

引用格式:李荣杰,李娜,阎晓. 电力市场一体化对地区绿色经济效率的影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 523-535. [Li R J, Li N, Yan X. Impact mechanism of electricity power market integration on regional green economic efficiency[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 523-535.] DOI: 10.18402/resci.2022.03.08

电力市场一体化对地区绿色经济效率的影响机制

李荣杰,李娜,阎晓

(山西财经大学资源型经济转型发展研究院,太原 030006)

摘要:在碳达峰碳中和目标约束下,推进经济社会发展全面绿色转型势在必行。受限于电力资源供需的逆向分布特征,中国尚未有效建立统一电力市场,清洁电力消纳能力不足,严重制约地区绿色经济效率的提升。本文借助2013—2018年中国30个省(市、区)的面板数据,利用空间面板模型和中介模型分析了电力市场一体化对地区绿色经济效率的影响效应及影响机制。结果表明:①电力市场一体化不仅能够有效促进各省(市、区)自身绿色经济效率的提升,也能够对空间关联地区的绿色经济效率产生显著的溢出影响;②电力市场一体化对各省(市、区)绿色经济效率提升的促进作用既能够直接产生,也能通过实现规模效应、优化产业结构和提高企业技术创新能力3种途径的传导而间接产生。研究结果的政策启示包括:完善统一电力市场总体设计和治理体系,推进区域电力市场协同运行与融合发展,加强电力市场对地区绿色发展的支撑作用。

关键词:电力体制改革;电力市场一体化;绿色经济效率;空间溢出效应;传导机制;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.03.08

1 引言

电力作为重要的终端能源载体,在中国低碳经济发展中处于至关重要的地位。自2002年国务院发布《电力体制改革方案》以来,电力行业破除一家办电的体制束缚,逐步形成了电力市场主体多元化的竞争格局。同时,以新能源发电技术和信息技术深度融合的能源革命为清洁能源的规模化发展提供了可能^[1]。2021年11月24日中央召开全面深化改革委员会第二十二次会议,审议通过《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,提出“要推进适应能源结构转型的电力市场机制建设”“发挥电力市场对能源清洁低碳转型的支撑作用”,如何科学高效配置电力资源,建设高标准电力市场体系成为当前中国把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局,推进经济社会发展全面绿色转型的重要议题。

跨省区电力交易壁垒是中国目前电力市场化建设存在的主要问题^[2,3]。长期以来,中国电力资源在地理上呈现“南贫北富,东少西多”的分布特征,而用电需求则是“东高西低,南强北弱”,多数省(市、区)的电力生产与消费难以实现自我平衡^[4]。通过进行省际间电力交易,能够有效实现电力资源丰富区和需求区的互补。然而,在“省为实体”的电力体制下,为了实现本省企业利益以及地方政府部门利益,各省级政府势必会干预电力资源的跨省区交易,市场用电主体缺乏择电话语权^[5],这在一定程度上造成了各省电力市场“片块化”的状态,严重扭曲电力资源的有效配置。据统计,2021年1—6月,全国各电力交易中心共完成市场交易电量17023.1亿kW·h,其中省内交易量占总交易量的82.11%,省间交易电量仅占17.89%,跨省电力交易规模仍处于较低水平。省际间协同推进电力市场一体化发展,

收稿日期:2021-08-20 修订日期:2022-01-25

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJC790076);国家自然科学基金青年项目(41701630);山西省“1331”提质增效工程山西财经大学资源型经济转型协同创新中心建设项目(晋教科[2021]4号)。

作者简介:李荣杰,男,河北鹿泉人,副教授,研究方向为能源经济与政策。E-mail: rongjieli715@163.com

通讯作者:李娜,女,山西泽州人,博士研究生,研究方向为区域绿色发展。E-mail: lina_sxufe@163.com

对于提升电力资源配置效率和清洁能源消纳能力,推进地区绿色高质量发展具有重要的现实意义。

绿色全要素生产率是目前比较流行的绿色经济效率评价方法,该方法的优点在于能够将多种要素之间的替代关系纳入分析框架,并且综合考察生产过程中产生的正面与负面产出^[6]。关于绿色经济效率的影响因素,现有文献多集中在技术进步、产业集聚、贸易开放度和城镇化水平等视角的分析^[7-10]。近年来,省间电力交易对绿色发展的影响开始引起学界的关注。Rodríguez-Sarasty等^[11]通过构建电力调度模型对北美洲东北部的电力市场交易进行考察,发现各地区电力部门的协作与整合能够显著降低电力系统成本并减少碳排放。Sun等^[12]从技术创新视角,提出打破地方市场分割、建立统一市场是提升电力行业环境效率的有效手段。在加快构建统一电力市场的背景下,科学测度省际电力市场一体化水平并深入探讨其对地区绿色发展的影响,具有一定的理论意义和决策参考价值。

本文的创新和贡献主要包括以下几个方面:首先,将碳中和理念引入绿色经济效率分析框架,在考虑碳排放作为非期望产出的基础上,将绿地面积作为碳汇要素期望产出纳入测度模型;其次,逆向借鉴市场分割测度理论与方法,构建电力市场一体化指数,科学测度地区电力市场一体化水平;再者,构建电网空间矩阵,为考察地区绿色经济效率的空间关联特征提供基于地区间电力输送关系的独特视角;最后,提出并系统性实证检验电力市场一体化对绿色经济效率的多重影响机制。

2 理论分析与研究假设

2.1 电力市场一体化与绿色经济效率界定

市场一体化的概念最早由Machlup^[13]于1976年提出,主要反映市场中的各类要素在地区之间的适当流动性,以及商品在产地与销售地市场价格的一致性,即表明除必要的运输成本之外,市场要素的流动不需要支付由市场分割、贸易壁垒等造成的额外交易费用。即便中国电力产业业务环节的自然垄断属性已经发生了动态变化,但输配电业务仍存在较强垄断性,需在政府管制下运营,不可避免会受到国家现行体制机制的影响。《关于加快建设全

国统一电力市场体系的指导意见》提出“实现电力资源在全国更大范围内共享互济和优化配置,加快形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系”。借鉴相关学术定义和政策实践,本文中的电力市场一体化主要指电力资源在全国电力市场范围内流动的难易度,一定程度上可以理解为是基于价格层面的各地区电力市场在“全国统一电力市场体系”的融入度。

绿色经济效率一般指单位环境影响所产出的产品与服务价值。提升绿色经济效率是新时代高质量发展的内在要求。《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》提出“把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局”。本文中的绿色经济效率内涵及测度分析框架充分考虑当前“碳达峰、碳中和”目标约束,既考察地区经济发展与社会生产,亦涵盖环境保护、资源约束等,并更为具体地引入碳排放和碳汇相关要素。

