanism analysis

随着全球能源安全问题和环境保护问题日益严峻,以“可持续转型”为核心的能源发展模式已经引起了各国政府、企业与学者的高度关注^[1-3]。然而,中国能源产业也正经历着体制改革阵痛期、能源转型加速期、环境保护关键期以及经济发展换挡期的四期并轨阶段,供需结构尚待优化、产能过剩依然突出、“双碳”目标任务艰巨。尤其在“高质量发展”趋势下,加之决战决胜脱贫攻坚任务、疫情防控常态化要求以及国际贸易摩擦不断升级等问题的出现,中国能源平稳、有序、可持续的升级转型已然成为了供给侧结构性改革以及能源生产与消费革命等任务中的重中之重。

尽管中国能源转型的目标明确,但转型过程中仍面临诸多损失与不确定性,如传统化石能源行业超低排放改造问题、新能源设备利用小时不足问题、可再生能源平均成本过高问题、“弃风弃光弃水”等严重限电问题、电网变电站容载比过高问题、“电能替代”与“多能互补”矛盾问题等损失,制约着转型的效率、弱化了转型的成效。此外,值得注意的是,中国的能源转型具有一定的制度优势,但与世界主要工业化国家相似:转型过程仍处于“量变”的阶段,可持续的“质变”拐点仍未可期。因此,保证能源转型路径选择的科学性、实用性和高效性,成为了实现高质量发展和现代化强国目标、解决中国能源产业“不平衡不充分”等主要矛盾的当务之急。基于此,本文溯源能源转型的基础性问题——路径选择的影响因素,并通过构建分析框架及采用实证分析对因素的影响机理进行系统性研究,以期在丰富学科理论的基础上对政府施政和企业决策提供必要支持。

一、文献述评

Grübler(2004)^[4]提出了能源转型的3个特征,即“数量”“结构”以及“质量”;基于此,Binder等(2017)^[5]将能源转型过程定义为“沿着特定路

径的一系列破坏性变化过程和渐进性适应过程”。自此,“路径”问题逐渐成为了能源转型领域的核心问题之一。早年间,有些学者研究过传统化石能源效率与新型化石能源开发^[6],有些学者分析过集中式可再生能源与分布式能源^[7],还有学者讨论过综合能源系统与服务^[8]。随后,各国逐渐对“转型路径”与“转型模式”之间的差别有了更为清晰的认知^[9];进而对于“能源转型路径”的探讨,又回到了一些根源问题上^[10]。因此,必须正确认识能源转型“质变”的核心问题^[11-14]。

如何推动能源转型?目前,对于该问题的研究多集中于转型系统模式^[15]、能源—环境政策^[16]、区域发展^[17]以及可持续性^[18]等领域。技术路线上,能源转型路径的量化分析存在两套并行方案:一是涉及能源转型的社会—技术分析^[19],主要侧重于转型主体以及技术创新等;二是宏观层面能源系统的量化分析^[20],主要包括综合评估模型、复杂系统建模以及系统优化模型等。其中,基于技术经济视角的量化建模重点在于“通过能源市场协调能源流动、转换和消费,定义能源系统”^[21];基于地球科学和工程视角的量化建模重点为“参与者的行为、惯性和创新,以及转型空间”^[22]。

实际情况远比理论判断更为复杂。尤其是国外学者所研究的相关问题并非中国能源转型过程中的主要“矛盾”。中国能源转型有其特殊性:根源上,世界范围内取得一定能源转型成果的国家或地区,要么早已完成了工业化转型^[23],要么是其经济社会结构相对简单^[24];进程中,中国能源系统具有独特性,路径选择无法生搬硬套国外的现成经验。在广泛的研究中,虽然Selvakkumaran等(2017)^[25]也曾强调“识别并确定能源转型路径的关键因素是一项核心工作”,但不难发现,能源转型路径选择影响因素的系统性分析工作尚无学者

深入展开,尤其是量化分析方面的成果更为匮乏。

本文主要贡献包括:理论层面,基于经典经济学理论、并利用交叉学科先进理论,构建能源转型路径选择的理论框架和概念模型,用以检验转型广联性与选择合理性;方法层面,实现定量与定性相结合,将“对转型路径的影响”具化为“对转型路径选择属性的影响”,进而说明从因素的传导过程与驱动过程来说明影响机制,并总结中国能源转型路径选择的特点与趋势;应用层面,针对八大综合经济区,从内生和外源两个层面识别不同类型的影响因素,并总结不同转型阶段的路径选择的一般性规律,为决策与监管提供支持。

二、研究方法

(一)概念模型

1. 概念界定

西方经济学经典的理论认为:有效需求的充分条件是购买意愿与支付能力。据此类比:保证能源转型“有效性”的直接因素,既有“转型能力”因素又有“转型意愿”因素。为证明上述假设,依据路径依赖理论和路径创新理论锚定两类转型能力——“锁定型”与“解锁型”;依据可持续转型理论锚定两类意愿——“渐进式”与“突进式”。此外,基于复杂适应性系统理论,能源转型路径选择的影响因素可分为内生因素和外源因素;从演化的角度看,内生和外源均为动态变化因子。针对“转型能力”进行评估,对路径属性进行定义:

(1)路径依赖性与锁定能力:能源转型的路径选择过程中,存在一种“发展惯性”;观察期内,制度变迁、经济升级、技术进步以及行为优化等驱动力未能改变能源演进的轨迹(无论“好”与“坏”),从而产生了选择行为的路径依赖性与主体决策的锁定能力^[26]。

(2)路径脆弱性与恢复能力:路径脆弱性是指在受到内部和(或)外部不确定性干扰时,能源转型系统因受阻而振荡的概率;恢复能力是指能源转型系统处于不利环境或受到消极影响时,可实现功能性复原的程度或弹性^[27]。

(3)路径创新性与突破能力:能源转型的路径选择可通过“有意识”的行为“偏移”,对既定演化路径进行“解锁”,以应对“外部事件的冲击”或实现“内部的优化发展”;通过选择行为的路径创新性与主体决策的突破能力,实现能源转型的轨迹跃迁^[28]。

2. 理论框架

在转型过程中,区别于侧重“偶然性”和“自发性”的路径依赖,路径创新更强调偏离既定轨迹的转型主体“自主性”有意识行为,且该行为应服从于“有限理性”。因此,能源转型路径选择的演化过程会通过内生因素产生质变,并形成不同程度的“报酬规模递增效应”和“路径自我强化效应”,进而打破原路径、形成新路径,不仅要求内生因素的提高与突破,而且要求外源因素的改进与适应(见图1)。

