

广东省工业减污降碳时空演变及影响因素研究

王晓宇¹, 岳芳敏², 顾天莉¹

(1. 中共广东省委党校, 广东 广州 510053; 2. 中共广东省委党校 社会和生态文明教研部, 广东 广州 510053)

摘要: 探究工业领域内减污降碳时空变化特征和驱动因素对于实现我国“双碳”目标、加快经济社会发展全面绿色转型具有重要意义。本研究以广东省下辖的21个地级市作为分析对象, 基于各市工业大气污染物排放和碳排放的相关数据, 构建旨在评估工业部门减污降碳效果的指标体系。运用时空地理加权回归、空间自相关和随机森林算法等模型对2006—2020年广东省工业减污降碳时空演变特征及影响因素展开分析。结果表明: (1) 2006—2020年, 广东省工业减污降碳整体呈良好趋势, 21个地级市工业减污降碳评价指标的平均值由2006年的0.88下降到2020年的0.74; 广东省工业减污降碳评价指标在2007—2013年和2017年存在较强的空间集聚特征, 全省工业减污降碳评价指标时空分异特征显著。 (2) 2006—2020年, 广东省工业减污降碳评价指标整体上呈珠三角核心城市低、粤东西北高的空间格局, 时空变动上工业减污降碳评价指标在中等值以下的地区有明显的扩大趋势, 低范围值由珠三角核心城市——广州市、深圳市向北扩散至梅州市、韶关市、清远市等粤北生态保护区, 其空间集聚特征呈现出集聚—离散的变化趋势。 (3) 第三产业对工业支持度、高技术制造业发展水平、能源消费效率和碳排放权交易试点的GTWR模型回归系数整体呈负值, 且影响的重要程度存在空间异质性。 (4) “十一五”至“十三五”时期, 广东省高技术制造业发展水平和规模以上工业企业R&D内部经费支出比重一直是推动工业减污降碳的关键因素。此外, 经济集聚度、工业规模水平和第三产业对工业支持度对于工业绿色发展的重要性也在提升。

关键词: 工业减污降碳; 时空演变; 影响因素

中图分类号: F429.9

文献标识码: A

文章编号: 1008-9659(2026)01-0033-15

近年来, 我国在推进生态文明建设的进程中取得了令人瞩目的成就, 特别是在环境质量提升和生态系统保护与修复两大核心领域。然而, 当前温室气体减排和生态环境保护所面临的深层次、结构性和根源性压力依然未得到根本缓解, 仍需要深入打好污染防治攻坚战, 实现减污降碳协同增效。2021年9月, 《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》发布, 标志着我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向, 推动减污降碳协同增效的关键时期^[1]。广东省作为我国改革开放的排头兵, 不仅是经济总量第一大省, 也是能源消费与碳排放大省, 单位生产总值能耗位居全国较高水平。根据中国城市温室气体工作组的数据集显示, 2020年广东省碳排放量占全国碳排放总量的5.8%, 其中工业领域的碳排放量占比达68%以上^[2]。同时, 作为支撑广东省经济增长的“压舱石”, 规模约占全国八分之一的工业拥有较完备的制造业体系。新时期广东省加快推进产业转型升级, 规模以上工业增加值中先进制造业产值占比超过一半, 高技术制造业产值占三成, 节能降碳的市场化机制改革走在全国前列, 能源消费中非化石能源占比超过三成。目前, 广东省总体处于工业化中后期阶段, 但粤东西北地区与珠三角地区经济发展水平存在较大差距, 产业结构仍以钢铁、石油化工、有色金属等重工业为主, 传统的高投入、高耗能、高污染、低效益产业推动增长的模式仍未得到根本扭转, 工业能耗强度较大且以化石能源为主的用能特性在短期内难以改变。这些问题对全省构建绿色低碳循环的工业体系及高质量实现“双碳”目标构成挑战。2023年6月, 广东省作出“1310”部署, 提出要深入推进绿美广东生态建设, 持续强化减污、节能与降碳力度, 打造人与自然和谐共生的“广东样板”。2023年8月, 《广东省减污降碳协同增效实施方案》将推动工业领域协同增效作为绿色低碳转型的主要任务之一^[3]。因此, 评估分析广东省工业部门减污降碳水平, 明确驱动工

[收稿日期] 2024-12-02

[修回日期] 2025-01-08

[作者简介] 王晓宇(2001-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境经济与政策方面研究, E-mail: wangxiaoyu_0423@126.com.

业减污降碳的影响因素,对实现工业绿色转型、促进减污降碳协同增效具有重要的现实意义,将在支撑我国“双碳”目标实现方面发挥重要作用。

1 文献综述

1.1 减污降碳协同效应的理论研究

化石燃料的燃烧是大气污染物和温室气体排放的主要共同来源,基于二者同根同源的特点^[4],部分学者对减污降碳协同的基本内涵、关键路径、多元共治体系构建等展开了系统探讨^[5-6]。关于“协同效应”的定义可追溯至联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在其第三次评估报告中初次确切提出的“协同效益”,这一概念可解释为在实施温室气体减排措施时产生的影响气候变化之外的重要效益^[7]。根据中国生态环境部环境与经济政策研究中心的定义,减污降碳协同效应包含控制污染物排放时所带来的温室气体减排效应和降低碳排放过程中产生的减污效应两个方面^[8]。

1.2 减污降碳协同效应及其影响因素的实证研究

学者们在研究视角、研究尺度和研究方法上不断丰富大气污染物排放和碳排放的研究。在研究视角上,许多学者从单边视角出发,针对某一减污或降碳政策的实施效果进行量化评估或测算。如Burtraw等人^[9]研究发现,美国电力行业实行的二氧化碳减排政策对于抑制其他空气污染物排放具有显著效果;郑石明等人^[10]认为气候政策可以通过间接途径发挥减少碳排放的协同作用,且中央政府在气候政策协同方面的表现较省级政府更为优越;刘奎等人^[11]研究指出,碳排放权交易试点政策主要通过促进企业直接减少排放和提升能源效率的途径来降低企业二氧化碳排放总量和强度。更进一步地,基于双边视角全面探究减污与降碳政策协同效应的研究也受到了学界的关注。如张瑜等人^[8]认为中国的减污和降碳政策展现出显著的协同效应,降碳政策在减少污染物排放和碳排放上具有相近效果,而减污政策的效果主要侧重于污染物减排方面;孙建等人^[12]研究指出,环境保护税政策和碳交易政策均能在一定程度上抑制工业污染物和碳排放。在研究尺度上,已有文献主要从国家层面、区域层面、行业层面等对减污降碳的效应、影响因素和时空特征等进行探究。唐湘博等人^[13]对中国大气污染物排放与碳排放的时空分布进行分析,并进一步探讨减污降碳协同效应在全国八大经济区及各省的时空演变特征;康哲等人^[14]识别了黄河流域包鄂榆、关中平原和中原三大城市群减污降碳的关键因素及其非线性相应关系;陈晓红等人^[15]发现中国工业存在明显的减污降碳协同效应,即在大气污染物排放当量减少的同时会显著促进碳排放量的减少。在研究方法上,计量模型、指标构建与因素分解法的应用较为广泛。Du等人^[16]从微观企业视角出发,构建了涵盖污染物排放强度和碳排放指数的综合评价指标,并采用面板固定效应模型和中介效应模型验证了环境规制对中国工业企业污染减排和协作减排的有效性;王力等人^[17]运用LMD(对数平均迪氏指数)分解法和LEAP(长期能源替代规划)模型,对渭南市的大气污染物与温室气体进行协同减排效应模拟和预测分析,研究结果表明,能源结构优化、产业结构升级和交通运输条件改善具有显著的协同减排效果;狄乾斌等人^[18]运用复合系统协同度模型和引力模型等量化工具,揭示了中国三大城市群内部各子系统在减污降碳协同治理方面的表现及其区域差异和空间关联。

