

电力基础设施投资对大气污染的影响研究

艾洪山；万宇

(湖南大学经济与贸易学院, 湖南省长沙市, 410079)

摘要：本文利用 Hsiao, Ching, and Wan (2012)提出的回归合成控制法，基于 2003-2015 年中国地级市层面的二氧化硫排放数据，评估了 2010 年投入运营的楚穗线、德宝线、伊穆线和银东线四条特高压线路对送电端地级市和受电端省份二氧化硫排放量的影响。实证结果显示，特高压项目投运后：(1)对于送电端而言，送电端城市中德阳市、银川市和丽江市的二氧化硫排放量平均每年分别增加了 0.2%、1.3%和 1.3%。(2)对于受电端而言，受电端省份中陕西省、广东省和四川省的二氧化硫排放量平均每年分别减少了 0.17%、0.25%和 0.34%。(3)从整体而言，受电端减少的二氧化硫排放量远远大于送电端增加的量，全国总的二氧化硫排放量减少。现阶段，特高压电网对大气污染减排做出了一定的贡献。

关键词：电力基础设施投资；大气污染；特高压电网；回归合成控制法

中图分类号：F062.1

文献标识码：A

1 引言

近年来，以煤炭等化石能源为主的能源消费结构在全国引发了持续、大范围的大气污染，造成了严重的经济损失并危害着公众健康（陈婷和陈硕，2014）。据不完全统计，煤炭燃烧排放的烟尘、二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳和总悬浮颗粒分别占全国的 70%、85%、67%、80%和 70%。煤炭燃烧是造成大气污染最主要、最直接的原因。在煤炭消费总量中，与其他行业相比，电力行业的煤炭消费量居高不下，在 2016 年达到了近 67%（Yaru Zhang et al., 2018）。若能从电力行业减少煤炭消费量，将能大大减少大气污染物的排放，为我国大气污染防治做出重要贡献。电力基础设施投资是促进电力行业实现绿色发展的重要因素。因此，电力基础设施建设是有效降低煤炭消费总量、降低大气污染的关键。

特高压作为新型电力基础设施，有“电力高速公路”之称，具备了输送容量大、运输距离长、线路损耗低、占地面积少等综合优势，使得电力资源跨区域大规模流动成为可能，被认为是实现电力资源优化配置的关键手段。近年来也有研究证实了通过特高压来实现跨区送电，确实存在环境改善效应。国际组织绿色和平的研究报告显示，特高压电网每输送 1 亿千瓦时电力，可使负荷中心减少约 17 吨 PM₁₀、7 吨 PM_{2.5}，450 吨 SO₂ 和 NO_x 的排放。Li and Lin (2017) 以中国的跨区输电线（IRET）为准自然实验，使用双重差分法，评估了跨区输电对环境的影响，结果发现输入区的二氧化硫排放增长率下降近 7%。Wang et al. (2020) 通过构建空气污染扩散模型，评估了 2017 年特高压输电项目的大气污染控制效果，结果发现 2017 年特高压输电使得全国范围内减少了 51,000 吨 SO₂、47,300 吨 NO_x，16,400 吨 PM_{2.5} 和 23,400 吨 PM₁₀。

值得注意的是，上述针对特高压减排效应的分析与研究仅侧重于受电端。京津冀等负荷中心在“以电代煤”、“雾霾治理”的压力下，已经停止新增煤电机组，它们只能选择加大接受外输电以解决新增电力需求。但是，特高压输送的电力来源并非完全是清洁能源。据统计，2018 年特高压电网累计对外输送的可再生能源电力为 2,084 亿千瓦时，约占全年外输电总量的 52%；其中，有 9 条特高压线路对外输送的可再生能源电力所占比例之和低于 15%。这意味着特高压在降低受电端本地火电需求的同时可能增加了送电端的化石能源消费。换言之，特高压可能存在污染转移效应。然而，鲜有文献对此展开讨论。

为了理清中国特高压输电项目的大气污染减排效果，为中国的特高压工程建设提供决策支持，进一步优化能源互联网建设，从而实现全球减排和可持续发展。本文全面量化评估了

中国特高压电网的大气污染减排效应，主要贡献体现在：

首先，我们分别从送电端和受电端评估了特高压项目对二氧化硫排放量的影响。实证结果显示，特高压项目实施后，送电端城市的二氧化硫排放量均有增加。对于受电端而言，特高压项目实施后，受电端地区由于接受外来输电而减少本地发电量，导致当地的二氧化硫排放量有所减少。整体而言，特高压项目投运后，受电端减少的二氧化硫排放量远远大于送电端增加的量，也就是说，全国总的二氧化硫排放量减少，特高压项目有一定的减排效果。

其次，参考 Hsiao et al. (2012) 的思路，我们构建了适用于本文研究目标的回归合成控制法评估模型，进而以中国地级市层面 2003-2015 年的二氧化硫排放数据为分析对象，准确筛选控制组和实验组，使用两步法，分别测算了楚穗线、德宝线、伊穆线和银东线四条代表特高压线路输电端和受电端的二氧化硫减排效应。

本文其余部分结构如下：第二部分是文献综述，第三部分是模型构建，第四部分是数据与设定，第五部分是实证分析，第六部分是稳健性检验，第七部分是结论。

2 文献综述

电力基础设施本身就是基础设施的一个组成部分，基础设施对城市的经济、社会和环境产生重要的影响。基础设施提升城市化水平，促进经济发展，但其环境效益也应受到同样的重视 (Prashant Kumar et al., 2019)。不同的基础设施由于其承载的功能与性质不一样，对环境造成的影响也不一样 (Jinhuan Wang et al., 2020)。而且由于数据收集受限，难以进行准确的量化评估，相关的文献并不多。但国内外学者普遍关注的领域是交通基础设施投资对大气污染的影响，并且通过大量的理论和实证来评估两者之间的关系。

万冬君等 (2007) 通过构建能源基础设施-经济-社会-环境的复合模型，研究发现北京市的能源基础设施对环境具有重要的影响作用，电力、热力等系统的性能提升能够改善空气质量。梁若冰和席鹏辉 (2016) 以 14 个城市新开通的 45 条轨道交通线路为例，评估城市轨道交通的减排效应。研究发现轨道交通开通能够替代其他路面交通，减少机动车尾气排放的大气污染物，有效改善城市的空气污染问题。Chuanwang Sun et al. (2018) 基于中国 2000-2012 地级市的面板数据，量化评估了交通基础设施对空气质量的影响，研究发现增加城市交通基础设施能够缓解空气污染，且实证检验了改善效应是显著的。Cong Sun et al. (2014) 研究表明机动车保有量与城市空气质量存在负相关，通过交通基础设施建设来提高公共交通水平，有助于减少机动车尾气排放导致的空气污染。交通拥堵导致机动车尾气排放增加，在一定程度上加剧了空气污染，有必要加强交通基础设施建设来治理交通拥堵问题，这一观点在许多文献得到验证 (Zijia Wang et al., 2015; Wenhui Chen et al., 2017; 刘铁军等, 2017)。罗源 (2018) 基于中国 2000-2012 年地级市的面板数据实证分析交通基础设施投资对城市空气质量的影响，并采用了不同的大气污染物指标进行稳健性检验，证实了交通基础设施投资能够有效改善空气污染，但轨道交通对不同污染物的改善程度不一。Zhi Luo et al., (2018) 研究表明道路密度指数与 PM_{10} 呈显著的负相关，城市交通基础设施投资对空气污染治理具有重要作用。

现有关于基础设施投资的研究大多数围绕交通基础设施，缺少对其他基础设施或整体的研究。基础设施种类丰富，不同基础设施承载的功能不同，仅仅围绕某一类基础设施开展研究并不能全面反映基础设施及不同类别的作用。直接研究电力基础设施投资对空气污染影响的文献极少。较多文献研究交通基础设施投资对空气污染的影响，具有一定的参考价值，但是电力基础设施和交通基础设施分属不同领域，其功能不同，对空气污染的作用机制不同。要研究电力基础设施投资对空气污染的影响，还需要进行大量的实证检验，本文全面量化特高压输电项目的减排效应是对现有研究的补充。