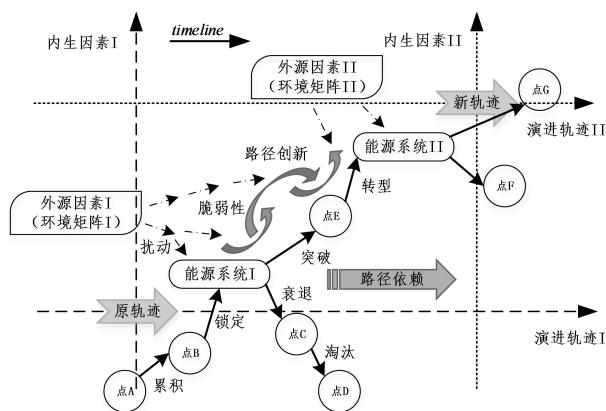


图1 能源转型路径选择与轨迹跃迁的演化概念模型

理论上,“依赖性强、脆弱性小、创新能力低”的能源系统转型最难转型;具有“依赖性弱、脆弱性大、创新能力高”等特点的系统所受阻较小^①。实践中,转型主体的博弈过程具有不确定性,导致路径依赖与路径创新并非简单的替代关系,还可能存在复杂的互补关系,尤其脆弱性的影响仍需根据现实情况进行判断。因此,能源转型路径选择的演化过程,不仅受到系统内自身作用的制约,而且也受到系统外环境的影响。外源因素可分为“简单”和“复杂”两种情况:在简单环境中,影响因素较少、变化较小,因此选择“路径依赖”的概率更

① 当轨迹跃迁发生时,能源系统内的各转型主体将面临两种策略选择——“越轨突破性创新”与“顺轨渐进性创新”。

大;在复杂环境中,影响因素较多且处于动态变化之中,因此选择“路径创新”的偏向更大。

(二) 测算模型

1. 属性测算模型

为研究区域内生因素和外源因素对能源转型路径选择的影响,以 i 表示区域、 En 表示能源部门、 $SubEn$ 表示细分的能源部门(主要包括煤炭、石油与天然气、电力、其他能源)。

(1) 路径依赖性

相对于工业产值、投资和就业等指标,人均能源投资可从能源规模的发展角度更为直接地反映区域性能源系统演进的路径依赖程度^[29],即:

$$PathDe_i^{En} = \frac{Inv_i^{En}}{Pop_i} \quad (1)$$

其中, $PathDe_i^{En}$ 为区域内人均能源投资,其标准化后的纯量可表示区域性能源系统演进的路径依赖程度; Inv_i^{En} 为区域内能源产业投资总量; Pop_i 为区域内总人口。 $PathDe_i^{En}$ 越高,则区域 i 内能源系统演进的路径依赖程度越高;反之则越低。

(2) 路径脆弱性

当区域经济过度依赖于能源资源禀赋(能源供给侧)以及高耗能产业(能源需求侧)时,则表现出其经济结构相对单一而缺乏弹性;在该区域在面对内部波动和外部冲击时,能源系统演进将增加区域经济的衰退风险^[30]。因此设定:

$$PathVu_i^{En} = \frac{Cons_i^{En}}{GDP_i} \quad (2)$$

其中, $PathVu_i^{En}$ 为区域内单位 GDP 的能源消耗,其标准化后的纯量可表示区域性能源系统演进的路径脆弱程度; $Cons_i^{En}$ 为区域内所有行业的能源消费总量; GDP_i 为区域经济生产总值。 $PathVu_i^{En}$ 越高,则区域 i 内能源系统演进的路径越脆弱;反之则越低。

(3) 路径创新性

能源转型是能源供给侧与能源需求侧共同作用的结果;因此,区域内的能源转型路径创新可以能源产业多样性水平来衡量。在测度上,采用熵指数法(Entropy Index)对多样性进行测算^[31-32],公式如下:

$$PathCr_i^{En} = \sum_{SubEn \in En} \left[\left(\frac{Inv_i^{SubEn}}{Inv_i^{En}} \right) \cdot \ln \left(\frac{Inv_i^{SubEn}}{Inv_i^{En}} \right) \right] \quad (3)$$

其中, $PathCr_i^{En}$ 为区域内能源产业的多样化水平,其标准化后的纯量可表示能源转型的路径创新程度; Inv_i^{SubEn} 表示区域内能源类细分部门的投资; Inv_i^{En} 表示区域内能源产业的总投资。 $PathCr_i^{En}$ 越大,则区域内能源转型的路径创新水平越高;反之则越低。

2. 多元回归模型

为分析路径依赖性、脆弱性以及创新性的主要内生与外源因素及其影响程度^[33],构建多元线性关系:

$$obj = \alpha + \sum_m \beta_m \cdot x_m + \varepsilon \quad (4)$$

其中, obj 表示能源转型路径选择的属性,即路径依赖性($PathDe_i^{En}$)、路径脆弱性($PathVu_i^{En}$)以及路径创新性($PathCr_i^{En}$); x_m 表示内生、外源的主要影响因素, m 表示主要影响因素的数量; α 和 β_m 均为待估的经济参数; ε 为随机干扰项。

为消除特征之间的差异性,提高模型的收敛速度和测算精度,同时不影响拟合过程中变量的变化趋势,采用离差标准化方法进行归一化处理:

$$Variable^* = \frac{Variable - Variable^{\min}}{Variable^{\max} - Variable^{\min}} \quad (5)$$

其中, $Variable^*$ 为变量标准化后所得的纯量, $Variable$ 即指代 obj 和 x ; $Variable^{\max}$ 和 $Variable^{\min}$ 分别表示相对数值样本数据的最大值和最小值。

三、实证分析

(一) 数据基础

1. 变量选取

为保证变量所形成的指标体系不失研究的一般性与科学性,一方面,从复杂适应系统理论的角度看,能源系统内部所形成因果闭合回路的状态变量为内生因素,边界以外作用于闭合回路节点的状态变量为外源因素;另一方面,从能源转型驱动力的角度看,内生因素可根据制度—经济—技术—行为的四维框架进行分解^[34-35],且可从时空二维结构析出外源因素^[36]。变量的含义如表 1 所示。