也有学者通过STIRPAT、地理加权回归、耦合协调度模型和地理探测器等方法对减污降碳效应进行评估。刘茂辉等人^[19]基于STIRPAT模型,预测分析了不同情景下天津市减污降碳的协同效应;王菲等人^[20]对长三角工业二氧化碳控制和大气污染物控制两个子系统间的耦合度进行量化计算,并结合时空地理加权回归和地理探测器,深入探讨长三角地区工业部门减污降碳协同效应的时空演变特征及其驱动因素。相关文献聚焦于经济发展水平、人口因素、产业结构、技术进步等方面^[21-23],学者们同时也关注了环境规制、对外贸易、政府财政等对二氧化碳和大气污染物排放的影响^[24-26]。

综上所述,已有文献在减污降碳的理论、方法和指标选取等方面奠定了良好的基础,但仍存在一些不足。一方面,基于大气污染物排放和碳排放双边视角的研究在工业内部结构调整方面,对工业减污降碳驱动因素的探究不足。另一方面,缺乏针对广东省的实证分析,当前案例经验尚不足以支撑我国推进减污降碳协同增效,助力“双碳”目标的实现。鉴于此,本研究以广东省21个地级市作为研究区域,对2006—2020年

广东省工业领域的减污降碳成效进行量化评估并剖析其时空演变特征。运用时空地理加权回归和随机森林机器学习算法等模型,探讨影响广东省工业减污降碳的关键因素,以期为广东省工业提高“含绿量”的绿色发展之路提供参考。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

广东省位于中国华南地区,区位优势优越,作为我国改革开放的先行地,其经济社会发展一直走在全国前列,同时广东省也是能源消费大省,在能源消费和碳排放方面占据较大比重。据测算,2019年广东省工业生产过程二氧化碳排放总量为614.1万吨^①,其中,广州市、深圳市的碳排放量分别居于第一、第二位,二者碳排放总量占全省工业生产过程二氧化碳总排放量的12.5%(表1)。

表1 2019年广东省各地级市工业生产过程碳排放量

地级市	工业生产过程碳排放量 (百万吨)	地级市	工业生产过程碳排放量 (百万吨)	地级市	工业生产过程碳排放量 (百万吨)
广州市	3854.87	汕头市	2874.15	韶关市	2740.29
深圳市	3836.29	梅州市	2864.38	河源市	2726.06
阳江市	3157.85	阳江市	2844.73	佛山市	2719.86
汕尾市	2992.27	汕尾市	2832.31	中山市	2716.69
茂名市	2979.50	茂名市	2794.70	珠海市	2715.68
清远市	2966.06	清远市	2778.86	潮州市	2690.59
湛江市	2901.17	湛江市	2774.32	云浮市	2648.91

2.2 数据说明

2.2.1 工业生产过程二氧化碳排放量的测算

采用排放系数法对城市边界内工业部门因一次能源消耗而产生的二氧化碳排放量进行核算,选取原煤、焦炭、汽油、柴油及天然气5种化石能源作为计算基础^[14],对省内各地级市工业部门碳排放量进行核算。本研究参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011年)中推荐的相关参数进行工业生产过程碳排放量核算,计算公式如下

$$C = \sum_{i=1}^5 E_i \times EF_i \tag{1}$$

其中,C为工业生产过程中产生的二氧化碳排放量, E_i 为第*i*种能源的消费量, EF_i 为第*i*种能源的二氧化碳排放因子。在计算过程中,采用平均低位热值作为能源发热值基准,相关数据来源于《中国能源统计年鉴2020》,碳氧化率则参考《广东省市县(区)级温室气体清单编制指南(试行)》(2020年)(表2)。

表2 工业生产过程二氧化碳排放计算参数

能源种类	能源低位发热值(kJ/kg)	碳氧化率	碳排放系数(tc/TJ)	CO ₂ 排放因子
原煤	20908	0.94	25.80	1.9003kg-CO ₂ /kg
焦炭	28435	0.93	29.20	2.8604 kg-CO ₂ /kg
汽油	43070	0.98	19.10	2.9251 kg-CO ₂ /kg
柴油	42652	0.98	20.20	3.0959 kg-CO ₂ /kg
天然气	38931	0.99	15.30	2.1621 kg-CO ₂ /m ³

注:CO₂排放因子=碳排放系数×能源低位发热值×0.000001×(44/12)×碳氧化率。

① 数据来源参见数据说明部分,由作者计算所得。

2.2.2 工业减污降碳指标的构建

为量化评估广东省21个地级市工业减污降碳的整体效能,借鉴马伟波等人^[27]和王敏等人^[28]的研究,将工业生产过程二氧化碳排放量和工业二氧化硫、工业烟(粉)尘、工业氮氧化物排放量纳入减污降碳指标(Index of pollution and carbon reduction),并采用加权函数构建该指标体系(表2),计算公式为

$$IPC = \sum_{i=1}^4 I_i \times w_i \quad (2)$$

其中,IPC为城市减污降碳评价指标,该指标为逆指标,取值范围为0~1,其值越小则表示该市工业减污降碳的效果越显著,工业“含绿量”越高; I_i 为单项指标的极差标准化值,单项指标对原始数据进行负向指标标准化处理,以消除数据量纲、数量级的影响,其取值范围为0~1; w_i 为单项指标对应权重,并使用熵权系数法来确定各项指标权重。

考虑数据可得性,最终选取地级市工业二氧化硫排放量、工业烟(粉)尘排放量、工业氮氧化物排放量、工业生产过程二氧化碳排放量作为工业减污降碳细分领域的代表性单项指标。地级市工业二氧化硫排放量、工业烟(粉)尘排放量、工业氮氧化物排放量单项指标数据来源于《中国城市统计年鉴(2007—2021)》,地级市工业生产过程二氧化碳排放数据采用排放系数法进行核算(表3)。

表3 工业减污降碳指标的构建

指标类型	单项指标	单位	权重	属性
减污	工业二氧化硫排放量	吨	0.224	-
	工业烟(粉)尘排放量	吨	0.172	-
	工业氮氧化物排放量	吨	0.184	-
降碳	工业生产过程二氧化碳排放量	万吨	0.420	-

2.2.3 影响因素及其数据来源

综合已有文献的研究结果可知,影响工业污染物排放和碳排放的重要因素主要包括经济发展水平、能源消费、产业结构、人口规模、技术进步和环境规制等^[8,12-15],受限于数据可得性,在工业领域污染物排放和碳排放的影响因素分解研究中,鲜有专门针对工业内部结构因素的探讨。基于此,本研究将工业产业间、产业链、产业结构因素纳入影响因素,选择规模效应、结构效应、技术效应和治理效应4个维度共12项具体指标作为解释变量,以揭示广东省工业减污降碳时空演变特征的驱动因素。

