

DOI:10.3969/j.issn.1674-8131.2023.02.004

# 国家生态文明试验区建设提高了碳生产率吗？ ——采用回归控制法的实证分析

胡剑波, 向 港

(贵州财经大学 经济学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘 要:**设立国家生态文明试验区是加快推进生态文明建设的重要举措,2016年和2017年设立的首批国家生态文明试验区有福建省、江西省和贵州省。在“双碳”目标约束下,有效提高碳生产率成为国家生态文明试验区建设的重点任务之一。利用2004—2020年29个省份的面板数据,运用回归控制法分析福建、江西、贵州三省建设国家生态文明试验区对碳生产率的影响及其作用机制,结果表明:设立国家生态文明试验区后,三省碳生产率的增长快于其他26省份的均值,且福建省比浙江省、江西省比安徽省、贵州省比云南省有更快的碳生产率增长;设立国家生态文明试验区产生了明显的碳生产率提升效应(福建省、江西省、贵州省的年均政策效应分别为0.1378万元/吨、0.0654万元/吨、0.0403万元/吨),该结论在时间安慰剂、排除其他政策干扰和用信息准则选择最优子集等稳健性检验中依然成立;设立国家生态文明试验区产生了明显的能源消费结构改善效应、技术进步促进效应、劳动生产率提高效应。应持续推进国家生态文明试验区建设,有效促进绿色低碳发展。

**关键词:**国家生态文明试验区;回归控制法;碳生产率;能源结构;技术进步;劳动生产率

**中图分类号:**F205;F127 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8131(2023)02-0043-17

**引用格式:**胡剑波,向港.国家生态文明试验区建设提高了碳生产率吗?——采用回归控制法的实证分析[J].西部论坛,2023,33(2):43-59.

HU Jian-bo, XIANG Gang. Has the construction of national ecological civilization pilot zone increased carbon productivity?: an empirical analysis based on regression control method [J]. West Forum, 2023, 33(2): 43-59.

\* 收稿日期:2023-02-11;修回日期:2023-03-17

基金项目:四川省社会科学重点研究基地“四川循环经济研究中心”重点项目(XHJJ-2202)

作者简介:胡剑波(1982),男,四川泸州人;教授,博士后,博士生导师,主要从事贸易与气候变化、低碳经济与绿色发展研究;E-mail:hjbbo@126.com。向港(1997),男,湖南株洲人;硕士研究生,主要从事低碳经济与绿色发展研究;E-mail:879737032@qq.com。

## 一、引言

党的十八大以来,生态文明建设成为“五位一体”总体布局中的重要内容。2016年8月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于设立统一规范的国家生态文明试验区的意见》,指出设立统一规范的国家生态文明试验区,要以改善生态环境质量、推动绿色发展为目标,以体制创新、制度供给、模式探索为重点,将中央顶层设计与地方具体实践相结合,集中开展生态文明体制改革综合试验,规范各类试点示范,完善生态文明制度体系,推进生态文明领域国家治理体系和治理能力现代化。2016年8月中共中央办公厅、国务院办公厅印发《国家生态文明试验区(福建)实施方案》,2017年10月中共中央办公厅、国务院办公厅印发《国家生态文明试验区(江西)实施方案》和《国家生态文明试验区(贵州)实施方案》,至此,首批国家生态文明试验区的实施方案全部确立。设立国家生态文明试验区的目的是改善生态环境质量、推动绿色发展,而在“双碳”目标约束下,有效提高碳生产率,减少碳排放,自然成为国家生态文明试验区建设的重点任务之一。那么,在三个试验区的建设实践中,是否有效提高了碳生产率?其主要是通过怎样的路径来提高碳生产率的?对于这些问题的回答具有重要的意义,既可以检验国家生态文明试验区建设的阶段性成果,又能为全国的生态文明建设提供经验借鉴和政策启示。因此,本文试图探究国家生态文明试验区建设对碳生产率影响及其作用机制。

建设国家生态文明试验区是我国推动生态文明共建共享、探索形成人与自然和谐发展新格局的一项重要举措,自首批国家生态文明试验区设立以来,许多学者将该政策视为一项准自然实验,从多方面对其政策效应进行了分析,发现国家生态文明试验区的设立对试验地区的生态、经济和社会发展产生了积极影响。比如:提升了生态旅游效率(闻娟等,2018)<sup>[1]</sup>,促进了企业绿色技术创新水平提高(Hou et al, 2022)<sup>[2]</sup>,降低了大气污染并具有正向溢出效应(Wang et al, 2021)<sup>[3]</sup>,改善了空气质量(谢哈进等, 2021)<sup>[4]</sup>,提升了生态效率(梁琦等, 2022)<sup>[5]</sup>,降低了碳排放强度(汪克量等, 2022; 胡剑波, 2022)<sup>[6-7]</sup>,等等;还有些学者则通过构建多维度的生态环境和经济发展评价指标体系,研究国家生态文明试验区设立对环境与经济关系的影响(陈洪飞, 2022; Liu et al, 2022)<sup>[8-9]</sup>。

现有文献进行政策效应评价的主要方法包括双重差分法(Difference in Difference, DID)、倾向得分匹配法(PROPENSITY SCORE MATCHING, PSM)、合成控制法(SYNTHETIC CONTROL METHOD, SCM)、断点回归法(Regression Discontinuity Design, RDD)和回归控制法(Regression Control Method, RCM)等,不同方法的使用都具有一定的前提条件:利用双重差分法评价政策的实施效果,需要满足处理组和控制组选择随机的条件,但政策的实施往往具有较强的针对性,因而这个条件在现实中很难实现(陈林等, 2015)<sup>[10]</sup>;倾向得分匹配法适用于截面数据,而在评价政策实施效果时一般使用的是面板数据,容易造成地区和时间的错误匹配(罗世华等, 2022)<sup>[11]</sup>;断点回归法则需要识别政策制定者在确定政策干预时的门槛(刘生龙等, 2016)<sup>[12]</sup>;合成控制法中模型设计的权数不能为负数,容易忽略控制组的负面影响,导致合成的精度较低(Abadie et al, 2010; 沈艳等, 2022)<sup>[13-14]</sup>。而由Hsiao等(2012)提出的回归控制法<sup>[15]</sup>,不仅适用于面板数据,而且不需要处理组和控制组满足随机性的假设,模型的权数可正可负,是一种适用性较广的政策评价工具。

综上所述,一方面,现有文献对国家生态文明试验区建设的碳减排效应研究较少,尤其缺乏其影响机制的探究;另一方面,由于首批国家生态文明试验区只有3个,且不满足选择随机性的假设前提,使得常用的政策效应评估方法存在局限性,对实证结果的可信性产生影响。鉴于此,本文基于2004—2020年29个样本省份(不包括港澳台地区、西藏自治区、海南省)的面板数据,采用回归控制法来检验国家生

态文明试验区建设对试验省份碳生产率的影响及其作用机制。本文的边际贡献主要在于:一是在研究对象上,聚焦于第一批试验区分析国家生态文明试验区建设对碳生产率的影响,拓展和丰富了国家生态文明试验区的政策效应研究及其经验证据;二是在研究方法上,选用回归控制法进行实证检验,一定程度上克服了其他方法的局限性,可以得到更加精准的实证结果,并为相关研究提供方法借鉴;三是在研究内容上,进一步从能源消费结构、技术进步和劳动生产率 3 个维度探究国家生态文明试验区建设提升碳生产率的路径,为加快推进生态文明建设提供了经验借鉴和政策启示。

## 二、理论分析与研究假说

### 1. 国家生态文明试验区建设的碳生产率提升效应

碳生产率是指在经济社会发展过程中排放单位二氧化碳所实现的 GDP 产出水平,在“双碳”目标约束下,要在保持经济稳定增长的同时实现碳减排,提高碳生产率是关键。不同类型的发展政策及环境规制对地区碳生产率的影响各异,其影响地区碳生产率的作用机制也有差别(李小平等,2020)<sup>[16]</sup>。设立国家生态文明试验区既是一种区域发展战略,也是一项典型的环境规制政策。设立国家生态文明试验区的目的就是要在保护和改善生态环境方面进行先行先试,政府必然会通过一定的环境规制来调控经济主体的排污行为。我国已作出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的承诺,通过提高碳生产率来实现碳减排自然是国家生态文明试验区建设的重点任务。因此,试验区政府一方面会通过设定相关强制性的指标或法律法规来限制地区碳排放量,另一方面也会通过征税和补贴等市场性手段促进碳生产率提高。比如,对高污染高排放高能耗的企业征收排污税,对高技术含量、绿色环保型公司进行财政补贴,通过政策支持绿色产业发展,推动产业结构的绿色低碳化转型升级,等等。此外,国家生态文明试验区还可以通过建立和完善碳排放权交易制度、用能权交易制度、碳汇市场等手段来弥补自身在生态文明建设过程中付出的生态成本,进而有助于提高本地的碳生产率水平。

