

# 国家生态文明试验区建设有助于提升碳排放效率吗？

## ——基于合成控制法的实证分析

张明斗,代洋洋

(东北财经大学 经济学院,辽宁 大连 116025)

**[摘要]**以2016年起分批设立的国家生态文明试验区为准自然实验,借助合成控制法实证评估其建设对各试验区碳排放效率的影响效果及作用机制。研究发现,国家生态文明试验区建设有助于提升福建省和江西省的碳排放效率,且对福建省的提升幅度高于江西省,经安慰剂检验、排序检验、稀疏合成控制检验、DID检验后结论依旧成立。效率分解发现,国家生态文明试验区建设提升了福建省碳排放的规模效率变化指数,对江西省碳排放的规模效率变化指数和纯技术效率变化指数均有促进作用。机制分析发现,促进绿色技术创新、改善能源利用效率分别作为内生动力和外部途径,均能在国家生态文明试验区建设提升碳排放效率的过程中发挥积极作用。研究为全面推进我国生态文明建设、早日实现碳达峰和碳中和目标提供了理论参考和政策启示。

**[关键词]**碳排放效率;国家生态文明试验区;绿色技术创新;能源利用效率;合成控制法

**[中图分类号]**F061.5 **[文献标志码]**A **[文章编号]**2096-3114(2023)06-0101-10

### 一、引言

进入21世纪以来,海平面上升、冰川融化、能源安全问题等气候风险事件频发,以碳减排为核心的绿色发展方式逐渐得到了世界各国的认可,现已成为人类共识。作为全球最大的碳排放国和能源消费国,我国十分重视碳排放治理。2020年,习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出碳达峰和碳中和目标(简称“3060”目标),并将其纳入生态文明建设整体布局。随后,中共中央、国务院发布的《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》,为落实“3060”目标做出了详细指引。可见,我国为早日实现“3060”目标和绿色发展做出了巨大努力,生态文明建设作为关系人民福祉、关乎民族永续发展的根本大计,更是其中不可或缺的一环。

2012年11月,党的十八大首次提出了生态文明建设的战略决策,并详细阐述了生态文明建设的宏伟蓝图。为贯彻这一战略部署,国家发改委等六部委于2013年12月发布了《关于印发国家生态文明先行示范区建设方案(试行)的通知》,旨在通过推动绿色、循环、低碳发展等途径提升生态文明水平。自2016年起,中共中央、国务院决定在全国范围内推广国家生态文明试验区建设,先后确立了福建、江西、贵州和海南四个地区。随着节能“双控”压力的加大,应对气候变化和二氧化碳减排工作加快推进,生态文明的内涵进一步发展、丰富,生态文明建设已进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。因此,全面考察国家生态文明试验区建设对碳排放效率的影响,汲取碳排放效率提升的经验,对达成碳达峰和碳中和目标、建成人与自然和谐共生的中国式现代化具有重要启示。

早期研究主要从理论层面对生态文明的理论和现实基础、科学内涵、基本路径等进行了系统性阐述,

**[收稿日期]**2023-07-19

**[基金项目]**国家社会科学基金重大项目(21ZDA099);辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2007123);辽宁省经济社会发展研究项目(2024lslslybkt-012)

**[作者简介]**张明斗(1983—),男,山东济宁人,东北财经大学经济学院教授,博士,主要研究方向为城市经济,通信作者,邮箱:zhangmingdou0537@126.com;代洋洋(1998—),男,山东泰安人,东北财经大学经济学院硕士生,主要研究方向为产业经济。

近年来则涌现出了许多与之相关的实证研究。首先,学者们基于生态城市健康指数数据,从生态经济文明、生态社会文明和生态环境文明三个角度等对城市或者省份的生态文明水平进行了详细测度<sup>[1-3]</sup>。其次,不乏学者利用生态文明先行示范区的准自然实验探究生态文明建设的影响效应。从环境与健康角度看,生态文明先行示范区建设能够优化本地和邻近示范区的空气质量<sup>[4]</sup>,抑制环境污染,降低发病率和死亡率,即改善环境质量、提升公众健康水平<sup>[5]</sup>;分地区来看,示范区建设也能够提升福建省和贵州省的生态全要素生产率,但对江西省的提升幅度并不明显<sup>[6]</sup>;从碳排放角度来看,示范区建设能发挥碳减排效果<sup>[7]</sup>,降低碳排放强度,且对福建省、贵州省和云南省碳排放强度的降低作用尤为明显<sup>[8]</sup>;从企业角度来看,示范区建设会促使业绩处于增长状态的当地企业增加技术投资<sup>[9]</sup>。再次,亦有研究关注国家生态文明试验区的创新效应,指出其建设既有助于促进企业绿色创新也有利于省级绿色技术创新水平的提升<sup>[10]</sup>。最后,有学者从生态文明的建设细节出发,发现水生态文明城市试点对区域减排和绿色创新具有促进作用<sup>[11]</sup>,有助于降低水污染强度<sup>[12]</sup>;但是,该政策的实施抑制了城市绿色全要素生产率的改善,挤压了政府的技术支出,在增加企业合规成本的同时,并未发挥创新补偿效应<sup>[13]</sup>。