(1)规模效应。经济集聚和人口集聚可以通过规模效应和拥挤效应对减污降碳发挥重要影响,当集聚程度大小处于合理水平时,经济集聚有利于城市节能减排^[29-30]。工业规模与工业生产活动中产生的污染物排放和碳排放密切相关。经济集聚度的计算借鉴林伯强等人^[30]的方法,采用单位土地面积上的劳动力进行测度;工业规模水平用规模以上工业总产值占GDP比例衡量。

(2)结构效应。结构效应影响因素既要考虑工业内部结构,又要考虑能源消费结构^[15]。工业减污降碳很大程度上依赖于工业内部结构升级和内驱力推动,主要在产业整体结构、工业产业链结构和工业产业间结构高级化上有所体现。在产业整体结构方面,参考孙智君等人^[31]的方法,采用第三产业产值与工业总产值比例表征第三产业对工业的支持力度;在工业产业链结构方面,采用规模以上工业增加值占规模以上工业总产值比例测度工业增加值率;在工业产业间结构方面,采用规模以上重工业总产值和规模以上轻工业总产值比例、规模以上高技术制造业增加值和规模以上工业增加值比例分别表征重工业化系数和高技术制造业发展水平。在能源消费上,以煤炭、石油和天然气为代表的传统化石能源的燃烧是导致区域大气污染物排放和碳排放的重要因素,故选择煤炭消费量占能源消费总量比例来表征能源消费结构。

(3)技术效应。随着知识成为创新发展的关键要素,技术进步对工业减污降碳的促进作用日益凸显。一方面,技术进步直接影响了能源消费效率,进而影响工业污染物和碳排放强度;另一方面,工业企业可以通过加大研发力度来提高工业废物防治度和利用率,达到循环经济的效果。本研究使用各地级市规模以上

工业企业研究与试验发展经费(R&D)内部经费支出占全省比例来衡量工业企业研发强度。能源消费效率参考史丹^[32]的做法,采用单要素能源经济效率计算方法,即用地区生产总值与能源消费总量之比表征能源效率。

(4)治理效应。政府主导的正式环境规制对工业减污降碳发挥了重要作用。在市场化经济激励型减排工具的运用上,广东省是全国首批开展碳排放权交易的省级试点。所以本研究根据碳排放权交易试点正式运行的时间构建虚拟变量,2013年及以后的年份取值为1,否则取值为0。在环境治理方面,由于地级市层面的污染治理投资数据无法获得,本研究使用节能环保支出占财政支出比例来衡量政府在污染物治理上的规制程度。

影响因素的相关原始数据来源如表4所示。地区生产总值、规模以上工业总产值等涉及价值形态的变量均通过GDP平减指数折算为2006年不变价。

表4 工业减污降碳影响因素及数据来源

指标维度	具体指标	数据来源
规模效应	经济集聚度	《中国城市统计年鉴(2007—2021)》
	年末常住人口	《广东统计年鉴(2007—2021)》
	规模以上工业总产值占GDP比重	《中国城市统计年鉴(2007—2021)》
	第三产业对工业支持度	《中国城市统计年鉴(2007—2021)》
结构效应	工业增加值率	《广东统计年鉴(2007—2021)》
	重工业化系数	《广东统计年鉴(2007—2021)》
	高技术制造业发展水平	《广东统计年鉴(2007—2021)》
	煤炭消费量占能源消费总量比重	《中国能源统计年鉴(2007—2021)》
技术效应	规模以上工业企业R&D内部经费支出占全省比重	《广东统计年鉴(2007—2021)》
	能源消费效率	《中国能源统计年鉴(2007—2021)》
治理效应	碳排放权交易试点	2013年及以后取值为1,否则为0
	节能环保支出占财政支出比重	《广东统计年鉴(2007—2021)》

2.3 研究方法

2.3.1 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型不仅具有地理加权回归(GWR)模型在空间异质性分析上的优势,还通过引入时间解决了GWR仅适用于截面数据回归的局限性问题。考虑到时间与空间的非平衡性,能够有效捕捉空间和时间维度上的异质性,即考虑到因变量与自变量之间的关系在不同地点和不同时期可能存在的差异,从而使得估计结果更加有效,模型为

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

其中, (μ_i, v_i, t_i) 为广东省21个地级市中第*i*个地级市的时空坐标, μ_i, v_i, t_i 分别为第*i*个地级市的经度、纬度和时间; $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 为截距项; $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 为第*i*个地级市的第*k*个影响因素的回归系数; ε_i 为随机误差项。影响因素回归系数 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 的估计方法为

$$\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i) = [X^T W(\mu_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(\mu_i, v_i, t_i) Y \quad (4)$$

其中, $\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i)$ 为 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 的估计值; X 为自变量构成的矩阵; X^T 为矩阵 X 的转置矩阵; Y 为时间尺度下广东省21个地级市减污降碳评价指标的矩阵值; $W(\mu_i, v_i, t_i)$ 为时空权重矩阵。

GTWR模型主要通过ArcGIS 10.8软件实现,具体操作时使用Huang等人^[33]开发的GTWR插件。

2.3.2 空间自相关模型

为描述广东省工业减污降碳的空间分布特征及其集聚程度,采用全局莫兰指数(Global Moran's I)进行度量。当指数在(0,1]区间时,表示存在空间正相关关系和集聚特征;当指数在[-1,0)区间时,表示存在空间负相关关系和离散特征;当指数等于0时,表示空间关系呈现随机分布状态。全局莫兰指数的计算公式为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})^2)} \quad (5)$$

其中, I 为全局莫兰指数, x_i 和 x_j 分别表示地区 i 和地区 j 的工业减污降碳评价指标的数值, \bar{x} 为广东省21个地级市工业减污降碳评价指标的平均值。文章选用的 $W_{i,j}$ 是基于地理邻近关系的二进制空间权重矩阵。

2.3.3 随机森林算法

随机森林(Random Forest, RF)作为一种机器学习算法,其机制在于通过随机抽取的方式构建多棵决策树(Decision Trees)并集成,实现对数据集的训练^[34]。RF模型可以通过袋外误差来估计输出变量对输入变量的影响程度。算法的构建流程如下:

(1)使用自助采样法从原始训练数据中集中随机抽取 n 个样本点,并基于这些样本点构建一棵相应的决策树,未出现在任何子集中的样本作为“袋外”样本。

(2)构建随机森林时, N 棵决策树仅基于单个子集生成,且树的生长持续至每个叶节点包含的样本数量不超过 m 个。对于树中的任一节点,系统会从 F 个特征中随机抽取若干个,并选择其中之一作为拆分依据。

(3)对于新的数据点,利用每 N 棵决策树分别对其 y 值进行预测。

随机森林算法的一大优势在于能够同时输入多个变量,且在数据缺失或异常情况下依然能够维持模型的精度。此外,该模型还能量化评估各解释变量的重要性,可以通过分析不同时点解释变量的重要性动态变化来揭示影响因素的时间效应。随机森林模型的计算通过MATLAB软件实现,并将数据集分为三个时段进行训练。