表 1 能源转型路径选择的变量含义

符号		名称	含义	类型	
被解释变量	obj	$PathDe^{En}$	路径依赖性	区域内人均能源投资,反映能源转型路径选择的锁定能力	路径选择属性
		$PathVu^{En}$	路径脆弱性	区域内单位 GDP 能耗,反映能源转型路径选择的恢复能力	
		$PathCr^{En}$	路径创新性	区域内产业多样化水平,反映能源转型路径选择的突破能力	
解释变量	x_1	体制锁定	区域内国有企业数量占全部企业比例,体现能源转型的制度保障能力	制度性因素	内生因素
	x_2	产业结构	区域内能源产业总产值与第二产业总产值的比值,体现产业制度绩效	制度性因素	
	x_3	经济水平	区域内人均国内生产总值,体现能源转型的经济支持能力	经济性因素	
	x_4	价格水平	区域内新能源成本的平均价格指数,体现竞争优势	经济性因素	
	x_5	技术扩散	区域内新能源装机占区域能源总装机的比重,体现技术驱动	技术性因素	
	x_6	资产投资	区域内能源固定资产投资占区域 GDP 的比重,体现行为理性约束	行为性因素	外源因素
	x_7	资源禀赋	区域内新能源总产量占全部能源总产量的比重,体现能源安全		
	x_8	地区区位	区域内是否沿海作为虚拟变量(1,0),体现协同性		
	x_9	对外开放	区域内 FDI 与区域内固定资产投资总额的比值,体现有序性		

2. 数据描述

为分析能源发展平稳期(2000—2005)、能源转型换挡期(2006—2013)以及能源转型加速期(2014—2019)的区域性特征,兼顾区域能源发展的关联性、避免区域划分的模糊化,将截面数据分为八大综合经济区(除港、澳、台的 31 个省级行政单位),用以进行面板回归分析。

数据来源包括:《中国统计年鉴(2000—2020)》

《中国能源统计年鉴(2020)》《中国工业统计年鉴(2000—2020)》《能源与电力分析年度报告系列(2010—2020)》以及《中国电力系统转型报告(2019)》。各区域路径选择属性的原始数据以及自变量原始数据的统计性描述分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 能源转型路径选择属性测算的变量统计性描述

指标统计	能源工业投资	常住人口	能源消费总量	GDP	煤炭行业总投资	石油和天然气行业总投资	电力行业总投资	其他能源行业总投资
	/亿元	/万人	/万吨标准煤	/亿元	/亿元	/亿元	/亿元	/亿元
容量	160	160	160	160	160	160	160	160
均值	606.66	4292.44	11242.77	14736.90	84.62	60.35	398.11	90.85
中位数	461.08	3798.76	9137.50	9329.10	22.58	10.62	289.93	48.31
最大值	3383.00	11521.00	38899.00	104644.75	1352.22	605.64	2592.49	664.89
最小值	6.58	258.00	480.00	117.80	0.00	0.00	5.78	0.00
标准差	573.80	2723.44	7952.64	16480.94	166.58	102.71	386.11	111.69

表 3 因变量测算数据原始值的统计性描述

因变量	指标统计								
	体制锁定 x_1	产业结构 x_2	经济水平 x_3	价格水平 x_4	技术扩散 x_5	资产投资 x_6	资源禀赋 x_7	地区区位 x_8	对外开放 x_9
	%	%	(亿元/万人)	(1)	%	%	%	(1)	%
容量	160	160	160	160	160	160	160	160	160
均值	0.1414	0.2463	3.4037	103.4255	0.0766	0.0558	0.0783	0.6250	0.0566
中位数	0.0866	0.2088	2.9816	101.4333	0.0454	0.0401	0.0528	1.0000	0.0393
最大值	0.5393	0.7355	11.9055	336.5250	0.4261	0.2446	0.3166	1.0000	0.3060
最小值	0.0177	0.0529	0.4435	89.8800	0.0000	0.0134	0.0000	0.0000	0.0015
标准差	0.1286	0.1574	2.3996	19.1588	0.0921	0.0451	0.0795	0.4841	0.0548

3. 数据检验

利用同根检验法和异根检验法进行单位根检验,如表 4 所示。除体制锁定、产业结构和价格水平外,其余变量均存在单位根(虚拟变量无需进行单位根检验);利用各变量一阶差分进行检验,由 p 值判断因变量和自变量的一阶差分为平稳过程。

为防止出现伪回归,在通过截面相关性检验的情况下(见表 5),采用 Kao 检验方法,对 3 组模型中残差的平稳性进行检验,如表 6 所示。路径依赖性回归模型中,在 5% 的显著性水平下变量间存在协整关系;路径脆弱性回归模型和路径创新性回归模型中,均在 1% 的显著性水平下变量间存在协整关系。

表 4 面板数据单位根检验的结果

变量		检验方法					结论
		LLC	Breitung	IPS	Fisher - ADF	Fisher - PP	
因变量	<i>PathDeEn</i>	2.38941 [0.9916]	0.92028 [0.8213]	1.3208 [0.9067]	15.0388 [0.5218]	5.89491 [0.9892]	不平稳
	Δ <i>PathDeEn</i>	-4.2042 [0.0000]	-0.81175 [0.2085]	-3.12415 [0.0009]	39.468 [0.0009]	52.4169 [0.0000]	平稳
	<i>PathVuEn</i>	0.82376 [0.7950]	1.08371 [0.5584]	0.43149 [0.6669]	13.982 [0.6001]	9.81022 [0.8763]	不平稳
	Δ <i>PathVuEn</i>	-7.06779 [0.0000]	-5.46074 [0.0000]	-3.77134 [0.0001]	39.5641 [0.0009]	39.0924 [0.0011]	平稳
	<i>PathCrEn</i>	-2.37825 [0.0087]	-1.06709 [0.1430]	-0.70924 [0.2391]	20.3353 [0.2055]	17.1323 [0.3771]	不平稳
	Δ <i>PathCrEn</i>	-7.73547 [0.0000]	-4.54021 [0.0000]	-7.34101 [0.0000]	76.8255 [0.0000]	92.9028 [0.0000]	平稳
	x_1	-12.0177 [0.0000]	3.61507 [0.9998]	-7.23478 [0.0000]	55.7198 [0.0000]	61.3179 [0.0000]	平稳
	Δx_1	-4.0559 [0.0000]	-0.72391 [0.2346]	-2.21339 [0.0134]	29.9976 [0.0180]	35.7138 [0.0032]	平稳
	x_2	-10.9375 [0.0000]	0.14685 [0.5584]	-9.55961 [0.0000]	69.9028 [0.0000]	102.321 [0.0000]	平稳
	Δx_2	-7.60705 [0.0000]	-2.47137 [0.0067]	-9.72102 [0.0000]	86.3686 [0.0000]	119.78 [0.0000]	平稳
	x_3	-4.55645 [0.0000]	3.99109 [0.0000]	-2.02927 [0.0212]	26.4171 [0.0484]	37.1723 [0.0020]	不平稳
	Δx_3	-5.38818 [0.0000]	-2.94172 [0.0016]	-2.50397 [0.0061]	31.0644 [0.0132]	43.932 [0.0002]	平稳
自变量	x_4	-8.57461 [0.0000]	-7.80368 [0.0000]	-5.31728 [0.0000]	52.6698 [0.0000]	52.3601 [0.0000]	平稳
	Δx_4	-11.3339 [0.0000]	-5.20993 [0.0000]	-9.66785 [0.0000]	96.1667 [0.0000]	176.078 [0.0000]	平稳
	x_5	0.86471 [0.8064]	7.52381 [1.0000]	5.41897 [1.0000]	2.01253 [1.0000]	1.76062 [1.0000]	不平稳
	Δx_5	-4.4779 [0.0000]	-8.32608 [0.0000]	-3.54451 [0.0002]	38.3978 [0.0013]	40.5902 [0.0006]	平稳
	x_6	-1.48864 [0.0683]	-1.50982 [0.0655]	-0.42693 [0.3347]	19.3895 [0.2490]	20.1331 [0.2143]	不平稳
	Δx_6	-10.004 [0.0000]	-8.28673 [0.0000]	-9.9313 [0.0000]	97.7027 [0.0000]	136.794 [0.0000]	平稳
	x_7	2.30345 [0.9894]	5.26215 [1.0000]	4.40314 [1.0000]	7.7891 [0.9549]	7.00498 [0.9732]	不平稳
	Δx_7	-9.36774 [0.0000]	-1.48172 [0.0692]	-7.91108 [0.0000]	79.0588 [0.0000]	89.1084 [0.0000]	平稳
	x_9	2.90521 [0.9982]	-3.52226 [0.0002]	1.78423 [0.9628]	12.4269 [0.7141]	17.6938 [0.3421]	不平稳
	Δx_9	-7.65594 [0.0000]	-3.02712 [0.0012]	-7.65112 [0.0000]	75.6189 [0.0000]	102.334 [0.0000]	平稳