3 模型构建

参考 Hsiao, Ching, and Wan (2012) 提出的面板数据评估方法，并结合本文的研究背景，

我们构建了有特高压项目地区二氧化硫排放量的反事实,进而评估实际排放量与反事实排放量之间的差值,即处置效应。

具体来说,我们设 y_{it}^1 和 y_{it}^0 分别表示城市 i 在时间 t 建设有特高压项目和没有特高压项目时的二氧化硫排放量。那么,特高压项目对城市 i 在时间 t 的二氧化硫排放量的影响效应为:

$$\Delta_{it} = y_{it}^1 - y_{it}^0 \quad (1)$$

但是,我们无法同时观察到 y_{it}^1 和 y_{it}^0 。观测到的数据通常以 (y_{it}, d_{it}) 的形式表现为

$$y_{it} = d_{it}y_{it}^1 + (1 - d_{it})y_{it}^0 \quad (2)$$

其中,如果城市 i 建设有特高压项目,则 $d_{it}=1$;反之,则 $d_{it}=0$ 。

我们假设每个城市的二氧化硫排放量受到两部分的影响:第一部分是 $K \times 1$ 维公共因子向量 f_t (未观测),它推动所有城市的二氧化硫排放量随时间变化,包括特高压城市和非特高压城市。这些因素包括国家宏观政策、经济发展水平、环境规制等;第二部分是特殊因子 $\alpha_i + u_{it}$,其中 α_i 代表个体固定效应, u_{it} 代表 $E(u_{it})=0$ 的特殊误差项,与 $j \neq i$ 的 u_{jt} 不相关。那么,

$$y_{it} = b_i f_t + \alpha_i + u_{it}, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

其中, b_i 是 $K \times 1$ 维载荷系数,该系数可能随城市 i 的变化而变化。换言之,每个城市都受到共同因素 f_t 的影响,但对 f_t 的反应可能因个体而异。

进一步地,我们假设所有城市 i 在时间 $t=1, \dots, T_1$ 时其 SO_2 排放量的 y_{it} 不受特高压项目的影响,亦即在 $t \leq T_1$ 时,所有城市均未上马特高压项目。当 $t > T_1$ 时,不失一般性,假设城市1已运行了特高压项目,但其他所有的 $y_{it} (i = 2, \dots, N)$ 不受任何特高压项目的冲击和影响。

设 $y_t = (y_{1t}, \dots, y_{Nt})$ 是 y_{it} 在时间 t 的 $N \times 1$ 维向量。由于 T_1 之前没有运行有任何特高压项目,所以观察到的 y_t 如下:

$$y_t = y_t^0 = \alpha + B f_t + u_t, \quad t = 1, \dots, T_1 \quad (4)$$

其中, $y_t^0 = (y_{1t}, \dots, y_{Nt})$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$, $B = (b_1, \dots, b_N)$ 是 $N \times K$ 因子载荷矩阵, $u_t = (u_{1t}, \dots, u_{Nt})$ 。

从时间 $T_1 + 1$ 起,受到特高压项目影响的城市1的 SO_2 排放量为:

$$y_{1t} = y_{1t}^1 = \alpha_1 + b_1 f_t + \Delta_{1t} + u_{1t}, \quad t = T_1 + 1, \dots, T \quad (5)$$

其中, Δ_{1t} 是一种处置效应,反映了特高压项目投运后对城市1的二氧化硫排放量产生的影响。

对于没有受到特高压项目影响的其他城市,有:

$$y_{it} = y_{it}^0 = \alpha_i + b_i f_t + u_{it}, \quad i = 2, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

在 N 和 T 都很大的情况下,可以用极大似然法识别公共因子的个数 K ,并与 B 一起估计 f_t 。然而,无论是 N 还是 T ,在宏观经济的应用中都不是很大。我们的重点不是找出要素结构,而是构造反事实。只要 (y_{1t}, \dots, y_{Nt}) 是由相同的共同因素驱动, y_{it} 就可以被其他截面单位预测。因此,我们采用Hsiao et al.(2012)的方法。利用观测数据 (y_{2t}, \dots, y_{Nt}) 代替 f_t ,构造出反事实的 y_{it}^0 (e.g. Ching et al., 2012; Bai, Li & Ouyang, 2014; Du & Zhang, 2015; among others)。

当 $N > K$ 时,存在一个向量 α 满足:

$$\alpha' B = 0 \quad (7)$$

所以, $\alpha' y_t = \alpha' u_t$ 。

因此,假设 y_{it}^0 ,可以写为:

$$y_{it}^0 = E(y_{it}^0 | y_{-t}) + \varepsilon_{it} = \bar{\alpha} + \alpha_{-1}' y_{-1t} + u_{1t}^* \quad (8)$$

其中 $y_{-t}=(y_{2t}, \dots, y_{Nt})$, $y_t=(y_{1t}, y_{-t})$ 。

只要如假设 5 在 Hsiao et al.(2012)所说, 即:

$$E(u_{it}|d_{1t}) = 0, i \neq 1 \quad (9)$$

Hsiao et al.(2012) 表明, $\bar{\alpha}$ 和 α_{-1}^* 可用最小值来估计:

$$\frac{1}{T_1} \sum_{t=1}^{T_1} (y_{1t}^0 - \bar{\alpha} - \alpha_{-1}^* y_{-1t}) (y_{1t}^0 - \bar{\alpha} - \alpha_{-1}^* y_{-1t}) \quad (10)$$

我们可以在没有特高压项目影响的情况下定义反事实 y_{1t}^0 的预测值:

$$\hat{y}_{1t}^0 = \hat{\alpha} - \hat{\alpha}_{-1}^* y_{-1t}, t > T_1 \quad (11)$$

然后, 在此基础上, 对特高压城市特高压项目建设在 t 时间内的处置效应进行了预测:

$$\hat{\Delta}_{1t} = y_{1t}^1 - \hat{y}_{1t}^0, t > T_1 \quad (12)$$

标准误差 \hat{y}_{1t}^0 , $\sigma_{y_{1t}^0}$ 的构造符合标准预测误差公式。因此, $\hat{\Delta}_{1t}$ 的置信带被构造为:

$$\hat{\Delta}_{1t} \pm c\sigma_{y_{1t}^0} \quad (13)$$

其中 c 是根据期望的置信水平选择(Hsiao, 2014)。

如果 Δ_{1t} 是平稳的, 则整个政策评价期 $T_1 + 1$ 到 T 的平均处理效果(ATE)可以用如下一致估计:

$$\frac{1}{(T-T_1)} \sum_{t=T_1+1}^T \Delta_{1t} \quad (14)$$

其次是如何选择最佳预测模型来构造反因子。使用较多的 y_{jt} 改进了样本内拟合, 但可能导致样本外预测不准确。为了平衡样本内部与样本外预测的一致性, Hsiao et al.(2012) 建议使用一些模式选择标准来寻找最佳预测指标。具体来说, 我们遵循 Hsiao et al.(2012) 的观点使用两步法:

步骤 1: 使用 R^2 从 $N-1$ 非特高压城市(以 $M(m)^*$ 表示)中选取 $m=1, \dots, N-1$ 的 m 个非特高压城市对 y_{1t}^0 的最佳预测。

步骤 2: 来自 $M(1)^*$, $M(2)^*$, \dots , $M(N-1)^*$, 根据修正的 Akaike 信息准则(AICC; Hurvich & Tsai, 1989)选择 $M(m)^*$ 。

4 数据与设定

4.1 指标选取与数据来源

本文选择二氧化硫排放量作为研究指标, 出于以下两点考虑: 第一, 二氧化硫是国家重点监测的六类大气污染物之一, 该指标能够在一定程度上反映大气污染的水平。同时也有大量的理论和实证研究选择了二氧化硫排放量作为研究指标。第二, 二氧化硫是煤炭燃烧的首要污染排放物, 也是工业废气的主要排放物。该指标在统计年鉴中有专项数据统计, 能够获取真实而确切的数据, 有助于本文的数据收集工作。