2.2 电力市场一体化与绿色经济效率理论关系分析

电力市场从属于商品市场范畴,既具有商品市场的一般特征,又以交换电力这一特殊商品区别于其他商品市场。因而,本文分别从以上两个方面对电力市场一体化与绿色经济效率的理论关系进行分析。

(1)从电力市场的一般属性层面来看,电力市场一体化能够有效促进区域专业化分工,提升电力资源的配置效率。依据新古典经济理论,商品市场的均衡主要依靠价格供求机制作用,即在全国电力市场一体化情况下,电力市场供给者与市场需求者之间相互作用,共同决定均衡电价和均衡电量。但在分权体制下,为保证本省经济的持续增长与获取客观财政收入,地方政府往往会对本省发电企业采取一定的保护政策,阻碍电力资源的自由流动。这就使得全国层面的电力资源无法实现竞争均衡,导致社会效益净损失。通过深入推进电力市场一体化,能够有效挖掘具有比较优势的电力产业的生产潜力,形成更加科学合理的区域分工体系,显著提高省间资源配置效率。

(2)从电力市场的特殊属性来看,电力市场一

2022年3月

体化能够促进清洁电力替代传统电力,减少能耗排放,提升生态效率。电力资源具有难以储存性和公用性。这就导致在省内外电力企业同时供电的情况下,地方政府出于利益最大化的考虑,会优先支持本地电力消纳。同时,调入的可再生能源电力多具有周期性和不稳定性,在此情况下本地火电企业需承担调峰责任,造成本地区实际用电成本的上升。因而,即便地方政府面临降碳考核压力,但出于经济利益的考虑,依然会选择本地区更为稳定可靠的火电企业,接受外来清洁电力的积极性较低。通过构建全国统一电力市场,能够提升清洁能源消纳能力,积极发挥电力市场对能源清洁低碳转型的支撑作用,进而改善地区绿色经济效率。因此,本文提出研究假说H1:

H1:电力市场一体化水平的提高能够有效促进地区绿色经济效率的提升。

2.3 电力市场一体化对绿色经济效率的影响机制分析

Brock等^[14]认为,任何经济活动均能够通过规模变化、结构转型和技术进步3种渠道对环境质量产生作用。卞元超等^[15]的研究进一步证实,市场分割能够通过抑制经济规模扩张、产业结构升级以及技术进步对地区雾霾污染问题产生重大影响。因此,本文围绕上述3种途径考察电力市场一体化对绿色经济效率的影响机制(图1)。

(1)规模效应机制。规模效应也可称为规模经济,主要指因规模扩大而带来的经济效益提高。一方面,电力工业往往具有规模经济特征,随着产出规模的扩大,平均成本逐渐降低。在统一电力市场下,具有发电优势的电力企业能够通过发挥自身比较优势获取规模经济效益。而电力市场呈现“片块

化”状态时,各地区始终依据自身利益最大化制定政策措施^[16],造成省间电力交易难度升高。2016年甘肃省“千亿风车停摆事件”恰好反映了这一问题。送电省(市、区)出于对自身利益的考虑,极力拓展本地区可再生能源发电项目,而受端省(市、区)为维持本地区经济发展,拒绝接收外来可再生能源输送,积极发展本地区的火电能源,最终导致千亿风车闲置,资源严重浪费。另一方面,对于其他工业企业而言,电力资源是其生产的重要投入要素。电力市场分割将导致电力价格扭曲,造成电价偏离电力资源的边际回报^[17]。同时,企业作为电力资源的消费方无法正常行使其选择权,亦无法形成对电力供给者的需求反馈,最终导致地区整体经济陷入效率弱化的“发展困境”。而电力市场一体化则能够有效配置电力资源,形成电力资源供需双方的良性互动。据此,提出研究假说H2:

H2:电力市场一体化能够通过发挥规模效应促进地区绿色经济效率提升。

(2)结构优化机制。电力市场一体化对产业结构升级的推动作用可以从以下两个方面进行体现:①在电力市场“片块化”状态下,地方政府依靠显性或隐性的优惠政策扶持本地发电企业的发展,干预各类要素资源的自由流动,造成行业间的发展失衡问题^[18]。而受保护的这些企业既失去了转型的积极性,又凭借其垄断优势对本地区用能企业生产成本造成进一步影响。随着电力市场的逐步整合,新的发电企业将进入市场,打破原有发电企业的垄断地位及垄断价格,推动电力价格朝着更加合理化方向发展。②作为资源型产业,电力产业的过度保护往往造成技术密集型产业的萎缩^[19]。依靠地方政策保护,电力企业能够很容易获得超额利润,这些利润使得生产要素流向电力行业。而技术密集型企业随着生产要素的不断流失,逐渐萎缩甚至退出市场,形成电力企业对其他技术密集型企业的挤出效应。电力市场一体化能够有效避免由于垄断利润造成的对制造业等其他产业的挤出效应。由此,本文提出研究假说H3:

H3:电力市场一体化能够通过推动产业结构优化升级促进地区绿色经济效率提升。

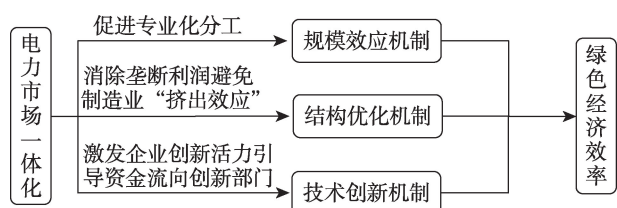


图1 电力市场一体化影响绿色经济效率的传导机制

Figure 1 Transmission mechanism of electric power market integration affecting green economic efficiency

(3)技术创新机制。电力市场一体化能够有效激发企业创新活力,营造良好的创新环境。①提高企业创新积极性。在“片块化”的电力市场中,地方政府通常采取保护策略来阻碍外部企业进入本地市场,以此来提升本地区发电企业竞争力。在这种情况下,本地区电力企业由于竞争威胁减弱,将失去技术创新与研发的动力。与此同时,因为发电企业对其他技术密集型企业的挤出效应,将导致这些行业难以形成创新集聚效应,技术进步缓慢。在电力市场一体化下,省间交易壁垒消失,外部企业能够自由进入本地市场,而原先受保护的电力企业将面临巨大的竞争压力,企业为了更好地生存将加大创新投入,提高企业创新能力。同时,随着电力企业将更多的利润投向创新部门,行业间收入差距缩小,挤出效应减弱甚至消失,其他行业创新水平也将大大提升。②引导企业资金流向创新部门。吕越等^[20]认为市场分割会促使企业更偏好以寻租活动而非自主创新的方式提高总收益。在电力市场“片块化”状态下,受保护的电力企业为了能够获得更多的利润,不可避免会进行寻租活动,通过多方游说等手段争取政府部门的特殊政策,有效阻止外部竞争者进入该市场,维护其垄断地位。而在电力市场一体化情况下,这类寻租成本将转移至创新部门。此外,地方政府在采取地方保护手段后,对本地区内部市场竞争的担忧进一步降低,从而对本地区技术创新的资金投入和创新支持力度减弱,进一步抑制本地区技术进步,阻碍绿色经济效率提升。因而,提出研究假说H4:

H4:电力市场一体化能够通过促进技术进步提高地区绿色经济效率。

3 研究设计

3.1 模型构建

考虑到某一地区进行经济调整与优化过程难免会对周围地区的绿色发展产生一定的空间影响。具有空间关联关系的两个或多个地区之间,在资本、劳动力、技术、能源等多个方面均可能存在互动行为,进一步产生地区之间绿色经济效率的空间关联。故而,通过构建包含空间效应的回归模型来

检验电力市场一体化对绿色经济效率的影响。首先,采用Moran's I 来检验绿色经济效率的空间自相关性,该公式可以表示为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (1)$$

式中: $\bar{Y} = \sum_{i=1}^N Y_i / N$, $S^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 / N$; N 表示省(市、区)个数, Y_i 表示 i 省(市、区)的绿色经济效率, W_{ij} 表示空间权重。Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$:当指数介于0到1时,表明观察变量存在正空间自相关性,且Moran's I 越接近1,正自相关性越强;相反,当指数介于-1到0时,说明观察变量具有负空间自相关性,Moran's I 越接近-1,负自相关性越强。为系统考察绿色经济效率的空间关联特征,本文通过构建以下3种空间权重矩阵对绿色经济效率的空间关联特征进行系统考察:一是邻接矩阵,主要根据各省之间是否相邻(相邻=1,不相邻=0)进行构建。二是地理经济距离矩阵,借鉴杨万平等^[21]的研究,构建涵盖地理距离和经济距离的嵌套式矩阵。其中,地理距离基于各省省会城市的经纬度坐标进行计算得到,经济距离为样本期内各省人均GDP均值绝对差值。三是电网矩阵,主要考察各省之间是否存在电网连接关系^①(相邻=1,不相邻=0)。

在此基础上,构建带空间自回归误差项的空间自回归模型(SARAR)。SARAR模型能够同时考察某一地区绿色发展水平受空间关联地区绿色经济效率及其随机误差冲击的影响,既包含空间滞后项,也包含空间误差项。具体设定如下:

$$GTFP_{it} = \lambda W_1 GTFP_{it} + a_1 MI_{it} + a_2 C_{it} + u_{it} \quad (2)$$

$$u_{it} = \rho W_2 u_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: $GTFP_{it}$ 表示 i 省(市、区)在第 t 年的绿色经济效率; MI_{it} 表示 i 省(市、区)在第 t 年的电力市场一体化指数; C 代表控制变量,包括城镇化水平、能源结构和对外开放程度; λ 为空间自回归系数,表示关联省份绿色经济效率对本省绿色经济效率的空间影响; W 表示空间权重; a 表示待估参数; u_{it} 为随机误差项; ρ 为空间残差自回归系数,表示关联省(市、区)绿色经济效率的随机误差冲击对本省绿色

① 依据《中国“十四五”电力发展规划研究》中公布的全国目前特高压骨干网架进行判断。

2022年3月

经济效率的影响; $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

进一步,采用逐步回归法检验电力市场一体化对绿色经济效率的影响机制。模型设定如下:

$$M_{it} = b_1 MI_{it} + b_2 C_{it} + u_{it} \quad (4)$$

$$GTFP_{it} = \lambda W_1 GTFP_{it} + c_1 MI_{it} + c_2 M_{it} + c_3 C_{it} + u_{it} \quad (5)$$

式中: M 表示中介变量,包括经济规模、产业结构升级和技术进步; b 、 c 均为待估参数。首先,对式(2)进行回归,检验电力市场一体化 MI_{it} 的回归系数 a_1 是否显著,如果显著,说明电力市场一体化会影响绿色经济效率。其次,对式(4)进行回归,检验电力市场一体化 MI_{it} 的回归系数 b_1 是否显著,如果显著,表明电力市场一体化对中介变量有影响。最后,对式(5)进行回归,若中介变量 M_{it} 的回归系数 c_2 和电力市场一体化 MI_{it} 的回归系数 c_1 均显著,且 c_1 小于 a_1 ,即表明存在部分中介效应;若 c_1 不显著,但 c_2 显著,说明中介变量完全发挥作用,即存在完全中介效应。

3.2 指标选取

(1)被解释变量:绿色经济效率($GTFP$)。依据绿色全要素效率理念和当前国内外倡导的碳中和形势,将能源与环境相关投入产出要素纳入整体分析框架。具体投入指标:①劳动力投入,采用各省年末就业人口作为劳动投入指标;②资本投入,采用永续盘存法计算得到的各省(市、区)固定资本存量作为资本投入指标^[22];③能源投入,以各省能源消费总量进行衡量;④土地投入,采用各省建成区面积作为土地投入的代理变量。产出指标:①期望产出,选取反映经济规模的地区生产总值GDP和体现环境效益的绿地面积作为期望产出^[23];②非期望产出,选用二氧化碳排放量和PM2.5浓度作为非期望产出。同时,为了避免VRS模型无可行解的问题,选用全局参比Malmquist(GML)指数进行指数测算^[24]。设时间跨度为 R ($r=1, 2, \dots, R$),基于整个考察期的投入与产出数据,可以构造全局最优参考集 $S = S^1 \cup S^2 \cup \dots \cup S^R$,由于各期参考的是共同前沿,计算得出的也是单一Malmquist指数:

$$GML(x^{r+1}, y^{r+1}, x^r, y^r) = \frac{E(x^{r+1}, y^{r+1})}{E(x^r, y^r)} \quad (6)$$

式中: GML 表示从 r 到 $r+1$ 期绿色全要素生产率的变化; x 、 y 分别表示投入和产出要素; $E(\cdot)$ 表示方向距离函数。假设特定年份绿色全要素生产率为1,则后续年份绿色全要素生产率可由 GML 指数累乘得到。