注:检验形式设定为含截距和趋势项; Δ 表示表示变量的一阶差分;方括号[]内为统计量的p值。

表 5 面板数据截面相关性检验的结果

变量		检验方法				d. f.	结论
		Breusch - Pagan LM	Pesaran scaled LM	Bias - corrected scaled LM	Pesaran CD		
因变量	<i>PathDeEn</i>	449.338 [0.0000]	56.30366 [0.0000]	56.09314 [0.0000]	21.08473 [0.0000]	28	不相关
	<i>PathVuEn</i>	542.8547 [0.0000]	68.80036 [0.0000]	68.58983 [0.0000]	23.29706 [0.0000]	28	不相关
	<i>PathCrEn</i>	121.6918 [0.0000]	12.5201 [0.0000]	12.30957 [0.0000]	8.482498 [0.0000]	28	不相关
自变量	x_1	526.4727 [0.0000]	66.61122 [0.0000]	66.40069 [0.0000]	22.93519 [0.0000]	28	不相关
	x_2	450.5376 [0.0000]	56.46396 [0.0000]	56.25343 [0.0000]	21.19285 [0.0000]	28	不相关
	x_3	546.8791 [0.0000]	69.33814 [0.0000]	69.12762 [0.0000]	23.38266 [0.0000]	28	不相关
	x_4	346.5062 [0.0000]	42.56219 [0.0000]	42.35166 [0.0000]	16.95086 [0.0000]	28	不相关
	x_5	502.2243 [0.0000]	63.37088 [0.0000]	63.16036 [0.0000]	22.39192 [0.0000]	28	不相关
	x_6	146.3113 [0.0000]	15.81001 [0.0000]	15.59948 [0.0000]	8.803179 [0.0000]	28	不相关
	x_7	284.9114 [0.0000]	34.33123 [0.0000]	34.12071 [0.0000]	9.979688 [0.0000]	28	不相关
	x_9	366.1049 [0.0000]	45.18117 [0.0000]	44.97065 [0.0000]	18.76681 [0.0000]	28	不相关

注:方括号内为统计量的p值。

表 6 面板数据协整分析 Kao 检验

模型		ADF		结果
类型	因变量	统计量值	p 值	
路径依赖性	<i>PathDeEn</i>	-2.059689	0.0197	拒绝原假设
路径脆弱性	<i>PathVuEn</i>	-3.448693	0.0003	拒绝原假设
路径创新性	<i>PathCrEn</i>	-4.228729	0.0000	拒绝原假设

(二) 结果分析

1. 时空特征分析

利用表 1 所描述的原始数据进行计算,得到能源转型路径选择属性测算结果,如图 2 所示。

(1)就路径依赖性而言,整体呈现逐渐增强的发展趋势;①大西北综合经济区对能源转型的路径依赖程度最高、路径锁定能力最强,呈现出较为陡峭的“S 型 + W 型”,在换挡期的发展速率最快,在加速期出现幅度较大的震荡;②长江中游综合经济区对能源转型的路径依赖程度最低,呈现出较为平缓的“S 型 + W 型”,在换挡期和加速期,路径锁定能力最弱;③东北综合经济区对能源转型的路径依赖程度较为适中,但路径依赖性呈现出“倒 U 型”,在加速期内呈现逐渐递减;④黄河中游综合经济区、北部沿海综合经济区、大西南综合经济区、东部沿海综合经济区以及南部沿海经济区等区域对能源转型路径依赖程度依次排序,且除北部沿海综合经济区外,其余区域的路径依赖性均呈现出“S 型”,较为适度的路径锁定能力保证了该五大区域的依赖性峰值均出现在加速期。

(2)就路径脆弱性而言,整体呈现逐渐减弱的变化趋势,抗冲击能力和抗风险能力逐渐增强,且各区域路径脆弱性最大的情况均出现在换挡期之前的能源发展平稳阶段;①大西北综合经济区的能源转型路径脆弱性最明显,表明在不确定性因素干扰下,能源转型受阻振荡的概率最大,且虽在换挡期和加速期的脆弱程度下降速率最快,但仍高于其他区域;②南部沿海经济区的能源转型路径脆弱性最小,且呈现出接近于线性的递减趋势,表明能源转型路径受到风险冲击而出现衰退的概率最小;③东北综合经济区的能源转型路径脆弱性较为特殊,呈现出平缓的“L 型”,且脆弱性降速最快出现在换挡期、降速趋于平缓且弹性缓冲效果最佳出现在加速期;④黄河中游综合经济区、大