本文使用的 2003-2015 年地级市二氧化硫数据来源于《中国城市统计年鉴(2004-2016 年卷)》, 各地级市缺失的二氧化硫数据由相应省份的统计年鉴补充完整。为了保证数据的平稳性, 本文取二氧化硫排放量的自然对数水平进行测算。此外, 本文涉及的 2010 年地级市火电厂工业总产值与省级电力缺口数据均根据相应的统计年鉴数据测算而得。

4.2 实验组的选择

本文研究的特高压线的样本选择存在两个难题: 第一, 特高压线先后建成, 时间跨度大,

不存在统一的投产时间点；第二，不同特高压线的电力输出地区和输入地区并不能明确区分。考虑到以上两个问题，本文选取楚穗线、德宝线、伊穆线和银东线作为研究对象，其中德宝线是唯一双向线。首先，从投运时间上来看，这四条线路投产时间集中在 2010 年，可以将 2010 年作为划分投运前后的时间节点；其次，从输入地区来说，不存在多条特高压线输送同一地区的情形。复奉直流和林枫直流尽管也是在 2010 年开始运行，但由于其受电端均为上海，与本文采用的地级市样本点不具可比性，不纳入研究对象。

（一）送电端

由于中国行政区划省级单位跨地域范围较大，地级市之间的自然资源禀赋分布存在较大的空间异质性，导致各个地级市的发电能源种类占比各不相同。而且，不是所有地级市都为特高压送电，提供送电的地级市输出量占比也有差异。以银东直流为例，银东直流主要将黄河上游的水电和宁夏东部的火电送出，在宁夏东部固原市建立一个火电站并不会对宁夏北部石嘴山市的二氧化硫排放产生影响。因此，本文根据特高压输电线中电力资源的具体来源，选取地级市作为实验组。如表 1 所示，送电端的实验组为丽江市、德阳市、宝鸡市、呼伦贝尔、银川市。

表 1 送电端实验组的选取

特高压线	主要电力来源	实验组（地级市）
楚穗直流	水电	云南丽江
德宝直流 （双向）	水电	四川德阳 陕西宝鸡
伊穆直流	火电+风电	内蒙古呼伦贝尔
银东直流	水电+火电	宁夏银川

注：表 1 中数据主要是依据官方文件或国家电网的新闻获得。

（二）受电端

考虑到中国电网的管理以省级电网为单位进行统一调度，接受特高压输电并不仅仅是单独或某几个地级市。以楚穗直流为例，来自云南的电力送入广州增城区穗东换流站以后，通过广东省电力公司进行统一调度分配，因此对广东全省电力供应起到缓解作用。所以，本文以特高压受电端的省份选取实验组，根据选取的四条特高压线，受电端的实验组为广东省、辽宁省、山东省、四川省和陕西省。

4.3 控制组的选择

选择潜在控制组时，需要满足两个标准。第一，对于要估计的变量二氧化硫，控制组必须与实验组具有很强的相关性，即在特高压项目实施之前，控制组能对实验组的结果进行良好的预测。第二，特高压项目对控制组应该是外生的，即特高压项目对控制组 SO_2 的影响可以忽略不计。

（一）送电端

近年来，特高压项目迅速发展，国内没有几个城市可以完全外生于特高压的处置效应。但是，本文可以确定本文选取的四条特高压线干预相对外生的地级市。首先，为了满足特高压项目对控制组城市是外生的，本文去掉四条特高压项目送端和受端的省内所有地级市，那么这四条特高压线对其他城市二氧化硫造成的影响可忽略不计。其次，对送电端城市而言，特高压项目主要涉及到送电端地区的火电效率提高和清洁能源整合。燃煤发电是导致二氧化硫等空气污染物排放的主要原因，一方面，升级火电机组，提高燃煤发电效率，安装脱硫脱硝除尘设备，实现低能耗、低排放；另一方面，水电、风电等清洁能源替代煤炭在能源结构中的比例，将大大减少二氧化硫排放的产生。

为了选出与送电端实验组地区高度相关的控制组，本文用火电厂工业总产值来捕捉城市二氧化硫排放量的相似性。火电发电是产生二氧化硫的重要原因，在火电机组技术水平相近的前提下，火电厂工业总产值比较接近的地级市，由此产生的二氧化硫排放量也比较接近。

因此, 本文根据 2010 年中国各地级市的火电厂工业总产值, 以实验组城市的值为界, 按照上下浮动 25% 选取相应的控制组城市, 如表 2 所示。以银川市为例, 2010 年该市的火电厂工业总产值为 2157991 元, 以其为基准, 选取火电厂工业总产值在 [1618493, 2697489] 的城市作为银川市的控制组。值得注意的是, 本文在选取各送电端地级市的控制组时剔除了四条特高压项目送端和受端的省内所有城市, 不具有可比性的直辖市北京市、天津市、重庆市和上海市, 以及排除 2011 年行政状况发生变化的巢湖市。表 2 列出了送电端的控制组城市。

表 2 送电端控制组地级市的火电厂工业总产值 (2010 年) 单位: 元

地级市	火电厂 工业总产值	地级市	火电厂 工业总产值	地级市	火电厂 工业总产值
丽水市	0	泰州市	1772189	宜春市	9993601
黄山市	0	池州市	1805698	温州市	10665591
宣城市	0	辽源市	1921790	四平市	10672796
赣州市	0	安顺市	1950521	阳泉市	11697418
抚州市	0	六盘水市	1961846	台州市	12278234
黄冈市	0	乌鲁木齐市	1975311	淮安市	12666303
随州市	0	吉安市	2017612	呼伦贝尔市	12759362
永州市	0	黑河市	2125691	保定市	13101932
玉林市	0	平凉市	2145131	湖州市	13175756
贺州市	0	银川市	2157991	福州市	14345708
河池市	0	宝鸡市	2375161	太原市	15589681
崇左市	0	郑州市	2490029	绍兴市	15757546
德阳市	0	承德市	2611056	贵阳	15797363
丽江市	0	景德镇市	2611856		
武威市	0	通化市	2735912		
庆阳市	0	芜湖市	2841910		
定西市	0	莆田市	2872974		
陇南市	0	吉林市	2936819		
克拉玛依市	0				

注: 表 2 中火电厂工业生产总产值是根据 2010 年工业企业数据库的数据核算得出, 按升序排列, 并选出范围在以实验组城市为界上下浮动 25% 内的地级市。为了便于对比, 表中黑体的地级市为送电端的实验组城市。

(二) 受电端

表 3 受电端控制组省份的电力缺口 (2010 年) 单位: 亿千瓦时

省份	电力缺口	省份	电力缺口
山西	691	甘肃	-12
湖北	625	江西	-37
贵州	550	湖南	-127
安徽	366	浙江	-253
陕西	253	山东	-255
四川	246	河南	-272
福建	41	辽宁	-420
广西	39	江苏	-505
吉林	28	河北	-699
新疆	17	广东	-823
黑龙江	14		

注: 表 3 中电力缺口数据是根据 2010 年电力统计年鉴, 用电力消费量减去发电量计算

得出。为了便于对比，表中黑体的省份为受电端实验组省份，表左边列出电力缺口为正的省份，表右边列出电力缺口为负的省份。

为了选出与受电端实验组地区高度相关的控制组，本文对实验组地区的特征进行分析。本文发现除了双向输电的德宝线以外，广东、山东是经济大省，辽宁是重工业大省，这些经济特征导致这些地区的电力较为短缺；德宝线的一端四川由于水电装机比重大而在河流枯水期存在季节性缺电，另一端陕西以火电为主，其南部地区常年电力供应紧张。总的来说，特高压受电端的选取更多考虑的是解决当地电力短缺，环境问题尚未成为主要的考虑因素。