3 结果分析

3.1 广东省工业减污降碳时空演变特征

3.1.1 时序演变特征

根据熵权系数法计算公式测算2006—2020年广东省工业减污降碳指标并制作色阶图(图1)。可以看出,“十一五”以来,全省工业减污降碳指标整体上由高向低变化,工业绿色化发展趋势明显。

珠三角	广州市	0.68	0.66	0.73	0.71	0.68	0.62	0.66	0.66	0.48	0.46	0.46	0.52	0.69	0.60	0.56
	深圳市	0.78	0.76	0.79	0.76	0.72	0.76	0.74	0.73	0.71	0.72	0.65	0.65	0.65	0.64	0.58
	珠海市	0.75	0.75	0.79	0.71	0.76	0.68	0.73	0.73	0.62	0.64	0.71	0.73	0.73	0.77	0.79
	佛山市	0.75	0.75	0.79	0.71	0.76	0.68	0.73	0.73	0.62	0.64	0.71	0.73	0.73	0.77	0.79
	东莞市	0.67	0.68	0.67	0.68	0.66	0.71	0.69	0.68	0.66	0.60	0.68	0.66	0.76	0.77	0.73
	中山市	0.94	0.90	0.88	0.87	0.83	0.83	0.85	0.83	0.77	0.85	0.78	0.81	0.77	0.80	0.80
	惠州市	0.93	0.90	0.86	0.87	0.89	0.82	0.82	0.77	0.81	0.78	0.80	0.76	0.84	0.77	0.76
	江门市	0.86	0.84	0.85	0.83	0.80	0.81	0.80	0.75	0.71	0.71	0.77	0.80	0.80	0.77	0.78
粤东	肇庆市	0.91	0.87	0.87	0.84	0.85	0.81	0.84	0.81	0.73	0.74	0.77	0.68	0.77	0.72	0.76
	汕头市	0.87	0.85	0.87	0.90	0.85	0.86	0.84	0.86	0.84	0.81	0.85	0.85	0.79	0.79	0.75
	潮州市	0.94	0.93	0.91	0.92	0.90	0.91	0.83	0.86	0.82	0.83	0.84	0.82	0.86	0.82	0.81
	揭阳市	0.97	0.91	0.86	0.88	0.90	0.85	0.83	0.90	0.76	0.83	0.77	0.85	0.81	0.80	0.75
粤西	汕尾市	0.99	0.94	0.92	0.91	0.90	0.87	0.87	0.83	0.78	0.76	0.85	0.78	0.79	0.77	0.81
	湛江市	0.86	0.84	0.90	0.86	0.85	0.88	0.86	0.87	0.75	0.75	0.75	0.74	0.78	0.76	0.77
	茂名市	0.89	0.88	0.90	0.86	0.83	0.78	0.81	0.81	0.57	0.63	0.63	0.77	0.81	0.77	0.81
	阳江市	0.90	0.93	0.88	0.84	0.91	0.86	0.79	0.85	0.77	0.80	0.78	0.76	0.82	0.73	0.79
粤北	云浮市	0.87	0.88	0.79	0.84	0.84	0.83	0.80	0.78	0.79	0.75	0.79	0.80	0.75	0.80	0.75
	清远市	0.	0.86	0.92	0.85	0.80	0.83	0.78	0.80	0.80	0.77	0.77	0.67	0.72	0.60	0.64
	韶关市	0.85	0.85	0.83	0.82	0.86	0.81	0.80	0.84	0.77	0.76	0.73	0.75	0.77	0.76	0.69
	梅州市	0.87	0.83	0.82	0.81	0.80	0.82	0.83	0.82	0.71	0.78	0.81	0.75	0.78	0.74	0.69
	河源市	0.94	0.93	0.94	0.88	0.93	0.90	0.90	0.84	0.84	0.88	0.79	0.82	0.83	0.81	0.73
		2006	2017	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

工业减污降碳指标

低 较低 中等 较高 高

图1 2006—2020年广东省工业减污降碳指标演化

如图2所示,2006—2020年广东省各地级市工业减污降碳指标总体呈下降趋势,表明广东省全省工业整体呈清洁发展趋势。根据工业减污降碳水平起伏变化,将2006—2020年全省整体的工业减污降碳变化情况分为以下三个阶段:(1)2006—2014年,工业减污降碳指标明显下降,2012—2014年降幅较大,降幅达8.45%;(2)2015—2018年,工业减污降碳指标上升,工业绿色化转型陷入瓶颈期;(3)2018年之后,工业减污降碳指标呈下降趋势。2013年,《大气污染防治行动计划》和《广东省碳排放权交易试点工作实施方案》有效推动了工业领域在减污降碳方面的进步。然而,环境规制政策的持续性效果并非始终显著,因此工业绿色化转型在某些时期遇到发展瓶颈。

从具体分区域来看,2006—2020年21个地级市工业减污降碳指标的平均值由0.88下降至0.74,特别是在2014年这一节点,除粤北地区外,珠三角、粤东和粤西地区工业减污降碳指标均达到最低点。在工业减污降碳评价指标下降幅度方面,粤北四市降幅最大(0.22),其次是粤东四市(0.17),粤西三市的下降幅度相对较小(0.09)。在工业减污降碳指标的变化率绝对值方面,粤北五市的表现仍最为显著,为0.22;粤西三市则最低,为0.10。2006—2020年,珠三角地区的工业减污降碳指标一直低于全省平均水平且与全省波动趋势较为一致,于2014年达到最低点后小幅上升然后再度下降,粤东地区则处于全省平均水平以上,而粤北地区一直呈下降趋势且与珠三角地区的工业减污降碳指标数值之间的差距不断缩小。整体上,2006—2020年广东省工业减污降碳效果显著,粤北生态发展区的表现尤为突出。