环境规制的政策效应存在区域异质性,即同一规制政策在不同的区域产生的效果存在差异,因此需要根据地区的地理特质、资源禀赋、经济水平等制定具有地区适应性的规制政策(杨晓妹,2023)<sup>[17]</sup>。第一批国家生态文明试验区设立的三个试验省份分别处于我国东部、中部和西部地区,资源禀赋条件和经济发展水平都存在较大的差异,因此,各试验省份根据其在国家生态文明建设中战略定位和重点任务的不同出台了适合自身发展的试验区实施方案。福建省拥有良好的经济基础,要在保护和改善生态环境的基础上,积极探索绿色发展的新动能,健全和完善生态保护的体系,构建绿色金融体系,推动经济绿色发展;江西省山水林田湖草等自然资源丰富,要在完善自然资源保护机制和生态治理体系的同时,积极推动绿色产业发展以及产业绿色转型,打造成为中部地区生态文明建设的先行示范区;贵州省则旨在成为长江珠江上游绿色屏障建设示范区,推动生态文明大数据应用、生态旅游、生态文明法治的发展,加深生态文明建设的国际交流合作。加上三个试验省份在经济发展水平、产业结构以及碳生产率等方面也具有显著差异,因而在不同的试验省份,国家生态文明试验区建设产生的碳生产率提升效应的强弱可能不同。

基于以上分析,提出假说 H1:国家生态文明试验区建设有助于提升试验区的碳生产率(H1a),这种碳生产率提升效应在不同的试验省份存在异质性(H1b)。

### 2. 国家生态文明试验区建设提升碳生产率的机制

碳生产率为 GDP 与碳排放量的比值,不仅受到碳排放状况的影响,也受到 GDP 增长的影响,因而具

有众多影响因素。在参考张成等(2014)、李荣杰等(2016)、唐志鹏等(2017)对碳生产率影响因素分析的基础上<sup>[18-20]</sup>,本文选择从能源结构、技术进步和劳动生产率三个方面来探究国家生态文明试验区建设提升试验区碳生产率的机制。

(1)能源消费结构改善效应。改善能源消费结构(降低化石能源消费比例)是提高碳生产率的重要路径。在我国经济迅速增长的过程中,“富煤、缺油、少气”的资源禀赋结构导致煤炭在火力发电和工业发展中扮演着重要的角色,是目前主要的能源消耗,但是过度消耗煤炭等化石能源会带来大量的二氧化碳排放,给生态环境的可持续发展造成巨大压力。高度依赖化石能源不利于可持续发展的实现,中央和地方政府都一直强调要调整和优化能源消费结构。三个试验省份都积极推动用能权交易制度和碳排放权交易市场的完善,通过政府调控和市场调节促进水泥、火电、造纸等高煤消耗行业的转型升级,减少煤炭等化石能源的使用。《福建省“十三五”能源发展专项规划》提出,要重点优化能源结构,控制煤电发展,重点发展核电、水电、风电等清洁发电模式,严格控制能源消费总量,显著提升煤炭集约高效利用,开发利用其他绿色能源。《江西省“十三五”能源发展规划》指出,江西省存在能源自给能力不足、能源结构亟须优化、煤炭消费比重占能源消费的70%左右、能源设施薄弱等问题。对此,江西省提出了一系列的解决措施,严格控制能源使用总量,减少煤炭使用,提高煤炭利用效率,出台煤电行业超低排放和节能改造实施方案,推行清洁能源替代煤炭能源,积极推进能源市场改革,同时还出台了林业碳汇的相关政策。为了加强大气污染物排放和碳排放协同治理,推动能源革命和产业革命,加快建成国家生态文明试验区,贵州省政府印发《贵州省“十三五”控制温室气体排放工作实施方案》,提出要严格控制能源消费总量和强度,减少煤炭等化石能源的使用,加快发展风能、太阳能等非化石能源的使用,并逐步提高非化石能源的使用占比,加快产业结构调整,控制工业领域碳排放,大力发展低碳行业。可见,在推进国家生态文明试验区建设过程中,三个试验省份出台了很多环境规制政策来减少煤炭等化石能源的使用,进而可以通过改善地区能源消费结构来提升碳排放率。

(2)技术进步促进效应。内生增长理论认为技术进步是经济增长的内在动力,波特假说也认为技术进步有助于提高生产率和资源的利用效率,是改善环境质量的重要路径之一。技术进步可以从减少碳排放和促进经济增长两个维度对碳生产率产生显著正向影响。一方面,技术进步有利于提升能源利用效率,减少能源消耗和资源浪费,减少碳排放;另一方面,技术进步有利于提高生产效率,实现资源的有效配置,进而以较小投入实现较大的经济产出。在三个试验省份的实施方案中都提出:要通过推动绿色技术创新,提高资源的利用效率,减少污染物排放,推动产业结构的绿色转型,加快地区生态文明建设。福建省出台《福建省“十三五”科技创新驱动专项规划》,深入实施创新驱动发展战略,推动以科技创新为核心的全面创新,加快掌握核心技术,推动新兴技术研发,促进技术成果转化。江西省出台《江西省“十三五”科技创新升级规划》,通过加大科技研发投入培养科技创新型人才和团队,搭建创新型平台和载体,提高企业的自主创新能力,充分发挥科技创新在经济和生态中的支撑作用。贵州省制定实施《关于推动创新创业高质量发展打造“双创”升级版的实施意见》《贵州省推动大数据与工业深度融合发展工业互联网实施方案》等一系列文件,以大数据引领创新发展,推动技术进步,实现创新和改革的协同发展。此外,各试验省份的环境规制政策也能激发企业的“创新补偿”效应,倒逼企业发展和创新绿色技术(马丹等,2023)<sup>[21]</sup>。因此,国家生态文明试验区建设可以通过促进试验区的技术进步来提升碳生产率。

(3)劳动生产率提高效应。根据索洛经济增长模型,劳动要素投入是经济增长的重要来源,增加劳动投入可以扩大生产规模,迅速提高经济产出,但盲目粗放式加大劳动力投入将不利于碳生产率的提

升。在要素投入相同的情况下, 劳动生产率越高, 单位就业人口所创造的价值越大, 越有利于提高碳生产率。因而提高地区劳动生产率不仅是促进经济发展的重要抓手, 也是提高碳生产率的有效路径之一。环境规制政策可以通过推动技术创新、优化就业结构等提高劳动生产率(张成, 2011)<sup>[22]</sup>, 而恶劣的生态环境会导致企业劳动生产率下降(曹斯蔚, 2022)<sup>[23]</sup>。国家生态文明试验区建设有助于改善生态环境质量, 加快新兴产业聚集进程, 推动技术密集型产业发展, 进而提高劳动生产率。福建省政府印发《关于促进城乡居民增收的实施意见》, 提出要切实提高地区劳动生产率, 提高技能人才和科研人员的薪酬待遇, 稳就业, 促增收, 提高人民生活水平。江西省出台《江西省人力资源和社会保障事业“十三五”规划》, 实行积极的就业政策, 推动实现高质量就业, 完善公共服务和社会保障制度, 提高地区劳动生产率。贵州省出台《关于推进全方位公共就业服务的实施意见》等多个文件推进公共就业服务, 并大力支持互联网、大数据、人工智能等新型技术产业发展, 扩大数字型人才就业。因此, 国家生态文明试验区建设可以通过提高试验区的劳动生产率来提升碳生产率。

基于以上分析, 提出假说 H2: 国家生态文明试验区建设能够改善能源消费结构(H2a)、促进技术创新(H2b)、提高劳动生产率(H2c), 进而提升试验区的碳生产率。

### 三、研究设计与数据处理

本文研究的处理组对象只有 3 个, 且国家生态文明试验区的选定不具有随机性, 不能满足双重差分法中对象选择的随机性原则; 倾向得分匹配法主要适用于截面数据; 国家生态文明试验区的选择虽然倾向于一些生态环境较好的省份, 但并没有设立特定的门槛, 也不能满足断点回归法的使用前提。鉴于此, 本文基于反事实的分析思路, 运用回归控制法来评估国家生态文明试验区建设对碳生产率的影响。该方法的基本思想是: 在因子模型的框架下, 把政策实施对象之间的相关关系归结于一些不可观测的公共因子, 构建处理组未受政策干预的反事实状态, 从而与真实值对比得到政策实施的处理效应。具体而言, 基于各个省份间的横截面相关性, 以未被设立为国家生态文明试验区的省份(控制组)合成虚拟的处理组, 预测处理组在未被设立为国家生态文明试验区状态下的碳生产率变化趋势(反事实结果), 进而与处理组真实的变化趋势进行比较, 以此来评估政策实施的处理效应。自回归控制法提出以来, 该方法在区域政策评估领域得到了广泛的应用, 特别适用于只有一个或者少数几个地区受到政策干预的情形(Ouyang et al, 2015; 方诚等, 2021)<sup>[24-25]</sup>。