如何降低碳排放规模、提升碳排放效率,是当前学界关注的重点议题。现有研究从经济发展、技术进步、产业结构升级、区域一体化和数字经济发展等角度对碳排放的决定因素进行了较为丰富的讨论<sup>[14-18]</sup>,与本文密切相关的文献主要关注各类环境政策对碳减排效率的影响。王勇等、Chai 等分别关注碳排放权交易试点和新能源示范城市政策,研究发现两个政策的实施均有助于提升碳排放效率<sup>[19-20]</sup>。上述文献为本文从环境政策角度考察国家生态文明试验区建设对碳排放效率的影响奠定了扎实的理论基础。

梳理上述文献可以发现,尽管现有研究从多个角度对生态文明的影响效应、碳排放效率的影响因素进行了系统性探究,但是对国家生态文明试验区建设的关注不足,缺乏从生态文明角度探究对碳排放效率影响的研究,更未从省份个体角度出发对国家生态文明试验区建设的政策效应展开细致讨论。为此,本文在使用 Super-SBM 模型对 2000—2020 年省级碳排放效率进行测度的基础上,借助 2016 年起逐步开展的国家生态文明试验区这一准自然实验,采用合成控制法研究国家生态文明试验区建设如何影响各个试验区碳排放效率的问题。相比于已有文献,本文可能的边际贡献体现在:首先,本文基于国家生态文明试验区的准自然实验,探究生态文明建设对各试验区碳排放效率的影响,这不仅在一定程度上拓展有关国家生态文明试验区政策效应的研究内容,而且丰富碳排放效率的研究体系;其次,本文将碳排放效率分解为规模效率变化指数和纯技术效率变化指数,通过结构解析进一步审视国家生态文明试验区建设对碳排放效率的影响,有助于准确把握碳排放效率提升的本质;最后,本文从内在动力层面的绿色技术创新和外部途径层面的能源利用效率改善两条渠道,揭示国家生态文明试验区建设影响碳排放效率的内在机制,为更好地落实试验区试点政策、提升碳排放效率提供理论和经验解释。

## 二、理论分析与研究假设

为落实生态文明体制改革要求、切实解决关系人民群众切身利益的资源环境问题、实现生态文明领域国家治理体系和治理能力现代化,国家生态文明试验区作为承担国家生态文明体制改革创新试验的综合性平台应运而生。一方面,国家生态文明试验区督促地区建立资源总量管理和节约制度,实施污染物排放总量和强度的双控行动,资源利用效率大幅度提高,碳排放效率也得到了极大提升;另一方面,试验区对生态环境质量的重视会提高资源使用和污染物排放的难度,提升二氧化碳排放的边际成本,抑制地区碳排放,提高碳排放效率。具体来看,国家生态文明试验区建设可能通过在内生动力上发挥绿色技术创新效应、在外部途径上改善能源利用效率对碳排放效率产生影响。

在内生动力上,绿色技术创新为国家生态文明试验区助力碳排放效率的提升注入了创新源泉。环境库兹涅茨曲线假说认为,经济增长和环境污染之间呈现倒 U 形关系,经济规模、技术进步、制度因素等能够影响上述关系,而技术进步是降低能源消耗、改善环境质量的根本途径<sup>[21]</sup>。一方面,国家生态文

明试验区建设推动了绿色技术创新水平的提升。国家生态文明试验区建设既通过减税降费、补贴奖励、优惠贷款等激励措施为企业和科研机构提供充分的资金和技术支持,缓解了绿色技术创新面临的融资约束,又依托对绿色技术创新的需要,从需求端刺激企业、科研院所和政府重视新能源、清洁能源等技术的研发和应用。同时,试验区建设吸引了大量的高端人才和企业集聚,形成了科技创新的生态系统,通过知识共享、创新合作等形式发挥知识溢出的外部性,促进绿色技术创新水平的提升。另一方面,绿色技术创新是解决环境污染问题的有效手段,能够促进碳排放效率的提升<sup>[22]</sup>。绿色技术创新有助于推动企业清洁生产和研发,不断提升节能力度和能源绿色消费,同时催生出新的能源消费方式,赋能产业结构低碳绿色转型发展,在带动清洁部门总产出增加的同时并未造成碳排放总量的明显增加,甚至在一定程度上会降低碳排放,从而实现碳排放的源头防控,提升碳排放效率。

在外部途径上,能源利用效率为国家生态文明试验区助力碳排放效率的提升赋予了能源保障。一方面,国家生态文明试验区建设能够增强能源利用效率。首先,政府从政策层面鼓励企业和居民节约能源、推广能源高效利用技术,并通过制定严格的能源消耗和管理规定,鼓励企业采用更加节能和环保的技术和工艺,进而促进能源利用效率的提升。其次,国家生态文明试验区建设鼓励和推广绿色能源的使用,减少对传统能源的依赖,有助于优化能源利用效率。最后,试验区建设依托能源交易机制降低能源成本,并提高能源的经济成本,从而激励企业和居民采用更加节能和环保的技术和工艺,能源利用效率得以有效改善。另一方面,能源利用效率的强化通常意味着在生产或消费中使用更少的能源,以实现相同的生产或消费目标。在能源需求量相同的情况下,提高能源利用效率可以减少能源消耗,降低能源需求,提升碳排放效率。同时,碳排放作为一种负外部性产出,会对环境质量造成不良影响,而企业和个人在生产 and 消费过程中往往难以内部化这些环境治理成本,但能源利用效率的提升可以减少单位能源消耗所产生的碳排放量,降低环境负担,发挥积极的外部性作用。基于上述理论分析,本文提出如下研究假设:

假设 1:国家生态文明试验区建设能够提升碳排放效率。

假设 2:国家生态文明试验区建设能够通过促进内在动力层面的绿色技术创新和改善外部途径层面的能源利用效率提升碳排放效率。

### 三、研究设计

#### (一) 模型构建

本文基于国家生态文明试验区建设构建准自然实验,将属于试验区的 4 个省份作为实验组,将其他 26 个(不含西藏自治区和港澳台地区)不属于试验区的省(区市)作为控制组,进而通过政策效应评估方法来考察国家生态文明试验区建设对碳排放效率的影响。合成控制法(SCM)可以有效弥补 DID 在政策评估时政策不随机的缺陷,该方法最早由 Abadie 等提出<sup>[23]</sup>,随后 Abadie、Arkhangelsky 等对其进行了进一步完善<sup>[24-26]</sup>,其最大的优势是基于数据驱动方式来选择最优权重,避免了主观选择控制组的随意性。为此,本文参考 Abadie 等的研究<sup>[24]</sup>,使用合成控制法探究国家生态文明试验区建设对碳排放效率的影响,具体模型构建如下:

假设存在  $J+1$  个观测地区、 $T$  个观测期,同时不妨设只有第一个省份在  $T_0 \in \{1, 2, \dots, T-1\}$  期开始成为国家生态文明试验区,剩余  $J$  个没有成为试验区的省份作为潜在控制组。设  $Y_{it}^N$  和  $Y_{it}^T$  分别为不属于试验区和属于试验区的第  $i$  个省份在  $t$  时刻的结果变量,其中  $i = 1, 2, \dots, J+1, t = 1, 2, \dots, T$ 。假定成为试验区并不会对政策冲击前的结果变量产生影响,所以对于  $\forall t \in \{1, 2, \dots, T_0\}$  和  $\forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 均有  $Y_{it}^T = Y_{it}^N$ , 同时用  $\alpha_{it} = Y_{it}^T - Y_{it}^N$  表示某省份成为国家生态文明试验区对碳排放效率的因果效应,则会有:

$$Y_{it}^T = Y_{it}^N + \alpha_{it} \quad (1)$$

令  $D_{it}$  表示国家生态文明试验区的虚拟变量,如果第  $i$  个省份在  $t$  时刻属于试验区,则令  $D_{it} = 1$ , 否则取值为 0。因此,省份  $i$  在  $t$  时刻的结果变量可以表示为:

$$Y_{it}^I = Y_{it}^N + \alpha_{it} D_{it} \quad (2)$$

由于只假设第一个省份在  $T_0 (1 \leq T_0 < T)$  期时成为国家生态文明试验区,所以有:

$$D_{it} = \begin{cases} 1 & i = 1 \text{ 且 } t > T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

合成控制法的最终目的是估计  $\alpha_{iT_0+1}, \alpha_{iT_0+2}, \dots, \alpha_{iT}$ 。由于本文假设第一个地区在  $T_0$  开始受到试验区建设的影响,其余  $J$  个地区在所有时期均未受到影响,所以对于  $t > T_0$ ,试验区的政策效应为:

$$\alpha_{it} = Y_{it}^I - Y_{it}^N = Y_{it} - Y_{it}^N \quad (4)$$

鉴于  $Y_{it}^I$  是可观测的,故仅通过估计  $Y_{it}^N$  即可得到  $\alpha_{it}$  的估计值。为此,本文参考 Abadie 等的研究<sup>[24]</sup>,给出  $Y_{it}^N$  的表达式,如式(5)所示:

$$Y_{it}^N = \delta_t + \theta_i Z_i + \lambda_i \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中,  $\delta_t$  表示影响碳排放效率的时间趋势项;  $Z_i$  是  $(r \times 1)$  维向量,表示一系列不受政策干预的可观测协变量;  $\theta_i$  表示  $(1 \times r)$  维的未知参数向量;  $\lambda_i$  表示具有不同因子载荷的未知公共因子向量;  $\mu_i$  表示地区固定效应;  $\varepsilon_{it}$  是每个地区不可观测的短暂冲击,满足地区层面均值为 0 假定。

值得注意的是,式(5)是对传统双重差分模型的拓展,其允许存在随时间变化的不可观测因素,即  $\lambda_i$  不再为常数;同时,模型也并不排除  $Y_{it}^N$  为时变可测行列式的情况,即向量  $Z_i$  在不受政策干预时可以包含干预前和干预后时变变量的取值。例如,假设  $T = 2, T_0 = 1$ , 当  $i = 1, 2, \dots, J+1$  且  $t = 1, 2$  时,  $Z_{it}$  是一个标量随机变量。如果  $Z_i = (Z_{i1} Z_{i2})$ ,  $\theta_1 = (\beta_0), \theta_2 = (0\beta)$ , 则有  $\theta_i Z_i = Z_{it} \beta$ 。此外,式(5)允许  $Z_i, \mu_i, \varepsilon_{it}$  是相互独立的。

为求解  $Y_{it}^N$ , 本文考虑一个  $(J \times 1)$  维的权重向量  $W = (\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{J+1})$ , 其中,对  $\forall j = 2, 3, \dots, J+1$  都有  $\omega_j \geq 0$ , 且  $\omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_{J+1} = 1$ 。向量  $W$  的每个特征值均代表一个潜在的合成控制,即控制地区的特定加权平均值。对每个控制组地区按权重  $W$  加权后得到碳排放效率的取值为:

$$\sum_{j=2}^{J+1} \omega_j Y_{jt} = \delta_t + \theta_t \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j Z_j + \lambda_t \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j \mu_j + \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j \varepsilon_{jt} \quad (6)$$