本文从电力需求侧出发，考虑到中国能源资源与市场逆向分布，产出较高的地区一方面电力需求量较大，另一方面电力资源相对短缺，因此往往更容易出现电力短缺的现象。本文用电力消费量减去发电量得到电力缺口数据。因此，本文根据 2010 年中国各省的电力缺口，选取相应的控制组省份，如表 3 所示。陕西省和四川省的电力缺口为正，则电力缺口同为正的省份组成其控制组；山东省、辽宁省和广东省的电力缺口为负，则电力缺口同为负的省份组成其控制组。其中，不包括特高压送电端的省份内蒙古、宁夏和云南，不具有可比性的直辖市北京市、天津市、上海市和重庆市，以及排除数据缺失的西藏和台湾。

5 实证分析

5.1 送电端

(一) 模型预测

表 4 送电端特高压城市样本拟合效果

特高压线	地级市	In-sample fit	
		R-square	F-statistic
德宝线	德阳市	0.48	4.62 on 1 and 5 DF
楚穗线	丽江市	0.99	204.71 on 2 and 4 DF
银东线	银川市	0.683	10.76 on 1 and 5 DF
伊穆线	呼伦贝尔市	0.998	1225.06 on 2 and 4 DF
德宝线	宝鸡市	0.953	40.93 on 2 and 4 DF

利用处置前时期数据建立预测模型，并采用基于 Eq.(8)的 AICC 准则对非特高压城市进行组合。表 4 显示，除了德阳市和银川市，其他实验组城市均有较好的样本拟合， $R^2 > 0.95$ 。这些结果表明，AICC 准则选择的预测模型表现比较好，预测的特高压城市二氧化硫排放量的反事实在处置后时期内具有较好的可比性。

(二) 平均处置效果

根据第一节描述的方法，本文评估了特高压项目对送电端城市二氧化硫排放量的平均处置效应。表 5 分别列出了每个特高压城市在整个评估期内（2003-2015）和投运期内（2010-2015），按照二氧化硫排放量的自然对数水平计算的实际值和预测值及平均处置效应结果。

表 5 送电端特高压城市的平均处置效果（对数）

特高压线	地级市	Panel A: Whole evaluation period			Panel B: Operation period		
		Actual	Predicted	ATE	Actual	Predicted	ATE
德宝线	德阳市	9.918	9.823	0.095	9.918	9.711	0.206
楚穗线	丽江市	8.274	7.672	0.601	8.746	7.443	1.303
银东线	银川市	10.336	9.719	0.616	11.088	9.752	1.335
伊穆线	呼伦贝尔市	11.136	11.218	-0.082	11.335	11.513	-0.178
德宝线	宝鸡市	10.890	11.184	-0.294	10.476	11.114	-0.638

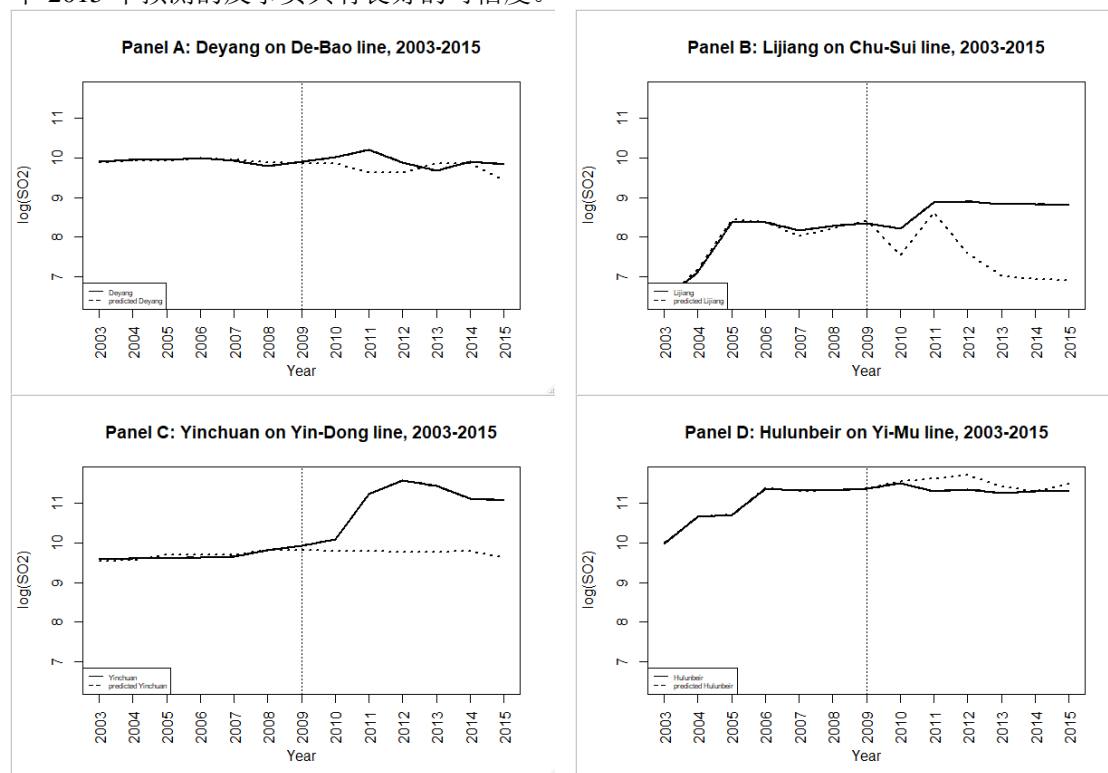
首先，从符号上来看，面板 A 与面板 B 估计结果一致，送电端特高压城市有 3/5 的正 ATE，2/5 的负 ATE。这表明特高压项目投运对送电端城市的二氧化硫排放量没有显著的减

排效果，反而导致其增加。其中，德阳市、丽江市和银川市都呈现出增加的情形，而呼伦贝尔市和宝鸡市则呈现出减少的情形。

其次，从大小上来看，面板 B 的 ATE 都大于面板 A 的结果，也就是说从投运期来测算的 ATE 比整个评估期测算的结果更大。由于本文更感兴趣的是面板 B 的 ATE，它更直接地评估了特高压项目对送电端城市二氧化硫排放量的影响，本文主要讨论面板 B 的结果，并结合按照二氧化硫排放量绝对量的测算结果。2010 年特高压项目投运后，德阳市和银川市的二氧化硫排放量平均每年分别增加了 0.2% 和 1.3%，即 0.32 万吨和 5.43 万吨，丽江市的二氧化硫排放量平均每年增加了 1.3%；而呼伦贝尔市和宝鸡市的二氧化硫排放量平均每年分别减少了 0.18% 和 0.63%，即 0.62 万吨和 3.03 万吨。

究其原因，德阳市是双向德宝线中在夏季丰水期为陕西省输送富余水电的送电端，但由于干湿季分明的自然气候特征，在冬季枯水期只能依靠火力发电来满足电力需求。虽然四川省在冬季接受来自德宝线的宝鸡市输送的电力，但德阳市接受的份额有限，没有明显的替代效果，不过德阳市的二氧化硫排放量增加幅度不大。丽江市依托当地丰富的水能资源，基本以水力发电为主，即使因输电任务而增加发电量，也不会导致二氧化硫排放量的增加。因此极有可能是 2010 年后丽江当地引入了云铝沥鑫等电解铝污染工业，造成了污染物的排放增加，而不是特高压的副作用。银川市建有大型火电基地，以火力发电为主，因输电任务而增加火力发电量，导致银川市的二氧化硫排放量显著增加。呼伦贝尔市的风电产业开发趋于成熟，在内蒙古电力开展风火打捆外送模式下，风电比例逐年提高，大幅替代火电，二氧化硫排放量有所下降。宝鸡市是双向德宝线中在冬季为四川省输送火电的送电端，得益于夏季德阳市输送的水电，有效地替代了火电，显著地减少了宝鸡市的二氧化硫排放量。

