

有效 R&D 投入、清洁能源消费结构与二氧化碳排放量 ——基于中介效应的实证研究

■ 赵俊梅 刘伟琼 赵玉珍

摘要：本文基于全国 30 个省非动态面板数据，对有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间的关系进行研究，并将清洁能源消费结构作为中介变量探究有效 R&D 投入对于二氧化碳排放量的影响。研究结果表明：1. 有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间存在倒“U”型的关系，有效 R&D 投入达到一定程度时，才能抑制温室气体的排放量。2. 清洁能源消费结构在有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间起到积极的作用，但是对二氧化碳排放量的直接效应为负，起到抑制作用。3. 有效 R&D 投入和广义能源消费结构共同对二氧化碳排放量起到抑制的作用。

关键词：二氧化碳排放量 有效 R&D 投入 清洁能源消费结构 中介效应

一、研究背景

随着社会的进步，生态环境已经成为可持续发展的重中之重。土地沙漠化、森林火灾等极端气候变化以及自然灾害频发发生，全球生态环境恶化已经成为威胁人类生存的“定时炸弹”。为应对这一现象联合国颁布《京都议定书》，习近平主席在 2015 年巴黎协会上表示中国正在重点发展生态文明建设，促进绿色低碳循环发展。因此，如何将二氧化碳排放量控制在合理的范围内已成为社会文明生态发展至关重要的一环。

由于早期国内工业产业发展较快，引发了严峻的环境问题。从能源结构的角度看，2018 年国内煤炭能源的消费量占全年能源消费总量的 59%，比 2017 年下

降 1.4 个百分点。与此同时，我国环保清洁能源消费量（水电、风电、天然气等）达到了全年能源消费总量的 22.1%，同比增长 1.3%。预计到 2020 年末，我国将完成“十三五”规划，实现煤炭消费比重的目标（即煤炭消费降低至 58%，天然气能源消费所占比例高达 10%，非化石能源消费比重增至 15%）。当前阶段对于达成大气治理的攻坚战是非常重要的。因此，研究二氧化碳排放量的影响因子并有效抑制二氧化碳的排放，为我国自主减排和应对全球气候变化做出贡献是一项非常重要的课题。

二、文献综述与研究假设

（一）有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间的关系

科学研究与技术进步是推动人类社会发展的第一要素，各国对于大气环境的治理问题必须依靠科技的投入与创新。早期学者认为随着我国研发投入不断增加，可以有效抑制二氧化碳排放量以及二氧化碳排放强度。随着社会的发展以及研究理论和方法的不断成熟，目前大多学者认为研发投入对温室气体的抑制性作用是存在一定门槛值的。王钊、王良虎（2019）运用最小二乘法发现，只有在研发投入达到一定程度的水平的情况下，才会促进产业结构的升级，进而抑制二氧化碳排放量，而且二氧化碳排放量的增加会反向促进 R&D 的投入量，形成倒逼趋势。罗朝阳等（2019）基于非动态面板分析模型发现，当技术投入达到一定门槛时，技术投入优化的产业结

基金项目：内蒙古社科规划重点项目“内蒙古产业部门关联碳排放的统计核算和责任追究制度研究”（批准号：2017NDA060）；内蒙古工业大学校重点项目“内蒙古各产业部门碳排放统计核算、考核评价和责任追究制度研究”（批准号：SZD201701）。

构可以促进能源效率的利用。因此,本文认为研发投入与二氧化碳排放量之间存在先促进后抑制的非线性的关系。据此提出第一个假设:

H1:有效R&D投入与二氧化碳排放量之间存在倒“U”型关系。

(二)清洁能源消费结构在有效R&D投入影响二氧化碳排放量过程中的中介效应

近年来,随着人们环保意识的增强以及我国对大气治理问题的关注,全球变暖这一严峻的环境问题已有所改善。我国早期快速的工业化发展以及对煤炭等重污染能源的过度使用带来了许多与之相关的环境问题,因此许多学者着手研究能源消费结构对温室气体排放的影响。1.清洁能源的使用可以直接有效抑制温室气体的排放量。孙建基于中国30个省区市的真实数据以及预测数据所构成的面板数据,通过实证分析发现不同区域清洁能源使用对二氧化碳排放量影响不同。2.以往部分研究人员将“能源消费结构”作为中介变量研究能源售价和二氧化碳排放量之间的关系,以及将其作为中介变量研究技术研发创新对公司绩效的影响。本文将“能源消费结构”作为中介变量研究有效R&D投入与二氧化碳排放量之间的关系。综上所述,本文认为清洁能源消费结构,在有效R&D投入与二氧化碳排放量关系中起到中介效

应。基于此本文提出假设:

H2:有效R&D投入可以促进清洁能源的使用,使得能源消费结构不断优化。

H3:清洁能源可以作为中介变量,与有效R&D投入共同抑制温室气体排放量。

三、研究设计

(一)样本选取

本文选取2013年-2017年全国30个省(不包括港、澳、台以及西藏地区)连续5年非动态面板数据作为样本。有效R&D投入、二氧化碳排放量等指标选取均来自于历年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》或根据统计年鉴已知数据进行计算。清洁能源消费结构指标的测算与运用基于《遵义统计年鉴》。

(二)变量的设定

1.被解释变量:

二氧化碳排放量(CO₂):本文研究的是全国区域二氧化碳排放量的驱动因素,故将二氧化碳排放量作为被解释变量。根据各省每年对不同能源的消费情况,以及能源对应二氧化碳排放系数,对排放量进行测算^[14]。具体公式如下:

$$CO_2\text{排放量} = \sum E_i * C_i$$

E为某省某年某种能源消耗量,C为该种能源对应的二氧化碳排放系数,i为能源的种类。

根据2006年IPCC公布的能源碳排放参考系数测算不同能源的碳排放系数,见表1。

2.主要解释变量:

有效R&D投入(RD):罗朝阳(2019)将技术进步水平作为科技研发投入的门槛变量,认为只有在技术达到一定水平的情况下,产业结构优化对能源效率有促进作用。本文将各地区有效R&D投入(即第二产业规模以上有效的专利个数)作为解释变量。

3.中介变量:

清洁能源消费结构(CES):与发达国家相比,我国目前还没有达到大量使用绿色清洁能源来满足日常生产需要。截至目前我国能源消费以煤炭为主,汽油、煤油、焦炭等为辅。现有大多文献,将煤炭能源消费量占能源消费总量的比重,作为能源消费比重。而本文选取《遵义统计年鉴》的统计方法,以广义上的清洁能源(除煤炭、燃料油以外的能源消费量)消费量占区域总能源消费量作为能源消费结构。这样做有利于统一各指标关系的方向性,也是本文的指标创新。具体公式如下:

$$CES = \frac{\sum C_i}{EN_i}$$

其中C_i为各省每年除煤炭、燃料油以外的其他能源消费量,EN_i为各省每年总的能源消费数量。

4.控制变量

表1:各能源碳排放参考系数

能源名称	原煤	焦炭	原油	燃料油	汽油	煤油	柴油	液化石油气	天然气
二氧化碳排放系数	1.9003	2.8604	3.0202	3.1705	2.9251	3.0179	3.0959	3.1013	2.1622

鉴于目前已有文献, 本文控制变量选取如下:

(1) 产业结构升级 (ISU): 以往学者大多采用第三产业的总产值与该地区年总产值的比重作为产业结构升级指标, 忽视了第一产业、第二产业产值对产业结构升级产生的影响, 计算方法过于粗略, 缺乏准确性。故本文根据徐敏 (2015) 采用的计算方法对产业结构升级系数 (ISU) 进行计算。公式如下:

$$ISU = \sum_{i=1}^3 d_i \times i = d_1 \times 1 + d_2 \times 2 + d_3 \times 3$$

其中 d_1 代表某省某年第一产业占该地区总产值 (GDP) 的比重, d_2 代表某省某年第二产业占该地区总产值, d_3 代表某省某年第一产业占该地区总产值 (GDP) 的比重。