假设存在  $(T_0 \times 1)$  维向量  $K = (k_1, k_2, \dots, k_{T_0})$ , 那么干预前结果变量的线性组合便定义为  $\bar{Y}_i^K = \sum_{s=1}^{T_0} k_s Y_{is}$ 。为了进行简化,首先考虑  $k_1 = k_2 = \dots = k_{T_0} = 1/T_0$ , 则  $\bar{Y}_i^K = T_0^{-1} \sum_{s=1}^{T_0} Y_{is}$  可用以表示国家生态文明试验区建设前碳排放效率的简单平均。

假设存在权重向量  $(\omega_2^*, \omega_3^*, \dots, \omega_{J+1}^*)$ , 使得:

$$\sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* \bar{Y}_j^K = \bar{Y}_1^K \text{ 且 } \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* Z_j = Z_1 \quad (7)$$

如果  $\sum_{s=1}^{T_0} \lambda_s / T_0 \neq 0$ , 则有:

$$Y_{it}^N - \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* Y_{jt} = \frac{\lambda_t}{\sum_{s=1}^{T_0} \lambda_s / T_0} \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* \frac{1}{T_0} \sum_{s=1}^{T_0} (\varepsilon_{js} - \varepsilon_{1s}) - \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* (\varepsilon_{jt} - \varepsilon_{1t}) \quad (8)$$

Abadie 等的证明指出,在标准条件下,如果政策干预前的时期数量远大于干预后的时期数,则式(8)右侧的均值将接近于 0<sup>[24]</sup>, 所以政策效果  $\alpha_{it}$  的估计值为:

$$\alpha_{it} = Y_{it} - \sum_{j=2}^{J+1} \omega_j^* Y_{jt}, t \in \{T_0 + 1, T_0 + 2, \dots, T\} \quad (9)$$

当  $(\bar{Y}_1^K, Z_1)$  属于  $\{(\bar{Y}_2^K, Z_2), (\bar{Y}_3^K, Z_3), \dots, (\bar{Y}_{J+1}^K, Z_{J+1})\}$  的凸包时,式(7)便得以成立,进而可求得  $\alpha_{it}$ 。然而,实际中并不存在权重  $\omega_j^*$  使式(7)精确成立,只能对控制组进行合成控制使式(7)近似成立。

假定  $X_1 = (Z_1', \bar{Y}_1^{K1}, \dots, \bar{Y}_1^{Km})$  是试验区确立前  $(k \times 1)$  维的地区特征向量,  $X_0$  是  $(k \times J)$  维向量,其第

$j$ 列表示第 $j$ 个地区试验区确立前相应的特征变量,本文将通过计算 $X_1$ 和 $X_0W$ 之间的最小距离 $X_1 - X_0W$ 来确定权重 $W^*$ :

$$X_1 - X_0W_V = \sqrt{(X_1 - X_0W)'V(X_1 - X_0W)} \quad (10)$$

其中, $V$ 是 $(k \times k)$ 维的对称半正定矩阵,可以通过使用 Abadie 等开发的 Stata 程序中的 Synth 包计算求得<sup>[24]</sup>,进而使合成地区在试验前能够更好地接近国家生态文明试验区的碳排放效率。

## (二) 变量选取

### 1. 被解释变量:碳排放效率(cee)

本文使用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型测算碳排放效率,以解决效率的高估问题以及投入、产出效率的非径向调整问题<sup>[27]</sup>,由于篇幅所限,具体模型不再赘述。碳排放效率是资本投入、劳动投入和能源消耗共同作用的结果。具体地,选取资本存量作为资本投入的表征变量,参考张军等的做法<sup>[28]</sup>,采用永续盘存法以 9.60% 的经济折旧率对各省固定资本存量进行估算,并以 2000 年为基期使用各省的固定资产价格指数进行平减;选取年末就业人数作为劳动投入的表征变量;选取各省煤炭、焦煤、石油、原油等各类能源的消费总量(转换为万吨标煤)作为能源消耗的表征变量;期望产出使用以 2000 年为基期的实际 GDP 衡量;非期望产出使用各省份的二氧化碳排放量衡量,参考 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会编制的《国家温室气体清单指南》中的计算公式求得。

### 2. 核心解释变量:国家生态文明试验区建设

本文以中共中央办公厅、国务院办公厅于 2016 年陆续印发的《国家生态文明试验区实施方案》作为准自然实验,将方案中提及的福建省、江西省、贵州省和海南省作为实验组。同时,西藏自治区、港澳台数据缺失严重,予以剔除,故将除试验区以外的 26 个省份作为控制组。

### 3. 协变量

参考邵帅等的研究<sup>[29]</sup>,本文选取如下协变量:(1) 经济发展水平( $\ln pgdp$ ),用人均 GDP(2000 年不变价)衡量,并取自然对数;(2) 产业结构状况( $stru$ ),用第三产业增加值与第二产业增加值的比衡量;(3) 政府干预程度( $gover$ ),用政府支出占 GDP 的比重衡量;(4) 科技支出水平( $tec$ ),用科学技术支出占政府支出的比重衡量;(5) 对外开放程度( $fdi$ ),用外商直接投资金额占 GDP 的比重衡量;(6) 交通运输水平( $tran$ ),用每万人货运量衡量。