图 1 比较直观地展示了送电端实验组城市的反事实拟合效果和平均处置效应。可以看到，送电端实验组城市在处置前时期 2003-2009 年，都拟合得较好，基于控制组构建的二氧化硫排放量预测路径几乎与 5 个特高压城市的实际路径相重叠，这也说明处置后时期 2010 年-2015 年预测的反事实具有良好的可信度。



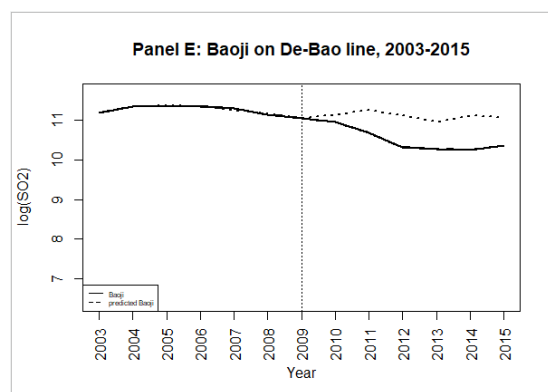


图 1 送电端特高压城市处置效应图

注：图 1 中，黑色实线为实际路径，虚线为预测的反事实路径。面板 D 和 E 中虚线在实线之上，说明特高压项目对呼伦贝尔市和宝鸡市的二氧化硫排放量有减排效果；而其余面板，均为实线在虚线之上，说明特高压项目对这几个送电端城市没有减排效果，这些与表 5 的结果是一致的。

5.2 受电端

(一) 模型预测

表 6 受电端特高压省份样本拟合效果

特高压线	省份	In-sample fit	
		R-square	F-statistic
伊穆线	辽宁省	0.758	15.68 on 1 and 5 DF
银东线	山东省	0.994	335.15 on 2 and 4 DF
德宝线	陕西省	0.921	58.56 on 1 and 5 DF
楚穗线	广东省	0.097	0.54 on 1 and 5 DF
德宝线	四川省	0.609	7.79 on 1 and 5 DF

利用处置前时期数据建立预测模型，并采用基于 Eq.(8)的 AICC 准则对非特高压省份进行组合。表 6 显示，除了广东省，其他 4 个实验组省份均有较好的样本拟合，特别是山东省和陕西省， $R^2 > 0.92$ 。这些结果表明，AICC 准则选择的预测模型表现比较好，特高压城市的二氧化硫排放量及其预测的反事实在后处理期内具有较好的可比性。

(二) 平均处置效果

本文根据第二节描述的方法，评估了特高压项目对受电端省份二氧化硫排放量的平均处置效应。表 7 分别列出了每个特高压省份在整个评估期内（2003-2015）和投运期内（2010-2015），按照二氧化硫排放量的自然对数水平计算的实际值和预测值及平均处置效应结果。

表 7 受电端特高压省份的平均处置效果（对数）

特高压线	省份	Panel A: Whole evaluation period			Panel B: Operation period		
		Actual	Predicted	ATE	Actual	Predicted	ATE
伊穆线	辽宁省	13.688	13.573	0.115	13.733	13.484	0.249
银东线	山东省	14.196	14.164	0.032	14.159	14.090	0.070
德宝线	陕西省	13.448	13.528	-0.080	13.354	13.527	-0.173
楚穗线	广东省	13.629	13.745	-0.116	13.519	13.771	-0.252
德宝线	四川省	13.643	13.800	-0.157	13.478	13.819	-0.341

首先，从符号上来看，面板 A 与面板 B 一致，受电端特高压省份有 3/5 的负 ATE，2/5 的正 ATE。这表明特高压项目投运对受电端省份的二氧化硫排放量有一定的减排效果。其中，陕西省、广东省和四川省都呈现出减少的情形，而辽宁省和山东省则呈现出增加的情形。

其次,从大小上来看,面板 B 的 ATE 都大于面板 A 的结果,也就是说从投运期来测算的 ATE 比整个评估期测算的结果更大。如前所述,本文对面板 B 的 ATE 更感兴趣,本文主要讨论面板 B 的结果,并结合按照二氧化硫排放量绝对量的测算结果。2010 年特高压项目投运后,陕西省、广东省和四川省的二氧化硫排放量平均每年分别减少了 0.17%、0.25%和 0.34%,即 15.71 万吨、20.74 万吨和 29.01 万吨;而辽宁省和山东省的二氧化硫排放量平均每年分别增加了 0.25%和 0.07%,即 1.03 万吨和 9.46 万吨。

究其原因,陕西省和四川省同是双向德宝线的受电端,火电与水电的季节互补,整体上减少了火电的比例,从而有效地减少了陕西省和四川省的二氧化硫排放量。而且测算结果表明,四川省的减排效果更加显著,这是因为特高压项目缓解四川弃水问题,使得当地能够最大限度地利用清洁水电,淘汰落后的火电机组,优化四川的供电结构。广东省接受外来输电,减少了本地火力发电量,而且随着广东省内核电站陆续并网发电,火电比例下降,从而显著地减少了二氧化硫排放量。然而,辽宁省和山东省在接受外来输电的情况下,二氧化硫排放量仍然增加,表明当地以火电为主的供电结构没有得到改善。此外,辽宁省和山东省是工业大省,除了燃煤发电,其他行业对煤炭的需求量也较大,这也是导致二氧化硫排放量增加的原因之一。