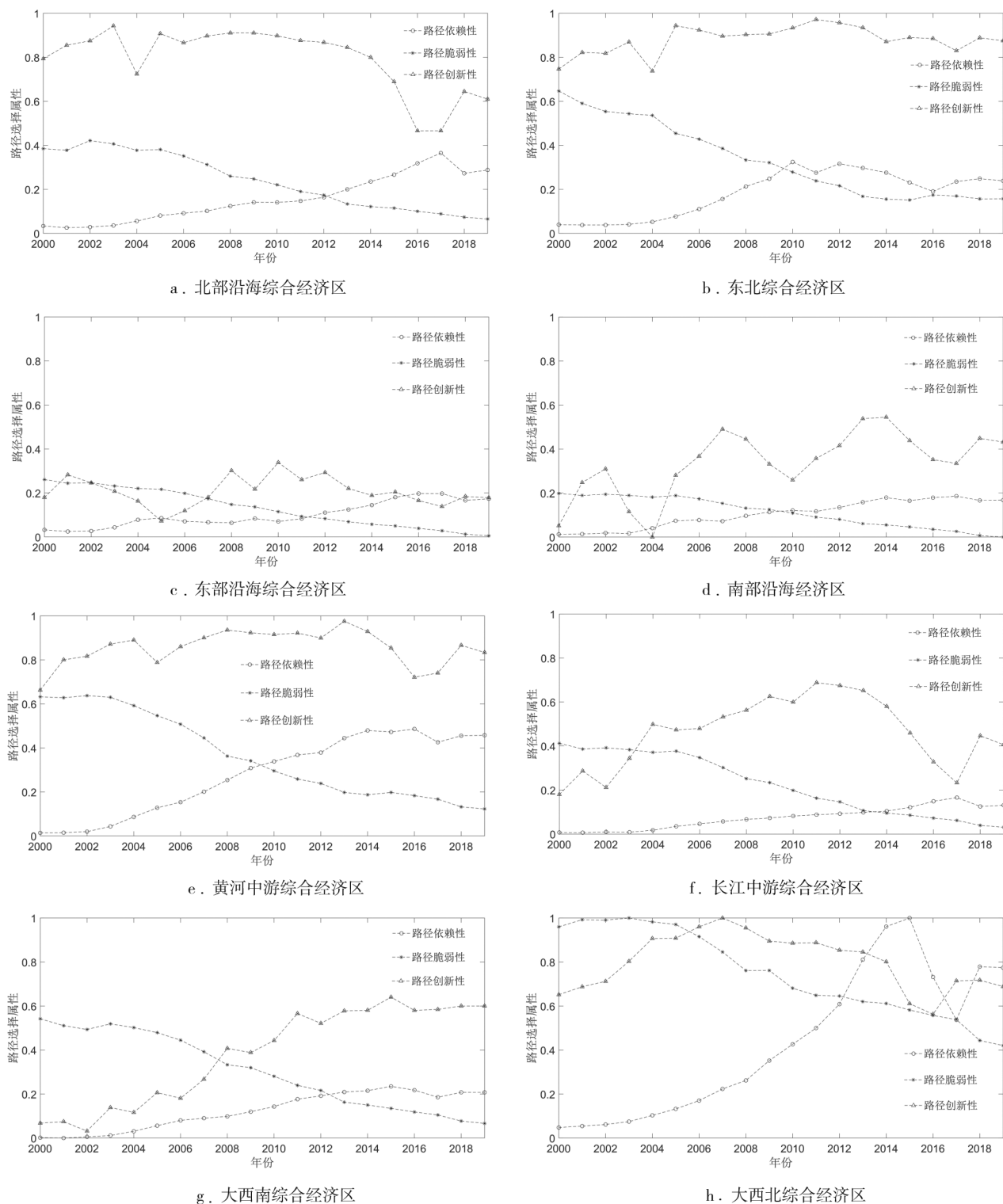


图2 中国八大综合经济区能源转型路径选择发展趋势

西南综合经济区、北部沿海综合经济区、长江中游综合经济区以及东部沿海综合经济区等区域的能源转型路径脆弱性依次排序,且均呈现出平缓的“反S型”,表明换挡期内的抗风险能力较强,加速期内路径脆弱性降至最低且保持稳定。

(3)就路径创新性而言,各区域的路径创新性存在明显差异,曲线形状呈现出两个梯队、四种类型。①第一梯队的能源转型路径创新水平较高,能源转型的行为偏移能力和突破能力较强,且路径创新性的峰值均出现在换挡期、震荡过程均出

现在平稳期期末至加速期期初,包括平缓“倒 U 型”趋势的大西北综合经济区、平缓“M 型”波动的东北综合经济区和黄河中游综合经济区以及“M 型”凹向原点的北部沿海综合经济区;②第二梯队的能源转型路径创新水平较低,对既定的能源发展路径进行解锁的能力相对较弱,行为突破能力有待提高,导致此类区域能源转型轨迹跃迁的概率较低,且出现显著波动的情况均出现在换挡期,包括陡峭“倒 U 型”趋势的长江中游综合经济区、“S 型”增长的大西南综合经济区、“S 型 + W 型”波动增长的南部沿海经济区以及平缓“M 型”波动的东部沿海综合经济区。

据此,可对能源转型的演化路径进行分异,归纳类型如表 7 所示。

2. 影响机理分析

基于平稳期、换挡期以及加速期的差异性,将样本数据分段处理,以考察不同类型属性的指标变量对能源转型路径选择的作用方向 and 影响程度;选择混合估计模型,采用最小二乘法进行估计(见表 8)。

为分析参数不稳定是否会对模型产生影响,采用残差平方累积和检验模型的稳健性:在 5% 置信区间内,观测样本区间内残差累积和的平方分布于边界区间以内。因此,模型的稳健性处于可接受范围。

(1)能源发展平稳期内,①影响区域能源转型路径依赖性的主要因素共 7 个,具有巩固作用的包括经济水平、价格水平、资产投资和产业结构,且经济性因素成为了依赖性的决定性因素;具有削弱作用的包括体制锁定、对外开放和资源禀赋,且制度性因素对原轨迹的解锁过程起到了关键作用。②影响区域能源转型路径脆弱性的主要因素共 3 个,包括具有催化作用的价格水平和资产投资,以及具有抑制作用的对外开放,且经济性因素和技术性因素明显成为了平稳期中最敏感的因素。③影响区域能源转型路径创新性的主要因素共 6 个,其中具有促进作用的经济水平、资产投资和对外开放主导着能源转型突破能力的变化趋势,并决定着转型轨迹跃迁的方式和方向;在具有抑制作用的 3 个因素中,技术扩散并未与路径创新

表 7 2000—2019 年中国八大综合经济区能源转型路径的演化分异

类型	演化路径	特征	区域
I	锁定趋向型	转型路径的依赖性增强、脆弱性明显、创新性降低,主要体现锁定能力	北部沿海综合经济区、大西北综合经济区
II	解锁趋向型	转型路径的依赖性降低、脆弱性下降、创新性增强,主要体现突破能力	大西南综合经济区
III	随机转化型	转型路径的依赖性与创新性无显著逆向关系,脆弱性增减规律复杂,锁定趋向或解锁趋向均不显著	东北综合经济区、东部沿海综合经济区、南部沿海经济区、黄河中游综合经济区、长江中游综合经济区