(2)解释变量:电力市场一体化指数(MI)。本文逆向借鉴市场分割理论及指数构建方法,首先测度电力市场分割指数,并以其倒数形式构建电力市场一体化指数。目前,较多研究采用源自Samuelson“冰川成本”模型^[25]的相对价格法测算市场分割指数。该模型认为,两省(市、区)价格 P_i 和 P_j 既可以同时升降,也可以一升一降,只要相对价格方差 $var(P_i/P_j)$ 能够随着时间的变化而收敛,就表明两个省(市、区)之间的相对价格变动幅度收窄,即可以判定市场是整合的^[26]。依据相对价格法,电力市场分割指数的计算过程包括4步:①建立面板数据库。构建包含年份(t)、地区(n)和商品种类(k)的三维($t \times n \times k$)面板数据。选取4类发电企业的平均上网电价,具体为燃煤、燃气、水电、风电。部分省(市、区)缺失的电价数据值按照当年全国各省(市、区)的电价平均值进行补齐。②计算相对价格差异。本文的原始数据为发电企业平均上网电价,考虑到对数形式能够缓解异方差和偏态性问题,因而采用相对价格形式 $Q_{ijt}^k = \ln(P_{it}^k/P_{jt}^k)$ 。同时,为避免由于取对数而造成的 Q_{ijt}^k 符号反向变化,对 Q_{ijt}^k 统一取绝对值,即 $|Q_{ijt}^k| = |\ln(P_{it}^k/P_{jt}^k)|$ 。张德钢等^[27]指出,比起“以邻为壑”,中国各省间当前的竞争状态更符合“政治竞标赛”,因此,主要采用30个省(市、区)两两组合的形式进行测算。③剔除不可加效应。 t 年份 i 和 j 两个省(市、区)关于 k 商品的价格差异 $|Q_{ijt}^k|$ 可以分解为两部分信息,一部分是仅与 k 商品本身相关的属性信息 a^k ,另一部分是与两省(市、区)市场环境相关的共有信息 ε_{ijt}^k ,即 $|Q_{ijt}^k| = a^k + \varepsilon_{ijt}^k$ 。如果没有消除 k 商品的属性信息 a^k 就与其他商品的相对价格进行加总求方差,测算结果将存在高估风险。故采用去均值法消除这种偏差,用公式可表示为 $q_{ijt}^k = |Q_{ijt}^k| - \overline{Q_t^k}$ 。④测算相对价格方差,按照

省(市、区)进行合并。计算 t 年份,省(市、区) i 和省(市、区) j 4类电力商品的相对价格差异值 q_{ijt}^k 的方差 $var(q_{ijt}^k)$,并对所求得的方差值进行分年分地区合并,即可求出各省(市、区)与全国其他省(市、区)的电力市场分割指数 seg_n 。公式为:

$$seg_n = \left(\sum_{i \neq j} var(q_{ijt}^k) \right) / N \quad (7)$$

式中: n 表示地区; N 为需要合并的省(市、区)组合数目。在电力市场分割指数的基础上,取倒数形式构建电力市场一体化指数 MI_n ,如下:

$$MI_n = 1/seg_n \quad (8)$$

为避免在后续的回归估计时电力市场一体化的系数过小,将计算所得的原始电力市场一体化指数缩小100倍。

(3)中介变量:①经济规模(ED),考虑到受电价影响的企业大部分为工业企业,选用经过对数处理后的各省(市、区)第二产业增加值作为衡量指标;②产业结构升级(IS),借鉴李荣杰等^[28]的测度方法,采用产业结构高级化指数进行衡量;③技术进步(RD),选取经过对数处理后的各省(市、区)规模以上工业企业有效发明专利数作为代理变量。

(4)控制变量:①城镇化水平(UR),采用城镇人口占总人口比重衡量;②对外开放程度(OD),采用进出口贸易总额与国内生产总值GDP的比值进行衡量;③能源结构(ES),采用非化石能源消费占能源消费总量的比重衡量。

3.3 数据来源

基于数据的可获性,选择2013—2018年中国30

个省(市、区)作为研究对象(因数据缺失,不包括西藏、港澳台地区)。解释变量所涉及电价数据来源于《全国电力价格情况监管通报》;被解释变量中的就业人数、控制变量中非国企就业人数来源于《中国人口和就业统计年鉴》;能源消费数据与污染排放数据分别来源于《中国能源统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》;被解释变量中的固定资本数据来源于《中国固定资产投资年鉴》;剩余数据均来源于《中国统计年鉴》和各省统计年鉴。地区生产总值、固定资本存量等涉及价格数据以2012年为基期进行价格折算,并假定2012年绿色全要素生产率为1。具体变量描述性统计如表1所示。

4 结果与分析

4.1 空间相关性检验

在进行空间回归前,首先对绿色经济效率及OLS回归拟合的模型残差进行空间相关性考察。表2的结果显示,在邻接矩阵、地理经济距离矩阵和电网矩阵3种空间权重矩阵下,绿色经济效率 $GTFP$ 的Moran's I 均大于0且在1%的水平上显著,表明绿色经济效率存在明显的正空间自相关性,绿色经济效率在空间分布中呈现“高高集聚、低低集聚”的特征。由电力市场一体化对绿色经济效率进行拟合线性回归,得到的残差值 $resid$ 的Moran's I 检验结果也拒绝独立同分布的原假设,即表明残差存在空间自相关性,仅依靠普通的线性回归是不够的,需要通过构建空间计量模型来考察电力市场一体化对绿色经济效率的影响。

4.2 电力市场一体化对绿色经济效率的影响

为避免虚假回归问题,采用ADF-Fisher检验方

表1 变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量名称	变量符号	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
绿色经济效率	$GTFP$	180	1.092	0.144	0.507	1.709
电力市场一体化指数	MI	180	0.046	0.018	0.007	0.097
经济规模	ED	180	9.044	0.881	6.691	10.589
产业结构升级	IS	180	2.873	0.140	2.629	3.278
技术进步	RD	180	9.065	1.444	5.323	12.702
城镇化水平	UR	180	0.582	0.118	0.378	0.896
对外开放程度	OD	180	0.244	0.257	0.012	1.270
能源结构	ES	180	0.122	0.114	0.003	0.492

2022年3月

表2 Moran's I统计值

Table 2 Moran's I statistics

变量	邻接矩阵		地理经济距离矩阵		电网矩阵	
	Moran's I	z值	Moran's I	z值	Moran's I	z值
GTFP	0.242***	5.030	0.225***	4.849	0.188***	4.750
resid	0.510***	10.439	0.488***	10.285	0.400***	9.842

注:*, **, ***分别表示变量在10%、5%和1%水平上显著。

法对所有变量进行单位根检验(表3)。检验结果显示各变量均在5%的显著性水平上拒绝存在单位根的原假设,即认为所有变量均为平稳序列,可进行下一步回归估计。

表4为电力市场一体化影响绿色经济效率的回归结果。其中,模型(1)–(3)依次对应邻接矩阵、地理经济距离矩阵和电网矩阵3种空间权重矩阵。从空间自回归系数来看, λ 的取值分别为0.689、0.702和0.700,且在1%水平上显著,表明空间关联省(市、区)的绿色经济效率对本省(市、区)的绿色发展存在正向溢出作用,即在地理位置、经济发展水平及电力输配联系等多重因素驱动下,本省(市、区)的绿色经济效率水平与空间关联地区的绿色经济效率紧密联系,表现为“共荣共损”的空间集聚特征。从空间残差自回归系数来看, ρ 的取值始终显著为负,表明空间关联省(市、区)绿色经济效率的随机误差冲击对本省(市、区)的绿色经济效率水平存在负向影响。从电力市场一体化的回归系数来看,无论选用哪一种权重矩阵,电力市场一体化的系数都显著为正,表明电力市场一体化与绿色经济效率呈现显著正相关,即各省(市、区)间电力市场的一体化有利于地区绿色经济效率的提升。这与本文的预期一致,假设H1得到了验证。从具体数值来看,