#### 1. 反事实框架下回归控制模型的构建

借鉴 Hsiao 等(2012)和洪扬(2021)的研究思路<sup>[15][26]</sup>, 假设  $y_{it}^1$  为受政策影响的个体  $i$  在  $t$  期的结果效应,  $y_{it}^0$  为如果个体  $i$  未受政策影响在  $t$  期的结果效应, 则个体  $i$  的处理效应可表示为:  $\Delta y = y_{it}^1 - y_{it}^0$ 。本文的研究对象  $i$  为福建省、江西省、贵州省三个设立为国家生态文明试验区的省份, 由于现实世界的唯一性, 只能观测到  $y_{it}^1$ , 而不能观测到  $y_{it}^0$ , 因此无法直接估算其政策效应。为了解决上述问题, 使用回归控制法构造合理的控制组, 并用控制组来模拟处理组如果没有设立国家生态文明试验区的碳生产率变化趋势(反事实结果), 以此来评估实际的政策效应。假设  $y_{it}^0$  是由一个“因子模型”所生成, 如式(1)所示:

$$y_{it}^0 = \alpha_i + \beta X_{it}' + b_i' f_t + u_{it} \quad (i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T) \quad (1)$$

其中,  $\alpha_i$  表示个体固定效应,  $X_{it}$  为  $F \times 1$  维的可观测的控制变量,  $f_t$  为  $K \times 1$  维的不可观测的共同因子,  $b_i$  表示  $K \times 1$  维的因子载荷,  $u_{it}$  为随机扰动项。若给定时期  $t$ , 将所有个体的方程叠放, 在一定正则条件下适当变换, 则可以消去不可观测的共同因子(Li et al, 2017)<sup>[27]</sup>, 从而可以得到更为简洁的时间序列

回归方程, 如式(2)所示:

$$y_{1t} = \lambda_1 + \lambda' Z_t + \varepsilon_{1t} \quad (2)$$

在式(2)中,  $Z_t = (y_{2t} \cdots y_{Nt}, X_{2t} \cdots X_{Nt})$ , 其包含了所有控制组个体的结果变量和控制变量。使用政策实施之前各省的数据( $t=1, \dots, T_0$ ), 对式(1)进行 OLS 回归, 即利用式(3)预测反事实结果:

$$\hat{y}_{1t}^0 = \hat{\lambda}_1 + \hat{\lambda}' Z_t^* \quad (t=T_0+1, \dots, T) \quad (3)$$

在式(3)中,  $Z_t^*$  表示  $Z_t$  中的任意子集, 可以用来帮助预测  $y_{1t}^0$ 。基于以上构建的反事实结果, 可以得到如式(4)所示的政策实施效应:

$$\hat{\Delta y} = \hat{y}_{1t}^1 - \hat{y}_{1t}^0 \quad (t=T_0+1, \dots, T) \quad (4)$$

在采用政策实施前的数据估计式(2)时, 为避免放入过多控制组个体和控制变量而产生“过拟合”问题, 本文参照 Li 和 Bell (2017) 的研究<sup>[27]</sup>, 使用 Lasso 的方法筛选变量, 然后再基于回归控制模型进行 OLS 回归, 并采用交叉验证方式确定参数取值, 以使合成的福建省、江西省、贵州省的碳生产率尽可能地接近其真实值, 从而提高测算的精确性。

## 2. 变量选取和数据来源

(1) 处理组和控制组选取。选取福建省、江西省、贵州省作为处理组, 由于三个省份实施方案的批准时间不一, 因此福建省的政策实施基期  $T_0$  设定为 2016 年, 江西省和贵州省的政策实施基期  $T_0$  设定为 2017 年。考虑到海南省在 2019 年也被批准设定为国家生态文明试验区, 而西藏自治区的数据缺失较多, 所以控制组为 26 个省市 (不包括港澳台地区、西藏自治区、海南省)。

(2) 被解释变量测算。考虑到各地区发展不平衡, 不能简单地用碳排放量来衡量各个地区的碳减排效果, 采用“碳生产率”作为被解释变量。“碳生产率”为地区 GDP 与碳排放量的比值。采用 IPCC (2006) 的方法测算碳排放量, 根据煤、焦炭、汽油、煤油、燃料油、柴油、天然气、热力、电力等九种能源的实际消费量进行计算; 以各地区 2004 年的 GDP 为基期, 进行平减处理得到各年度的不变价 GDP。

(3) 控制变量选择。借鉴杨庆等 (2021) 和李小平等 (2020) 对碳生产率的研究<sup>[28][16]</sup>, 选取以下 5 个控制变量: 一是“经济发展水平”, 采用人均 GDP 的自然对数值来衡量; 二是“产业结构高级化”, 采用第三产业产值占地区 GDP 的比重来衡量; 三是“城镇建设水平”, 采用城镇人均道路面积来衡量; 四是“对外开放程度”, 采用进出口总额与地区 GDP 的比值来衡量; 五是“环境保护投入”, 采用环境保护财政支出与地方一般财政支出的比值来衡量。

(4) 数据来源。本文采用 2004—2020 年样本省份的面板数据进行分析, 测算碳排放量所使用的能源消耗数据来自 2005—2021 年的《中国能源统计年鉴》, 其他数据来自 2005—2021 年的《中国统计年鉴》和各省区市统计年鉴, 并利用国家统计局官网的资料对部分缺失数据进行填补。

## 3. 碳生产率的变化趋势

样本期间福建省、江西省、贵州省以及控制组 26 个省区市平均的碳生产率变化趋势如图 1 所示。可以发现: (1) 碳生产率均值呈逐年递增的趋势, 说明我国的能源利用效率在不断提高。(2) 福建省和江西省的碳生产率一直高于 26 省份的均值, 而贵州省的碳生产率则一直低于 26 省份的均值。其原因是贵州省的产业结构以第二产业为主, 且高能耗、高污染、高排放的企业相对较多, 生产活动中会排放大量  $CO_2$ , 同时其整体的经济产出水平较低, 导致其碳生产率偏低。(3) 从增长幅度来看, 福建省、江西省、贵

州省碳生产率的年均增长率均大于 26 省份的平均增长率。福建省碳生产率的年增长趋势最为明显, 年均增长达到 0.066 0 万元/吨, 江西省和贵州省的年均增长分别为 0.044 2 万元/吨和 0.044 4 万元/吨, 而 26 省份均值的年均增长为 0.036 8 万元/吨。(4) 进一步从国家生态文明试验区设立的时点来看, 福建省碳生产率从 2016 年起增长加速, 2016—2020 年年均增长为 0.089 3 万元/吨(大于 0.066 0 万元/吨); 江西省和贵州省的碳生产率从 2017 年开始上升幅度加大, 2016—2020 年年均增长分别达到 0.051 3 万元/吨(大于 0.044 2 万元/吨)和 0.056 4 万元/吨(大于 0.044 4 万元/吨), 并远高于 26 省份均值的年均增长(0.027 8 万元/吨)。由此可以初步判断, 国家生态文明试验区建设促进了试验省份碳生产率提高。

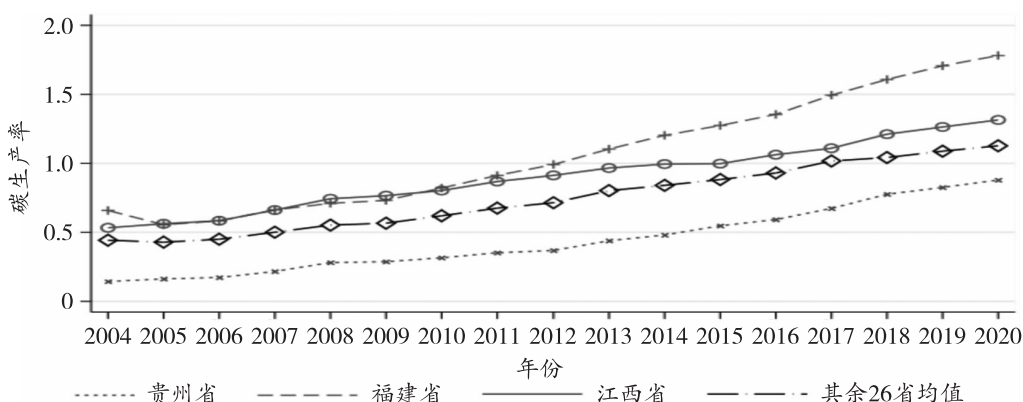
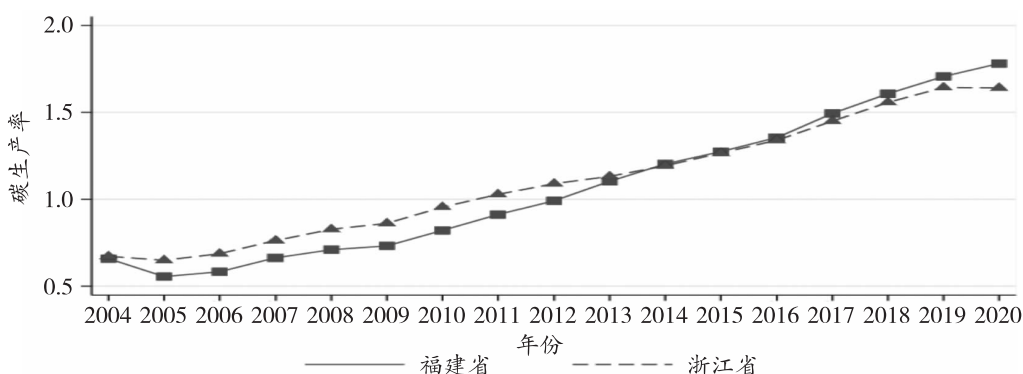