表 8 能源转型路径选择演化特征的拟合回归分析结果

变量	能源发展平稳期(2000—2005)			能源转型换挡期(2006—2013)			能源转型加速期(2014—2019)			2000—2019 年样本期间		
	PathDeEn	PathVuEn	PathCrEn	PathDeEn	PathVuEn	PathCrEn	PathDeEn	PathVuEn	PathCrEn	PathDeEn	PathVuEn	PathCrEn
x_1	-0.050516 ** (-2.038777)	0.212667 (1.064059)	0.059682 (0.133373)	-0.222567 *** (-3.139015)	1.199236 *** (8.547245)	0.438505 (0.736233)	-0.408337 ** (-2.258650)	0.824099 *** (4.782549)	-1.316156 * (-1.759793)	0.006197 (0.148457)	0.368738 *** (4.848291)	-0.273872 (-1.303013)
	0.045298 ** (2.026548)	0.152545 (0.846057)	0.127009 (0.314628)	-0.246017 *** (-4.385301)	-0.065427 (-0.589360)	-0.710461 * (-1.507592)	0.176940 (1.065422)	0.192647 (1.217051)	0.718279 (1.045475)	-0.210070 *** (-4.084208)	0.269899 *** (2.879885)	0.073017 (0.281923)
x_2	0.530706 *** (5.3833)	0.090155 (0.113372)	5.761796 *** (3.236193)	0.160788 *** (3.308422)	-0.138817 (-1.007152)	0.838442 (1.432992)	0.222990 *** (3.644109)	-0.033479 (-0.574031)	-1.263227 *** (-4.990137)	0.109890 ** (2.845434)	-0.173362 (-2.463630)	-0.221764 (-1.140358)
	0.392876 *** (2.739688)	1.550339 * (1.340276)	1.185764 (0.457852)	0.004981 (0.170507)	0.001226 (0.021209)	-0.128588 (-0.523984)	0.015934 (0.043758)	-0.445525 (-1.283699)	-1.164902 (-0.773312)	-0.044163 (-0.868312)	0.112729 (1.216404)	-0.087071 (-0.339975)
x_3	-0.039198 (-0.621205)	-0.001328 (-0.002610)	-4.981994 *** (-4.371743)	0.431554 *** (6.583712)	-0.258063 * (-1.989533)	0.079008 (0.143489)	0.241572 *** (4.531427)	0.031937 (0.628532)	0.874502 *** (3.965272)	0.349083 *** (10.84454)	-0.249448 *** (-4.252984)	0.228088 (1.407167)
x_4	0.139637 *** (4.65924)	0.936660 *** (3.874537)	1.012485 * (1.870621)	0.838579 *** (12.11603)	0.391631 *** (2.859447)	1.006812 * (1.731699)	0.863615 *** (7.282056)	0.178717 * (1.581068)	-0.184792 (-0.376652)	0.775023 *** (17.95023)	0.413192 *** (5.252152)	0.395670 * (1.819901)
x_5	-0.025429 ** (-2.035365)	0.020618 (0.204591)	-0.594849 ** (-2.636383)	-0.093182 ** (-2.690504)	0.079684 (1.162684)	-0.928372 *** (-3.191042)	-0.095265 ** (-2.060166)	-0.035627 (-0.808340)	-0.262581 (-1.372634)	-0.070230 *** (-2.912234)	0.146829 *** (3.341556)	-0.337267 *** (-2.777403)
x_6	-0.002751 (-0.465473)	-0.017413 (-0.365223)	-0.186377 * (-1.745973)	0.004976 (0.520792)	0.014015 (0.741251)	-0.039516 (-0.492345)	-0.002776 (-0.165320)	-0.004842 (-0.302525)	0.145478 ** (2.094289)	-0.009020 (1.040055)	0.009020 (-0.468993)	0.013932 (0.262116)
x_7	-0.029799 * (-2.019967)	-0.176296 * (-1.481509)	0.593927 ** (2.229231)	0.000648 (0.010782)	0.274460 ** (2.308903)	0.434421 (0.860907)	-0.388125 (-1.496935)	0.462899 * (1.873128)	0.904876 (0.843616)	0.045457 (1.427089)	-0.126069 ** (-2.172140)	-0.268172 * (-1.671951)
C	-0.008417 (-0.535901)	0.161221 (1.272496)	0.075714 (0.266912)	0.024320 (1.006766)	0.059726 (1.249462)	0.492786 ** (2.428513)	0.030451 (0.991177)	-0.016248 (-0.554864)	0.860269 *** (6.768752)	0.010648 (0.583867)	0.142696 *** (4.294367)	0.705595 *** (7.683717)
$R-squared$	0.855048	0.830482	0.557541	0.972968	0.944568	0.474766	0.977054	0.959401	0.650172	0.933640	0.869667	0.311471
$Adjusted R-squared$	0.820718	0.790333	0.452748	0.968463	0.935329	0.387227	0.971620	0.949785	0.567319	0.929659	0.861847	0.270160
F 值	24.90627	20.68494	5.320398	215.9605	102.2408	5.423485	179.7875	99.77479	7.847215	234.4893	111.2109	7.539544
F -统计量的 p 值	0.000000	0.000000	0.000106	0.000000	0.000000	0.000028	0.000000	0.000000	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000

注:小括号内为 t 值;***表示 1% 显著水平显著,**表示 5% 显著水平显著,*表示 10% 显著水平显著。

的演进方向保持一致,反而由于未能实现规模经济,导致突破能力降低,同时资源禀赋和地区区位也未能发挥预期优势,使得该阶段能源转型路径创新受到掣肘。

(2)能源转型换挡期内,①影响区域能源转型路径依赖性的主要因素共6个,其中资产投资、技术扩散和经济水平具有一定的巩固作用,且行为性因素超越技术性因素和经济性因素,成为了锁定原轨迹的根本力量;且产业结构和体制锁定成为了解锁原轨迹的决定性因素。②影响区域能源转型路径脆弱性的主要因素共4个,包括具有催化作用的体制锁定、资产投资和对外开放,以及具有抑制作用的技术扩散,虽然现有因素对该时期能源转型路径脆弱性的解释力较好,但制度性因素和行为性因素已然成为能源转型路径选择的最大风险源。③影响区域能源转型路径创新性的主要因素共4个,其中的资产投资依然是转型轨迹倾向于跃迁的主要原因,但随着不确定性增加,能源转型的原轨迹锁定将逐步侧重于对其他影响因素的偏向;与此同时,资源禀赋和产业结构等因素也替代了原有的体制锁定因素,从而导致该时期能源转型路径突破能力被逐步抑制,且能源发展轨迹跃迁的作用效果难以凸显。