### 4. 机制变量

基于上述理论分析,本文选取如下机制变量:(1) 绿色技术创新水平( $GT$ ),本文参考李青原等的研究<sup>[30]</sup>,将绿色专利授权数取自然对数作为绿色技术创新水平的表征变量;(2) 能源利用效率( $EC$ ),本文参考黄和平和李莹的研究<sup>[31]</sup>,使用单位 GDP 能耗作为能源利用效率的表征变量。

## (三) 数据来源

只有当政策实施前的研究时期远大于政策实施后的研究时期时,合成控制法才能具有良好的拟合效果和说服力<sup>[24]</sup>。因此,在考虑数据可得性的前提下,本文尽可能地使用 2000—2020 年 30 个省(区市)的面板数据研究国家生态文明试验区建设对福建省、江西省、贵州省和海南省碳排放效率的影响,数据来源于 2001—2021 年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各省(区市)的统计年鉴,部分缺失数据用线性插值法补全。

## 四、实证结果分析

### (一) 政策效应分析

受资源禀赋、产业结构、生态环境以及政策时间的影响,国家生态文明试验区的政策效应在不同地区之间必然呈现显著差异,从地区个体差异角度研究试验区建设对碳排放效率的影响也就显得尤为必要。为此,本文使用合成控制法依次对各个试验地区进行评估。具体地,将不属于国家生态文明试验区

的 26 个省(区市)作为控制地区,利用协变量来合成 4 个属于国家生态文明试验区的省份。同时,为保证合成控制组在多个维度上更加接近实验组,本文将碳排放效率在 2001 年、2007 年和 2013 年的取值同样作为协变量予以考虑。

本文基于数据驱动方式,使用 Stata 中的 Synth 程序包进行合成控制,得到了各试验区的合成控制地区及其最优权重(限于篇幅,留存备索)、协变量的事前合成匹配情况(如表 1 所示),这一过程完全根据干预前的协变量来确定,有效克服了实验组可能存在的非随机性问题。

从表 1 可以看出,对福建省和江西省而言,本文所选取的影响碳排放效率的所有变量的真实值与合成值均十分接近,其差距远小于真实值与控制组均值的差距,同时试验区建设前碳排放效率在部分年份的取值也较为接近真实值,这说明在较好拟合碳排放效率的基础上,影响碳排放效率的协变量的相似度也很高。但是,对贵州省而言,产业结构状况的真实值与合成值的差距远大于与控制组均值的差距,对海南省而言,大多数协变量的真实值与合成值的差距均大于与控制组均值的差距,说明贵州省和海南省的拟合状况并不好。因此,合成控制法较好地拟合了福建省和江西省在国家生态文明试验区设立前的特征,可以用于研究福建省和江西省国家生态文明试验区建设的政策效应。

表 1 协变量的事前合成匹配情况

协变量	控制组	江西省		福建省		贵州省		海南省	
	均值	真实值	合成值	真实值	合成值	真实值	合成值	真实值	合成值
<i>lnpgdp</i>	10.206	9.533	9.751	10.235	10.234	9.026	9.564	9.700	10.377
<i>stru</i>	1.021	0.761	0.852	0.808	0.823	1.030	0.769	1.768	0.868
<i>gover</i>	0.205	0.179	0.192	0.110	0.141	0.307	0.402	0.229	0.161
<i>tec</i>	0.016	0.008	0.013	0.015	0.018	0.009	0.006	0.009	0.018
<i>fdi</i>	0.413	0.320	0.336	0.763	0.743	0.092	0.149	1.837	0.856
<i>trans</i>	25.492	16.527	25.256	16.324	24.141	10.308	15.951	18.015	32.375
<i>cee(2001)</i>	0.717	0.791	0.791	1.068	0.994	0.309	0.382	1.000	1.072
<i>cee(2007)</i>	0.597	0.607	0.607	0.808	0.792	0.339	0.352	0.696	0.721
<i>cee(2013)</i>	0.537	0.575	0.575	0.718	0.716	0.352	0.297	0.563	0.619

国家生态文明试验区省份与其合成省份碳排放效率的变化趋势如图 1 所示(限于篇幅,仅呈现福建省和江西省的合成控制结果)。图中,竖直虚线对应的横坐标表示该省份被确立为国家生态文明试验区的年份,实线和虚线间的垂直距离即为国家生态文明试验区建设的政策效应。如果政策实施前实验组和控制组拟合效果较好,且政策实施后具有明显差异,则说明政策效应比较显著,反之则表明政策效果不显著。一方面,合成控制法是利用控制组省份合成出一个实验组的反事实状态,即要求实验组能够通过控制组加权估计,但是贵州省碳排放效率的变动趋势(倒 U 形)是所有省份中特殊的存在,无法通过其他省份较好地合成,故本文将不再考虑贵州省建设国家生态文明试验区对碳排放效率的影响;另一方面,合成控制法要求试验区的设立时间应早于研究期限的最后一年,同时考虑到政策效应发挥的时滞问题,故本文也不再将海南省纳入研究样本。最终,本文将仅从江西省和福建省两个省份着手,探究国家生态文明试验区建设对其碳排放效率的影响。