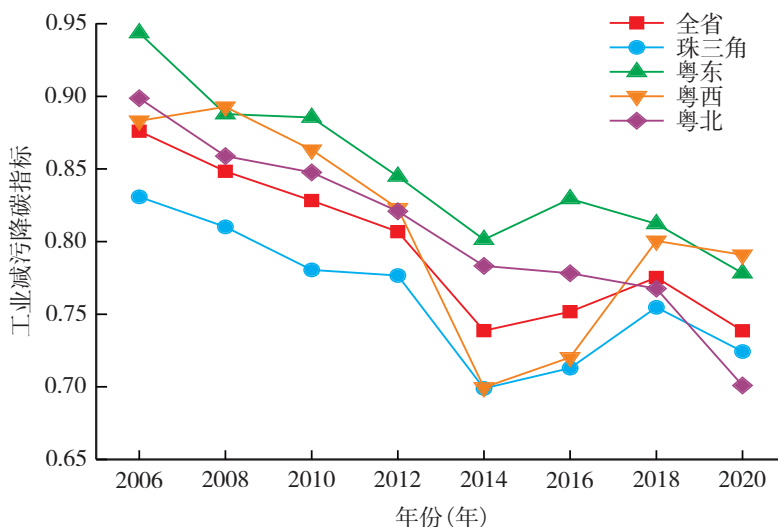


图2 2006—2020年广东省工业减污降碳变化趋势

3.1.2 空间演变特征

结合图1和图2所呈现的空间分布特征,广东省工业减污降碳评价指标整体呈珠三角核心城市低、粤东西北高的分布格局,且整体呈由广州、深圳等珠三角核心城市向周围辐射递减的特征,省域整体工业减污降碳效果良好,呈“中心-外围”式扩散的空间分布特征。空间变动上,广东省工业减污降碳展现出显著的提升和扩展态势,减污降碳指标的低值范围由广州、深圳、佛山等珠三角核心城市向北转移至韶关、清远、梅州等粤北地区。从2006—2020年工业减污降碳指数的变化幅度来看,除东莞市和佛山市外,其余19个地级市的工业减污降碳指标总体上保持下降趋势,其中粤北地区的清远市、河源市、梅州市和粤东地区的揭阳市以及珠三角地区的深圳市、珠海市的降幅均超过20%,工业清洁低碳发展趋势良好。从不同区域来看,珠三角核心城市的工业减污降碳指数显著低于粤东西北地区,广州市、深圳市的工业降污降碳效应自2006年以来表现良好,而作为“世界工厂”“工业重镇”的东莞和佛山的工业减污降碳指标有上升态势,反映出两地作为制造业大市,面临新旧动能转化,产业转型压力较大。2006年大部分地级市的工业减污降碳指数分布在0.78~0.98区间,而2016年、2020年分布于0.62~0.70和0.70~0.78两个区间的地级市数量明显增加,这一变化展现出全省推进工业领域绿色低碳发展的积极效果。

利用Stata17.0软件计算全局莫兰指数,评估广东省工业减污降碳的空间分布特征及空间集聚程度。由

表5可知,除2014年外,其余年份的全局莫兰指数均为正值;2007—2013年和2017年的全局莫兰指数通过了显著性检验,表明在该时段内,广东省工业减污降碳水平具有显著的空间正相关关系并呈现出较强的空间集聚特征。分阶段来看,在“十一五”和“十二五”的前三年,广东省工业减污降碳的空间集聚特征显著增强并呈上升趋势;而2013年后空间集聚特征趋于离散,2017年呈短暂空间集聚特征后,空间离散特征又趋于强烈。总体上,2006—2020年广东省工业减污降碳空间集聚特征呈先上升后下降的波动趋势。

表5 广东省工业减污降碳指标的全局莫兰指数

年份(年)	Global Moran's I	Z 值	P 值
2006	0.1822	1.5414	0.1232
2007	0.2241	1.8398	0.0658*
2008	0.2050	1.7279	0.0840*
2009	0.2939	2.2675	0.0234**
2010	0.2837	2.1982	0.0279**
2011	0.2640	2.1454	0.0319**
2012	0.3469	2.6435	0.0082***
2013	0.4025	2.9579	0.0031***
2014	-0.0049	0.3110	0.7558
2015	0.1134	1.1461	0.2518
2016	0.1784	1.6919	0.0907*
2017	0.3676	2.9035	0.0037***
2018	0.1139	1.1025	0.2702
2019	0.1105	1.0875	0.2768
2020	0.1122	1.0989	0.2718

注:*** 表示 $P < 0.01$, **表示 $P < 0.05$, *表示 $P < 0.1$ 。

3.2 广东省工业减污降碳影响因素分析

3.2.1 时空地理加权回归结果

(1)GTWR 模型精度评估。为消除变量间不同量纲的影响,在 GTWR 模型计算之前需要对所有变量进行标准化处理。还需对标准化后的所有变量进行多重共线性检验,避免因变量间存在强烈相关性而引发伪回归现象。经过共线性诊断,所选变量的方差膨胀因子(VIF)均小于 10,均可以进行时空地理加权回归分析。

分别利用全局回归(OLS)、地理加权回归(GWR)和时空地理加权回归模型(GTWR)对不同驱动因素对于广东省工业减污降碳的影响程度进行定量分析。如表6所示,GTWR 模型的 R^2 明显高于 OLS 模型和 GWR 模型,GTWR 模型的残差平方和在三个比较模型中处于最低水平,说明 GTWR 模型的拟合优度优于其他两种模型,在时空维度上较好地拟合了 12 项影响因素与工业减污降碳指标之间的关联关系。

表6 回归模型精度评估

模型	R^2	Ajusted R^2	RSS	AICc 值
OLS	0.686	0.673	0.738	-987.78
GWR	0.855	0.849	0.341	-1075.15
GWTR	0.899	0.895	0.238	-1052.48

(2)影响因素回归系数空间特征。为揭示各个自变量对工业减污降碳影响的空间差异,本研究根据 GTWR 模型的回归结果选取 2020 年数据,结果如图 3 和表 7 所示。可以看出,广东省工业减污降碳各影响因

素在地理空间分布上并非均匀一致。下面从规模效应、结构效应、技术效应和治理效应四个维度对各影响因素的回归系数展开分析。

规模效应:经济集聚度对工业减污降碳指标的影响回归系数自粤西向粤东递增,呈现阶梯式分布格局。除粤北的梅州、河源和粤东4市外,其余地级市的工业减污降碳指标受到经济集聚的负向驱动,表明当经济集聚在合理水平时,经济集聚的外部规模效应有利于推动工业减污降碳。人口规模上,全省除湛江、阳江、云浮、韶关和汕尾5市外,年末常住人口数量对工业污染物排放和碳排放作用为负,即人口规模的集聚效应大于拥挤效应。工业规模上,工业减污降碳指标受到规模以上工业总产值占GDP比重的抑制作用整体呈由珠三角地区向两翼递减的格局,表明珠三角地区的工业规模扩张到一定程度,外部规模效应和成本节约等各类溢出效应逐渐显现,由此带来工业减排效果。