3种空间权重矩阵下,电力市场一体化的回归系数分别为0.899、0.941和0.979,电网矩阵下的电力市场一体化回归系数最大,反映出电力市场基于输配电网进行交易的特殊性^[29]。

在控制变量中,城镇化水平对绿色经济效率的影响表现为正向显著,表明城镇化水平的提高能够有效促进地区绿色经济效率提升。可能的原因是,城镇化发展虽然会带来大量能源消费需求和污染排放加重,但也使得地区的各类资源集中利用、污染物集中排放,两类影响相互抵消后仍然具有对资源使用和污染治理效率的促进作用^[30]。对外开放程度的回归系数在模型(1)–(3)中均显著为正,表明对外开放程度能够对地区的绿色经济效率产生明显的正向作用,即深化对外开放是促进中国各地区

表4 电力市场一体化影响绿色经济效率的回归结果

Table 4 Results of electric power market integration affecting green economic efficiency

变量	邻接矩阵	地理经济距离矩阵	电网矩阵
	(1)	(2)	(3)
MI	0.899*** (7.742)	0.941*** (7.581)	0.979*** (8.877)
UR	0.582*** (10.106)	0.540*** (7.908)	0.603*** (5.803)
OD	0.354*** (3.817)	0.363*** (3.895)	0.414*** (3.319)
ES	-0.072 (-0.592)	-0.081 (-0.697)	-0.090 (-0.384)
λ	0.689*** (21.955)	0.702*** (18.480)	0.700*** (11.566)
ρ	-0.745*** (-28.607)	-0.747*** (-39.391)	-0.706*** (-5.650)
log L	217.183	216.802	217.454
模型	FE	FE	FE
样本量	180	180	180

注:*, **, ***分别表示变量在10%、5%和1%水平上显著;系数估计结果的括号内为t值。下同。

表3 变量单位根检验

Table 3 Variable unit root test

变量	逆卡方统计量	P值
GTFP	99.215	0.001
MI	145.205	0.000
ED	84.565	0.020
IS	104.199	0.000
RD	88.389	0.010
UR	106.794	0.000
OD	155.094	0.000
ES	82.429	0.029

绿色经济效率提升的重要手段。能源结构对绿色经济效率的影响不显著,表明中国各地区的清洁能源利用比例还有待进一步提升。

由于存在空间滞后项,不能仅仅依靠回归系数表征电力市场一体化对绿色经济效率的影响,需要通过偏微分法^[31]进一步考察电力市场一体化对绿色经济效率的直接效应、间接效应和总效应。计算结果如表5所示。

根据估计结果,电力市场一体化指数对绿色经济效率影响的总效应为正,说明电力市场一体化水平的提升能够促进地区绿色经济效率提升。同时,电力市场一体化指数的直接效应和间接效应在各类权重矩阵下均显著为正,表明电力市场一体化既对本地区绿色经济效率具有明显的直接效应,也对空间关联地区的绿色经济效率具有显著的溢出效应。

表5 电力市场一体化对绿色经济效率的空间效应估计结果
Table 5 Spatial effects of electric power market integration on green economic efficiency

空间效应	变量	邻接矩阵 (1)	地理经济距离矩阵 (2)	电网矩阵 (3)
直接效应	<i>MI</i>	1.074*** (7.465)	1.118*** (7.627)	1.137*** (6.768)
	<i>UR</i>	0.692*** (9.712)	0.640*** (8.172)	0.685*** (6.785)
	<i>OD</i>	0.431*** (4.065)	0.439*** (4.217)	0.494*** (3.039)
	<i>ES</i>	-0.078 (-0.531)	-0.088 (-0.625)	-0.098 (-0.024)
间接效应	<i>MI</i>	1.839*** (5.036)	2.059*** (5.006)	2.396** (2.264)
	<i>UR</i>	1.187*** (5.334)	1.178*** (5.117)	1.361*** (4.378)
	<i>OD</i>	0.728*** (4.177)	0.793*** (4.582)	1.081* (1.645)
	<i>ES</i>	-0.159 (-0.580)	-0.190 (-0.657)	-0.211 (-0.029)
总效应	<i>MI</i>	2.914*** (5.993)	3.177*** (6.157)	3.533*** (2.917)
	<i>UR</i>	1.879*** (6.683)	1.817*** (6.397)	2.046*** (6.345)
	<i>OD</i>	1.159*** (4.267)	1.232*** (4.691)	1.575* (1.950)
	<i>ES</i>	-0.237 (-0.564)	-0.278 (-0.649)	-0.309 (-0.028)

应。就效应大小而言,电力市场一体化对空间关联地区的间接效应高于对本省(市、区)的直接效应,具有明显的正外部性。以电网矩阵的回归结果为例,电力市场一体化对本地区绿色经济效率的直接效应为1.137,对基于电网的空间关联省(市、区)绿色经济效率的间接效应为2.396,溢出效应是直接效应的2倍。城镇化水平和对外开放程度无论对本地区还是空间关联地区的绿色经济效率都有着显著正向作用,是推动地区绿色发展的重要抓手。能源结构对各地地区的绿色经济建设未能发挥有效作用。

4.3 稳健性检验

为得到更为准确的检验结果,从以下2个角度进行稳健性检验:

(1)替换被解释变量。为避免单个投入产出指标选取偏误对整体绿色经济效率测算结果的影响,本文借鉴陈诗一^[32]的做法,根据变量之间的替代关系,另设定7组投入产出方案进行测算,并将所有方案(共8组方案)估算结果取均值作为被解释变量的替代变量。具体投入产出指标变换关系及方案组合如下:

基准:*L K E DA GDP GA CO₂ PM*

参照1:*L K E DA GDP GA CO₂ SO₂ CS*

参照2:*L K E DA GDP CO₂ PM*

参照3:*L K E DA GDP CO₂ SO₂ CS*

参照4:*H K E DA GDP GA CO₂ PM*

参照5:*H K E DA GDP GA CO₂ SO₂ CS*

参照6:*H K E DA GDP CO₂ PM*

参照7:*H K E DA GDP CO₂ SO₂ CS*

其中,*L*表示就业人口;*K*表示固定资本存量;*E*表示能源消费总量;*DA*表示建成区面积;*GDP*表示地区生产总值;*GA*表示绿地面积;*PM*表示PM2.5浓度;*CO₂*、*SO₂*、*CS*分别表示二氧化碳、二氧化硫和烟粉尘排放量。依据上述方案得到的回归结果如表6第(1)–(3)列所示。