图 1 3 个国家生态文明试验区试验省份和控制组平均的碳生产率变化趋势

进一步根据经济发展水平和所处的地理位置, 选取浙江省、安徽省和云南省作为近似的对照省份, 分别与福建省、江西省和贵州省进行对比分析, 如图 2 所示。六个省份的碳生产率都呈现递增趋势, 三个试验省份的增长速度快于其对照省份, 尤其是在试验区设立之后更为明显。福建省碳生产率在 2016 年后超过了浙江省, 呈现出较快的增长趋势, 而浙江省碳生产率的增长趋势逐步放缓。江西省碳生产率一直高于安徽省, 但在 2015 年至 2016 年几乎相同, 即在此期间安徽省的碳生产率增长快于江西省; 而在江西省设立为国家生态文明试验区后, 碳生产率显著提升, 与安徽省的差距也在逐年增大。贵州省碳生产率一直低于云南省, 试验区设立之前, 两者间的差距逐步扩大, 但试验区设立之后, 差距在快速减小。上述对比分析表明, 在国家生态文明试验区设立之后, 试验省份的碳生产率增长快于与其经济发展水平相近、地理位置相似的其他省份, 进一步表明国家生态文明试验区建设对试验省份的碳生产率增长具有显著的促进作用。后文将运用更为严谨的实证方法来检验这种政策效应。





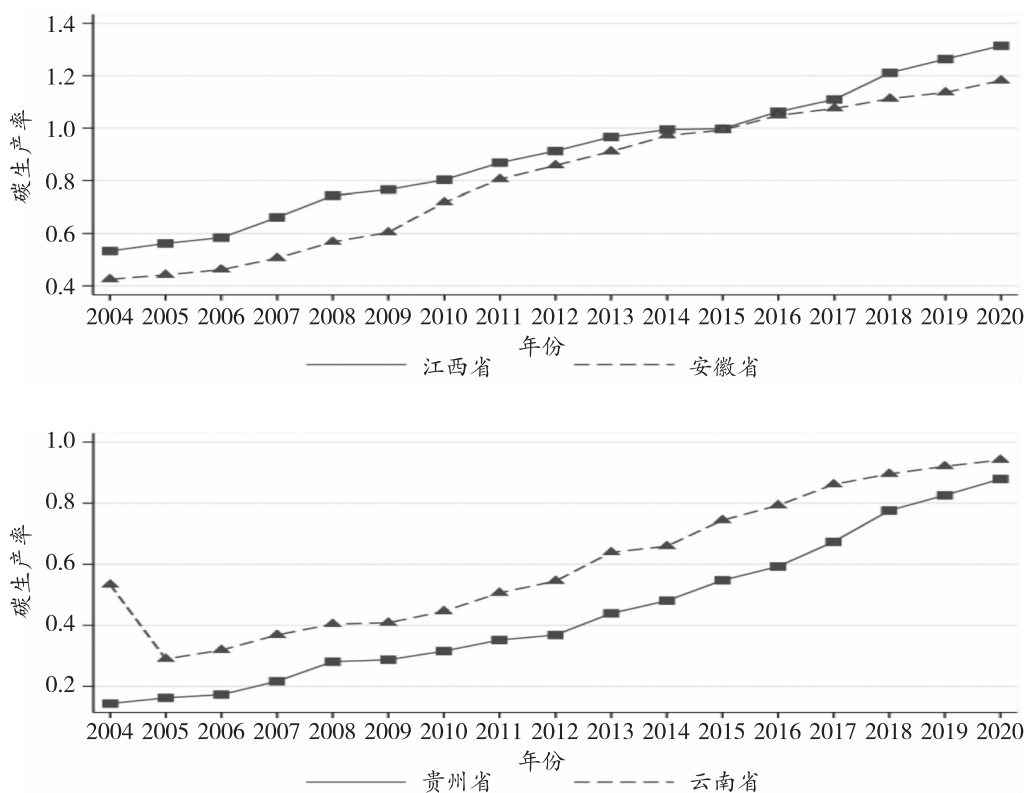


图2 试验省份与近似对照省份碳生产率变化趋势对比

#### 四、实证检验结果分析

##### 1. 回归控制分析结果

首先,运用控制组 26 个省份 2004—2015 年的各变量数据构建反事实的处理组碳生产率的变化趋势。用 26 个省份在国家生态文明试验区具体方案实施前的数据分别合成虚假的福建省、江西省和贵州省碳生产率变化曲线;并用三个试验省份的均值来刻画国家生态文明试验区总体(下文用“试验省份”来表示)的碳生产率变化趋势。采用 Lasso-OLS 方法进行回归运算,结果如表 1 所示。

以福建省为例进行说明。运用控制组 26 个省份 2004—2015 年的各变量数据拟合反事实的福建省碳生产率变化趋势,从表 1 可知,采用 Lasso-OLS 方法共选择了 8 个变量进行拟合(其中控制变量也参与合成与预测),模型回归的拟合优度高达 0.999 6,说明在国家生态文明试验区设立前,生成的虚假福建省(“合成福建省”)的碳生产率与真实值的相似度很高。按照式(3)和式(4),计算“合成福建省”的碳生产率反事实结果,并与真实值进行比较,生成拟合图(见图 3)。从图 3 可知,在设立国家生态文明试验区之前,真实福建省与“合成福建省”的碳生产率曲线贴合度很高,处理效应在 0 值附近上下浮动;而在设立国家生态文明试验区之后,两者碳生产率变化趋势出现背离,真实福建省的碳生产率大于“合成福建省”,且处理效应呈现逐年递增趋势。上述结果表明,国家生态文明试验区建设显著提高了福建省的碳生产率。江西省和贵州省以及试验省份的情况与此类似(见图 4、图 5 和图 6),不再赘述。总之,国家生态文明试验区建设有效提高了试验区的碳生产率,研究假说 H1a 得到验证。



表 1 回归控制模型估计结果

变 量	碳生产率(福建省) R <sup>2</sup> =0.999 6			变 量	碳生产率(试验省份) R <sup>2</sup> =0.999 3		
	回归系数	标准误	P 值		回归系数	标准误	P 值
产业结构高级化(河南)	0.580 0	0.281 7	0.109	碳生产率(上海)	0.133 1	0.060 3	0.079
对外开放程度(河南)	-0.206 9	0.033 1	0.003	碳生产率(湖南)	0.037 9	0.037 7	0.360
碳生产率(湖南)	0.401 0	0.023 0	0.000	碳生产率(北京)	0.033 6	0.038 9	0.427
环境保护投入(北京)	2.095 8	0.446 3	0.009	碳生产率(陕西)	0.091 4	0.037 3	0.058
碳生产率(云南)	0.087 4	0.024 1	0.022	碳生产率(天津)	0.063 3	0.032 3	0.108
城镇建设水平(云南)	0.002 1	0.001 0	0.119	碳生产率(河北)	0.612 9	0.119 0	0.004
城镇建设水平(新疆)	0.004 4	0.002 9	0.196	碳生产率(吉林)	0.209 4	0.068 5	0.028
碳生产率(河北)	0.972 6	0.075 3	0.000	城镇建设水平(黑龙江)	0.008 1	0.006 1	0.237
常数项	-0.092 9	0.056 6	0.176	常数项	-0.050 5	0.037 9	0.240