结构效应:从整体产业结构角度看,第三产业产值与工业总产值比重对工业减污降碳指标的负向影响显著,在广州市、佛山市等珠三角核心城市第三产业的支持度对工业减排效果尤为显著,说明在后工业化发展阶段,第三产业对工业支持度越高,越有利于工业清洁化发展。结合全省产业结构升级情况,2013年广东省三产结构由之前的“二三一”转变为“三二一”,金融、物流、软件信息技术服务业等以知识密集型为主要特征的现代生产性服务业快速发展,为工业提供专业化特色服务,支撑工业高端化、绿色化、智能化发展。从工业内部产业链角度看,工业增加值率的回归系数空间分布情况与第三产业支持度相似,佛山市、东莞市等制造业大市的工业增加值率对于工业减排效果明显,说明在制造业基础雄厚的地区,工业生产过程中新增加的价值越高,反映出工业产业链投入产出经济效益越好,越能推动区域工业绿色化发展。从工业内部产业间结构角度看,2020年粤东4市、梅州市和湛江市的工业减污降碳指标与重工业化系数呈正相关关系,重工业产值与轻工业产值比重越高则工业污染物排放和碳排放强度越大,这与地区产业结构密切相关:揭阳市、汕头市、潮州市的纺织服装产业是区域经济发展“名片”,轻工业是汕潮揭都市圈的优势产业,相较于其他地区,在研究时段内重工业化系数由快速增长到逐步放缓至下降的演变过程,粤东地区和梅州的重工业化系数仍处于上升阶段。湛江市的主导产业集中在钢铁、石化和造纸三大领域,近年来随着巴斯夫(广东)一体化、中科炼化、宝物钢铁湛江生产基地等大型重工业项目的落地投产,湛江临港大型产业集聚区雏形初显,集聚所带来的减排效应仍需经过一段时间后才能有所体现。高技术制造业产值占工业总产值比重对于工业污染物和碳排放强度的抑制作用明显,且呈以广州市、深圳市为辐射核心的“中心-外围”式空间分布格局,体现出医药制造、电子信息、航空航天等高技术制造业具有高技术、高附加值、低能耗的特点。以知识为关键要素的高技术制造业发展在经济集聚度较高的珠三角“先发优势”核心城市中,能更好地通过技术溢出、专业化分工等机制发挥显著的减排优势。从能源消费结构角度看,煤炭消费量占能源消费总量比重的回归系数自粤东沿东江流域增大,其中粤西和珠三角9市的工业减污降碳指数受煤炭消费占比的正向影响较大,即煤炭消费占比越高则工业减污降碳指标越大,越不利于绿色发展。“十三五”以来,广东通过严控煤炭消费、优化油气消费结构、促进非化石能源消费等系列措施持续优化全省能源消费结构。2020年广东省在一次能源消费结构中煤炭占比为33.4%,该比例低于全国平均水平23.4个百分点^①,能源消费结构优化对于工业减排效果逐步显现。

技术效应:在工业企业研发投入上,各市规模以上工业企业R&D内部经费支出占全省比例对工业污染物和碳排放的抑制效果主要出现在珠三角地区,尚未在粤北、粤东和粤西的茂名市得以体现。一方面可能由于科研投入对于技术进步的推动效果存在滞后性^[14],另一方面也体现出相关地区规模以上工业企业研发投入仍处于相对较低水平,所带来的节能减排效果小于规模扩张带来的增排效果。在能源效率上,除粤东4市外,工业减污降碳指标受能源效率的负向影响显著,即能源利用效率越高工业减污降碳指标越低,工业“绿化”程度越高,其中,深圳能源消费效率的提高对当地工业清洁化发展的促进作用最为明显。

治理效应:广东省作为全国首个开启碳排放权交易试点的省份,碳排放权交易试点对于全省工业减污降碳效果有积极促进作用,主要依托广州和深圳两个碳排放权交易所,交易范围覆盖全省约70%的能源碳

① 数据来源:https://economy.southcn.com/node_5576ae0948/7e68e29ae0.shtml。

排放量,这体现了在市场激励性环境规制政策上,广深“双城联动”并辐射带动周边地市相关控排主体积极参与碳交易的良性格局。在政府环境治理投入上,节能环保支出对于工业污染物排放和碳排放的抑制效果主要集中在珠三角地区和粤北的清远市、韶关市和粤西的湛江市,其中,在广州市、清远市和湛江市的抑制作用最为显著。



图3 2020年广东省各地级市GTWR模型回归系数

表7 2020年各影响因素回归系数

维度	变量	回归系数
规模效应	经济集聚度(X1)	-1.389 ~ 0.130
	年末常住人口(X2)	-0.199 ~ 0.236
	规模以上工业总产值占GDP比重(X3)	-0.090 ~ 0.218
结构效应	第三产业对工业支持度(X4)	-0.195 ~ 0.175
	工业增加值率(X5)	-0.058 ~ 0.034
	重工业化系数(X6)	-0.611 ~ 0.202
	高技术制造业发展水平(X7)	-0.322 ~ -0.014
	煤炭消费量占能源消费总量比重(X8)	-0.085 ~ 0.040
技术效应	规模以上工业企业R&D经费支出占全省比重(X9)	-1.210 ~ 0.274
	能源消费效率(X10)	-2.042 ~ 0.113

续表

维度	变量	回归系数
治理效应	碳排放权交易试点(X11)	-0.454 ~ -0.008
	节能环保支出占财政支出比重(X12)	-0.044 ~ 0.030

3.2.2 影响因素重要性变迁

如表8所示,在拟合优度方面,2006—2010年、2011—2015年、2016—2020年3个时期RF模型的R²均超过0.75,表明该模型在3个时期内均表现出较好的拟合效果;在精确度方面,3个时期RF模型的均方根误差(RMSE)均小于2%,可见在运算量没有显著增加的前提下随机森林模型提高了预测精度。

表8 RF模型精度评价

时期	R ²	均方根误差/10 ⁻³
2006—2010年	0.85	2.91
2011—2015年	0.81	2.23
2016—2020年	0.82	3.15

不同时点解释变量重要性动态变化的RF模型结果如图4和表9所示。需要说明的是,由于碳排放权交易试点(X11)是赋值为0、1的虚拟变量,其数值在2011—2015年出现时序变动,故该变量仅在“十二五”时期参与影响因素重要性排名。图4显示三个时期内重要性排名前五的各影响因素,可以看到,高技术制造业发展水平(X7)和规模以上工业企业R&D内部经费支出比重(X9)在2006—2020年间始终是推动广东省工业减污降碳的重要驱动因素,重要性排名均为前五。

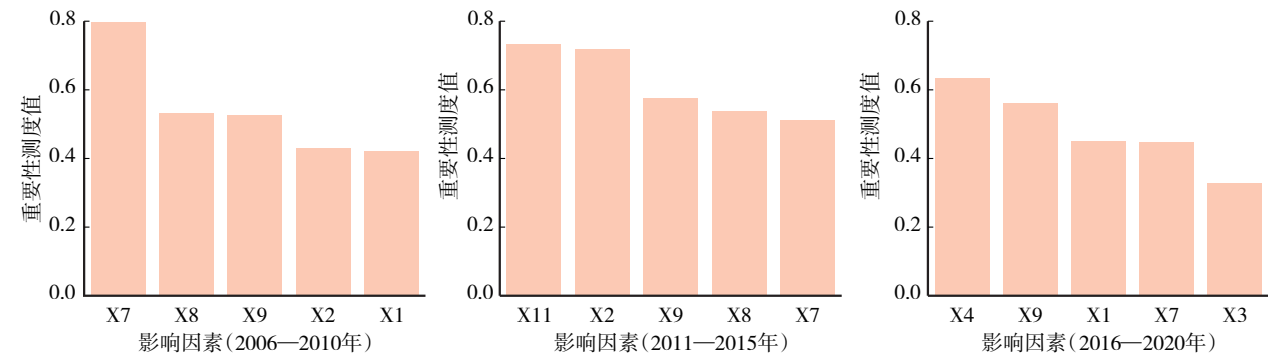


图4 2006—2020年重要性排名前五的影响因素

在规模效应方面,3个时期内,经济集聚度(X1)和规模以上工业总产值占GDP比重(X3)的重要性排名呈先降后升趋势,而年末常住人口(X2)的重要性排名则呈相反的变化趋势且波动较大,体现了在后工业化阶段,经济集聚和工业规模对推动工业绿色化发展的促进作用越来越强烈。结合GTWR结果的回归系数,集聚对工业污染物排放和碳排放具有双重效应。随着城镇化和工业化的快速推进,当经济活动的集中和工业生产规模的空间集聚水平达到一定阈值时,集聚带来的成本节约、专业化分工等各类外部规模效应凸显,大量工业企业的集中通过减排设施的共享、污染物排放的集中监管以及企业间技术和经验的学习等机制^[29],抑制工业污染物和碳排放强度,释放对环境“净化”的绿色效应。