(2)替换解释变量。近年来,随着太阳能光伏发电技术的日趋成熟,发电成本迅速降低,其经济性也正在逐步达到常规能源的相当水平^[33]。虽然太阳能发电量所占份额较小,但考虑到太阳能发电的强劲发展势头和在推动能源结构优化升级过程中的重要作用,在4类电价的基础上引入太阳能发电

2022年3月

表6 稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results

变量	稳健性检验 1			稳健性检验 2		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
MI/MII	0.493*** (4.323)	0.526*** (5.003)	0.529*** (4.863)	1.053*** (3.967)	1.108*** (3.888)	1.119*** (4.826)
UR	0.419*** (5.049)	0.378*** (4.874)	0.424*** (4.336)	0.504*** (5.182)	0.465*** (4.803)	0.547*** (3.036)
OD	0.184*** (14.595)	0.194*** (14.121)	0.197*** (9.502)	0.297*** (3.046)	0.303*** (3.066)	0.345*** (2.800)
ES	-0.169 (-1.298)	-0.170 (-1.303)	-0.190 (-1.569)	-0.038 (-0.310)	-0.046 (-0.382)	-0.027 (-0.202)
λ	0.804*** (47.286)	0.818*** (61.397)	0.807*** (23.024)	0.679*** (19.154)	0.688*** (16.881)	0.671*** (9.116)
ρ	-0.698*** (-13.134)	-0.711*** (-14.902)	-0.633*** (-8.998)	-0.719*** (-18.402)	-0.714*** (-24.003)	-0.634*** (-3.689)
$\log L$	283.836	283.402	284.924	216.605	216.204	216.632
模型	FE	FE	FE	FE	FE	FE
样本量	180	180	180	180	180	180

电价进行计算,得到新的电力市场一体化指数 MII 。表6第(4)–(6)列为考虑太阳能发电电价后的回归结果。

表6中,无论是替换被解释变量,还是替换解释变量,电力市场一体化的回归系数符号与显著性均未发生改变,表明本文的基本研究结论具有稳健性。

4.4 影响机制检验

为进一步检验假设H2–H4,利用中介模型探讨电力市场一体化影响绿色经济效率的传导机制,表7给出了邻接矩阵下的回归结果^②。其中,模型(1)为电力市场一体化对绿色全要素生产率进行回归的结果;模型(2)–(4)为电力市场一体化分别对中介变量经济规模、产业结构升级和技术进步的回归结果;模型(5)–(7)为逐次加入经济规模、产业结构升级和技术进步后,电力市场一体化与中介变量同时对绿色经济效率进行回归的结果。

模型(1)的检验结果表明,电力市场一体化能够显著促进各省绿色经济效率提升,与前文保持一致。模型(2)–(4)中,电力市场一体化的回归系数

均显著为正,说明电力市场一体化有利于产生规模效应、能够促进产业结构升级和技术进步。模型(5)–(7)的检验结果中,电力市场一体化与中介变量的回归系数均显著为正。同时,与模型(1)进行对比发现,在加入中介变量后,电力市场一体化的系数均有所减小,表明电力市场一体化对绿色经济效率的影响部分通过中介变量进行传导;也表明规模扩大效应、产业结构优化升级和企业技术创新皆是电力市场一体化影响绿色经济效率的传导路径,验证了假说H2–H4。从具体数值来看,在加入中介变量后,电力市场一体化的回归系数分别为0.746、0.897和0.797,即为电力市场一体化对绿色经济效率的直接效应,而通过经济规模、产业结构升级和技术进步传导的间接效应分别为0.153、0.002和0.102。表明在提出的3条传导路径中,规模效应的传导机制最为明显,技术创新次之,结构优化最弱。说明打破地区封锁和消除电力行业分割,促进专业化分工与规模,是地区绿色经济效率提升的必要前提。推动电力市场一体化,提高企业创新水平与创新能力,是实现地区绿色发展的重要途径。

② 由于邻接矩阵、地理经济距离矩阵和电网矩阵下,电力市场分割与绿色经济效率之间的影响机制检验结果基本一致,限于篇幅,文中只给出邻接矩阵的回归结果。

表7 电力市场一体化的传导路径检验结果

Table 7 Test results of indirect paths of electric power market integration							
变量	<i>GTFP</i> (1)	<i>ED</i> (2)	<i>IS</i> (3)	<i>RD</i> (4)	<i>GTFP</i> (5)	<i>GTFP</i> (6)	<i>GTFP</i> (7)
<i>MI</i>	0.899*** (7.742)	3.454** (2.716)	0.154** (2.490)	1.550*** (3.670)	0.746*** (6.633)	0.897*** (9.460)	0.797*** (13.050)
<i>ED</i>					0.025** (2.197)		
<i>IS</i>						0.428*** (2.782)	
<i>RD</i>							0.076** (2.338)
<i>UR</i>	0.582*** (10.106)	0.028 (0.018)	2.336*** (30.910)	16.663*** (44.479)	0.582*** (8.180)	-0.332 (-1.099)	-0.657 (-1.263)
<i>OD</i>	0.354*** (3.817)	-0.527** (-2.154)	-0.117*** (-3.502)	-1.740*** (-15.337)	0.363*** (3.767)	0.402*** (3.611)	0.479*** (3.148)
<i>ES</i>	-0.072 (-0.592)	-0.712 (-1.194)	-0.141*** (-3.821)	1.202*** (2.963)	-0.034 (-0.214)	0.023 (0.251)	-0.118 (-0.826)
λ	0.689*** (21.955)				0.689*** (24.527)	0.557*** (11.630)	0.613*** (11.932)
ρ	-0.745*** (-28.607)				-0.749*** (-26.118)	-0.590*** (-10.758)	-0.705*** (-40.902)
$\log L$	217.183				217.669	221.173	220.670
实证	步骤一 SARAR		步骤二 OLS			步骤三 SARAR	
模型	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE
样本量	180	180	180	180	180	180	180

5 结论与政策启示

5.1 结论

基于2013—2018年中国30个省(市、区)的面板数据,分别对各地区的电力市场一体化指数和绿色经济效率进行了测度,并采用空间SARAR模型和中介模型分析了中国电力市场一体化对地区绿色全要素生产率的影响效应及影响机制。主要结论如下:

(1)电力市场一体化既各省(市、区)自身的绿色经济效率提升具有显著促进作用,也对空间关联地区(涵盖地理距离、经济发展水平及电力输配关系)的绿色经济效率具有显著溢出效应,即推动电力市场一体化是解决中国经济-环境两难问题、提高地区绿色经济效率的有效手段。同时,在3种空间权重矩阵中,基于电网矩阵得到的电力市场一体化回归系数值最大,完善电网基础设施建设能够有

效增强电力市场一体化对绿色经济效率的影响。

(2)电力市场一体化对空间关联省(市、区)的溢出效应高于对本省绿色经济效率的直接效应,各个省(市、区)在电力市场一体化过程中能够对空间关联地区的绿色经济效率产生明显助力。换句话说,电力市场一体化具有较强的正外部性。在“诸侯经济”的背景下,完善利益补偿机制,矫正电力市场一体化的正外部性,能够有效激励地方政府主动作为,进而促进绿色经济效率。

(3)电力市场一体化对地区绿色经济效率的影响既能直接产生,也能通过规模效应、结构优化和技术创新3种途径进行传导。在上述3种传导路径中,规模效应路径最为有效,技术创新次之,结构优化最弱。电力市场一体化能够有效促进专业化分工,提升企业技术创新水平与创新能力,进而实现地区经济的绿色高质量发展。

5.2 政策启示

基于以上结论,得到以下几点政策启示:

(1)完善统一电力市场总体设计和治理体系。一方面要加快建设国家级、区域级、省级三级联动协作的电力市场架构,国家级电力市场负责科学监测整体电力市场运行,并有效充当跨省区市场交易的中间纽带;区域级电力市场负责区域范围内能源资源的优化配置;省级电力市场则重点关注省内电力交易,实现省内、省间、区域间互济共享的有序竞争市场。另一方面,为有效破除各地方政府对跨省区电力输送质量和稳定性的疑虑,必须加快制定规范统一的电力市场交易规则和电力输送标准,科学核定输配电价与全面放开竞争性环节电价,推动构建多元竞争的电力市场新格局。

(2)推进区域电力市场协同运行与融合发展。中国目前电网形态为东北、华北、西北、华中、华东、南方六大区域电网格局。在构建全国统一电力市场的同时,也应当积极探索区域内各省间电网的融合发展。长期以来,位于同一区域电网内的各省之间存在诸多联系,这为省间市场融合打下了坚实基础。在接下来的发展过程中可以尝试构建区域融合市场,通过推动电网数字化智能化建设,实现区域电网向区域能源互联网的升级,有效解决可再生能源在区域范围内的大规模并网与配置问题,促进区域内各省(市、区)共赢发展。当然,在融合发展的过程中,必须兼顾到各省(市、区)的经济利益,设计能够调节各省利益的分配机制,弥补在参与融合市场中受损省(市、区)的利益值。

(3)加强电力市场对地区绿色发展的支撑作用。统一电力市场的主要任务之一是解决中国可再生能源消纳,实现清洁能源对传统化石能源的替代,因而需要制定科学完善的可再生能源消纳保障机制,鼓励各省优先消纳可再生能源。一方面,将绿色理念融入到消费的各领域全链条,全力推动消费绿色低碳转型升级。通过制定配额制、绿证制等制度,将可再生能源消纳转化为用户的义务,扩大可再生能源的需求范围。另一方面,设计多周期多类型的电力交易方式以及科学的调峰补偿机制,提升可再生能源质量,进而有效增强用户购电意愿。

同时,加强绿色科技创新行动,通过增加技术研发投入、深化产学研融合等手段,推动大容量储能、高效光伏、高效风电等技术研发取得突破性进展,攻克新型电力系统安全稳定操控难题。

参考文献(References):

- [1] 李杨. 政府政策和市场竞争对欧盟国家可再生能源技术创新的影响[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1306-1316. [Li Y. Impact of government policy and market competition on renewable energy innovation in EU countries[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1306-1316.]
- [2] Zheng X M, Wu C K, He S J. Impacts of market segmentation on the over-capacity of the thermal electricity generation industry in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111761.
- [3] 聂龑, 张国兴. 基于社会-技术系统理论的中国电力系统演化路径分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 87-97. [Nie Y, Zhang G X. Evaluation of China's power system evolution path based on social-technological system theory[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 87-97.]
- [4] 何勇健. 跨省区电力市场如何破局建功[J]. 中国电力企业管理, 2020, (7): 28-30. [He Y J. How to break the situation in the inter-provincial power market[J]. China Power Enterprise Management, 2020, (7): 28-30.]
- [5] 周侠. 电力市场省际壁垒的形成机制研究[D]. 杭州: 浙江财经大学, 2019. [Zhou X. Research on the Formation Mechanism of Interprovincial Barriers in Electricity Market[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Finance and Economics, 2019.]
- [6] 林伯强, 谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究, 2019, 54(2): 119-132. [Lin B Q, Tan R P. Economic agglomeration and green economy efficiency in China[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(2): 119-132.]
- [7] 赵林, 曹乃刚, 韩增林, 等. 中国绿色经济效率空间关联网络演变特征及影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(10): 1933-1946. [Zhao L, Cao N G, Han Z L, et al. Spatial correlation network and influencing factors of green economic efficiency in China[J]. Resources Science, 2021, 43(10): 1933-1946.]
- [8] Yuan H X, Feng Y D, Lee C C, et al. How does manufacturing agglomeration affect green economic efficiency?[J]. Energy Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104944.
- [9] Pan X, Uddin M K, Saima U, et al. How do industrialization and trade openness influence energy intensity? Evidence from a path model in case of Bangladesh[J]. Energy Policy, 2019, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110916.
- [10] 胡绪华, 陈默. 制造业集聚与城市化协同驱动城市绿色全要素

