

2023-2024 年度
山西省统计科学研究课题
优秀成果

项目编号 2023LZ008

项目类别 重点课题

项目名称 煤炭资源型城市减污降碳协同效应、驱动
机制及优化路径研究

项目负责人 韩菲

承担单位 山西财经大学

课题组成员 刘谦 孙晓芳 张帆 张芳 贾一丹 李新越
郭雨婷

项目编号	2023LZ008
------	-----------

山西省统计科学研究项目结项评审活页

(活页文字表述中不得直接或间接透露个人相关背景材料)

课题名称：煤炭资源型城市减污降碳协同效应、驱动机制及优化路径研究

一、本课题解决的主要问题

党的二十大报告提出，建设人与自然和谐共生的中国式现代化需要协同推进降碳、减污、扩绿、增长。煤炭资源型城市是国家重要的能源战略保障基地，其产业结构偏重、能源结构偏煤的发展方式导致污染物和 CO₂ 排放量居高不下，正面临着经济转型发展与节能减排的双重压力，因此如何挖掘减污降碳协同增效潜力，明晰减污降碳协同增效的驱动机制，优化减污降碳协同增效路径，是煤炭资源型城市可持续发展的必经之路。本项目研究了 2008-2020 年中国大陆 47 个煤炭资源型城市减污降碳的协同效应、驱动机制及优化路径。

1. 主要研究内容

第一，煤炭资源型城市减污降碳协同效应的综合测度

煤炭资源型城市作为我国煤炭供应的主体和基础工业的主要集聚区，也是大气污染物和碳排放的重要区域。鉴于此，本项目以中国大陆 47 个典型煤炭资源型城市为研究单元，基于典型大气污染物 (PM_{2.5}、SO₂、NO₂) 和 CO₂ 的排放清单数据，采用归一化方法构建大气污染物与 CO₂ 协同排放当量指标 EReq:

$$EReq = W_{CO_2} \cdot (\epsilon Q_{CO_2}) + W_{AP} \cdot (\alpha Q_{PM_{2.5}} + \beta Q_{SO_2} + \gamma Q_{NO_2})$$

根据大气污染物和 CO₂ 排放的治理成本，研究确定上式中的各项参数后，通过对 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 和 CO₂ 独立排放量的加权平均方法，计算获得煤炭资源型城市 2008-2020 年城市尺度的 EReq，以综合测度煤炭资源型城市减污降碳的整体效果。

第二，煤炭资源型城市减污降碳协同效应的时空演化规律

由于大气污染物与碳排放均非局地现象，都具有较强的空间外溢性，因此识别减污降碳协同效应的变化趋势时应综合考虑空间相关性。为精细研究 EReq 的复杂时空演化过程，本项目拟突破常规的线性演化研究思路，研究构建贝叶斯时空层次模型(BSHM)实现对复杂时空变化过程的非线性变化效应识别，实现对煤炭资源型城市减污降碳协同效应变化趋势的识别和预测。

第三，煤炭资源型城市减污降碳协同效应的驱动机制

在精准评估了 2008–2020 年煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应及掌握了其时空演化规律的基础上，本项目进一步研究了煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应的驱动机制。本项目通过研建一种因果推断框架方法，并结合环境经济学和大气环境学的相关理论，综合分析了煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应的驱动因子和作用机制。具体而言，本项目通过综合贝叶斯 LASSO 模型 (B-LASSO)、倾向值得分匹配模型 (PSM) 和随机森林模型 (RFM), 研究构建了一种非线性因果推断模型，实现了对非线性因果影响机制的探究。具体来说，首先采用 B-LASSO 模型识别具有显著相关关系的变量，然后采用 PSM 方法识别具有因果关系的变量，最后再采用 RFM 估计这些因果驱动变量影响的重要性和非线性影响机制。

第四，煤炭资源型城市减污降碳协同效应的政策优化

基于时空演化和驱动机制的实证结果，研究提出煤炭资源型城市提高大气污染物与 CO₂ 协同减排效应的政策优化建议。(1) 根据大气污染物与 CO₂ 协同减排效应水平的高低，对煤炭资源型城市进行等级划分；(2) 基于煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应的时空演化特征和未来时空演进趋势，识别和划分减污降碳协同重点区域；(3) 根据煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应的空间差异格局，研究以大气环境改善和碳减排为导向的减污降碳空间格局优化政策策略；(4) 根据不同城市在减污降碳协同驱动机制的异质性，提出精准化的区域性政策优化建议；(5) 根据不同城市在经济结构、排放源构成、自然条件、政策条件等方面的特点，研究统筹兼顾区域协同的协同治理政策体系；(6) 综合各项实证结果，提出对现有法律法规，如

碳交易制度、环境保护税法、大气污染防治政策等的完善建议。

2.主要研究结论

首先,本项目测度了 2008–2020 年中国大陆地区 47 个煤炭资源型城市减污降碳的协同效应,并识别了上述效应的时空演化规律,结果显示:2017 年前煤炭资源型城市减污降碳协同效应水平较低且变化比较稳定,2017 年后大部分城市的减污降碳协同效应水平显著提高;其中,中部的长治、朔州,东部的邯郸、济宁,西部的鄂尔多斯、榆林减污降碳效应较好,而中部的鹤壁、淮南,东部的阜新、枣庄,西部的广元、平凉效应较差;就单个城市而言,西部和中部个别城市的减污降碳效应更显著,但从整个区域来看,东部地区整体减污降碳效果优于西部和中部,且东部城市间减污降碳协同效应水平差距较小,而西部和中部城市间上述效应水平差距较大,特别是西部地区,减污降碳效果最优和最差的城市其效应水平大约相差 10 倍多。