图 1 显示,在国家生态文明试验区建设前,江西省和福建省的碳排放效率具有良好的拟合效果,符合合成控制法的应用前提;在试验区建设后,两省份真实的碳排放效率明显高于合成的碳排放效率,而且福建省的碳排放效率差距远大于江西省。这说明,在对碳排放效率进行较好合成的前提条件下,试验区建设确实有助于提升江西省和福建省的碳排放效率,而且对福建省碳排放效率的政策效应更大。这是因为,随着试验区建设的推进,福建省和江西省均构建了完善的生态环境保护体系、污染物综合治理体系,自然资源的产权制度不断建立健全,绿色技术创新水平和能源利用效率持续提升,在保证经济持续发展的同时碳排放水平得以有效控制,碳排放效率不断提升。但是,江西省作为有色金属资源大省,在生态文明试验过程中不得不兼顾矿产资源的开发,导致其碳排放效率提升幅度有限。

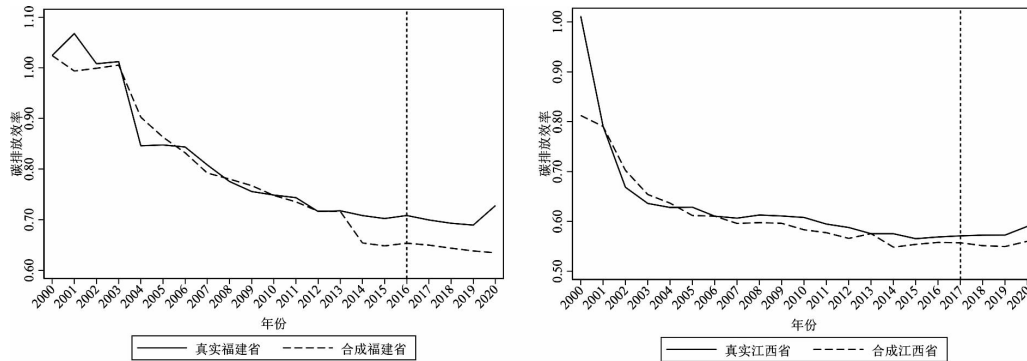


图1 合成控制结果

## (二) 稳健性检验

只有合成控制法在政策实施前具有良好的拟合效果,才有必要对政策实施地区进行稳健性检验<sup>[32]</sup>。因此,本文将利用安慰剂检验、排序检验、稀疏合成控制检验和 DID 检验对福建省和江西省的合成控制结果进行稳健性检验。

### 1. 安慰剂检验

为了排除碳排放效率的提升源自偶然因素,而非受国家生态文明试验区建设的影响,本文参考 Abadie 等提出的安慰剂检验<sup>[24]</sup>对试验区的政策效应进行有效性分析,其基本思路是依据合成控制的权重结果,分别选取权重最大的、没有成为试验区的安徽省和辽宁省两个省份作为福建省和江西省的安慰剂省份,并运用合成控制法进行分析。结果显示,真实安徽省和合成安徽省、真实辽宁省和合成辽宁省无论是在试验区建立前还是建立后,碳排放效率的变动趋势基本重合,说明与各个试验区具有高度相似性的控制组省份被假定为试验区后,碳排放效率未受影响,表明碳排放效率的提升并非是由偶然因素导致的,初步验证了合成控制分析的稳健性(限于篇幅,安慰剂检验结果留存备案)。

### 2. 排序检验

为证实政策评估结果的有效性,本文进一步参考 Abadie 等的研究<sup>[24]</sup>,采用排序检验验证上述合成控制结果在统计意义上是否显著,在进行排序检验前,必须保证政策实施前省份的合成控制对象具有良好的拟合效果,如果某地区在国家生态文明试验区建设前的拟合效果并不显著,即  $RMSPE$ <sup>①</sup> 值比较大,即使政策干预后得到较大的处理效应也不具有说服力。因此,参考 Abadie 等的研究<sup>[24]</sup>,本文将实验组省份政策干预前的  $RMSPE$  作为阈值,用以筛选排序检验中的控制组省份,即在控制组省份中剔除  $RMSPE$  高于阈值的地区,  $RMSPE$  计算公式如式(11)所示:

$$RMSPE_i = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^{T_0} (Y_{it}^I - Y_{it}^N)^2} \quad (11)$$

式中,各个变量的含义与上文合成控制模型一致。结果显示,在政策实施前,福建省和江西省的国家生态文明试验区建设对碳排放效率的政策效应均不明显,主要围绕在 0 值附近上下波动;在政策实施后,福建省和江西省碳减排效率的政策效应曲线明显高于多数控制组的政策效应曲线,说明控制组省份得到与试验区省份同样的政策效果是一个小概率事件,再次验证了合成控制结果的稳健性(限于篇幅,排序检验结果留存备案)。

### 3. 稀疏合成控制检验

为了说明合成控制结果不受个别省份的影响,本文进一步借鉴 Abadie 等的研究<sup>[25]</sup>进行稀疏合成控制检验,剔除合成控制过程中权重最大的控制组省份后再次进行验证。结果显示,在剔除权重最大的

①RMSPE(Root Mean Square Prediction Error,均方预测误差平方根)用以衡量真实城市与合成控制对象间的拟合程度,详见 Abadie 等<sup>[24]</sup>。

省份后,福建省和江西省的国家生态文明试验区建设仍有助于提升碳排放效率,与基准合成控制结果一致(限于篇幅,合成控制检验结果留存备案)。

#### 4. DID 检验

本文进一步使用 DID 方法对合成控制法进行稳健性检验,对国家生态文明试验区建设政策效果的显著性进行验证和补充。DID 模型设定如式(12)所示:

$$cee_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \eta X + \delta_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (12)$$