- 生产率提升研究: 来自中国内地 261 个城市的经验证据[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(24): 70–79. [Hu X H, Chen M. Research on the synergistic effect of manufacturing agglomeration and urbanization development for urban green total factor productivity: Empirical evidence from 261 prefecture-level cities and above in China[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2019, 36(24): 70–79.]
- [11] Rodríguez-Sarasty J A, Debia S, Pineau P O. Deep decarbonization in Northeastern North America: The value of electricity market integration and hydropower[J]. Energy Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112210.
- [12] Sun X X, Zhou X L, Chen Z W, et al. Environmental efficiency of electric power industry, market segmentation and technological innovation: Empirical evidence from China[J]. Science of The Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135749.
- [13] Machlup F. Economic Integration Worldwide[M]. Berlin: Springer, 1976.
- [14] Brock W A, Taylor M S. Economic growth and the environment: A review of theory and empirics[J]. Handbook of economic growth, 2005, DOI: 10.1016/S1574-0684(05)01028-2.
- [15] 卞元超, 吴利华, 周敏, 等. 国内市场分割与雾霾污染: 基于空间自滞后模型的实证研究[J]. 产业经济研究, 2020, (2): 45–57. [Bian Y C, Wu L H, Zhou M, et al. Domestic market segmentation and haze pollution: An empirical research based on SLX[J]. Industrial Economics Research, 2020, (2): 45–57.]
- [16] 王振波. 碎片型政策网络的内在机理研究: 基于“千亿风车基地停摆”事件的分析[J]. 行政科学论坛, 2017, (7): 31–37. [Wang Z B. Research on internal mechanism of fragment policy network: Based on the analysis of “100 billion windmill base shutdown” event[J]. Research of Administration Science, 2017, (7): 31–37.]
- [17] 甘行琼, 李玉姣, 蒋炳蔚. 财政分权、地方政府行为与产业结构转型升级[J]. 改革, 2020, (10): 86–103. [Gan X Q, Li Y J, Jiang B W. Fiscal decentralization, local government behavior and upgrading of industrial structure[J]. Reform, 2020, (10): 86–103.]
- [18] 黄麒麟, 姚婷婷. 市场分割与地区生产率: 作用机制与经验证据[J]. 财经研究, 2020, 46(1): 96–110. [Huang Z L, Yao T T. Market segmentation and regional productivity: Theoretical mechanism and empirical evidence[J]. Journal of Finance and Economics, 2020, 46(1): 96–110.]
- [19] Srinivasan S. Electricity as a traded good[J]. Energy Policy, 2013, 62: 1048–1052.
- [20] 吕越, 田琳, 吕云龙. 市场分割会抑制企业高质量创新吗?[J]. 宏观质量研究, 2021, 9(1): 29–44. [Lv Y, Tian L, Lv Y L. Does market segmentation hinder the high quality innovation of the Chinese enterprises?[J]. Journal of Macro-quality Research, 2021, 9(1): 29–44.]
- [21] 杨万平, 李冬. 中国生态全要素生产率的区域差异与空间收敛[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(9): 80–99. [Yang W P, Li D. Study on the regional differences and spatial convergence of ecological total factor productivity in China[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, 37(9): 80–99.]
- [22] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952–2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17–31. [Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952–2006[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008, 25(10): 17–31.]
- [23] 于伟, 张鹏, 姬志恒. 中国城市群生态效率的区域差异、分布动态和收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(1): 23–42. [Yu W, Zhang P, Ji Z H. Study on regional difference, distribution dynamics and convergence of eco-efficiency of urban clusters in China[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(1): 23–42.]
- [24] 刘华军, 石印, 乔列成, 等. 中国全要素劳动生产率的时空格局及收敛检验[J]. 中国人口科学, 2020, (6): 41–53. [Liu H J, Shi Y, Qiao L C, et al. Spatiotemporal pattern of China's total factor labor productivity and its convergence[J]. Chinese Journal of Population Science, 2020, (6): 41–53.]
- [25] 李嘉楠, 孙浦阳, 唐爱迪. 贸易成本、市场整合与生产专业化: 基于商品微观价格数据的验证[J]. 管理世界, 2019, 35(8): 30–43. [Li J N, Sun P Y, Tang A D. Trade cost, market integration and production specialization: Evidence from commodity prices micro-data[J]. Management World, 2019, 35(8): 30–43.]
- [26] Samuelson P A. Theoretical notes on trade problems[J]. Review of Economics and Statistics, 1964, 46: 145–154.
- [27] 张德钢, 陆远权. 市场分割对能源效率的影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(1): 65–72. [Zhang D G, Lu Y Q. Impact of market segmentation on energy efficiency[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(1): 65–72.]
- [28] 李荣杰, 李娜, 张静, 等. 地区能源结构低碳化差异的收敛机制及影响因素: 基于加权多维向量夹角指数[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(10): 90–99. [Li R J, Li N, Zhang J, et al. Regional differences convergence of low-carbon energy structure and influencing factors: Based on weighted multi-dimensional vector angle [J]. Journal of Statistics and Information, 2020, 35(10): 90–99.]
- [29] 张宏, 王礼茂, 张英卓, 等. 低碳经济背景下中国风力发电跨区并网研究[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2377–2388. [Zhang H, Wang L M, Zhang Y Z, et al. Analysis of cross-regional grid integration of wind power under a low carbon economy[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2377–2388.]
- [30] 周敏, 谢莹莹, 孙叶飞, 等. 中国城镇化发展对能源消费的影响路径研究: 基于直接效应与间接效应视角[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1693–1705. [Zhou M, Xie Y Y, Sun Y F, et al. Study on the influence path of China's urbanization development on energy consumption based on direct and indirect effect perspective[J]. Re-

2022年3月

sources Science, 2018, 40(9): 1693–1705.]

- [31] 梁琦, 肖素萍, 李梦欣. 数字经济发展、空间外溢与区域创新质量提升: 兼论市场化的门槛效应[J]. 上海经济研究, 2021, (9): 44–56. [Liang Q, Xiao S P, Li M X. Digital economy development, spatial spillover and innovation quality growth: The threshold effect test of market efficiency[J]. Shanghai Journal of Economics, 2021, (9): 44–56.]
- [32] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 经济研究,

2012, 47(8): 32–44. [Chen S Y. Evaluation of low carbon transformation process for Chinese provinces[J]. Economic Research Journal, 2012, 47(8): 32–44.]

- [33] 李耀华, 孔力. 发展太阳能和风能发电技术 加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 426–433. [Li Y H, Kong L. Developing solar and wind power generation technology to accelerate China's Energy transformation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 426–433.]

Impact mechanism of electricity power market integration on regional green economic efficiency

LI Rongjie, LI Na, YAN Xiao

(Research Institution of Transition of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance & Economics,
Taiyuan 030006, China)

Abstract: Under the constraints of the carbon peak and carbon neutrality goals, it is imperative to promote a comprehensive green transformation of economic and social development. Limited by the spatial mismatch of supply and demand of electric power resources, there is no effectively established unified electric power market in China and the capacity of clean power consumption is insufficient, which seriously restricts the promotion of regional green economic efficiency. Based on the panel data of 30 provinces of China from 2013 to 2018, this study used the spatial panel model and the intermediary model to analyze the effect and mechanism of the electric power market integration on the efficiency of the regional green economy. The results show that the integration of the electric power market not only can effectively promote the improvement of the green economic efficiency of a region, but also have a significant spillover effect on the green economic efficiency of the spatially related areas. The integration of the electricity market can promote the efficiency of the regional green economy. The effect can be directly generated and be transmitted through three ways: achieving scale effects, optimizing industrial structure, and improving enterprise technological innovation capabilities. The main implications of this research include improving the overall design and governance system of the unified electric power market, promoting the coordinated operation and integrated development of the regional power market, and strengthening the supporting role of the power market in regional green development.

Key words: electric power system reform; electric power market integration; green economic efficiency; spatial spillover effect; transmission mechanism; China