变 量	碳生产率(江西省) R <sup>2</sup> =0.999 6			变 量	碳生产率(贵州省) R <sup>2</sup> =0.999 0		
	回归系数	标准误	P 值		回归系数	标准误	P 值
碳生产率(浙江)	0.010 9	0.001 4	0.002	城镇建设水平(贵州)	0.003 0	0.002 8	0.351
碳生产率(湖南)	0.075 0	0.018 8	0.016	经济发展水平(上海)	0.080 5	0.055 3	0.219
经济发展水平(重庆)	0.044 5	0.056 2	0.473	碳生产率(广西)	0.086 5	0.099 5	0.434
经济发展水平(云南)	-0.071 1	0.055 2	0.267	城镇建设水平(甘肃)	0.002 5	0.003 1	0.459
经济发展水平(青海)	0.135 7	0.045 9	0.042	碳生产率(青海)	0.622 7	0.197 7	0.035
碳生产率(辽宁)	0.344 5	0.032 1	0.000	碳生产率(辽宁)	0.338 8	0.122 9	0.051
经济发展水平(辽宁)	0.120 1	0.028 3	0.013	城镇建设水平(辽宁)	0.012 8	0.008 9	0.223
城镇建设水平(辽宁)	0.005 4	0.002 3	0.082	碳生产率(吉林)	0.137 9	0.108 8	0.274
碳生产率(吉林)	0.001 3	0.001 2	0.361	产业结构高级化(黑龙江)	0.162 4	0.129 8	0.279
常数项	-1.946 8	0.094 1	0.000	常数项	-1.269 6	0.496 7	0.063

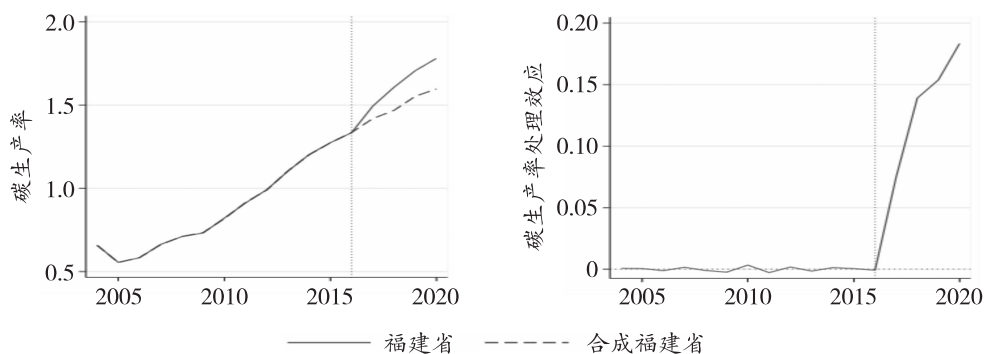


图 3 福建省建设国家生态文明试验区的碳生产率提升效应

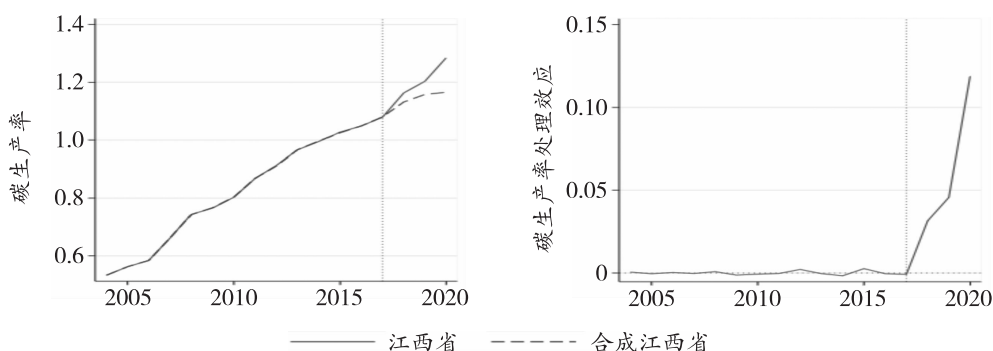


图 4 江西省建设国家生态文明试验区的碳生产率提升效应

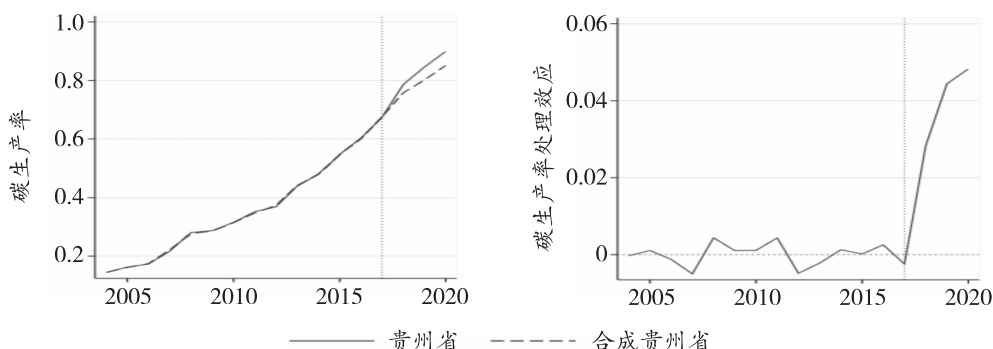


图5 贵州省建设国家生态文明试验区的碳生产率提升效应

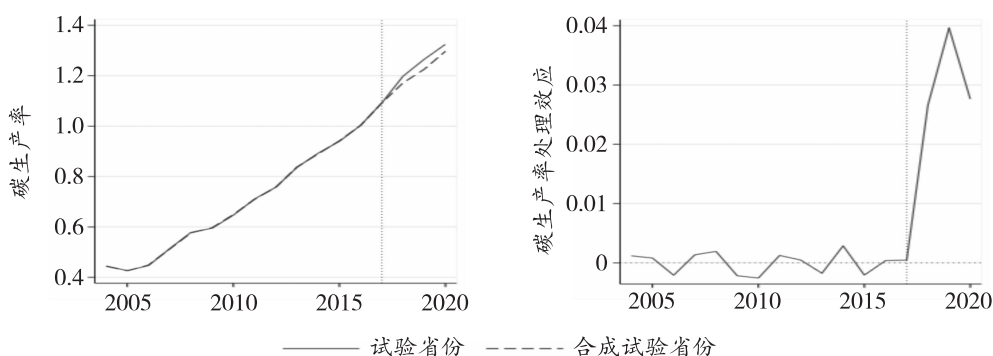


图6 国家生态文明试验区建设的平均处理效应

进一步计算三个试验省份的处理效应(见表2),可以发现,国家生态文明试验区建设对福建省的碳生产率提升效应远远大于江西省和贵州省,而江西省的碳生产率提升效应又大于贵州省,研究假说 H1b 得到验证。试验区总体(试验省份)的碳生产率提升效应较小的原因是,其碳生产率数据为福建省、江西省和贵州省的平均值,而每个省份的变化趋势和速率不同,取均值会减小数据的差异性,使得整体数据变化较为均匀,因而在合成反事实的碳生产率变化趋势时,虽然拟合优度会更高,但整体的变化趋势也较为平缓,造成对实际处理效应的低估。

表2 不同试验省份的处理效应比较

	福建省	江西省	贵州省	试验省份
总处理效应	0.551 3 万元/吨	0.196 1 万元/吨	0.120 9 万元/吨	0.090 2 万元/吨
年均处理效应	0.137 8 万元/吨	0.065 4 万元/吨	0.040 3 万元/吨	0.030 1 万元/吨

## 2. 稳健性检验

回归控制法也存在一定的缺陷,比如,可能存在其他遗漏变量或者其他政策的干扰,对预测产生影响。为验证分析结果的可靠性,本文进行如下稳健性检验:

(1)时间安慰剂检验。由于不同省份的政策强度相差较大,且各个省份碳生产率都呈现递增的趋势,若采用地区安慰剂检验仍不能排除一些内生因素的干扰,同时国家生态文明试验区设立为特定的省份,因此进行时间安慰剂检验。设定虚假的政策实施时点,对各试验省份碳生产率重新进行估计,借鉴黎鹏和闫俊(2022)的处理方式<sup>[29]</sup>,将试验区设立的时间提前两年,检验结果如图7所示。在反事实的

政策时点之前, 真实曲线与合成曲线拟合得很好; 在反事实的政策时点与真实的政策时点之间, 合成的反事实碳生产率变化曲线和真实的碳生产率变化曲线拟合度依旧较高, 变化趋势也极为相似, 没有明显的政策效应; 政策效应的拐点没有出现在反事实政策时点处, 而是依旧在真实的政策时点处。上述结果表明, 试验省份碳生产率的提升主要来源于设立国家生态文明试验区的外生冲击, 而不是其他因素的干扰, 因此, 前文的分析结论具有稳定性。