(3)能源转型加速期内,①影响区域能源转型路径依赖性的主要因素共5个,其中具有巩固锁定能力的因素包括行为性因素资产投资、技术性因素技术扩散以及经济性因素经济水平,具有削弱锁定能力的因素为制度性因素体制锁定和资源禀赋;制度变迁和体制改革强调了制度性转型应先于经济性转型、技术性转型以及行为性转型。②影响区域能源转型路径脆弱性的主要因素共3个,包括体制锁定、对外开放以及资产投资等因素均为促进作用,尤其是制度性因素,虽然在打破锁定,但同时也增加了不确定性,这也解释了能源体制改革的复杂性、系统性与长期性等问题。③影响区域能源转型路径创新性的主要因素共5个,其中具有促进作用的不仅包括技术扩散和地区区位,且其他影响因素对于能源转型路径突破能力的作用效果明显大于平稳期和换挡期的作用效果,其原因在于随着能源转型环境的不确定性逐渐增加,原有的内生因素和外源因素正逐渐失去确定性的主导地位;此外,具有抑制作用的体制锁定和经济水平,并未与预期的效果保持一致。

(4)就整体期间而言,①影响区域能源转型路径依赖性的主要因素共5个,包括具有巩固作用的资产投资、技术扩散以及经济水平,具有削弱效果的产业结构和资源禀赋,体制锁定失去了主导地位。②影响区域能源转型路径脆弱性的主要因素共8个,具有催化作用的资产投资、体制锁定、产业结构、资源禀赋和其他影响因素可有力地解释能源转型依赖性路径偏好的原因,具有抑制作用的技术扩散、经济水平和对外开放构成能源转型创新性路径偏好的基础。③影响区域能源转型路径创新性的主要因素共4个,虽然具有促进作用的资产投资以及具有抑制作用的资源禀赋和对外开放仍在发挥影响效果,但就长期而言,其他影响因素对能源转型路径突破能力和轨迹跃迁所带来的作用已远超预期,这也解释了现有因素对能源转型路径创新性解释力较差的原因。

四、结论与启示

(一) 结论

(1)从空间维度看,中国八大综合经济区能源转型路径选择虽有区域性差异,但均呈现出较为明显的“依赖性增强、脆弱性减小、创新性震荡”特征;其原因主要在于各区域的能源投资效率、能源生产效率以及能源消费效率存在较大不同。北部沿海综合经济区和大西北综合经济区内的人均能源投资逐年增加,导致了能源系统发展模式的套牢,虽然锁定能力较强,但抗风险能力和突破能力较弱,表现为“锁定趋向型”。大西南综合经济区内能源产业多样化发展水平较高,具有较为明显的区域优势,抗风险能力和突破能力较强,且无需依赖单一发展模式,表现为“解锁趋向型”。其余五大区域内,由于其能源转型路径的依赖性与创新性无显著的负相关性,能效增减规律复杂,均表现为“随机转化型”。因此,“锁定趋向型”区域推进转型的阻力较大;“解锁趋向型”区域可因势利导地平稳推进转型进程;“随机转化型”区域的情况相对复杂,或可适时尝试创新。

(2)从时间维度看,中国八大综合经济区能源转型路径选择呈现出“平稳期依赖性突出、换挡期脆弱性明显、加速期创新性增强”的特点,且各阶段主要影响因素类型存在明显差异。能源发展平稳期的能源部门处于相对确定性的演进环境之中,发展模式存在一定的惯性,制度性、经济性、技

术性以及行为性等因素协同交互、共同主导。换挡期内,演进环境的不确定性逐渐加剧,惯性被打破;但由于各区域的抗风险能力和恢复能力存在差异,导致转型路径脆弱性的降低幅度和递减速率出现明确的层次,内生因素起主导作用,且外源因素也逐渐发挥驱动作用。加速期的转型轨迹跃迁充满不确定性,中国能源转型的突破能力仍不稳定,转型模式仍处于探索阶段,制度性、技术性以及行为性等因素的影响效果逐渐减弱,且不确定性因素的影响效果逐渐凸显。

(3)从因素维度看,在复杂环境中的影响因素作用过程在不同阶段呈现不同的作用方向,部分因素的影响效果具有连续性、部分具有互斥性、部分具有随机性,但内生因素仍是能源转型的决定性因素。首先,对中国能源转型路径选择具有普遍性影响的因素,按照其权重进行排序分别为体制锁定、产业结构、资产投资、经济水平、价格水平、技术扩散、资源禀赋、对外开放和地区区位;目前,中国能源领域的制度转型、行为转型和经济转型均滞后于技术转型,技术问题已不再是制约中国能源转型的主要矛盾。其次,分属性看,对路径锁定能力而言,经济水平和资产投资等因素在短期和长期均具有强化效应,资源禀赋因素在短期和长期均具有弱化效应,体制锁定因素在短期具有弱化效应,但在长期具有强化效应,价格水平因素在短期具有强化效应、但在长期具有弱化效应;对路径脆弱性而言,体制锁定、资产投资等因素在短期和长期均具有刺激效应;对路径突破能力而言,资源禀赋因素在短期和长期均具有弱化效应,对外开放因素在短期是强化效应、但在长期具有弱化效应;其余各因素在短期的作用相对随机,且在长期不存在效果的连续性。

(二) 启示

首先,从过程及目标看,路径选择的锁定能力和恢复能力相对明显,但现有能源系统内生因素和现有环境外源因素对路径创新的影响较小,这就要求中国能源部门在未来的发展过程中应不断探索新的转型抓手。其次,由于区域间存在能效差异,在统筹规划的基础上,应做到因地制宜、因势利导,避免“一刀切”的经验主义思维方式。最后,应掌握不同影响因素的作用方式、方向以及周期,善于利用组合工具实现高效、有序、协同、可持续且高质量的演进,既要避免“短期有益、长期有

害”的操作,又要避免“目光短浅、畏首畏尾”的格局。

本文尚有不足之处:第一,本文提出了一个假设——“有效转型 = 转型能力 + 转型意愿”,但囿于篇幅的限制,仅从“能力”的角度进行了讨论,并未对“意愿”层面的因素进行展开,因此目前的影响因素的指标体系在能源转型路径选择的解释力方面做出了较大的牺牲。第二,囿于数据限制,在考察“其他影响因素”方面也未深入,并未未对其进行细化分解,如“农村脱贫”以及“贸易摩擦”等重要问题,以及“灾害风险”和“公共卫生安全”等方面,都需要进一步深入研究。以后的工作将针对上述不足进行弥补和深入探讨。

