

可再生能源投资总量和结构对碳排放的影响研究

何凌云, 吴 梦, 尹 芳

摘 要: 基于 2004—2013 年我国可再生能源投资、经济总量、产业结构、能源效率、碳排放量等相关数据, 运用调节效应模型、状态空间模型等, 测量了可再生能源投资总量和结构对碳排放的作用并比较了差异性; 在此基础上以上网电价政策为例, 进一步分析了可再生能源投资政策对碳减排的引导性。结果显示: (1) 可再生能源投资对碳排放没有直接的影响, 但通过经济总量和能源效率路径均产生了碳拉动作用; 通过结构路径, 可再生能源投资总量和结构对碳排放分别产生拉动和抑制作用; (2) 考虑单一路径时, 投资结构对碳排放的影响较大, 而综合考虑多个路径时, 投资总量的碳抑制效应优于投资结构; (3) 长期内, 可再生能源投资通过产业结构与能源效率对碳排放的作用受阻, 但通过能源结构路径对碳排放产生了明显的抑制作用, 且其抑制作用大于系统中的碳拉动作用; (4) 通过分析风电产业的标杆电价政策, 发现现有政策对可再生能源投资的碳减排作用具有引导性。

关键词: 可再生能源投资; 碳排放; 能源结构; 能源效率

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2017)01-0076-13

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2017.93.009

当前经济条件下, 能源活动是碳排放的主要来源。而从生产性角度讲, 影响碳排放的因素很多, 如能源强度、能源消费结构、产业结构、经济增长等^{[1][2]}。这其中, 结构和技术是最主要的减排路径。由于能源强度的降低对技术的依赖性较大, 很难在短期内实现, 因此能源消费结构的优化尤显重要, 尤其是一次能源消费结构的调整将直接影响碳减排目标的实现^{[3][4]}。开发利用可再生能源, 提高其在能源结构中的比例将是节能减排的重要选择, 但可再生能源的开发使用还处于起步阶段, 难与常规能源在市场上竞争, 必须通过特殊的政策手段和有效的发展机制推动其发展, 这其中, 可再生能源投资备受关注。从中国的实际看, 2015 年中国可再生能源投资、利用、发电总量均居全球第一, 投资占全球 1/3。《可再生能源“十三五”发展(征求意见稿)》中提出, “十三五”规划期间, 中国可再生能源新增投资约为 2.3 万亿元, 这必将对促进节能减排起到积极作用。有鉴于此, 本文试图从可再生能源投资的视角出发, 分析可再生能源投资总量和结构与碳排放的关系, 明确可再生能源投资对碳减排的促进作用, 从而进一步探究可再生能源投资结构的优化问题, 以期对低碳经济及可再生能源产业发展提供一些可供参考的政策建议。

基金项目: 国家自然科学基金“能源价格波动视角下的产业发展、碳排放效应及间接减排政策研究”(71203219); 教育部人文社会科学研究规划基金项目“碳总量与强度双重约束下我国节能减排的政策杠杆比较及协调研究”(16YJAZH015); 国家社科基金重大项目“我国自然资源资本化及对应的市场建设研究”(15ZDB163)

作者简介: 何凌云, 管理学博士, 中国矿业大学管理学院教授(江苏 徐州 221116); 吴梦(通讯作者), 中国矿业大学管理学院硕士研究生

一、国内外文献回顾

从研究层面看, 国内外学者大都肯定了能源结构对碳排放的影响。国内研究方面, 陈诗一等^[5]、林伯强等^[6]、何立华等^[7]的研究均表明, 优化能源结构是实现碳减排的有效途径之一。也有学者关注了能源结构与碳排放关系的区域差异性, 如 Liu 等^[8]分析了 2000—2011 年中国 30 个地区的二氧化碳排放效率, 并基于不同省份二氧化碳排放效率与能源消费结构的差异及演化规律提出减排的政策建议。Xu 等^[9]使用 LMDI 方法分解了中国不同省份影响碳排放水平的主要因素, 结果显示, 能源结构在经济相对发达或能源短缺的地区一直在改善, 而在经济相对不发达或能源丰富的地区一直处于恶化状态。以上分析表明, 能源结构的改善是碳减排的重要路径。降低煤炭消费比重, 大力发展风电、太阳能、地热能等可再生能源, 可有效优化能源结构, 很多学者对此进行了研究。方国昌等^[10]将新能源引入非线性节能减排动力演化系统, 研究得出, 新能源的开发利用可以改变中国目前的能源消费结构, 实现真正意义上的节能减排。我国有丰富的可再生能源, 具有巨大的发展潜力, 因此, 从我国的实际出发, 开发利用可再生能源可以达到减排的目的^{[11][12]}。受成本、技术、资源和二氧化碳排放等条件约束, 不同类型的可再生能源需要合理的比例配置^[13]。基于此, 可再生能源以及其他各类清洁能源的利用, 能源产业链优化成为低碳经济发展的重要方向, 这其中, 加大清洁能源的投资至关重要^[14]。李晓华^[15]从宏观层面分析了国内能源的投资现状, 并从能源投资与经济周期、产业结构以及工业发展之间的关系入手, 分析认为, 解决能源投资失衡的重要保障是能源投资的适度超前和投资结构的调整。董娟^[16]对 2004—2011 年的全球可再生能源投资趋势作出分析和判断, 为该产业发展和投资提供了一定的借鉴和参考。

国外研究中, Malaki 等^{[17](P19-26)}运用大量的数据分析未来全球气候和环境变化, 强调了未来发展可再生能源的必要性, 并指出, 为避免不可逆转的环境恶化, 有必要发展可再生能源。Mahesh 等^[18]、Bilgili^{[19][21]}、Jebli^[20]、Bhattacharya 等^[22]也都强调了可再生能源对提高环境质量的积极作用。进一步地, Apergis 等^[23]的研究得出可再生能源消耗与碳排放之间呈正相关, 同时, 可再生能源消耗与经济的双向因果关系表明可再生能源的扩大可以最大限度地减少挥发性石油和天然气的供应和价格带来的风险。但是, Tietjen 等^[24]通过比较可再生能源和化石燃料为主的电力市场的投资风险, 发现可再生能源的投资风险很高, 但随着其市场份额的增加而下降。因此, 可再生能源很难与常规能源在市场上竞争, 必须通过特殊的政策手段和有效的发展机制, 促进其发展。这些研究在政策层面上对可再生能源投资的研究提供了一定的启示。