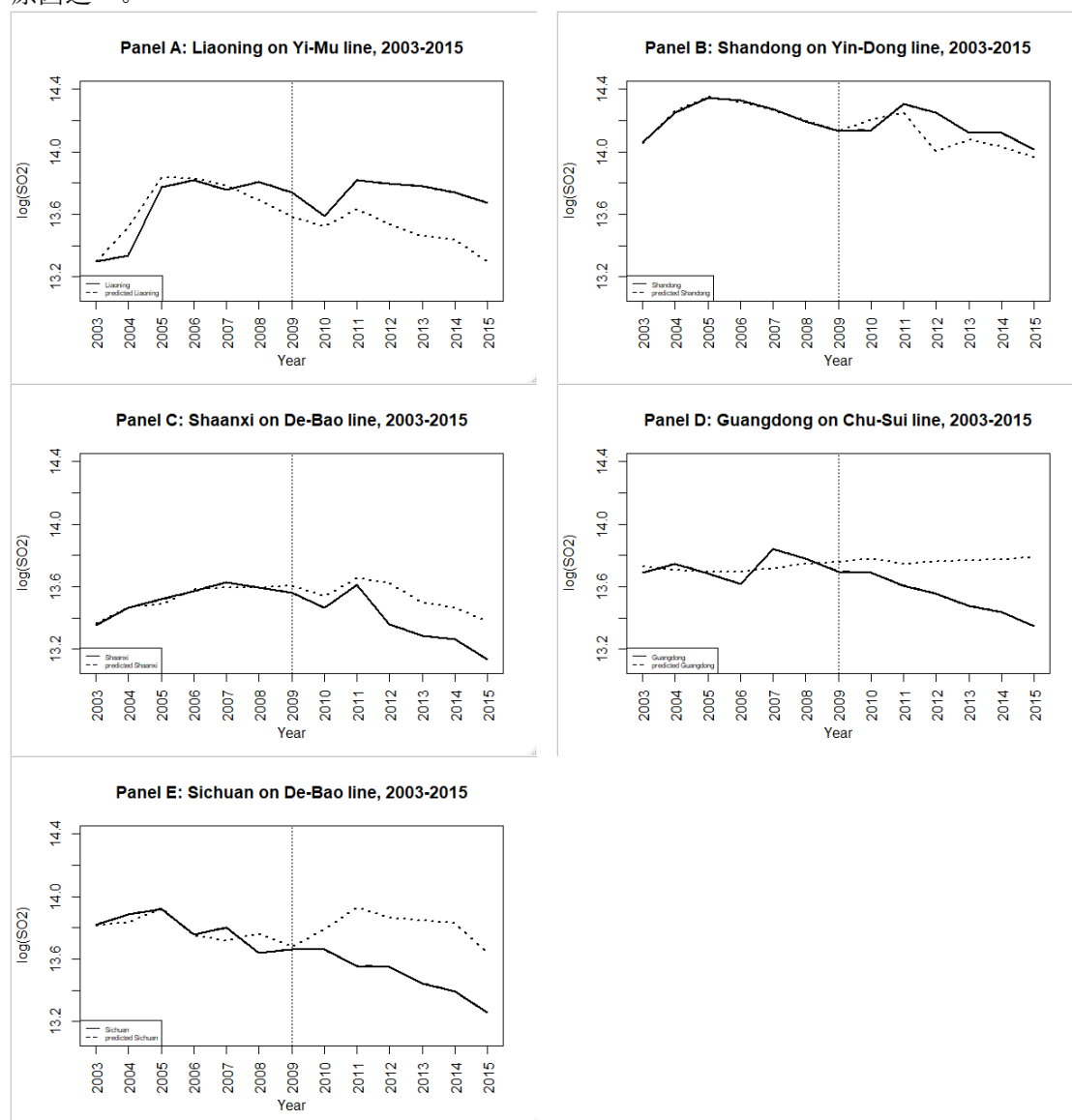


图 2 受电端特高压省份处置效应图

注:图 2 中,黑色实线为实际路径,虚线为预测的反事实路径。面板 C、D 和 E 中虚线

在实线之上,说明特高压项目对陕西省、广东省和四川省的二氧化硫排放量有减排效果;而其余面板 A 和 B,均为实线在虚线之上,说明特高压项目对辽宁省和山东省没有减排效果,这些与表 7 的结果是一致的。

图 2 比较直观地展示了受电端实验组省份的反事实拟合效果和平均处置效应。可以看到,受电端实验组省份在处置前时期 2003-2009 年,除了辽宁省和广东省波动较大,其余省份都拟合得较好,基于控制组构建的二氧化硫排放量预测路径几乎与特高压省份的实际路径相重叠,这也说明处置后时期 2010 年-2015 年预测的反事实具有良好的可信度。

6 稳健性检验

6.1 敏感性测试

为了测试基准结果对控制组变化的敏感性,本文通过构建新的控制组来重新估计模型。如果基准结果对此变化敏感,则基于新控制组的估计结果将与上述基准结果有显著差异;如果基准结果对此变化不敏感,则说明本文的主要估计结果是稳健的(Ke Xiao et al., 2017)。本文将从送电端和受电端分开进行分析。

(一) 送电端

回顾上一节,本文对送电端控制组的选择主要是依据 2010 年实验组的火电厂工业总产值选择相近区间的地级市组成控制组。在本小节,为了使控制组地级市的火电厂工业总产值分布更加广泛,本文将 2010 年各地级市火电厂工业总产值按升序排列,并剔除掉涉及送电端和受电端省内的所有地级市,在每个以 100 万元为间隔的区间内选取首个地级市,若区间内无城市,则忽略不计。例如,在火电厂工业总产值(万元)为[300, 400)的区间内,从小到大依次是泉州、宿州、白银、鸡西等城市,那么该区间内选取泉州。如表 8 所示,本文选择了 31 个地级市组成新的控制组。

表 8 送电端新控制组地级市的火电厂工业总产值(2010 年)

单位:百万元

地级市	火电厂 工业总产值	地级市	火电厂 工业总产值	地级市	火电厂 工业总产值
丽水	0.00	阳泉	1169.74	扬州	2370.43
桂林	105.29	台州	1227.82	漳州	2434.17
吉安	201.76	保定	1310.19	邯郸	2659.36
泉州	303.63	福州	1434.57	徐州	3187.31
铜陵	403.07	太原	1558.97	石家庄	3264.29
廊坊	563.40	常州	1652.78	无锡	3529.26
晋中	613.08	晋城	1701.91	宁波	5187.37
连云港	704.79	哈尔滨	1807.71	苏州	6509.86
阜阳	818.48	杭州	2044.74	大庆	7529.22
盐城	914.74	镇江	2111.66		
温州	1066.56	金华	2212.22		

注:表 8 列出了用于敏感性检验的送电端新控制组。本文把 2010 年各地级市的火电厂工业总产值按升序排列,剔除涉及送电端和受电端省内的所有地级市,在每个以 100 万元为间隔的区间内选取首个地级市。若区间内无城市,则忽略不计。

表 9 报告了送电端特高压城市基于新控制组估计的样本拟合度,对于所有的特高压城市, R^2 大于 0.92,表明基于新控制组的预测效果比基准结果的更好。本文进一步以图表形式展示结果,在处置前时期 2003 年-2009 年,基于新控制组构建的二氧化硫排放量路径几乎与 5 个特高压城市的实际路径相重叠,这也说明处置后时期 2010 年-2015 年预测的反事实具有良好的可信度。

表 9 送电端新控制组城市的拟合效果

特高压线	地级市	In-sample fit	
		R-square	F-statistic
德宝线	德阳市	0.957	44.33 on 2 and 4 DF
楚穗线	丽江市	0.969	154.89 on 1 and 5 DF
银东线	银川市	0.998	954.97 on 2 and 4 DF
伊穆线	呼伦贝尔市	0.983	116.63 on 2 and 4 DF
德宝线	宝鸡市	0.926	62.65 on 1 and 5 DF

表 10 报告了送电端特高压城市基于新控制组估计的平均处置效应结果。通过比较表 10 和表 5, 本文可以看到, 无论是面板 A 还是面板 B, 当控制组发生变化时, 基准结果在符号上都是一致的, 对应的城市都有 3/5 的正 ATE, 2/5 的负 ATE; 在大小的比较上, 基准结果也是稳健的。

表 10 送电端新控制组城市的平均处置结果 (ATE)

特高压线	地级市	Panel A: Whole evaluation period			Panel B: Operation period		
		Actual	Predicted	ATE	Actual	Predicted	ATE
德宝线	德阳市	9.918	9.866	0.052	9.918	9.804	0.113
楚穗线	丽江市	8.274	7.823	0.451	8.746	7.769	0.977
银东线	银川市	10.336	9.691	0.645	11.088	9.690	1.397
伊穆线	呼伦贝尔市	11.136	11.650	-0.513	11.335	12.447	-1.112
德宝线	宝鸡市	10.890	11.164	-0.274	10.476	11.069	-0.593

(二) 受电端

回顾上一节, 本文对受电端控制组的选择主要是依据各省份的电力缺口, 并排除了有特高压项目的省份。在本小节, 本文以生产总值作为电力短缺的代理变量, 主要是考虑到社会发展状况比较接近的省份, 对电力的需求具有相似性。本文根据 2010 年中国各省的生产总值, 选取相应的控制组省份组成新的控制组, 并排除有特高压项目的送电端省份, 如表 11 所示。

表 11 受电端新控制组省份的生产总值 (2010 年) 单位: 亿元

省份	GDP	省份	GDP
甘 肃	4120.75	湖 北	15967.61
贵 州	4602.16	湖 南	16037.96
新 疆	5437.47	四 川	17185.48
吉 林	8667.58	辽 宁	18457.27
山 西	9200.86	河 北	20394.26
江 西	9451.26	河 南	23092.36
广 西	9569.85	浙 江	27722.31
陕 西	10123.48	山 东	39169.92
黑龙江	10368.6	江 苏	41425.48
安 徽	12359.33	广 东	46013.06
福 建	14737.12		

注: 表 11 列出了用于敏感性检验的受电端新控制组。本文把 2010 年中国各省的生产总值按升序排列, 剔除掉涉及送电端和受电端的省份, 选取省份组成新的控制组。为了便于对比, 表中黑体的省份为实验组省份。

表 12 报告了送电端特高压城市基于新控制组估计的样本拟合度, 除了广东省和四川省, 其他省份的 R^2 都大于 0.92, 表明基于新控制组的预测效果比基准结果的更好。本文进一步以图表形式展示结果, 在处置前时期 2003 年-2009 年, 基于新控制组构建的二氧化硫排放量路径几乎与 5 个特高压省份的实际路径相重叠, 这也说明处置后时期 2010 年-2015 年预