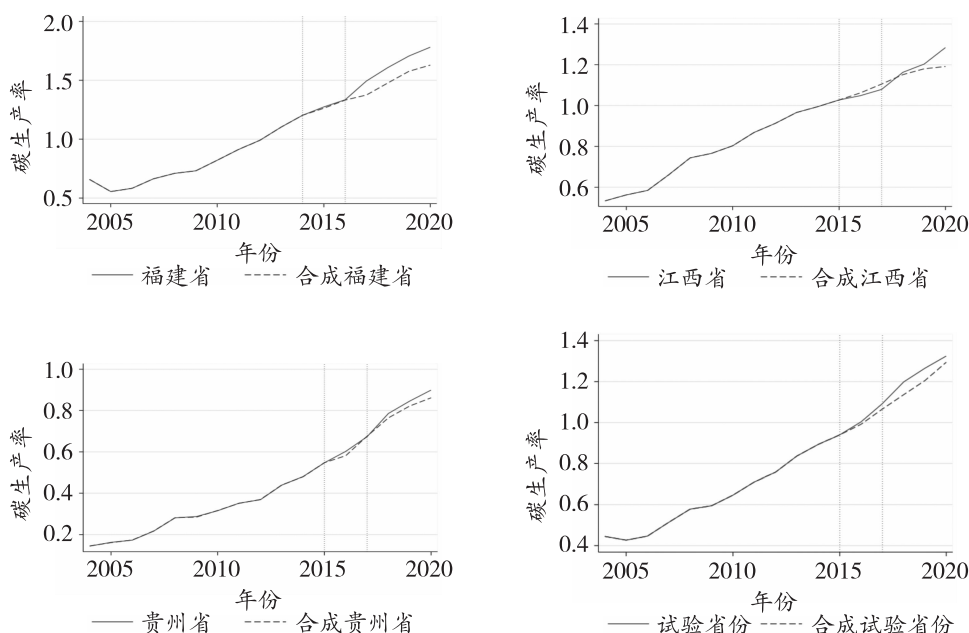


图7 时间安慰剂检验结果

(2) 排除其他政策的干扰。2016年9月,《长江经济带发展规划纲要》正式印发,明确要求长江经济带建设要走生态优先、绿色发展之路。以“生态优先、绿色发展”为核心理念的长江经济带发展战略实施必然也有利于碳生产率的提升,而江西省和贵州省都属于长江经济带。为了排除长江经济带发展战略对江西省和贵州省碳生产率的影响,选取长江经济带其他9个省市作为控制组,重新进行回归控制检验,合成结果如图8所示。可以发现,在排除长江经济带发展战略的干扰后,国家生态文明试验区建设的碳生产率提升效应依然显著存在。

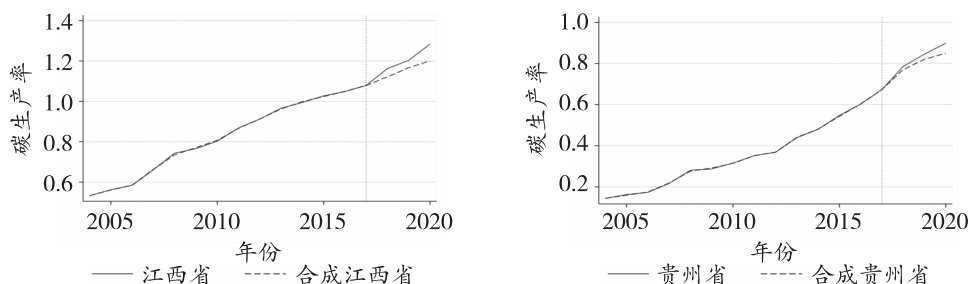


图8 排除其他政策干扰的稳健性检验结果

(3) 运用信息准则选择最优子集。借鉴 Hsiao 等 (2012) 和方诚等 (2021) 的研究<sup>[15][25]</sup>, 采用信息准则方法选择“最优子集”进行稳健性检验。使用 AIC、BIC 和 AICC 三种信息准则筛选合成值与真实值拟合程度最好的子集, 三个试验省份的最优选择都是采用 AICC 信息准则, 检验结果如图9所示。三个试

验省份的处理效应依然显著,再次验证了本文分析结论的稳定性。

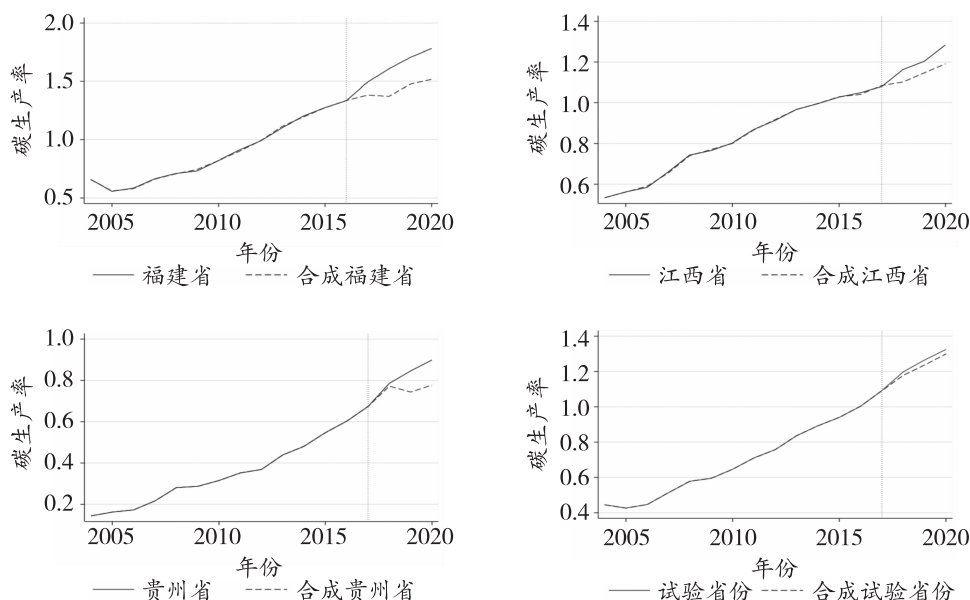


图9 使用 AICC 信息准则的稳健性检验结果

### 3. 作用机制分析

基于前文的理论分析,进一步采用回归控制法检验国家生态文明试验区建设是否产生了显著的能源消费结构改善效应、技术进步促进效应和劳动生产率提高效应。

(1) 改善能源消费结构。为了检验国家生态文明试验区建设能否改善试验区的能源结构,借鉴汪克亮等(2022)的研究<sup>[6]</sup>,采用煤炭消费占能源消费总量的比重来衡量能源消费结构,合成结果如图 10 所示。由于拟合的变量只有能源消费结构这一个变量,所以整体的拟合优度不是很高。福建省在政策实施前的拟合度为 0.887 0,产生的年均处理效应为-0.045 3;江西省在政策实施前的拟合度为 0.948 5,产生的年均处理效应为-0.023 3;贵州省在政策实施前的拟合度为 0.898 7,产生的年均处理效应为-0.040 6,试验省份在政策实施前的拟合度为 0.983 2,产生的年均处理效应为-0.037 9。从图中可知,在国家生态文明试验区实施方案出台之后,福建省、江西省和贵州省的煤炭消费在整个能源消费中的占比有较大幅度的下降,能源结构得到显著改善。可见国家生态文明试验区建设改善了试验省份的能源消费结构,有助于减少碳排放,进而提高碳生产率。由此,研究假说 H2a 得到验证。

(2) 促进技术进步。为了检验国家生态文明试验区建设能否促进试验区的技术进步水平提高,采用发明专利申请授权数的自然对数来衡量技术进步水平,运用回归控制法的合成结果如图 11 所示。从图中可知,福建省、江西省和贵州省的技术进步水平都呈现上升的趋势,福建省的技术进步水平最高,江西省次之,贵州省最低。在国家生态文明试验区设立之后,三个省份的技术进步水平依旧保持较高的上升趋势,并高于合成的反事实值,表明存在显著的政策效应。福建省在政策实施前的拟合度为 0.996 8,产生的年均处理效应为 0.684 6;江西省在政策实施前的拟合度为 0.992 1,产生的年均处理效应为 0.510 1;贵州省在政策实施前的拟合度为 0.989 3,产生的年均处理效应为 0.246 5,试验省份在政策实施前的拟合度为 0.997 4,产生的年均处理效应为 0.129 5。可见,国家生态文明试验区建设显著促进了试验区的技术进步水平提高,技术进步则有利于碳生产率提高。由此,研究假说 H2b 得到验证。