总体来看, 相关学者大都关注了能源结构对碳排放的影响, 强调开发利用可再生能源的重要性, 但是研究还存在一定的不足, 表现在: (1) 多从可再生能源利用(消费)的视角研究其与碳排放的关系, 从可再生能源生产(投资)视角出发的研究较少; (2) 少有的研究中, 对总量的关注相对较多, 对投资结构的研究很少; (3) 主要从政策层面分析可再生能源利用对碳排放的影响, 缺乏实证分析, 且多是研究可再生能源利用对碳排放的直接作用, 对可再生能源通过相关变量对碳排放的间接影响未作深入考量。

二、可再生能源投资对碳排放的影响机制

能源投资涉及多方面。一方面, 能源投资是为了满足经济发展和能源生产的需求, 需要与经济发展相协调; 另一方面, 能源投资又是能源工业和整个社会经济的驱动力量, 在社会持续增长的资本要素投入过程中起着重要的作用; 同时, 能源的投资还受到资源条件和环境容量的限制。可再生

能源属于低碳或非碳能源，可有效减少二氧化碳排放量。通过可再生能源投资可以引导能源生产和消费，提高可再生能源在能源供应中的份额，有助于减少化石能源的消耗量。因此，可再生能源投资影响碳排放的核心在于其可以有效影响可再生能源的利用进而对能源结构、产业结构等产生影响。图 1 是可再生能源投资对碳排放的作用路径。

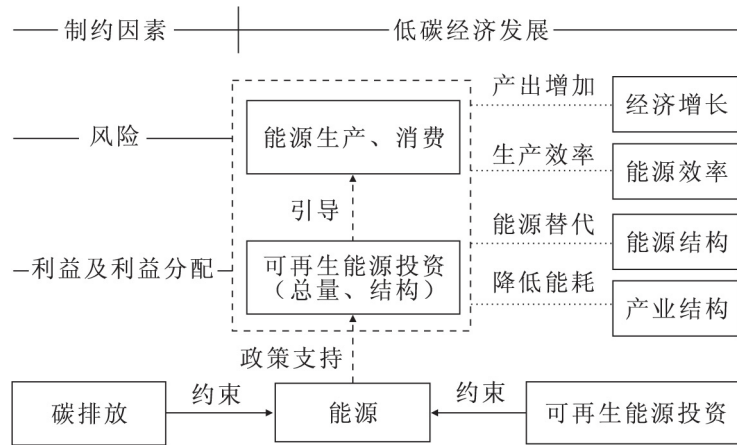


图 1 可再生能源投资对我国碳减排的作用路径

可再生能源投资的调控重点是在满足能源生产和消费的基础上，对可再生能源进行总量调控和结构调整；从总体上提高可再生能源的利用效率，提高低碳化投资的水平。能源与经济增长的关系非常密切，一方面，能源是经济增长的重要投入要素；另一方面，经济增长也会促进能源资源的开发利用，由于能源资源的稀缺性及能源资源开发利用产生的环境问题也会制约经济的发展^[25]。此外，能源储量结构决定了能源生产结构，可再生能源的投资会引导能源生产，生产结构又决定了消费结构。闫秀非等^[26]的研究表明：短期内，能源消费的增长对第一、第二产业的影响不同，长期来看对第一、第二产业产值有同向拉动作用。新能源的开发利用会扩大能源供给量，也会形成新的产业。因此，能源的生产、消费与经济增长和产业结构有着密切的关系。鲁万波等^[27]、Mi 等^[28]分别从产业结构、能源强度、能源结构几个层面分析了其对碳排放产生的影响。

此外，能源使用导致的碳排放必然会增加环境治理的成本。从能源成本效率的角度考虑，提高能源效率无疑是碳减排的重要路径。提高能源效率要求减少提供同等能源服务的能源投入，出发点是为了缓解能源短缺，提高能源利用效益。可再生能源具有永续利用的特点，加大可再生能源的利用可以缓解能源短缺的制约，且负外部性相对较低^[29]。综合以上，本研究拟测量可再生能源投资通过经济增长、产业结构、能源结构、能源效率等几个路径对碳排放产生的影响，进而分析其减排效应及其差异。

三、变量、数据与模型

（一）变量与数据

本文涉及的变量主要包括：

1. 碳排放量 CO_2 。根据中国 2004—2013 年资源型产业与制造业中各类能源（能源消耗种类分别包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气）的消耗量，结合《中国能源统计年鉴》（2005—2014 年）中各种能源消耗量折算标准煤为参考系数、《IPCC 国家温室气体排放清单指南》中公布的能源碳排放系数，计算出中国能源型产业与制造业的碳排放量数值，以此作为碳排

放量的衡量指标, 单位为万 t。

2. 可再生能源投资总量 RI 。可再生能源投资指开发商、政府、公众等主体由于可再生能源应用而投入(或支出)的资金。包括可再生能源发电、供热和燃气、液体燃料应用的投资, 不包括研发投入及对制造业的投资^[30]。相关数据来自《中国低碳发展报告》(2015年)、《全球可再生能源投资趋势》(2013年), 单位为亿元。

3. 可再生能源投资结构 RS 。投资结构是指一定时期内投资总量中所含各类投资的构成及其数量上的比例关系。可再生能源应用投资的主要领域包括可再生能源发电、沼气利用、太阳能热利用、生物燃料和地热利用, 其中发电领域所占比重最大^[30]。借鉴余长林^[31]对人力资本投资结构的定义^①, 选择目前我国可再生能源投资领域中发电投资的占比作为其替代变量, 单位为%。

4. 能源效率 E 。本文是基于纯经济效率出发的研究, 旨在从总体层面上衡量能源综合利用效率。从这个角度出发, 能源强度是衡量综合能源利用效率的常见指标之一。参考王俊杰等^[32]的研究, 选择能源强度的倒数“单位能耗 GDP ”($GDP/$ 能源消耗总量)作为衡量总体性能能源效率的指标, 单位为“ 10^8 元/ 10^4 tce”。相关数据来自《中国统计年鉴》(2005—2014年)和中经网产业数据库。

5. 其他变量。参照武红等^[33]对指标的确定^②, 选择 GDP 指数(1978=100)作为经济总量 Y 的替代变量。我国能源资源禀赋决定了能源消费结构在一定时期只能是以煤为主体, 因此选择煤炭消费占能源消费总量的比重作为能源结构 ES 的替代变量^[34], 单位为%。产业结构 IS 根据中国统计年鉴公布的生产法核算 GDP 总量标准, 选择第三产业增加值占 GDP 的比重作为替代变量, 单位为%。

限于数据的可得性和研究的需要, 样本区间为 2004—2013 年。图 2 是样本区间内相关变量的变动情况。为方便观察, 图 2(a) 中 CO_2 在原序列的基础上除以 10^3 , E 在原序列的基础上乘以 10^2 , 这并不改变序列的变动趋势。