其次,本项目通过综合贝叶斯 LASSO 模型(B-LASSO)、倾向值得分匹配模型(PSM)和随机森林模型(RFM),研究构建了一种非线性因果推断模型,从经济社会、政府规制以及自然环境三个方面探究了煤炭资源型城市减污降碳协同效应的驱动机制。结果显示,影响煤炭资源型城市减污降碳协同效应的主要因素是经济社会因素和自然环境因素。其中,人均 GDP(ED)、绿色发明专利申请量(TL)、实际利用外资水平(FDI)、空气流通指数(VC)、第三产业比重(PSI)对煤炭资源型城市减污降碳具有促进作用,而人口密度(IC)、城镇化率(UR)、能源消费结构(ENS)与减污降碳协同效应呈负相关。并且具有因果关系的 8 个变量的影响贡献从大到小分别是:ED(22.8%)、TL(19.0%)、ENS(12.1%)、IC(11.2%)、FDI(10.3%)、VC(8.9%)、PSI(8.2%)、和 UR(7.5%)。

二、本项目的重点难点

1.研究重点

(1)量化测度煤炭资源型城市减污降碳协同效应水平及空间差异。该内容是本项目的研究起点,是进一步开展时空演化规律、驱动机制、政策优化研究的基础,因此

也是研究重点。本项目突破了时空演化过程中传统的线性效应识别思路，研究构建贝叶斯时空层次模型（BSHM），由于大气污染物与碳排放均非局地现象，都具有较强的空间外溢性，因此识别减污降碳协同效应的变化趋势时应综合考虑空间相关性。BSHM模型是时空交互模型和贝叶斯层次模型的综合，其通过先验信息在充分考虑空间相关性的基础上，从复杂的时空变化过程中分解出总体空间趋势和局部时空趋势。实现时空非线性演化的科学刻画。

（2）深入研究煤炭资源型城市减污降碳协同效应的影响因素及作用机制。深入探讨煤炭资源型城市减污降碳效应的驱动机制是精准把握煤炭资源型城市推动减污降碳协同增效的关键，也是合理提出完善优化减污降碳政策建议的抓手。本项目通过综合贝叶斯 LASSO 模型（B-LASSO）、倾向值得分匹配模型（PSM）和随机森林模型（RFM），研究构建了一种非线性因果推断模型，实现了对非线性因果影响机制的探究。上述模型可以精准识别煤炭资源型城市减污降碳协同效应的驱动因子和因果作用机制，并估计相应的驱动效应。

2.研究难点

某些城市在某些年份的影响因素变量数据不易获取。本项目选择了 2008-2020 年中国大陆地区 47 个煤炭资源型城市为研究单元，并从经济社会、政府规制及自然环境三个方面选取了 12 个变量考察减污降碳效应的驱动机制。研究中发现有些城市缺乏相应年份的重要数据，因此还需要借助其他来源数据。通过采用前沿的深度学习模型，结合经济社会、自然地理等多个影响因素数据，以现有的数据为训练集，估计推算缺失的影响因素变量数据。

三、学术价值

第一，通过构建协同效应评价模型，实现对煤炭资源型城市减污降碳协同效应的科学测度，不仅丰富了协同效应理论的广度和深度，还可为其他类似综合评价问题提供研究思路和方法借鉴。

第二，为实现对复杂时空演化规律的精细化研究，突破线性变化测度的常规思路，研究提出一种贝叶斯时空层次模型；为深度研究复杂的时空因果关系，通过综合贝叶

斯 LASSO 模型 (B-LASSO)、倾向值得分匹配模型 (PSM) 和随机森林模型 (RFM), 研究构建了一种非线性因果推断模型, 实现了对非线性因果影响机制的探究。上述模型的提出, 可以丰富和完善时空统计方法体系, 并可为学界同行提供新的方法工具, 也可为类似研究提供方法借鉴。

四、创新之处

第一, 学术思想创新

时空样本数据在每个时空点上只可能有一次采样, 具有天然的小样本特性, 同时, 由地理学第一定律可知, 邻近的时空点之间又具有相关性, 因此, 时空数据的上述特性打破了经典统计范式要求的两大前提——大样本和独立同分布, 而贝叶斯统计范式可以通过先验信息有效解决时空数据中的小样本和非独立问题, 因此, 本项目采用贝叶斯统计范式分析时空数据, 较经典统计而言, 理论上更严密和完善。

第二, 研究内容创新

现有研究主要从宏观视角考察碳减排与大气污染控制的协同效应, 尚缺乏对煤炭资源型城市精细尺度协同减排机制的系统性深化研究。本项目以城市为研究单元, 评估了不同煤炭资源型城市大气污染物与 CO₂ 协同减排效应差异, 并进一步研究了协同减排效应的时空演化规律及驱动机制, 可为煤炭资源型城市因地制宜制定和优化相关协同减排政策提供参考, 对于资源型地区构建减污降碳协同控制体系具有重要意义。

第三, 研究方法创新

为实现对复杂时空演化规律的精细化研究, 突破线性变化测度的常规思路, 研究提出一种贝叶斯时空层次模型; 为深度研究复杂的时空因果关系, 通过综合贝叶斯 LASSO 模型 (B-LASSO)、倾向值得分匹配模型 (PSM) 和随机森林模型 (RFM), 研究构建了一种非线性因果推断模型, 实现了对非线性因果影响机制的探究。

说明: 页数不够可另加页。