表9 广东省工业减污降碳影响因素的重要性变迁

维度	变量	2006—2010年	2011—2015年	2016—2020年
规模效应	经济集聚度(X1)	0.420(5)	0.251(7)	0.450(3)
	年末常住人口(X2)	0.430(4)	0.719(2)	0.261(7)
	规模以上工业总产值占GDP比重(X3)	0.378(7)	0.039(11)	0.329(5)

续表

维度	变量	2006—2010年	2011—2015年	2016—2020年
结构效应	第三产业对工业支持度(X4)	0.254(9)	0.321(6)	0.634(1)
	工业增加值率(X5)	0.371(8)	0.026(12)	0.244(8)
	重工业化系数(X6)	0.380(6)	0.179(9)	0.212(9)
	高技术制造业发展水平(X7)	0.796(1)	0.513(5)	0.447(4)
	煤炭消费量占能源消费总量比重(X8)	0.532(2)	0.537(4)	0.265(6)
技术效应	规模以上工业企业R&D内部经费支出占全省比重(X9)	0.525(3)	0.576(3)	0.560(2)
	能源消费效率(X10)	0.205(10)	0.202(8)	0.120(10)
治理效应	碳排放权交易试点(X11)	—	0.732(1)	—
	节能环保支出占财政支出比重(X12)	0.068(11)	0.112(10)	0.175(11)

注:括号外数据为重要性测度值,括号内数据为重要性排名。

在结构效应方面,第三产业对工业支持度(X4)、高技术制造业发展水平(X7)和煤炭消费量占能源消费总量比重(X8)等三个因素的重要性排名在三个时段内有较大波动。从整体产业结构来看,第三产业对工业支持度对于工业减污降碳的重要性(X4)从“十一五”时期的第9位跃升至“十三五”时期的首位,尤其在“十二五”时期全省产业结构完成向“三二一”调整后,生产性服务业的快速发展为广东省工业转型升级、制造业向“微笑曲线”两端延伸注入动能。在工业内部产业间结构上,2006—2020年高技术制造业发展水平(X7)一直对工业减污降碳具有重要影响,相比之下,重工业产值与轻工业产值比重(X5)和体现工业内部产业链投入产出效益的工业增加值率(X6)的重要性排名较为靠后,与广东省工业内部发展情况和产业政策导向相呼应:广东省作为工业大省,钢铁、建材、石化、冶金等重工业产值增长到一定程度后增速放缓并呈下降趋势,但产业结构高级化并非意味着传统重型工业的消失,也不是一味追求重工业和规模以上工业产值的扩张,而是向高技术化、高附加值、绿色化、低碳化方向转型发展。以传统重工业领域的石化产业为例,《广东省发展绿色石化战略性支柱产业行动计划(2021—2025年)》注重产业链的优化布局与创新体系的健全,表明“高耗能、高排放、高污染”传统产业向“绿”前行的核心在于依靠科技要素带动的产业结构优化升级。在能源消费结构上,煤炭消费量占能源消费总量比重(X8)的重要性从“十一五”时期的第2位下降至“十三五”时期的中间位次。该变化一方面印证了在“十一五”期间广东将非化石能源和可再生能源摆在优先发展位置的显著成效,另一方面也体现了前期工业污染物和碳排放对能源消费结构优化的响应程度明显,后续随着能源消费结构改革的深入推进,响应程度趋于平缓。

在技术效应方面,规模以上工业企业R&D内部经费支出占全省比重(X9)在三个时期内一直是推动工业减污降碳的关键因素,研发投入因素的持续重要性凸显了技术创新在推动工业绿色低碳转型中可以通过产业与技术双相互促以释放“乘数效应”,这与结构效应因素中高技术制造业发展水平发挥的重要影响相佐证。在能源效率上,能源消费效率(X10)的重要性排名靠后,相较于能源消费结构的调整,能源消费效率的提高对工业污染物排放和碳排放的抑制作用并未达到预期。

在治理效应方面,碳排放权交易试点(X11)在“十二五”期间开始实施便对工业减污降碳产生重要影响,重要性在2011—2015年间居于首位,说明2013年广东碳排放权交易试点开始运行以来,该降碳政策从实施起便对工业污染物和碳排放具有显著的协同抑制效果,这与张瑜等人^[8]的研究结论相似。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)2006—2020年广东省21个地级市工业减污降碳评价指标的平均值由2006年的0.88下降到2020年的0.74,表明广东省工业减污降碳整体呈良好趋势。2006—2020年广东省工业减污降碳空间集聚特征呈先

上升后下降的波动趋势,空间离散特征在2013年后趋于明显。

(2)广东省工业减污降碳评价指标整体呈珠三角地区核心城市低、粤东西北高的空间格局,时空变动上,工业减污降碳评价指标在中等值以下的地区有明显的扩大趋势,低范围值由珠三角地区核心城市广州市、深圳市等向北扩散至梅州市、韶关市、清远市等粤北生态保护区,其空间集聚特征呈集聚-离散的变化趋势。

(3)第三产业特别是生产性服务业对工业支持度、高技术制造业发展水平、能源消费效率和碳排放权交易试点的GTWR模型回归系数对全省大部分区域的工业减污降碳评价指标产生显著的负向影响,且影响的重要程度存在时空异质性。这说明这些因素的增加可促使工业减污降碳,推动工业“含绿量”提升。

(4)在“十一五”至“十三五”期间,广东省高技术制造业发展水平和规模以上工业企业R&D内部经费支出比重一直是推动工业减污降碳的关键因素。此外,经济集聚度、工业规模水平和第三产业对工业支持度对于工业绿色发展的重要性也在提升。

4.2 建议

(1)以创新引领产业升级,以服务赋能绿色制造,共同推进传统制造业减污降碳。GTWR回归和RF模型结果均表明高技术制造业发展水平和规模以上工业企业R&D内部经费支出比重对于工业减污降碳发挥了关键且持续的推动作用。因此,在加快建设大战略性新兴产业集群和未来产业的过程中,需注重发挥科技创新对家电制造、钢铁、石化等传统产业升级与深远海风电、新型储能、高效光伏等绿色低碳产业孕育的引擎作用,鼓励和支持工业企业在产品结构调整、原料结构优化和工艺流程再造等绿色技术方面加大研发投入。同时,RF模型结果显示,第三产业对工业支持度对于减污降碳的影响力也在攀升,需进一步深化生产性服务业与先进制造业“两业融合”,以数字赋能推动全省工业互联网一体化平台建设,引导绿色消费需求和绿色产品供给融合,扩大光伏产品、新能源车船、绿色建材等产品消费,支撑产业链、供应链绿色低碳转型。