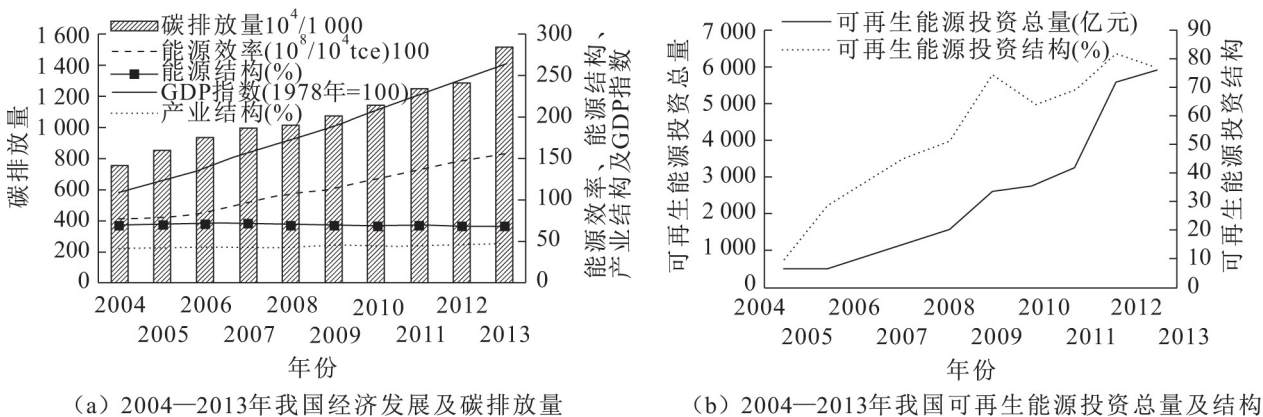


图 2 2004—2013 年相关变量变动情况

可以看出: (1) 样本区间内, 经济总量与碳排放量的变动趋势基本一致, 但 2008 年以后经济增速明显大于碳排放量的增速, 这在一定程度上说明我国还存在减排的空间; (2) 2004 年以来能源结构

① 余长林(2006)将人力资本投资分为教育和健康两种资本,用 IE 表示用于教育投资所形成的人力资本投资, IH 表示用于健康投资所形成的人力资本投资,令 $\varphi = \frac{IE}{IE+IH}$ 表示人力资本投资结构。

② 武红等(2011)对 GDP 指标的确定,是将 1980—2009 年 GDP 按当年价计算的数值换算为 1978 年不变价格计算的 GDP ,以保证数据的可比性和客观性。

基本稳定且略有下降,说明我国能源结构不断优化,但优化程度不明显;产业结构保持基本稳定;(3) 可再生能源投资总量与结构均呈上升趋势,2009 年之前可再生能源投资结构的增长速度明显高于投资总量,2009 年之后则相反。结合实际,自 2005 年 2 月《可再生能源法》颁布之后,风电产业开始迅猛发展,特别是“十五”和“十一五”期间,我国风电发展提速,总装机容量从 2005 年的 126 万 kW 增长到 2008 年年底的 1 217 万 kW,年增长率超过 100%。2008 年之前出台的政策基本是风力发电方面,2009 年开始光伏发电政策密切出台,投资结构的增速明显低于投资总量。

总体来看,可再生能源投资总量与结构的增速比碳排放量的增速快。理论上讲,可再生能源投资的增加导致可再生能源占一次能源的比重变大,过去以煤为主的能源结构被可再生能源替代实现优化,并且可再生能源投资的增长会促进利用成本的降低以及技术的创新,从而提高能源利用效率。

(二) 基本模型构建

1. Kaya^[35]将影响碳排放的因素分解为碳排放强度、能源强度、人均 GDP 和人口四部分,如式(1)。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{T_E} \times \frac{T_E}{GDP} \times \frac{GDP}{P_e} \times P_e \quad (1)$$

其中, CO_2 表示二氧化碳排放量, T_E 表示能源消费总量, $\frac{CO_2}{T_E}$ 、 $\frac{T_E}{GDP}$ 、 $\frac{GDP}{P_e}$ 、 P_e 分别表示碳排放强度、能源强度、人均 GDP 和人口。其中,碳排放强度受能源消费结构和碳排放系数两大因素的影响,如式(2)。

$$\frac{CO_2}{T_E} = \frac{T_{Ei}}{T_E} \times \frac{T_E}{CO_{2i}} \quad (2)$$

其中, T_{Ei} 是第 i 种能源的消费量, $\frac{T_{Ei}}{T_E}$ 和 $\frac{T_E}{CO_{2i}}$ 分别代表能源消费结构和二氧化碳排放系数。

由于碳排放系数在短期内固定不变,因此碳排放最终受能源消费结构、能源强度、人均 GDP 和人口四个因素的影响。本文从生产性角度进行研究,因此不考虑消费性因素“人口”;而人均 GDP 是衡量一国人民生活水平的标准,某种程度上也属于消费性因素,因此用反映经济规模的生产性指标 GDP 代替。本文用 GDP 指数作为经济总量的替代变量。此外,由于“能源效率”是能源强度的倒数,反映的都是技术因素,因此用能源效率代替能源强度。进一步地,上文分析中也指出,产业结构会对能源结构产生重要影响,从而也是影响碳排放的重要因素。鉴于此,本文将经济总量、产业结构和能源结构同时引入模型。

2. 根据本文的理论分析,可再生能源投资不能对碳排放产生直接作用,而是通过影响相关变量对碳排放产生调节作用。具体而言:第一,在本文设定的研究系统中,各种路径之间的作用存在复杂的博弈关系,可再生能源投资对碳排放产生的最终影响是多种效应博弈的结果;第二,在路径的选择上,基于上文的理论分析,主要选择总量、结构和效率(技术)路径。其中,结构路径包括了产业结构和能源结构两个层面。又由于根据相关学者的研究,能源消费结构在很大程度上受到产业结构的影响^{[28][36][37][38]},而能源消费结构对碳排放可以产生直接影响。因此,本文建模时也将这部分纳入模型。此外,在投资结构对碳排放的影响上,根据木森等^[39]的研究,投资结构调整必须与投资总量调节相配合,基于此,还考虑到了总量变动对结构的影响。为消除异方差并直接得出弹性,相关变量均取自然对数。进一步地,温忠麟等^[40]、陈晓萍等^[41]指出,通过叉乘项一方面可以在一定程度上反映直接、间接效应对因变量的综合作用;另一方面可以准确地找到中介模型中受调节的路径。基于此,论文采用叉乘(交互项)来表示调节作用,构建可再生能源投资总量和结构通过相关路径对碳排放产生的综合调节作用的模型如式(3)、(4)。

$$\ln CO_2 = C + \alpha_1 \ln(RI \times Y) + \alpha_2 \ln(RI \times ES) + \alpha_3 \ln(RI \times IS) + \alpha_4 \ln(RI \times ES \times IS) + \alpha_5 \ln(RI \times E) + \epsilon_t \quad (3)$$

$$\ln CO_2 = C' + \beta_1 \ln(RI \times Y) + \beta_2 \ln(RS \times ES) + \beta_3 \ln(RS \times IS) + \beta_4 \ln(RS \times IS \times ES) + \beta_5 \ln(RS \times E) + \beta_6 \ln(RI \times RS) + \omega_t \quad (4)$$