式中, $cee_{it}$  为碳排放效率, $did_{it}$  为国家生态文明试验区建设这一政策冲击变量, $\beta_1$  为试验区建设对碳排放效率影响的净效应, $X$  为控制变量的集合, $\delta_i$  为个体固定效应, $\gamma_t$  为时间固定效应,为误差项。

结果显示,福建省和江西省的  $did$  的估计系数分别在 1%、5% 的水平上显著为正,说明国家生态文明试验区建设显著提升了所在地的碳排放效率,与合成控制分析结果一致,验证了合成控制的有效性(限于篇幅,DID 检验结果留存备案)。

#### (三) 结构解析

根据效率的内涵,本文将碳排放效率( $cee$ ) 分解为规模效率变化指数( $Sech$ ) 和纯技术效率变化指数( $Pech$ ),三者关系具体如式(13) 所示:

$$cee = Sech \times Pech \quad (13)$$

规模效率变化指数和纯技术效率变化指数的合成情况,留存备案。对规模效率变化指数而言,尽管在国家生态文明试验区建设前,福建省规模效率变化指数的合成情况并不好,但是试验区建设后规模效率变化指数明显高于合成地区,因此可以认为试验区建设促进了碳排放规模效率的提升;对于江西省而言,规模效率变化指数在试验区建设前具有良好的拟合效果,试验区设立后,真实值明显大于合成值,说明江西省国家生态文明试验区建设提升了碳排放规模效率。

对纯技术效率变化指数而言,在国家生态文明试验区建设前,福建省和江西省碳排放的纯技术效率变化指数均实现了较好的拟合,但是在试验区建设后,福建省的真实值明显小于合成值,江西省的真实值明显大于合成值。这说明,国家生态文明试验区建设提升了江西省碳排放的纯技术效率变化指数,但是降低了福建省碳排放的纯技术效率变化指数。

#### (四) 机制检验

理论分析表明,国家生态文明试验区建设通过促进绿色技术创新和改善能源利用效率对碳排放效率产生影响。在进行机制检验时,应侧重研究解释变量对机制变量的影响,提升二者因果关系的可信度<sup>[33]</sup>。为此,本文将继续利用合成控制法,着重分析福建省和江西省的国家生态文明试验区建设对绿色技术创新水平和能源利用效率的影响(限于篇幅,机制检验图留存备案)。

一方面,无论是福建省还是江西省,真实的绿色技术创新水平和合成的绿色技术创新水平在国家生态文明试验区设立前的拟合效果较好,但在试验区成立后,真实的绿色技术创新水平明显高于合成的,说明国家生态文明试验区建设改善了试验区省份的绿色技术创新水平,进而实现了碳排放效率的提升。

另一方面,无论是福建省还是江西省,真实的单位 GDP 能耗和合成的单位 GDP 能耗在国家生态文明试验区设立前的拟合效果较好,但在试验区设立后,真实的单位 GDP 能耗明显低于合成的,说明国家生态文明试验区建设降低了试验区省份的单位 GDP 能耗,即改善了试验区省份的能源利用效率,进而有助于提升碳排放效率。

## 五、结论性评述

本文以 2016 年起分批设立的国家生态文明试验区为准自然实验,基于 2000—2020 年 30 个省(区市)的面板数据,采用合成控制法探究了国家生态文明试验区建设对各试验区碳排放效率的影响效应和内在机制。研究发现:(1)国家生态文明试验区建设显著提升了福建省和江西省的碳排放效率,而且



对福建省的提升幅度更大,经安慰剂检验、排序检验、稀疏合成控制检验、DID 检验后结论依旧可靠;(2)结构解析发现,国家生态文明试验区建设提升了福建省碳排放的规模效率变化指数,对江西省碳排放的规模效率变化指数和纯技术效率变化指数均有促进作用;(3)机制分析发现,试验区建设对碳排放效率的影响主要通过提升绿色技术创新水平、改善能源利用效率两条渠道发挥作用。

基于上述研究结论,本文提出如下政策建议:(1)总结国家生态文明试验区建设经验,推动试验区扩容工作,将更多符合条件的省份纳入试验区范围,并将国家生态文明试验区建设向地级市、县级市、乡镇等层面不断细化,形成自上而下的生态文明建设格局,全方位提升碳排放效率;(2)强化科技支撑,注重创新引领,把绿色创新作为引领碳排放效率提升的首要任务,不断健全创新激励机制,引导企业提高绿色技术创新水平,从源头上创新企业的生产模式,淘汰落后产能,以技术进步助力“3060”目标的实现;(3)重视我国能源终端利用效率低、能源利用方式粗放等问题,持续挖掘节能潜力,将改善能源利用效率作为碳排放效率提升的核心所在,发展更加高效的生产和生活方式,推动节能改造,提升能源管理效率,开发并使用清洁能源,在解决能源消费受限问题的同时,实现碳排放效率的提升。