(2) 能源效率 (EE): 依据规模效应不变假设将能源效率分解。根据 DEA、随机前沿面等方法对全要素生产率指标进行测算, 并将函数的产出进行分解。具体公式如下:

$$ENG = \frac{y^{t+1}}{y^t} \times \frac{E^t}{E^{t+1}} = EFCH \times TEC \times INP$$

式中 ENG 为能源效率的变化, EFCH 为技术效率变化, TEC 为技术进步带来的能源效率

变化, INP 投入替代效应。

(3) 人口规模 (NOP): 本文将全国各省年末人口总数作为影响二氧化碳排放量的控制变量。各指标的描述性统计数据见表 2。

四、实证分析

(一) 模型构建

本文将 2013-2017 年全国 30 个省连续 5 年的非动态面板数据作为样本, 构造了有效 R&D 投入与温室气体排放量的关系模型。并将广义清洁能源作为该模型中介变量, 研究广义清洁能源在原有模型中所起到的传导作用。

根据上文提出 3 个基本假设构建模型如下:

H1: 有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间存在倒“U”型关系。

模型一:

$$CO2_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 RD_{it} + \alpha_2 RD2_{it} + \alpha_3 ISU + \alpha_4 EE + \alpha_5 NOP + \varepsilon \quad (1)$$

H2: 有效 R&D 投入可以促进清洁能源的使用, 使得能源消费结构不断优化。

模型二:

$$CES_{it} = \beta_0 + \beta_1 RD_{it} + \beta_2 RD2_{it} + \beta_3 ISU_{it} + \beta_4 NOP_{it} + \varepsilon \quad (2)$$

H3: 广义清洁能源可以作为中介变量, 与有效 R&D 投入共同抑制温室气体排放量。

模型三:

$$CO2_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 RD_{it} + \gamma_2 RD2_{it} + \gamma_3 CES_{it} + \gamma_4 EE_{it} + \gamma_5 ISU_{it} + \gamma_6 NOP_{it} + \varepsilon \quad (3)$$

其中, i 和 t 分别表示地区、时间; α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 分别为待估参数, ε 为扰动项; CO_2 表示二氧化碳的排放量; RD 表示有效研究与实践发展的有效投入 (地区第二产业年有效专利个数); $RD2$ 为二阶有效 R&D 投入; ISU 表示产业结构升级程度; EE 代表能源效率水平; CES 为广义清洁能源消费结构; NOP 为人口规模即各地区每年年末的人口数。

(二) 实证回归结果与分析

本文对全国 30 个省连续 5 年的面板数据进行平稳性检验, 根据检验结果可知各变量均通过平稳性检验。因此, 本文采用最小二乘法 (OLS) 对以上 3 个假设模型进行估计。

回归结果如下:

根据模型一, 可以明显看出, 有效 R&D 投入与二氧化碳的排放量存在先促进后抑制的非线性关系, 即第二产业规模以上有效的专利数与二氧化碳排放量之间呈倒“U”型关系。一阶有效 R&D 投入系数为正的 0.162, 二阶有效 R&D 投入系数为负的 0.0036。这与假设一相符。说明当有效 R&D 处于较低水平时, 第二产业规模以上有效专利匮乏, 不足以抑制二氧化碳的排放

表 2 描述性统计分析

变量	最大值	最小值	均值	标准差	观测数
CO ₂	14.1593	0.4657	4.1076	2.8566	150
RD	28.9238	0.0205	2.0410	3.8743	150
RD2	836.5862	0.0004	19.0761	88.4499	150
ISU	2.8013	2.1938	2.3653	0.1231	150
EE	0.7433	0.0826	0.3055	0.1411	150
CES	0.9081	0.0966	0.3826	0.1624	150
NOP	1.1169	0.0578	0.4560	0.2727	150