其中, $\alpha_1 \cdots \alpha_5$ 是可再生能源投资总量通过经济总量、能源结构、产业结构、能源结构与产业结构的交互项以及能源效率对碳排放的作用系数; $\beta_1 \cdots \beta_6$ 是可再生能源投资结构通过相关路径对碳排放的作用系数^①; ϵ_t 和 ω_t 为随机扰动变量。进一步地, 为反映相关路径变量对碳排放作用的动态变化趋势, 基于模型 (3) 和 (4), 构建状态空间模型, 如 (5) 和 (6) 所示。

$$\ln(CO_2)_t = C + \alpha_{1,t} \ln(RI \times Y)_t + \alpha_{2,t} \ln(RI \times ES)_t + \alpha_{3,t} \ln(RI \times IS)_t + \alpha_{4,t} \ln(RI \times ES \times IS)_t + \alpha_{5,t} \ln(RI \times E)_t + \epsilon_t$$

$$\alpha_{1,t} = SV_1 \times \alpha_{1,t-1} + \mu_{1,t} \quad \alpha_{2,t} = SV_2 \times \alpha_{2,t-1} + \mu_{2,t} \quad (5)$$

$$\alpha_{3,t} = SV_3 \times \alpha_{3,t-1} + \mu_{3,t} \quad \alpha_{4,t} = SV_4 \times \alpha_{4,t-1} + \mu_{4,t}$$

$$\alpha_{5,t} = SV_5 \times \alpha_{5,t-1} + \mu_{5,t}$$

$$\ln(CO_2)_t = C' + \beta_{1,t} \ln(RS \times Y)_t + \beta_{2,t} \ln(RS \times ES)_t + \beta_{3,t} \ln(RS \times IS)_t + \beta_{4,t} \ln(RS \times ES \times IS)_t + \beta_{5,t} \ln(RS \times E)_t + \beta_{6,t} \ln(RI \times RS)_t + \omega_t$$

$$\beta_{1,t} = SV_1^* \times \beta_{1,t-1} + \eta_{1,t} \quad \beta_{2,t} = SV_2^* \times \beta_{2,t-1} + \eta_{2,t} \quad (6)$$

$$\beta_{3,t} = SV_3^* \times \beta_{3,t-1} + \eta_{3,t} \quad \beta_{4,t} = SV_4^* \times \beta_{4,t-1} + \eta_{4,t}$$

$$\beta_{5,t} = SV_5^* \times \beta_{5,t-1} + \eta_{5,t} \quad \beta_{6,t} = SV_6^* \times \beta_{6,t-1} + \eta_{6,t}$$

其中, $\alpha_{1,t} \cdots \alpha_{5,t}$ 是可再生能源投资总量通过经济总量、能源结构、产业结构、能源结构与产业结构的交互项以及能源效率对碳排放作用的变动状态, $\beta_{1,t} \cdots \beta_{6,t}$ 是可再生能源投资结构通过相关路径对碳排放作用的变动状态, ϵ_t 、 ω_t 为随机扰动变量, SV 、 SV^* 为状态矩阵。

四、模型估计及结果分析

(一) 变量关系的初步判断

进行模型估计前首先对变量间的关系进行初步判定。通过单位根检验发现, 相关序列均为 I(2) 序列。相关性检验表明, 碳排放与经济总量、能源效率、产业结构以及可再生能源投资总量的相关性分别为 0.983、0.974、0.968、0.966, 与投资结构及能源结构的相关性为 0.838、0.763。而可再生能源投资总量与经济总量、产业结构和能源效率的相关性为 0.991、0.976、0.987, 与能源结构仅为 0.799。可再生能源投资结构与能源结构、能源结构与产业结构的相关性相对较弱, 与产业结构、能源效率、投资总量及经济总量的相关性均达到 0.8 以上。为进一步验证变量间的关系, 采用格兰杰检验考量变量间的因果关系, 结果如表 1 所示。

表 1 反映出, 可再生能源投资总量与碳排放量短期内没有直接的因果关联, 但可以通过能源结构、产业结构影响碳排放量; 可再生能源投资结构与碳排放量、投资总量之间也没有直接的因果关

① $\alpha_1 \cdots \alpha_5, \beta_1 \cdots \beta_6$ 即“弹性系数”, 在文中用“效力”表示, 其本质是可再生能源投资通过相关路径变量对碳排放产生的作用大小(强度)。若 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_1, \beta_2, \beta_4, \beta_5, \beta_6 > 0$, 说明可再生能源投资通过相关路径变量对碳排放产生“拉动”作用; 若 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_1, \beta_2, \beta_4, \beta_5, \beta_6 < 0$, 说明可再生能源投资通过相关路径变量对碳排放产生“抑制”作用。需要特别说明的是, 本文中产业结构选取的替代变量为第三产业增加值占 GDP 的比重, 从经济意义出发, 该值越大表明产业结构越优化; 基于此, α_3, β_3 碳减排效应与上文分析相反, 若 $\alpha_3, \beta_3 > 0$, 说明可再生能源投资通过相关路径变量对碳排放产生“抑制”作用, 反之反是。在下文实证分析中均采用这种表述。

表 1 相关变量的格兰杰因果检验结果

过程	滞后期	P 值	过程	滞后期	P 值
RI→CO ₂	1	0.233 9	RS→CO ₂	1	0.586 8
	2	0.818 0		2	0.182 0
RI→E	1	0.109 1	RS→E	1	0.072 9***
	2	0.290 4		2	0.327 4
RI→ES	1	0.026 1**	RS→ES	1	0.152 5
	2	0.033 4**		2	0.042 5**
RI→Y	1	0.863 8	RS→Y	1	0.102 0
	2	0.788 3		2	0.846 0
RI→IS	1	0.009 7*	RS→IS	1	0.765 2
	2	0.104 1		2	0.954 9
Y→E	1	0.001 8*	ES→E	1	0.259 4
	2	0.004 0*		2	0.754 9
RS→RI	1	0.385 6	CO ₂ →RI	1	0.006 1*
	2	0.198 8		2	0.248 8