测的反事实具有良好的可信度。

表 12 受电端新控制组省份的样本拟合效果

特高压线	省份	In-sample fit	
		R-square	F-statistic
伊穆线	辽宁省	0.969	157.18 on 1 and 5 DF
银东线	山东省	0.994	335.15 on 2 and 4 DF
德宝线	陕西省	0.921	58.56 on 1 and 5 DF
楚穗线	广东省	0.097	0.54 on 1 and 5 DF
德宝线	四川省	0.625	8.33 on 1 and 5 DF

表 13 报告了送电端特高压城市基于新控制组估计的平均处置效应结果。通过比较表 13 和表 7, 本文可以看到, 无论是面板 A 还是面板 B, 当控制组发生变化时, 基准结果在符号上都是一致的, 对应的省份都有 3/5 的正 ATE, 2/5 的负 ATE; 在大小的比较上, 基准结果也是稳健的, 基准结果估计的 ATE 指标均与新控制组的接近。

表 13 受电端新控制组省份的平均处置结果 (ATE)

特高压线	省份	Panel A: Whole evaluation period			Panel B: Operation period		
		Actual	Predicted	ATE	Actual	Predicted	ATE
伊穆线	辽宁省	13.688	13.563	0.125	13.733	13.463	0.270
银东线	山东省	14.196	14.164	0.032	14.159	14.090	0.070
德宝线	陕西省	13.448	13.528	-0.080	13.354	13.527	-0.173
楚穗线	广东省	13.629	13.745	-0.116	13.519	13.771	-0.252
德宝线	四川省	13.643	13.702	-0.059	13.478	13.607	-0.129

6.2 可驳性测试

参考 Ke Xiao et al. (2017) 的研究, 本文在本部分考察模型稳健性时采用了可驳性测试。其基本思想是, 在计量模型中, 本文通常会对于样本进行估计, 其中不应该观察到“处置效应”, 原因是子样本没有受到处置。也就是说, 如果本文在子样本的估计结果中没有发现处置效应, 说明本文样本的主要估计结果是可信的。本质上, 这其实就是一种安慰剂检验。

具体来说, 本文应用 Hsiao et al. (2012) 的方法对基准结果中的非特高压城市进行了可驳性测试, 并对送电端和受电端分开进行研究。在每次测试中, 本文会将单个控制组城市看作是特高压城市。在这种情况下, 本文将 2010 年设置的特高压处置效应施加到控制组城市中的某一个, 并将其余的城市作为对照组。模型会根据 AICC 标准从其余控制组城市中选择最佳预测变量。如果目标城市的基准结果确实不受特高压项目的影响, 那么控制组城市的二氧化硫排放量对数的实际值和假设值之间的差异不会很大。此外, 由于本文的控制组样本数较大, 考虑到可比性, 本文从中随机抽取 5 个非特高压城市的结果。

(一) 送电端

表 14 可驳性检验结果: 送电端的控制组

控制组 地级市	Pre-intervention		Post-intervention	
	R-square	F-statistic	ATE	Significance
宜春市	0.895	42.44 on 1 and 5 DF	0.131	No
乌鲁木齐市	0.988	161.41 on 2 and 4 DF	-0.257	No
芜湖市	0.992	238.84 on 2 and 4 DF	0.096	No
温州市	0.998	967.73 on 2 and 4 DF	0.146	No
莆田市	0.996	505.12 on 2 and 4 DF	-0.630	No

表 14 报告了送电端随机抽取的 5 个控制组城市的样本内拟合效果和平均处置效应。在这 5 个控制组城市中, 除了宜春市, 其余城市的 R^2 大于 0.98, 表明预测效果良好。而且, ATE 表明送电端的控制组城市没有显著的可驳性影响。本文还将进一步通过核密度图进行

分析。

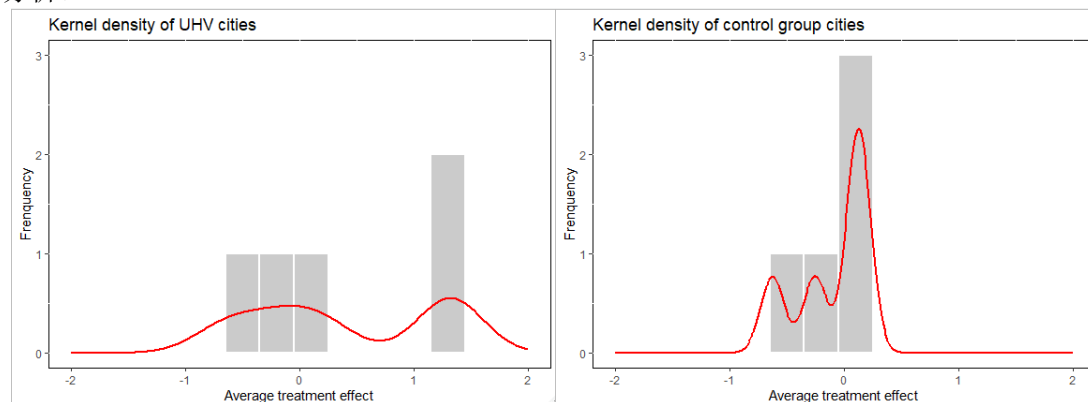


图3 送电端基准结果和可驳性测试结果的对比（直方图和核密度线）

从图3可以看出基准结果的分布比可驳性测试结果的更加分散。左边的基准结果显示，特高压城市的处置效应大小分别集中在-0.5-0.25%和1.3%附近，分散程度较高；而右边的可驳性测试结果显示，控制组城市的处置效应大小集中在-0.5%-0.2%附近，分散程度较低。而且，特高压城市的平均处置效应的幅度远大于控制组城市，这与本文的预期一致。

（二）受电端

表15 可驳性检验结果：受电端的控制组

控制组 省份	Pre-intervention		Post-intervention	
	R-square	F-statistic	ATE	Significance
湖北省	0.988	161.02 on 2 and 4 DF	-0.266	No
湖南省	0.986	142.8 on 2 and 4 DF	-0.374	No
江苏省	0.896	43.21 on 1 and 5 DF	0.116	No
山西省	0.99	190.74 on 2 and 4 DF	0.108	No
安徽省	0.917	55.09 on 1 and 5 DF	0.026	No

表15报告了受电端随机抽取的5个控制组省份的样本内拟合效果和平均处置效应。在这5个控制组省份中，除了江苏省，其余省份的 R^2 大于0.91，表明预测效果良好。而且，ATE表明受电端的控制组省份没有显著的可驳性影响。本文还将进一步通过核密度图进行分析。

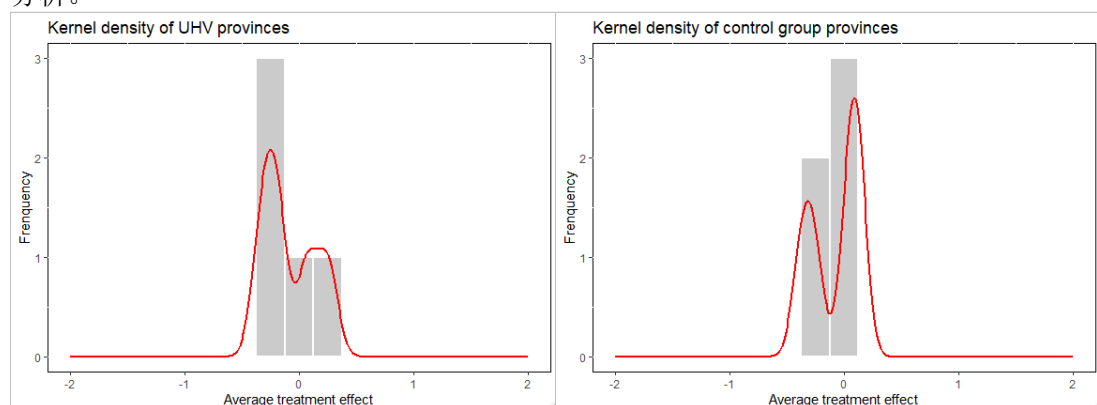


图4 受电端基准结果和可驳性测试结果的对比（直方图和核密度线）

与送电端的结果相似，本文从图4可以看出基准结果的分布比可驳性测试结果的更加分散。左边的基准结果显示，特高压省份的处置效应大小分别集中在-0.5和-0.1%-0.3%附近，分散程度较高；而右边的可驳性测试结果显示，控制组省份的处置效应大小集中在-0.3%-0.1%附近，分散程度较低。而且，特高压省份的平均处置效应的幅度远大于控制组省份，这与本文的预期一致。