	(1)	(2)	(3)
	co2_1	ces	co2_2
rd	0.162*** (0.0569)	0.0177*** (0.00495)	0.174*** (0.0556)
rd2	-0.00358** (0.00145)	-0.000399*** (0.000136)	-0.00387*** (0.00142)
ces			-2.371*** (0.846)
isu	0.638 (0.774)	0.126* (0.0690)	0.495 (0.756)
ee	-4.130** (1.792)		-2.455 (1.849)
nop	6.483*** (1.533)	-0.103 (0.103)	6.388*** (1.526)
_cons	0.640 (1.764)	0.103 (0.172)	1.401 (1.743)
N	150	150	150

* p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

量, 导致研发投入与二氧化碳排放量形成正相关的关系。在研发投入的后期, 当研发投入水平超过一定程度时, 对二氧化碳的排放量的抑制产生显著效果。

根据模型二的回归结果可知, 有效 R&D 投入的增加能够有效改善我国能源消费结构, 降低能源消费量中污染程度大的煤炭的比重, 进而提升清洁能源的比重。促进我国能源结构由“无效重碳”转化为“高效轻碳”。但该模型的成立也要求有效 R&D 投入量达到相对较高的程度, 具体原因可能是由于市场传导机制不通畅导致。

模型三是在模型一的基础上加入了清洁能源消费结构这一中介变量。模型三中有有效 R&D 投入作为主要解释变量, 相较于模

型一系数的绝对值都有所提高。一阶系数由原来的正的 0.162 提高到 0.174, 二阶研发投入系数由原来负的 0.0036 降低为负值 0.0039。从回归结果可以看出, 加入清洁能源消费结构这一中介变量后, 有效 R&D 投入对区域二氧化碳排放量的影响更加明显。因此, 清洁能源在有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间起到积极的调节作用。模型三中清洁能源消费结构指标系数为负, 并且清洁能源消费结构对二氧化碳排放量的抑制作用在 1% 的水平上显著。说明有效 R&D 投入和广义能源消费结构共同对二氧化碳排放量起到抑制作用。清洁能源消费结构对二氧化碳排放量的直接效应为负, 产生消极作用, 这与预期的经济理论吻合。

五、结论与建议

(一) 结论

本文对有效 R&D 投入与二氧化碳排放量的关系进行研究, 将广义清洁能源作为中介变量, 研究广义清洁能源在原有模型中所起到的调节作用, 并探究有效 R&D 投入对于二氧化碳排放量减少的具体路径问题。得出以下结论: 1. 有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间存在着先促进后抑制的非线性关系, 当有效 R&D 投入达到一定的临界值时, 才能抑制温室气体的排放量。2. 将清洁能源作为中介变量加入

模型后, 有效 R&D 投入对二氧化碳排放量的影响系数绝对值加大。说明广义清洁能源消费结构作为中介变量可以在有效 R&D 投入与二氧化碳排放量之间起到积极的作用。但清洁能源消费结构对二氧化碳排放量的直接效应为负, 呈现出对温室气体排放的抑制作用。3. 有效 R&D 投入和广义能源消费结构共同对二氧化碳排放量起到抑制作用。

(二) 建议

习近平总书记在十九大报告中指出, 坚持人与自然和谐共处, 提出绿水青山就是金山银山的理念, 坚持节约资源和保护环境的基本国策。本文根据实证回归结果及结论, 对关于我国如何降低温室气体排放量提出合理建议, 为我国有效治理温室气体排放过多问题以及“自主减排”做出贡献。

1. 加大有效 R&D 投入, 培育创新发展新动力

国家、政府以及相关环境监管机构应鼓励各省各企业加大有效的研发投入。通过大量有效 R&D 投入能够改善第二产业重污染、高排放、低效率的产品生产加工流程工艺。应注重有效 R&D 投入的多元化、普适性, 使第二产业相同专利技术可以用于不同区域、不同行业、不同企业, 对有限资源进行合理的运用及配置, 达到改善我国大气排放不科学的目的, 实现“高污染多排放无效率”到“稳环保轻排