注: *、**和*** 分别表示在 1%、5%和 10%的置信水平下拒绝原假设。

联,但与能源效率和能源结构间存在明显的因果关系。同时,我国碳排放量对可再生能源投资具有很强的引导性,这主要是政策因素的影响。以上是基于统计学意义上的分析,说明可再生能源投资对碳排放量存在调节作用。但实际经济活动中还存在较复杂的作用过程,本文重点分析可再生能源投资总量和结构通过 Y、ES、IS、E 对碳排量产生的调节。当然,实际经济运行中还存在相关变量之间的交互影响,甚至反馈作用,因果检验的数据支持了碳排放量对投资总量的反馈作用。在此说明的是,本文仅研究投资对碳排放的单向作用过程。

(二) 静态、动态模型估计结果

模型 (3) 和 (4) 中变量均包含交互项,根据相关性检验的结果判断,模型具有多重共线性。考虑到传统的 OLS 估计不适合具有多重共线性的模型,本文采用逐步回归法逐步修正模型中的多重共线性。估计结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 可再生能源投资总量对碳排放量的调节作用

调节项	C	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	R ²
Y	11.353 0* (0.000 0)	0.168 5* (0.000 0)	—	—	—	—	0.944 1
Y+ES	11.987 2* (0.000 0)	0.848 1* (0.045 5)	-0.920 7 (0.092 5)	—	—	—	0.963 7
Y+IS	10.986 2* (0.000 0)	0.730 4 (0.094 4)	—	-0.713 6 (0.180 2)	—	—	0.957 5
Y+E	10.144 7* (0.000 3)	0.667 2 (0.327 9)	—	—	—	-0.513 0 (0.457 5)	0.948 6
Y+ES+IS+E	10.678 4* (0.000 4)	1.929 0* (0.042 2)	-2.081 1 (0.103 5)	1.122 3 (0.308 2)	—	-1.140 0 (0.142 3)	0.977 4
ES	11.213 0* (0.000 0)	—	0.226 8* (0.000 0)	—	—	—	0.933 2
ES+IS	—	—	9.473 6 (0.000 0)	-8.633 0 (0.000 0)	—	—	0.228 1
ES×IS	10.508 3* (0.000 0)	—	—	—	0.217 1* (0.000 0)	—	0.935 3
E	11.766 0* (0.000 0)	—	—	—	—	0.173 0* (0.000 0)	0.940 5

注:*表示在 5%水平下通过显著性检验,调节项中 Y 表示投资总量对 Y 的调节进入模型,同理,Y+ES 表示投资总量对 Y 和 ES 的调节进入模型,以此类推。表中的数据表示系数大小,括号中的数据为相关变量对应的 P 值。表 3 同。

表 3 可再生能源投资结构对碳排放量的调节作用

调节项	C	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	R^2
Y	11.489 8* (0.000 0)	0.210 5 (0.000 1)	—	—	—	—	—	0.858 2
$Y+E$	14.630 3* (0.005 0)	-1.104 1 (0.488 6)	—	—	—	1.373 7 (0.413 0)	—	0.872 0
$Y+ES+E$	8.703 5* (0.008 3)	1.988 5 (0.099 8)	0.718 0* (0.003 7)	—	—	-1.349 0 (0.225 5)	—	0.971 6
$Y+ES+E+RI$	7.316 0* (0.031 8)	2.640 3 (0.067 3)	-1.013 9* (0.018 0)	—	—	-1.580 7 (0.170 7)	-0.142 5 (0.290 5)	0.977 8
ES	11.597 9* (0.000 0)	— (0.001 7)	0.281 1* (0.001 1)	—	—	—	—	0.727 5
$ES+E$	13.049 6* (0.000 0)	— (0.007 5)	-0.517 2* (0.001 1)	—	—	0.586 1* (0.000 6)	—	0.953 7
$ES+IS$	13.882 0* (0.000 0)	—	-2.113 4* (0.001 1)	2.241 1* (0.000 5)	—	—	—	0.955 6
$Y+ES+E+ES \times IS+RI$	—	1.810 8 (0.070 9)	-3.305 7* (0.000 2)	—	2.502 1* (0.003 3)	-0.783 0 (0.316 9)	-0.253 3* (0.014 8)	0.990 7
E	11.988 7* (0.000 0)	—	—	—	—	0.220 5 (0.000 1)	—	0.862 3
RI	12.363 2* (0.000 0)	—	—	—	—	—	0.133 1* (0.000 0)	0.914 5
$ES+IS+E+RI$	13.965 1* (0.000 0)	—	-2.357 3 (0.161 4)	2.199 74 (0.251 5)	—	0.458 8 (0.304 7)	-0.149 7 (0.424 4)	0.965 4

结合表 2 和表 3 可以看出:

1. 同时考虑总量和效率路径时, (1) 可再生能源投资总量与结构通过经济总量分别产生了 0.168 5、0.210 5 的碳拉动作用, 说明我国尚未实现经济增长的碳脱钩; (2) 能源效率从本质上反映的是技术进步, 可再生能源投资总量与结构通过影响能源效率分别产生了 0.173 0、0.220 5 的碳拉动作用。这与理论分析并不一致。其原因可能是由于技术回弹效应的存在使得能源效率提高减少的碳排放被部分抵消, 碳排放不可能同比例的减少^[42]; (3) 综合考虑经济总量与能源效率两个路径时, 可再生能源投资总量和结构对碳排放分别产生 0.154 2 和 0.269 6 的拉动作用。这可能是由于能源效率提高未能抵消经济增长对碳排放的拉动^[43]。总体来看, 可再生能源投资结构通过总量和效率路径对碳排放的影响相对较大。一方面可再生能源投资通过影响产出对碳排放产生了拉动效应, 这与我国工业推动的经济增长模式有密切的关联; 另一方面, 可再生能源投资在成本、风险等因素的约束下, 工业主体对使用清洁能源提高能源效率的积极性受到可再生能源投资结构的影响更大。

2. 同时考虑能源结构和产业结构路径时, 可再生能源投资总量通过能源结构与产业结构路径分别产生了 9.473 6、8.633 0 的碳拉动作用, 而投资结构通过能源结构与产业结构分别产生了 2.113 4、2.241 1 的碳抑制作用。投资结构通过结构路径产生的碳抑制效应优于投资总量; 这说明, 样本区间内投资总量对能源结构与产业结构的引导不足, 投资结构对能源结构的优化、产业结构的转型升级具有更强的促进作用。考虑经济总量以及结构和效率路径时, 可再生能源投资总量通过相关路径产生了 2.414 4 的碳抑制效应; 通过经济总量和能源结构路径产生了 0.072 6 的碳抑制作用; 而通过经济总量和产业结构路径产生了 1.444 的碳拉动作用。这与郭朝先^[44]的结论一致。另外, 可再生能源投资结构通过影响投资总量产生了 0.133 1 的碳拉动作用, 说明现阶段可再生能源投资结构通过投资总量对碳排放影响的传导效应存在, 但效力较低, 这与我国目前的实际相吻合。