#### 参考文献:

- [1]张海峰,林细细,梁若冰,等.城市生态文明建设与新一代劳动力流动——劳动力资源竞争的新视角[J].中国工业经济,2019(4):81-97.
- [2]Liu K, Tao Y, Wu Y, et al. How does ecological civilization construction affect carbon emission intensity? Evidence from Chinese provinces' panel data [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2020, 18(2): 97-102.
- [3]Duan L, Wang L. How does the construction of China's ecological civilization affect the health burden of urban and rural residents? [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2022, 20(4): 369-382.
- [4]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): 1-12.
- [5]Zhang Z, Xu H, Shan S, et al. The impact of ecological civilization construction on environment and public health—Evidence from the implementation of ecological civilization demonstration area in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 1-19.
- [6]辛宝贵,高菲菲.生态文明试点有助于生态全要素生产率提升吗? [J]. 中国人口·资源与环境,2021(5):152-162.
- [7]陈军,肖雨彤.生态文明先行示范区建设如何助力实现“双碳”目标?——基于合成控制法的实证研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2023(1):87-101.
- [8]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(7):57-70.
- [9]Chen M, Chen Y, Jiang C, et al. Does the construction of an ecological civilization promote firm technology investment? A quasi-natural experiment [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10(8): 1-16.
- [10]Hu J, Hu M, Zhang H. Has the construction of ecological civilization promoted green technology innovation? [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 29(11): 1-13.
- [11]Yang Q, Gao D, Song D, et al. Environmental regulation, pollution reduction and green innovation: The case of the Chinese Water Ecological Civilization City Pilot policy [J]. Economic Systems, 2021, 45(4): 1-18.
- [12]Lyu L, Kan D, Yao W, et al. Has China's pilot policy of Water Ecological Civilization City construction reduced water pollution intensity? [J]. Land, 2022, 11(11): 1-22.
- [13]Fan H, Tao S, Hashmi S H. Does the construction of a Water Ecological Civilization City improve green total factor productivity? Evidence from a quasi-natural experiment in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 1-19.
- [14]杨子晖.经济增长、能源消费与二氧化碳排放的动态关系研究[J].世界经济,2011(6):100-125.
- [15]申萌,李凯杰,曲如晓.技术进步、经济增长与二氧化碳排放:理论和经验研究[J].世界经济,2012(7):83-100.
- [16]刘志华,徐军委,张彩虹.科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的PVAR分析[J].自然资源学报,2022(2):508-520.

- [17]张可. 区域一体化有利于减排吗? [J]. 金融研究, 2018(1):67-83.
- [18]徐维祥,周建平,刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究, 2022(1):111-129.
- [19]王勇,赵晗. 中国碳交易市场启动对地区碳排放效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(1):50-58.
- [20]Chai J, Tian L, Jia R. New energy demonstration city, spatial spillover and carbon emission efficiency: Evidence from China's quasi-natural experiment [J]. *Energy Policy*, 2023, 173(12): 1-15.
- [21]魏巍贤,杨芳. 技术进步对中国二氧化碳排放的影响[J]. 统计研究, 2010(7):36-44.
- [22]邵帅,范美婷,杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022(2):46-69.
- [23]Abadie A, Gardeazabal J. The economic costs of conflict: A case study of the Basque country [J]. *American Economic Review*, 2003, 93(1): 113-132.
- [24]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.
- [25]Abadie A, Diamond A, Hainmueller J. Comparative politics and the synthetic control method [J]. *American Journal of Political Science*, 2015, 59(2): 495-510.
- [26]Arkhangelsky D, Athey S, Hirshberg D A, et al. Synthetic difference-in-differences [J]. *American Economic Review*, 2021, 111(12): 4088-4118.
- [27]Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [28]张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10):35-44.
- [29]邵帅,张可,豆建民. 经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J]. 管理世界, 2019(1):36-60.
- [30]李青原,肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企业绿色专利的证据[J]. 经济研究, 2020(9):192-208.
- [31]黄和平,李莹. 环境税费改革对能源利用效率的影响与作用机制研究[J]. 中国环境科学, 2023(7):3821-3834.
- [32]刘友金,曾小明. 房产税对产业转移的影响:来自重庆和上海的经验证据[J]. 中国工业经济, 2018(11):98-116.
- [33]江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5):100-120.

[责任编辑:高婷]

## Does the Construction of the National Ecological Civilization Pilot Zone Help Improve Carbon Emission Efficiency? Empirical Analysis Based on Synthetic Control Method

ZHANG Mingdou, DAI Yangyang

(School of Economics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

**Abstract:** This paper takes the National Ecological Civilization Pilot Zone established in batches since 2016 as a quasi-natural experiment, and empirically evaluates the impact and mechanism of its construction on carbon emission efficiency in each pilot zone using the synthetic control method. The study reveals that the construction of the National Ecological Civilization Pilot Zone has helped to improve the carbon emission efficiency of both Fujian and Jiangxi, with a greater improvement observed in Fujian. The conclusion is still valid after placebo test, sorting test, sparse synthesis control test, and DID. Additionally, the efficiency decomposition find that the construction of the National Ecological Civilization Pilot Zone has improved the scale efficiency change index of carbon emission in Fujian and promoted both the scale efficiency change index of carbon emission and the pure technical efficiency change index of carbon emission in Jiangxi. Mechanism analysis further reveals that promoting green technology innovation and optimizing energy utilization efficiency can play a positive role in the construction of the National Ecological Civilization Pilot Zone to improve carbon emission efficiency as both endogenous and external means. Overall, this study provides theoretical references and policy recommendations for promoting the construction of ecological civilization in China and achieving the carbon peak and carbon neutrality goals as soon as possible.

**Key Words:** carbon emission efficiency; national ecological civilization pilot zone; green technology innovation; energy efficiency; synthetic control method