参考文献:

- [1] SPERLING K, ARLER F. Local government innovation in the energy sector: a study of key actors' strategies and arguments [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2020, 126: 10983.
- [2] SAFARI A, DAS N, LANGHELLE O, et al. Natural gas: a transition fuel for sustainable energy system transformation? [J]. *Energy science and engineering*, 2019, 7(4): 1075-1094.
- [3] 王江, 张翔. 可持续能源转型: 模型构建与分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020(3): 74-82.
- [4] GRÜBLER A. Transitions in energy use [J]. *Encyclopedia of energy*, 2004, 6: 163-177.
- [5] BINDER C R, MÜHLEMEIER S, WYSS R. An Indicator-based approach for analyzing the resilience of transitions for energy regions. Part I: theoretical and conceptual considerations [J]. *Energies*, 2017, 10 (36): 1-18.
- [6] YU S. Evaluation of socioeconomic impacts on and risks for shale gas exploration in China [J]. *Energy strategy reviews*, 2015, 6: 30-38.
- [7] 林伯强, 李江龙. 基于随机动态递归的中国可再生能源政策量化评价 [J]. *经济研究*, 2014, 49(4): 89-103.
- [8] AMUSAT O O, SHEARING P R, FRAGA E S. Optimal integrated energy systems design incorporating variable renewable energy sources [J]. *Computers & chemical engineering*, 2016, 95: 21-37.
- [9] TAKAO Y. Low-carbon leadership: Harnessing policy studies to analyse local mayors and renewable energy transitions in three Japanese cities [J]. *Energy research & social science*, 2020, 69: 101708.
- [10] 刘平阔, 王志伟. 中国“能源转型”是否合理? ——能源替代—互补关系的实证研究 [J]. *中国软科学*, 2019(8): 14-30.
- [11] NKOANA E M. Community acceptance challenges of

- renewable energy transition: a tale of two solar parks in Limpopo, South Africa [J]. *Journal of energy in Southern Africa*, 2018, 29(1):34-40.
- [12] KNUTH S. "Breakthroughs" for a green economy? financialization and clean energy transition [J]. *Energy research & social science*, 2018(41): 220-229.
- [13] 冯烽. 能效改善与能源节约:助力还是阻力——基于中国20个行业能源回弹效应的分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2018, 35(2): 82-98.
- [14] BALEŽENTIS T, ŠTREIMIKIENĖ D. Sustainability in the electricity sector through advanced technologies: energy mix transition and smart grid technology in China [J]. *Energies*, 2019, 12(6): 1-21.
- [15] RUBIO-VARAS M, MUNOZ-DELGADO B. Long-term diversification paths and energy transitions in Europe [J]. *Ecological economics*, 2019, 163:158-168.
- [16] STOKES L, BREETZ H. Politics in the U. S. energy transition: case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy[J]. *Energy policy*, 2018, 113: 76-86.
- [17] DENES D S C D, DA CUNHA S K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil[J]. *Energy policy*, 2019, 125:396-404.
- [18] EDENS M G, LAVRIJSEN S A C M. Balancing public values during the energy transition: how can German and Dutch DSOs safeguard sustainability? [J]. *Energy policy*, 2019, 128:57-65.
- [19] GEELS F W, KERN F, FUCHS G, et al. The enactment of socio-technical transition pathways: a reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990-2014) [J]. *Research policy*, 2016, 45(4):896-913.
- [20] BERSANO A, SEGANTIN S, FALCONE N, et al. Evaluation of a potential reintroduction of nuclear energy in Italy to accelerate the energy transition [J]. *The electricity journal*, 2020, 33(7): 106813.
- [21] CARVALHO D B. Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system [J]. *Solar energy*, 2019, 191: 530-539.
- [22] CHERP A, VINICHENKO V, JEWELL J, et al. Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: a meta-theoretical framework [J]. *Energy research & social science*, 2018, 37:175-190.
- [23] AMRI F. Renewable and non-renewable categories of energy consumption and trade: do the development degree and the industrialization degree matter? [J]. *Energy*, 2019, 173: 374-383.
- [24] BOLWIG S, BOLKESJØ T F, KLITKOU A, et al. Climate-friendly but socially rejected energy-transition pathways: the integration of techno-economic and socio-technical approaches in the Nordic-Baltic region [J]. *Energy research & social science*, 2020, 67: 101559.
- [25] SELVAKKUMARAN S, AHLGREN E O. Understanding the local energy transitions process: a systematic review [J]. *International journal of sustainable energy planning and management*. 2017, 14: 57-78.
- [26] ROSENBLOOM D, MEADOWCROFT J, CASHORE B. Stability and climate policy? harnessing insights on path dependence, policy feedback, and transition pathways [J]. *Energy research & social science*, 2019, 50: 168-178.
- [27] LALDJEBAEV M, MORREALE S J, SOVACOOOL B K, et al. Rethinking energy security and services in practice: national vulnerability and three energy pathways in Tajikistan [J]. *Energy policy*, 2018, 114:39-50.
- [28] HANSEN T, KLITKOU A, BORUP M, et al. Path creation in Nordic energy and road transport systems-the role of technological characteristics [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2017, 70:551-562.
- [29] FADLY D. Low-carbon transition: private sector investment in renewable energy projects in developing countries [J]. *World development*, 2019, 122: 552-569.
- [30] MAHALINGAM B, ORMAN W H. GDP and energy consumption: a panel analysis of the US [J]. *Applied energy*, 2018, 213: 208-218.
- [31] DEMETRIUS L, LEGENDRE S. Evolutionary entropy predicts the outcome of selection: competition for resources that vary in abundance and diversity [J]. *Theoretical population biology*, 2013, 83: 39-54.
- [32] STEINER U K, TULJAPURKAR S. Drivers of diversity in individual life courses: sensitivity of the population entropy of a Markov chain [J]. *Theoretical population biology*, 2020, 133: 159-167.
- [33] 刘平阔, 孙飞虎, 谢品杰. 基于电源结构与城市化水平的电力产业有序发展研究 [J]. *智慧电力*, 2019(10): 63-69.
- [34] BOLWIG S, BAZBAUERS G, KLITKOU A, et al. Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2019, 101:440-452.
- [35] 刘平阔, 彭欢, 骆赛. 中国能源转型驱动力的结构性特征研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(12): 45-56.
- [36] 刘平阔, 王绵斌, 陈斌. 中国发电产业发展有序性: 基于省际布局和产业组织的实证研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(6): 1445-1464.

(本文责编:王延芳)