3. 短期来看, 可再生能源投资通过影响经济总量与能源效率并不均等地引起环境的改善; 能

源结构的优化与产业结构的升级也不一定引起环境的改善。综合考虑总量、结构和效率路径时,可再生能源投资能够对碳排放产生一定的抑制作用。考虑单一路径时,投资结构对碳排放的影响较大,综合考虑多个路径时,投资总量的碳抑制效应优于投资结构。其原因在于:第一,能源效率的提高产生的经济效益小于技术创新和设备升级的情况下,通过能源效率的提高不能有效改善环境的质量。并且技术生命周期的不同阶段影响力不同,对环境质量改善的影响力在时间分布上也必然是不均等的。第二,我国目前可再生能源不仅投资水电等市场需求相对稳定、技术相对成熟的行业,还投资于成本高、技术难、市场发展不稳定、政策扶持较小的行业,因而投资总量通过单一路径对碳排放的影响比投资结构小。此外,可再生能源投资对碳排放的影响是一个复杂的博弈过程,系统中的碳拉动效应有可能抵消碳抑制而最终导致从现在的结果看某些路径未产生减排效果。

在此基础上,对模型(5)和(6)进行估计,但结果表明两个方程并未实现较好的拟合。产业结构和能源效率对应的值不显著,说明长期内这两条路径并不通畅。可再生能源投资最直接的影响是能源消费结构,进而影响产业生产结构,生产结构的改变也会对能源结构起到一定影响,因此可再生能源投资通过能源结构与产业结构的交互作用对碳排放产生作用。产业结构的调整受多种因素影响,可再生能源投资通过产业结构路径对碳排放的影响并未显现。可再生能源投资虽然与能源效率存在紧密的内在联系,但由于技术创新、生产成本、制度安排等因素的制约以及回弹效应的存在,效率路径也存在阻滞。另外,可再生能源投资对碳排放的影响是一个复杂的过程,可能还存在其他的因素变量或者相关变量的滞后因素对碳排放的影响。本文在考虑已有变量的基础上,剔除产业结构与能源效率两个因素,进一步对剔除以上两个变量的模型进行拟合。剔除不显著的状态向量后,结果如表4所示。

表4 可再生能源投资影响碳排放的状态空间模型估计结果(剔除变量后)

模型	状态参数	最终状态	Z 统计量	P 值
RI→CO ₂ (RS→CO ₂)	SV ₁ '	0.359 6	4.655 4	0.000 0
	SV ₁ '*	0.988 0	4.379 8	0.000 0
	SV ₂ '	-2.197 1	-16.779 3	0.000 0
	SV ₂ '*	-4.102 1	-42.817 2	0.000 0
	SV ₃ '	1.865 7	38.053 1	0.000 0
	SV ₃ '*	3.434 4	26.683 1	0.000 0
	SV ₄ '*	-0.288 4	-4.161 4	0.000 0

表4反映出两个方程均实现了较好的拟合。基于此生成时变序列,反映样本区间内可再生能源投资通过相关变量对碳排放作用的动态变化过程。图3为时变作用的运行轨迹。

可以看出:

1. 可再生能源投资总量通过经济总量对碳排放的作用在 $[0, 1.5]$ 变动。样本区间内,作用小幅波动且总体呈上升趋势。可再生能源投资结构通过经济总量对碳排放作用系数在 $[-2, 1]$ 波动,波动幅度较大;2008年碳抑制作用最大(负值的绝对值最大),此后作用逐步降低,2009年之后呈现出碳拉动效应。从实际来看,2008年全球金融危机后,我国加快了经济结构调整,并致力于建设资源节约型国家,发展新能源产业成为经济发展的主要内容。进入“十二五”以来,我国经济持续稳定增长。这说明经济增长对能源仍具有很强的依赖性,并且可再生能源投资结构也受到经济环境的影响。

2. 考虑能源结构和产业结构的交互作用时,可再生能源投资通过 $ES \times IS$ 路径对碳排放的拉动作用在2006年迅速上升后趋于平稳,这与“十五”末期和进入“十一五”期间后我国对产业结

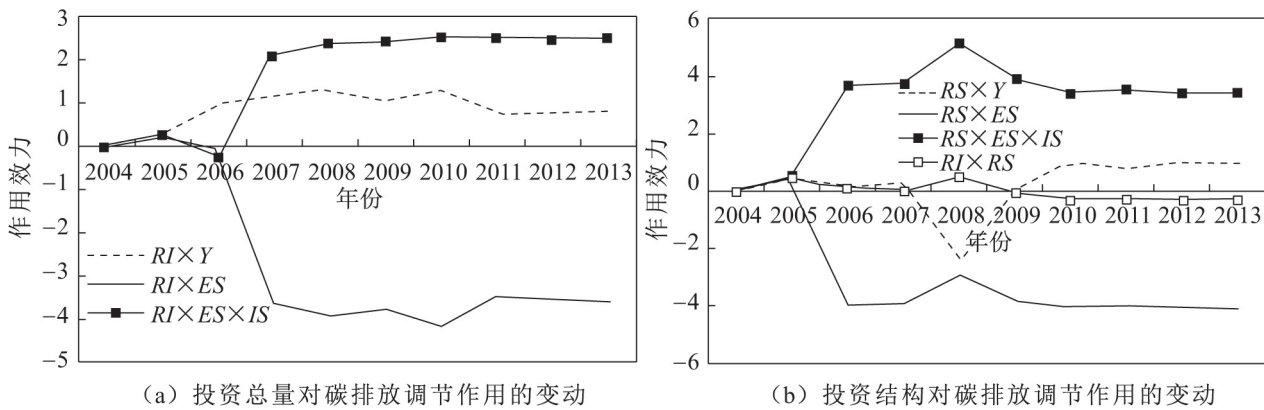


图3 可再生能源投资总量和结构对碳减排影响的时变调节效力

构调整的重视程度有关。受全球金融危机、欧债危机等国际不稳定因素的影响,为实现“保增长”的经济目标,我国工业发展中的重工业模式再次凸显,大量投资以及能源消耗使得第二产业占比回升,因而可再生能源投资通过结构路径对碳排放产生了拉动作用。进一步地,样本区间内,能源结构有所优化,2006年后可再生能源投资总量和结构通过能源结构路径均产生了显著的碳抑制作用且作用大于 Y 及 $ES \times IS$ 路径的碳拉动效应,2011年后碳抑制作用趋于平稳。从实践来看,2005年我国《可再生能源法》的颁布与实施有效推动了节能减排。