放高效率”的转变。

2. 优化能源消费结构，建立绿色发展新生态

整合能源消费结构是降低温室气体排放量的重要途径之一。我国不同于欧洲的一些发达国家可以依靠清洁能源进行生产消费。我国煤炭占据能源的主导地位已经持续了数十年。整合能源消费结构、促进能源体制变革不能一蹴而就，需要长期投入和维持。因此政府应针对重点区域进行重点专项监管以及问题监管，大力拉动清洁能源的使用已达到能源市场健康持续发展的目的。并且加强“简政放权”事前事中监管，加强能源行业生态意识体系建设及监管网络化建设。

3. 提升能源效率，构建协调发展新格局

研究能源长远发展战略、提升能源效率是我国生态文明建设当务之急。目前我国的能源效率处于较低水平，与发达国家相比处于劣势地位。在工业化高速发展的进程中战胜恶劣的气候变化问题，实现温室气体减排目标，是当前时间节点上必须应对的重大挑战。为了实现这一目标，在今后对二氧化碳减排的推动过程中，应当考虑对能源的充分利用，并对能源进行回收再利用。通过提高能源效率进而达到降低温室气体排放量的目的，稳扎稳打完成“十四五”大气治理目标。

4. 加强政府监管，完善政策推动新试点

政府监管作为我国经济发展一只“有形的手”应充分发挥其指导性、引领性和主观能动性的作用，而不是简单地依靠对产业结构的升级。政府可以针对不同行业、不同性质的企业进行资金补助以及相关的政策激励，潜移默化地加强市场对环境问题的重视。企业为了绿色持续健康发展，并在竞争中取得优势，必须考虑环境的限制因素。因此，如果政府可以推行有效激励政策并实施严格的监督管理，那么在环境规制的目标下将有望达到政府监管与企业发展的协同效应。■

参考文献：

[1] 孙建. 中国区域技术创新的二氧化碳减排效应——基于宏观计量经济模型模拟分析[J]. 技术经济, 2018, 37(10).

[2] 王钊, 王良虎. R&D投入、产业结构升级与碳排放关系研究[J]. 工业技术经济, 2019, 38(05).

[3] 王燕梅. 产业结构调整对内蒙古碳排放的影响分析[J]. 管理现代化, 2017, 37(01): 60-63., 2018, 46(02).

[4] 赵欣, 龙如银. 考虑全要素生产率的中国碳排放影响因素分析[J]. 资源科学, 2010, 32(10).

[5] 魏玮, 何旭波. 节能减排, 研发补贴与可持续增长——基于动态可计算一般均衡的情景分析[J]. 经济管理, 2013, 35(11).

[6] 王玉梅, 芮源, 孙欣. 能源要素价格扭曲影响碳强度的传导机制检验——基于能源结构的中介效应

分析[J]. 统计与信息论坛, 2016, 31(09).

[7] 徐建中, 贾大风, 李奉书, 王玥. 装备制造企业低碳技术创新对企业绩效的影响研究[J]. 管理评论, 2018, 30(03).

[8] 罗朝阳, 李雪松. 产业结构升级、技术进步与中国能源效率——基于非动态面板门槛模型的实证分析[J]. 经济问题探索, 2019, (01).

[9] 徐敏, 姜勇. 中国产业结构升级能缩小城乡消费差距吗?[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(03).

[10] 孙广生, 黄祎, 田海峰, 王凤萍. 全要素生产率、投入替代与地区间的能源效率[J]. 经济研究, 2012, 47(09).

[11] 王勇, 王颖. 中国实现碳减排双控目标的可行性及最优路径——能源结构优化的视角[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10).

[12] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 董红敏, 张称意, 王长科, 朱建华, 高庆先, 方双喜, 潘学标, 郑循华. 《IPCC 2006年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. 环境工程, 2019, 37(08).

(作者单位：内蒙古工业大学经济管理学院)

责任编辑：张莉莉