7 结论

本文利用 Hsiao, Ching, and Wan (2012)提出的回归合成控制法,基于 2003-2015 年中国地级市层面的二氧化硫排放数据,评估了 2010 年投入运营的楚穗线、德宝线、伊穆线和银东线四条特高压线路对送电端地级市和受电端省份二氧化硫排放量的影响。结果显示:送电端城市的二氧化硫排放量均有增加,而受电端地区的二氧化硫排放量有所减少。本文的主要结论如下:

(一)对于送电端而言,特高压项目实施后,送电端城市中德阳市、银川市和丽江市的二氧化硫排放量平均每年分别增加了 0.2%、1.3%和 1.3%。其中,银川市是由于输电任务而增大发电量且仍以火电为主,而丽江市的增加是由于电解铝工业污染。

(二)对于受电端而言,特高压项目实施后,受电端省份由于接受外来输电而减少本地发电量,导致当地的二氧化硫排放量有所减少。陕西省、广东省和四川省的二氧化硫排放量平均每年分别减少了 0.17%、0.25%和 0.34%。

(三)从整体而言,特高压项目投运后,受电端减少的二氧化硫排放量远远大于送电端增加的量,也就是说,全国总的二氧化硫排放量减少。现阶段,特高压项目对大气污染减排做出了一定的贡献。但是,预期的政策效果并没有完全实现,送电端的二氧化硫排放量增加,受电端的减排幅度不大。考虑到是因为特高压投运的时间不长,预计未来特高压项目可以发挥更大的减排作用。

(四)本文的不足之处在于,整个政策评估期的周期不够长,考虑到清洁能源的开发和整合需要大量时间,短期内特高压输送电力以火电为主可能会导致本文低估其减排效果,使得政策评估结果不够准确。而且,本文使用的二氧化硫排放量数据是按年度测量的,无法纳入季节因素变化的影响。这些问题值得进一步探讨。

参考文献

- [1] 陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011, 34(4): 124-143.
- [2] 陈硕,陈婷. 空气质量与公共健康_以火电厂二氧化硫排放为例[J]. 经济研究, 2014, 49(8): 158-169, 183.
- [3] 范欣,宋冬林,赵新宇. 基础设施建设打破了国内市场分割吗[J]. 经济研究, 2017, 52(2): 20-34.
- [4] 梁若冰,席鹏辉. 轨道交通对空气污染的异质性影响——基于 RDID 方法的经验研究[J]. 中国工业经济, 2016, 336(3): 83-98.
- [5] 林伯强,姚昕. 电力布局优化与能源综合运输体系[J]. 经济研究, 2009, 44(494), 06 106-116.
- [6] 刘铁军,邱大庆,孙娟,等. 城市交通拥堵与空气污染相关度的初步研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S2): 58-60.
- [7] 罗源. 城市交通基础设施投资对空气质量的影响[D]. 厦门大学, 2018.
- [8] 万冬君,刘伊生,姚兵. 城市能源基础设施-经济-社会-环境复合系统协调发展研究[C]//第九届中国管理科学学术年会论文集, 2007: 682-687.
- [9] 卫梦星. "反事实"思想在宏观政策效应评估中的应用——基于 Hsiao 面板数据的方法[D]. 中国社会科学院研究生院, 2013.
- [10] 杨继东,章逸然. 空气污染的定价_基于幸福感数据的分析[J]. 世界经济, 2014, 37(12): 162-188.
- [11] Bai C L, Qi; Ouyang, Min. Property taxes and home prices: A tale of two cities [J]. Journal of Econometrics, 2014, 180(1): 1-15.

- [12] Chen W, Lei Y. Path analysis of factors in energy-related CO₂ emissions from Beijing's transportation sector [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 50(473-87).
- [13] Ching S H, Cheng; Wan, Shui Ki. Impact of CEPA on the labor market of Hong Kong [J]. *China Economic Review*, 2012, 23(4): 975-81.
- [14] Du Z Z, Lin. Home-purchase restriction, property tax and housing price in China: A counterfactual analysis [J]. *Journal of Econometrics*, 2015, 188(2): 558-68.
- [15] Hsiao C, Ching HS, Wan SK. 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): 705-40.
- [16] Ke X, Chen H, Hong Y, et al. Do China's high-speed-rail projects promote local economy?—New evidence from a panel data approach [J]. *China Economic Review*, 2017, 44(203-26).
- [17] Kumar P, Druckman A, Gallagher J, et al. The nexus between air pollution, green infrastructure and human health [J]. *Environ Int*, 2019, 133(Pt A): 105181.
- [18] Li J, Lin B. Environmental impact of electricity relocation: A quasi-natural experiment from interregional electricity transmission [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, 66(151-61).
- [19] Luo Z, Wan G, Wang C, et al. Urban pollution and road infrastructure: A case study of China [J]. *China Economic Review*, 2018, 49(171-83).
- [20] Ouyang 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): 545-57.
- [21] Sun C, Luo Y, Li J. Urban traffic infrastructure investment and air pollution: Evidence from the 83 cities in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(488-96).
- [22] Sun C, Zheng S, Wang R. Restricting driving for better traffic and clearer skies: Did it work in Beijing? [J]. *Transport Policy*, 2014, 32(34-41).
- [23] Vega-Bayo A. An R Package for the Panel Approach Method for Program Evaluation: pampe [J]. *The R Journal*, 2015, 7(105-21).
- [24] Wan S-K, Xie Y, Hsiao C. Panel data approach vs synthetic control method [J]. *Economics Letters*, 2018, 164(121-3).
- [25] Wang J, Ren Y, Shu T, et al. Economic perspective-based analysis on urban infrastructures carrying capacity — A China study [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, 83(
- [26] Wang Y, Li M, Wang L, et al. Can remotely delivered electricity really alleviate smog? An assessment of China's use of ultra-high voltage transmission for air pollution prevention and control [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242(
- [27] Wang Z, Chen F, Fujiyama T. Carbon emission from urban passenger transportation in Beijing [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 41(217-27).
- [28] Zhang Y, Ma T, Guo F. A multi-regional energy transport and structure model for China's electricity system [J]. *Energy*, 2018, 161(907-19).

The Effects of Power Infrastructure Investment on Air Pollution

Ai Hongshan, Wan Yu

(Economy & Trade School, Hunan University, Changsha, 410079)

Abstract: Based on panel data of Chinese prefecture-level cities from 2003 to 2015, this study adopts the regression synthesis control method proposed by Hsiao et al. (2012) to evaluate the air pollution-reduction effect of four UHV lines (Chu-sui line, De-bao line, Yi-mu line, and Yin-dong line) on sulfur dioxide (SO₂) emissions. Empirical results indicate that after the four UHV lines were put into operation: (1) For sending areas, SO₂ emissions in Deyang, Yinchuan, and Lijiang increase by 0.2%, 1.3% and 1.3% on average, annually. (2) For landing areas, SO₂ emissions in Shaanxi, Guangdong, and Sichuan decrease by 0.17%, 0.25%, and 0.34% on average, annually. (3) Overall, the amount of SO₂ emissions reduced in landing areas is much larger than that increased in sending areas. To conclude, UHV projects have played an important role in controlling pollution and balancing power between regions at present stage.

Keywords: Power infrastructure investment; Air pollution; Ultra-high voltage power grid; Regression synthesis control method