3. 可再生能源投资结构通过影响投资总量对碳排放的作用在 $[-0.3, 0.4]$ 波动,剔除非正常波动外,整体波动幅度不大,平均值为 -0.03 ,即可再生能源投资结构每提高1%,碳排放平均降低0.03%。这种抑制作用在2008年以后有所提升,这与 $ES \times IS$ 路径的作用一致。

进一步地,《可再生能源“十三五”发展规划》中提出,到2020年非化石能源占能源消费总量比例达到15%,2030年达到20%。由于能源具有公共产品的属性,政府在可再生能源发展中的作用至关重要。除了直接投资以外,主要是通过制定和出台大量的激励和刺激政策(例如补贴政策、价格政策、税收优惠政策和优惠贷款等)鼓励可再生能源产业的发展。时变作用的研究结果表明,可再生能源投资对碳排放的影响在2005年、2006年、2008年存在明显的变化节点,因而可能存在政策等定性因素的影响。从我国的实践看,以2005年《可再生能源法》颁布为分界点,之前新能源相关政策出台的数量较少(2项),2006年开始新能源相关政策逐渐增多,2012年达到最多的23项。考虑到:(1)现行税收制度中针对可再生能源发展的优惠政策很少,且大都分散在各个税种之中,激励效果不明显;(2)目前我国可再生能源产业以风能和太阳能为主,并主要以电力形式加以利用,制约其大规模商业化的主要因素是“上网电价”。综合以上,本文将上网电价政策作为虚拟变量纳入模型,以在一定程度上揭示政策的有效性。鉴于风电产业的投资比例最大,因而仅考虑风电项目的核准电价。进一步构建模型如(7)和(8):

$$\ln(CO_2)_t = C + \alpha_{1,t} \ln(RI \times Y)_t + \alpha_{2,t} \ln(RI \times ES)_t + \alpha_{3,t} \ln(RI \times ES \times IS)_t + \alpha_{4,t} D_t + \epsilon_t \quad (7)$$

$$\ln(CO_2)_t = C' + \beta_{1,t} \ln(RS \times Y)_t + \beta_{2,t} \ln(RS \times ES)_t + \beta_{3,t} \ln(RS \times ES \times IS)_t + \beta_{4,t} \ln(RI \times RS)_t + \beta_{5,t} D_t + \epsilon_t \quad (8)$$

其中, D_t 为虚拟变量, $\alpha_{i,t}$ 和 $\beta_{i,t}$ 为其作用系数。由于2009年之前风电项目的核准电价以招标或审批的形式为主,2009年实施标杆电价,因此,若实施标杆电价, $D_t=1$,反之, $D_t=0$ 。对模型(7)和(8)进行估计,结果表明:当加入政策因素时,两个方程都实现了较好的拟合,方程的 R^2 分别为0.9608、0.9928, F 对应的 P 值为0.0010、0.0002。 DW 值都在2附近,不存在序列相关现象。并

且方程(8)的拟合效果更好,与剔除了产业结构和能源效率的动态模型估计结果一致。

以上结果揭示出:良好的政策对可再生能源投资的碳减排作用具有引导性,也在一定程度上说明了风电产业实施标杆电价政策的有效性。从实际情况看,近年来,我国制定了多种可再生能源发展的激励政策,但是主要针对电力,要深入发挥可再生能源投资的经济和环境效益,应进一步引导能源技术和投资的多样化。

五、结论与讨论

本文理论和实证分析的结果表明:第一,可再生能源投资与碳排放之间没有直接关联,而是通过总量、结构、效率等路径对碳排放产生调节作用,其最终的影响取决于系统中碳拉动和碳抑制效应的博弈。第二,短期来看,考虑单一路径时,投资结构对碳排放的影响较大;综合考虑多个路径时,投资总量的碳抑制效应优于投资结构。第三,可再生能源投资总量和结构通过结构路径(能源结构和产业结构)分别对碳排放产生拉动作用和抑制作用。总体来看,可再生能源投资结构通过总量和效率路径对碳排放的影响相对较大,通过结构路径产生的碳抑制效应优于投资总量。第四,可再生能源投资结构通过影响投资总量产生碳拉动作用,这说明现阶段可再生能源投资总量与结构间存在传导关系,但效力较低,这与我国目前的实际相吻合。第五,良好的可再生能源投资政策对碳减排作用具有引导性。

实践中,我国一直致力于节能减排的努力,强调了技术、经济、法律、行政、市场手段的综合运用。经济新常态下,经济增长速度的相对放缓以及结构性改革的推进,为节能减排提供了新的契机。随着石油和其他化石能源的日益枯竭及全球对于温室气体排放引起气候变暖问题的关注,开发利用可再生能源成为促进节能减排的关键点,这凸显了可再生能源投资的重要性。本文的研究表明,可再生能源投资能有效地促进碳减排,而结构和效率(技术)是减排的两大重要路径。但在样本区间内,投资总量对能源结构与产业结构的引导不足,投资结构对能源结构的优化、产业结构的转型升级具有更强的促进作用。因此,从实践层面上来看,一方面,强有力的结构调整政策和技术促进政策必然会放大可再生能源投资的减排效果。对于结构调整而言,实际上可以利用技术进步和制度创新转变能源利用方式,提高能源效率,优化能源结构。另一方面,合理的可再生能源投资政策也是促进节能减排的关键所在。2011—2013年我国可再生能源投资的增速明显加快,很大程度上也是受到国家政策的影响。因此,进一步通过政策引导可再生能源领域的投资,优化投资结构、提高投资效率,并结合中国实际,实现技术促进政策、能源财税政策、融资政策等激励政策的有效协调,以此激励可再生能源产业发展,将是促进节能减排、推动低碳经济发展的重要选择。

参考文献

- [1] 张利,雷军,张小雷. 1952年—2008年新疆能源消费的碳排放变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, (1).
- [2] 王常凯,谢宏佐. 中国电力碳排放动态特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, (4).
- [3] 范德成,王韶华,张伟. 低碳经济目标下一次能源消费结构影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, (4).
- [4] 柳亚琴,赵国浩. 节能减排约束下中国能源消费结构演变分析[J]. 经济问题, 2015, (1).
- [5] 陈诗一,严法善,吴若沉. 资本深化、生产率提高与中国二氧化碳排放变化——产业、区域、能源三维结构调整视角的因素分解分析[J]. 财贸经济, 2010, (12).
- [6] 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).