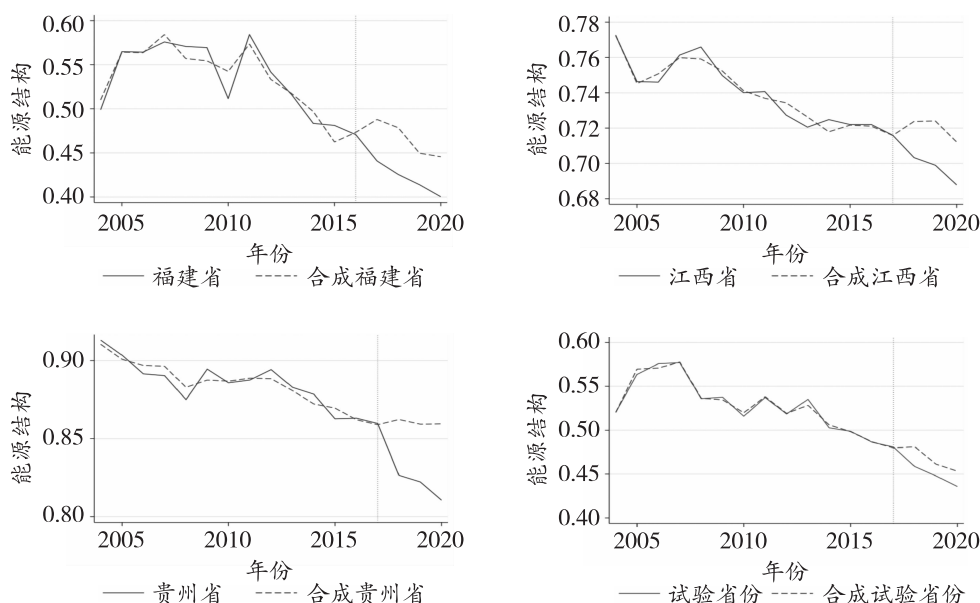


图 10 国家生态文明试验区建设的能源结构改善效应

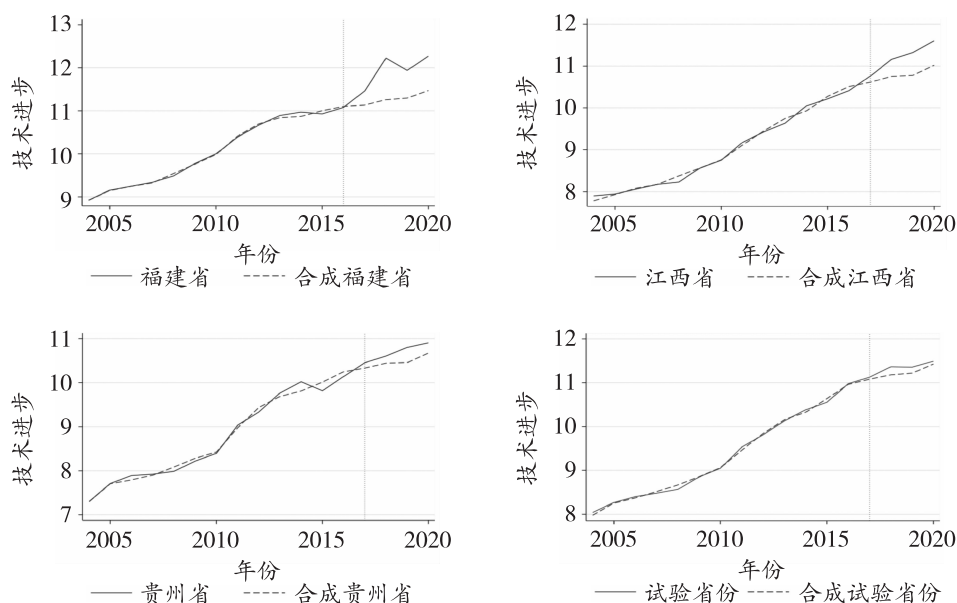


图 11 国家生态文明试验区建设的技术进步促进效应

(3) 提高劳动生产率。为了检验国家生态文明试验区建设能否促进试验区劳动生产率的提高,考虑到我国碳排放主要来源于工业部门,借鉴唐志鹏等(2017)的测算方法<sup>[18]</sup>,采用地区工业增加值与年末劳动就业人数的比值来衡量劳动生产率,运用回归控制法的合成结果如图 12 所示。三个省份的反事实合成值与真实值都产生了一定的偏离,说明存在较为明显的政策效应。福建省在政策实施前的拟合度为 0.999 0,产生的年均处理效应为 0.938 4;江西省在政策实施前的拟合度为 0.998 5,产生的年均处理效应为 0.209 5;贵州省在政策实施前的拟合度为 0.999 2,产生的年均处理效应为 0.140 1,试验省份在政策实施前的拟合度为 0.999 1,产生的年均处理效应为 0.377 2。可见,国家生态文明试验区建设显著提高了试验区的劳动生产率,进而提高了碳生产率。由此,研究假说 H2c 得到验证。

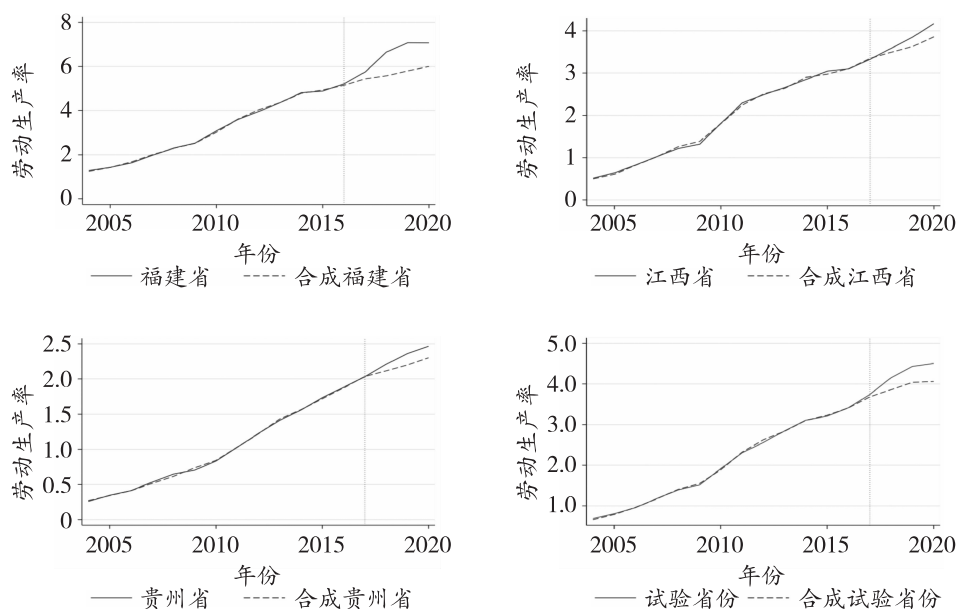


图 12 国家生态文明试验区建设的劳动生产率提高效应

## 五、结论与启示

在新发展阶段,设立国家生态文明试验区是加快推进生态文明建设的重要举措。自 2016 年和 2017 年设立第一批国家生态文明试验区以来,三个试验省份(福建、江西、贵州)积极开展生态文明体制改革综合试验,为完善生态文明制度体系探索路径、积累经验,有效促进了本地区的绿色可持续发展。本文利用 2004—2020 年 29 个省份的面板数据,采用回归控制法实证检验国家生态文明试验区建设对试验区碳生产率的影响及其作用机制,结果显示:(1)福建省、江西省、贵州省和其他 26 个省份(平均)的碳生产率都呈现逐年递增的趋势,三个试验省份的碳生产率增长率均大于 26 省份的均值,且在试验区设立后增长更快;与对照省份相比,试验区设立之后,福建省比浙江省、江西省比安徽省、贵州省比云南省有更快的碳生产率增长。(2)设立试验区的碳生产率提升效应明显,福建省、江西省、贵州省的年均处理效应分别为 0.137 8 万元/吨、0.065 4 万元/吨、0.040 3 万元/吨,表明国家生态文明试验区建设显著促进了试验区的碳生产率提升,该结论在时间安慰剂检验、排除其他政策干扰和用信息准则选择最优子集等稳健性检验中依然成立。(3)设立试验区在能源消费结构、技术进步水平、劳动生产率等方面产生了明显的政策效应,表明国家生态文明试验区建设通过改善能源消费结构、促进技术进步、提高劳动生产率等路径有效提升了试验区的碳生产率。

本文研究证明,国家生态文明试验区建设显著提升了试验区的碳生产率,改善能源结构、促进技术进步和提高劳动生产率是其主要的影 响路径。基于此,提出以下政策建议:第一,持续推进国家生态文明试验区建设,探索可复制推广的绿色可持续发展路径。因地制宜地在全国范围内设立更多的国家生态文明试验区,不断总结推广绿色发展的有效模式和经验,充分发挥国家生态文明试验区的示范作用,由点及面地带动整体生态文明建设,并有效促进低碳绿色发展。第二,进一步优化各地区的能源消费结构,降低煤炭等化石能源的使用,加大非化石能源和新能源的开发利用。积极推动传统高耗能产业的转型升级,促进新能源产业的发展和进步;对于高污染高排放的企业要强化环境规制,倒逼企业积极发展绿色低碳技术,促使企业转变能源消费模式,切实减少煤炭等化石能源的使用。第三,构建市场导向的



绿色技术创新体系,充分发挥技术进步对生态文明建设的引擎作用。政府应当加大科研投入,鼓励绿色技术创新,推进科研成果转化和应用,提高能源的利用效率和企业的生产率,激励和支持技术密集型产业和低碳技术创新型企业的高质量发展。第四,提高生产部门的劳动生产率,避免粗放式劳动投入。通过教育培训等方式提升劳动力综合素质,增加高质量的劳动要素投入,重视人才培养,避免劳动要素错配等不利于碳生产率提升的问题出现。

本文采用回归控制法验证了国家生态文明试验区建设的碳生产率提升效应及其若干作用机制,取得了有意义的研究成果,但由于篇幅和方法的限制,还存在进一步改进和拓展的空间:一是本文采用的回归控制法是一种点估计的预测方法,其结果是否具有统计学意义及显著性还需要进一步验证;二是研究的时间跨度可延展,未来数据更新后可进行补充研究;三是还可以进一步研究其他影响机制。

#### 参考文献:

- [1] 闻娟,凌常荣. 国家生态文明试验区旅游效率评价研究[J]. 生态经济,2018,34(6):228-231.
- [2] HOU J,ZHOU R,DING F, et al. Does the construction of ecological civilization institution system promote the green innovation of enterprises? A quasi-natural experiment based on China's national ecological civilization pilot zones[J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,29(44):67362-67379.
- [3] WANG H,GENG Y,ZHANG J, et al. Ecological civilization demonstration zone, air pollution reduction, and political promotion tournament in China: Empirical evidence from a quasi-natural experiment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(22):11880.
- [4] 谢晗进,毛瑜芮,李成. 国家生态文明建设与空气质量改善——来自合成控制法与 DID 的双重验证[J]. 生态经济,2021,37(2):209-215+229.
- [5] 梁琦,肖素萍,刘玉博. 环境政策对城市生态效率的影响与机制研究——基于生态文明先行示范区的准自然实验[J]. 西安交通大学学报(社会科学版),2022,42(3):61-70.
- [6] 汪克亮,许如玉,张福琴,等. 生态文明先行示范区建设对碳排放强度的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(7):57-70.
- [7] 胡剑波,叶树. 试点政策对省域碳排放强度的影响及其空间溢出效应——以国家生态文明试验区为例[J]. 城市发展研究,2022,29(09):33-41+83+53.
- [8] 陈洪飞,黄顺春. 有绿水青山就有金山银山——基于闽赣黔国家生态文明试验区的证据[J]. 生态经济,2022,38(8):204-212.
- [9] LIU D,LIU T G,ZHENG Y, et al. The construction efficiency study of China National Ecological Civilization Pilot Zone with network SBM model:A city-based analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research,2022.
- [10] 陈林,伍海军. 国内双重差分法的研究现状与潜在问题[J]. 数量经济技术经济研究,2015,32(7):133-148.
- [11] 罗世华,王栋. 碳交易政策对省域全要素能源效率的影响效应[J]. 经济地理,2022,42(7):53-61.
- [12] 刘生龙,周绍杰,胡鞍钢. 义务教育法与中国城镇教育回报率:基于断点回归设计[J]. 经济研究,2016,51(2):154-167.
- [13] ABADIE A,DIAMOND A,HAINMUELLER J. Synthetic control methods for comparative case studies, estimating the effect of california's tobacco control program[J]. Journal of the American Statistical Association,2010,105(490):493-505.
- [14] 沈艳,李星宇,周前坤. 大数据背景下面板数据政策评估的估计和推断[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(6):120-139.
- [15] HSIAO C,CHING H S,WAN S K. A panel data approach for program evaluation:Measuring the benefits of political and economic integration of Hong Kong with Mainland China[J]. Journal of Applied Econometrics,2012,27(5):705-740.
- [16] 李小平,余东升,余娟娟. 异质性环境规制对碳生产率的空间溢出效应——基于空间杜宾模型[J]. 中国软科学,



2020(4):82-96.

- [17] 杨晓妹,庞倩男,王有兴. 环境税对绿色创新的空间溢出效应——基于政府环境监管调节作用的分析[J]. 中国人口·资源与环境,2023,33(1):50-60.
- [18] 张成,王建科,史文悦,等. 中国区域碳生产率波动的因素分解[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(10):41-47.
- [19] 李荣杰,张磊,赵领娣. 中国清洁能源使用、要素配置结构与碳生产率增长——基于引入能源和人力资本的生产函数[J]. 资源科学,2016,38(4):645-657.
- [20] 唐志鹏,刘卫东,宋涛. 基于混合地理加权回归的中国省域碳生产率影响因素分析[J]. 资源科学,2017,39(12):2223-2232.
- [21] 马丹,朱清,杨馥岑. 绿色金融、环境规制与绿色技术创新效率——基于中国省际面板数据的实证分析[J]. 杭州师范大学学报(社会科学版),2023,45(1):92-107.
- [22] 张成,陆旸,郭路,等. 环境规制强度和生产技术进步[J]. 经济研究,2011,46(2):113-124.
- [23] 曹斯蔚. 雾霾污染的金融风险演化路径研究——来自中国工业企业的经验证据[J]. 西部论坛,2022,32(5):26-43.
- [24] OUYABG M,PENG Y. The treatment-effect estimation:A case study of the 2008 economic stimulus package of China[J]. Journal of Econometrics,2015,188(2):545-557.
- [25] 方诚,陈强. 棚户区改造安置的第三种方式——以安庆市的房票政策为例[J]. 经济学(季刊),2021,21(2):733-754.
- [26] 洪扬. 全面深化改革对中国经济发展的影响效应与作用路径——基于回归控制法的实证检验[J]. 软科学,2023,37(2):51-58.
- [27] LI K T,BELL D R. Estimation of average treatment effects with panel data:Asymptotic theory and implementation[J]. Journal of Econometrics,2017,197(1):65-75.
- [28] 杨庆,江成涛,蒋旭东,等. 高技术产业集聚能提升碳生产率吗[J]. 宏观经济研究,2021(4):141-159.
- [29] 黎鹏,闫俊. 自由贸易区的设立能够提升地缘经济关系水平吗?——来自 CAFTA 的实证[J]. 深圳社会科学,2021,4(2):35-47.

## Has the Construction of National Ecological Civilization Pilot Zone Increased Carbon Productivity?: an Empirical Analysis Based on Regression Control Method

HU Jian-bo, XIANG Gang

(School of Economics, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** The establishment of national ecological civilization pilot zones is an important step for China to explore the path of low-carbon and green development in the new stage of development. This study examines the impact of the construction of these pilot zones on the carbon productivity of the provinces where they are located, analyzes underlying factors, and provides evidence and experience for green and low-carbon development and ecological civilization construction in other regions. However, there is currently limited research on the carbon productivity of national ecological civilization pilot zones, especially a lack of in-depth analysis of their influencing factors.

Using panel data on carbon productivity and other variables from 29 provinces in China (excluding Tibet Autonomous Region, Hainan Province, Hong Kong, Macao, and Taiwan) from 2004 to 2020, this paper

analyzes the trends in carbon productivity among different provinces and investigates whether the construction of national ecological civilization pilot zones has improved the carbon productivity of the pilot provinces. The paper also further analyzes its influencing factors through empirical tests using regression control methods. The results show that carbon productivity in various provinces and cities in China has been increasing in recent years, with the growth rates of Fujian, Jiangxi, and Guizhou provinces higher than the average of the other 26 provinces. The difference became even more pronounced after policy implementation, and the conclusion remained valid after a comparative analysis with similar control provinces. The establishment of national ecological civilization pilot zones has significantly improved the carbon productivity of the pilot provinces, and this conclusion still held after robustness tests using time-placebo checks, other policy interferences, and information criteria for selecting optimal subsets. Further analysis of its influencing factors revealed that the pilot provinces had improved carbon productivity by optimizing their energy structure, promoting technological progress, and increasing labor productivity.

Compared with the existing literature, this paper focuses on the first batch of pilot provinces of national ecological civilization pilot zones in terms of research objects, and studies the impact of the establishment of national ecological civilization pilot zones on the carbon productivity of the pilot provinces, which enriches and expands the relevant empirical studies of national ecological civilization pilot zones and provides experiences and suggestions for the construction of ecological civilization in China. In terms of methodology, this paper adopts a counterfactual research approach and uses regression control methods for empirical testing. This method is particularly suitable for samples with a small number of pilot objects and can yield more accurate empirical results.

This study shows that the establishment of national ecological civilization pilot zones significantly improves the carbon productivity of the pilot provinces, and this policy effect is sustainable. The pilot provinces have improved carbon productivity by optimizing their energy structure, promoting technological progress, and increasing labor productivity. Therefore, the construction of national ecological civilization pilot zones should be further promoted to provide replicable empirical evidence for green and low-carbon development in other regions.

**Key words:** National Ecological Civilization Pilot Zone; regression control method; carbon productivity; energy structure; technological progress; labor productivity

**CLC number:** F205; C9127

**Document code:** A

**Article ID:** 1674-8131(2023)02-0043-17

(编辑:刘仁芳)