- [7] 何立华,杨盼,蒙雁琳,等. 能源结构优化对低碳山东的贡献潜力[J]. 中国人口·资源与环境,2015,(6).
- [8] Liu, Y., G. Zhao, Y. Zhao. An analysis of chinese provincial carbon dioxide emission efficiencies based on energy consumption structure[J]. *Energy Policy*, 2016, 96.
- [9] Xu, S., Z. He, R. Long, et al. Comparative analysis of the regional contributions to carbon emissions in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127.
- [10] 方国昌,田立新,傅敏,等. 新能源发展对能源强度和经济增长的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2013, (11).
- [11] 周光耀. 节能减排与可再生能源[J]. 上海电力学院学报, 2007, (3).
- [12] 魏凤,张晓黎,辛礼,等. 可再生能源发展对我国能源结构的影响[J]. 中国建设动态:阳光能源, 2006, (2).
- [13] 李虹,董亮,段红霞. 中国可再生能源发展综合评价与结构优化研究[J]. 资源科学, 2011, (3).
- [14] 刘雪菲. 低碳经济在中国[J]. 现代经济信息, 2010, (14).
- [15] 李晓华. 我国能源投资与能源投资规模的确定[J]. 中国能源, 2008, (8).
- [16] 董娟. 全球可再生能源发展现状及投资趋势分析[J]. 当代石油石化, 2014, (8).
- [17] Malaki, A., A. Ghannouchi, M. Wartiti. *Climate Change and the Need for Renewable Energy Sources*[M]. Dordrecht; Springer Netherlands, 2009.
- [18] Mahesh, A., K. Jasmin. Role of renewable energy investment in India: An alternative to CO₂ mitigation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, (5).
- [19] Bilgili, F., E. Koçak, Ü. Bulut. The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54.
- [20] Jebli, M. B., S. B. Youssef, I. Ozturk. Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis: The role of renewable and non-renewable energy consumption and trade in OECD countries[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60.
- [21] Bilgili, F. . Business cycle co-movements between renewables consumption and industrial production: A continuous wavelet coherence approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52.
- [22] Bhattacharya, M., S. R. Paramati, I. Ozturk, et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries[J]. *Applied Energy*, 2016, 162.
- [23] Apergis, N., J. E. Payne, K. Menyah, et al. On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth[J]. *Ecological Economics*, 2010, (11).
- [24] Tietjen, O., M. Pahle, S. Fuss. Investment risks in power generation: A comparison of fossil fuel and renewable energy dominated markets[J]. *Energy Economics*, 2016, 58.
- [25] 王亮,赵涛. 中国可再生能源消费、经济增长与碳排放的动态关系[J]. 技术经济, 2013, (11).
- [26] 闫笑非,杜秀芳. 中国能源消费与产业结构变化关系的实证研究[J]. 改革与战略, 2009, (2).
- [27] 鲁万波,仇婷婷,杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究[J]. 经济研究, 2013, (4).
- [28] Mi, Z., S. Pan, H. Yu, et al. Potential impacts of industrial structure on energy consumption and CO₂ emission: A case study of Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, (103).
- [29] 蒋松云,曾铮. 能源效率和可再生能源的发展及其金融支持的国际经验[J]. 经济社会体制比较, 2008, (1).
- [30] 董文娟,齐晔. 可再生能源投融资[R]. 北京: 清华—布鲁金斯公共政策研究中心, 2015.
- [31] 余长林. 人力资本投资结构及其经济增长效应——基于扩展模型的内生增长理论与实证研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2006, (12).
- [32] 王俊杰,史丹,张成. 能源价格对能源效率的影响——基于全球数据的实证分析[J]. 经济管理, 2014, (12).
- [33] 武红,谷树忠,周洪,等. 河北省能源消费、碳排放与经济增长的关系[J]. 资源科学, 2011, (10).
- [34] 徐丽娜,赵涛,刘广为,等. 中国能源强度变动与能源结构、产业结构的动态效应分析[J]. 经济问题探索, 2013, (7).

- [35] Kaya, Y. *Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*[R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup; Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.
- [36] Guan, Y., M. Li. Analysis on the degree of the industrial structure's impact on the energy consumption—Based on empirical study of Guangdong province[J]. *Energy Procedia*, 2011, (5).
- [37] 李姝, 姜春海. 战略性新兴产业主导的产业结构调整对能源消费影响分析[J]. *宏观经济研究*, 2011, (1).
- [38] 张文玺. 中日韩 GDP、人口、产业结构对能源消费的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, (5).
- [39] 木森, 周晓玲. 投资总量与投资结构相对运动规律初探[J]. *投资研究*, 1990, (3).
- [40] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰. 有中介的调节变量和有调节的中介变量[J]. *心理学报*, 2006, (3).
- [41] 陈晓萍, 徐淑英, 樊景立. *组织与管理研究的实证方法*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [42] 查冬兰, 周德群, 孙元. 为什么能源效率与碳排放同步增长——基于回弹效应的解释[J]. *系统工程*, 2013, (10).
- [43] 肖黎姗, 王润, 刘健, 等. 福建省能源消费碳排放和低碳能源发展研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, (11).
- [44] 郭朝先. 产业结构变动对中国碳排放的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, (7).

Effect of Total Amount and Structure of Renewable Energy Investment on Carbon Emissions of China

HE Ling-yun, WU Meng, YIN Fang

Abstract: Based on the data of renewable energy investment, economic gross, industrial structure, energy efficiency, carbon emissions, etc. In the period of 2004—2013 of China, with the methods such as the regulatory effect model and the state space model, this paper estimates and compares the differences of impact of the total investment amount and the structure of the renewable energy on carbon emissions. Besides, by taking the feed-in tariff policy as an example, we further analyse the guidance of renewable energy investment policy for carbon emissions. The research shows that firstly, renewable energy investment amount and structure has no direct impact on carbon emissions, but has carbon-pulling effect through influencing economy aggregate and energy efficiency; besides, through structure channel, the total amount and structure of renewable energy investment respectively results in pulling and depression effect of carbon emissions. Secondly, in terms of the single path, the investment structure has a great impact on carbon emissions, while in terms of the multiple paths comprehensively, the carbon depression effect of the total investment is superior to that of the investment structure. Thirdly, the industrial structure and energy efficiency channel is block in the long term, but through influencing the energy structure, there is significant carbon depression effect of renewable energy investment; and the carbon depression effect is greater than the pulling effect in system. Fourthly, through analyzing the effect of “wind power industry benchmark price policy”, we prove the guidance of existing policy of renewable energy investment for carbon reduction.

Key words: renewable energy investment; carbon emission; energy structure; energy efficiency

(责任编辑 朱 蓓)