(2)加快完善碳排放总量和强度“双控”制度,重点提高钢铁、石油化工、有色金属等重工业领域能源利用效率,加快推动能源结构优化。严格落实钢铁及建材行业产能产量调控,优化有色金属产能布局,加强石化产业刚性布局约束,推动能耗要素向高技术制造业、先进制造业等具有“三高一低”特性的项目倾斜。深入推进煤电、钢铁、有色金属、建材、石油化工等行业设备更新和技术改造,有序开展生产全流程清洁化、循环化、低碳化改造,鼓励工业企业开展节能诊断和能效对标,提高化石能源清洁利用效率。在保障能源供给安全基础上,积极推进非化石能源替代,严格实施煤炭减量替代,推动工业用能结构绿色转型。

(3)各区域根据各自比较优势,差异化地构建工业减污降碳协同治理体系,加快建设绿色低碳循环产业体系。珠三角地区作为广东省核心区,要充分发挥经济集聚的正外部性规模效应,率先达到环境库兹涅茨曲线拐点,实现污染物和碳排放与经济增长脱钩。加快提升绿色、低碳科技创新能力,带动粤东西北地区减污降碳协同发展。粤东、粤西沿海经济带在积极推动传统优势产业绿色低碳转型的同时,着力发展以海上风电为标杆的先进制造业,并加速培育新能源产业集群。作为全省生态发展区的粤北五市,在持续按照生态优先、节约集约原则,积极探索“两山”转化有效通道推动生态产品价值实现的同时,应积极培育发展绿色低碳产业集群,发展绿色低碳循环经济。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 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[EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649728.htm. 2021-10-24/2024-2-10.
- [2] 中国城市温室气体工作组. 中国城市二氧化碳排放数据集(2020)[EB/OL]. <https://www.cityghg.com/toArticleDetail?id=203>. 2022-10-07/2024-02-10.
- [3] 广东省生态环境厅. 关于印发《广东省减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. <https://gdee.gd.gov.cn/attachment/0/536/536712/4293238.pdf>. 2023-08-28/2024-02-10.

- [4] 《中国空气质量管理评估报告 2016》发布:大气污染物与温室气体同根同源 大气污染防治产生减碳效应[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10):2929.
- [5] 郑逸璇,宋晓晖,周佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(05):45-51.
- [6] 王涵,马军,陈民,等.减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(04):936-944.
- [7] 毛显强,邢有凯,高玉冰,等.温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划[J]. 中国环境科学, 2021, 41(07):3390-3398.
- [8] 张瑜,孙倩,薛进军,等.减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(05):1-13.
- [9] BURTRAW D, KRUPNICK A J, PALMER K L, et al. Ancillary Benefits of Reduced Air Pollution in the United States from Moderate Greenhouse Gas Mitigation Policies in the Electricity Sector[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(03):650-673.
- [10] 郑石明,何裕捷,邹克.气候政策协同:机制与效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(08):1-12.
- [11] 刘奎,赵铃铃,李婧婷.中国碳排放权交易试点的减排效应及作用机制研究[J]. 工业技术经济, 2022, 41(12):53-60.
- [12] 孙建,刘波,饶光明.环境保护税、碳交易与中国工业减污降碳协同增效[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(11):13-24.
- [13] 唐湘博,张野,曹利珍,等.中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10):2252-2263.
- [14] 康哲,李巍,刘伟.黄河流域城市群工业减污降碳影响因素与策略[J]. 中国环境科学, 2023, 43(04):1946-1956.
- [15] 陈晓红,张嘉敏,唐湘博.中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(12):2387-2398.
- [16] DU W J, LI M J. Assessing the Impact of Environmental Regulation on Pollution Abatement and Collaborative Emissions Reduction: Micro-evidence from Chinese Industrial Enterprises[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, 82:106382.
- [17] 王力,冯相昭,马彤,等.典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究:以渭南市为例[J]. 环境科学研究, 2022, 35(08):2006-2014.
- [18] 狄乾斌,陈小龙,侯智文.“双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(06):1155-1167.
- [19] 刘茂辉,刘胜楠,李婧,等.天津市减污降碳协同效应评估与预测[J]. 中国环境科学, 2022, 42(08):3940-3949.
- [20] 王菲,格桑卓玛,朱晓东.长三角工业减污降碳时空演变及其影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(04):661-671.
- [21] 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, 35(07):83-100.
- [22] 原伟鹏,孙慧,王晶,等.中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J]. 经济地理, 2022, 42(10):72-82.
- [23] 张为师,徐颖,惠婧璇.中国城市 CO₂排放和空气质量协同变化特征及驱动因素研究[J]. 中国环境管理, 2023, 15(02):38-47.
- [24] WANG B, WANG Y F, ZHAO Y Q. Collaborative Governance Mechanism of Climate Change and Air Pollution: Evidence from China[J]. Sustainability, 2021, 13(12):6785.
- [25] 孙金彦,刘海云.对外贸易、外商直接投资对城市碳排放的影响——基于中国省级面板数据的分析[J]. 城市问题, 2016, (07):75-80.
- [26] 孙静,马海涛,王红梅.财政分权、政策协同与大气污染治理效率——基于京津冀及周边地区城市群面板数据分析[J]. 中国软科学, 2019, (08):154-165.
- [27] 马伟波,赵立君,王楠,等.长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10):1273-1281.
- [28] 王敏,杨儒浦,李丽平.城市减污降碳协同度评价指标体系构建及应用研究[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(02):242-252.
- [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, 35(01):36-60, 226.
- [30] 林伯强,谭睿鹏.中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究, 2019, 54(02):119-132.
- [31] 孙智君,栗晓珊,刘蕊涵.超大城市工业内部结构变迁的实证研究——以北京和上海为例[J]. 中国软科学, 2017, (03):84-98.
- [32] 史丹.中国能源效率的地区差异与节能潜力分析[J]. 中国工业经济, 2006, (10):49-58.
- [33] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatio-temporal Variation in House Prices[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(03):383-401.
- [34] 李欣海.随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(04):1190-1197.

On the Spatial-temporal Evolution and Influencing Factors of Industrial Pollution Reduction and Carbon Reduction in Guangdong Province

WANG Xiao-yu¹, YUE Fang-min², GU Tian-li¹

(1. *Party School of the Guangdong Provincial Committee of CPC, Guangzhou, Guangdong, 510053, China;*

2. *Department of Social and Ecological Civilization, Party School of the Guangdong Provincial Committee of CPC, Guangzhou, Guangdong, 510053, China)*

Abstract: Exploring the spatial and temporal characteristics and its driven factors of Pollution Reduction and Carbon Reduction (PRCR) in the industrial sector is of great significance for achieving the goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality, as well as for accelerating the comprehensive green transformation of economic and social development pattern. This paper constructs an evaluation indexes system on the effects of PRCR in industrial sector during 2000–2006 in 21 prefecture-level cities in Guangdong Province, and analyzes its spatial and temporal evolution characteristics and influencing factors with the models of spatial and temporal geographically weighted regression, spatial auto-correlation, and random forest algorithm. The research results are as follows: (1) From 2006 to 2020, the overall trend of industrial PRCR in 21 cities in Guangdong Province was well and decreased from 0.88 in 2006 to 0.74 in 2020. The evaluation indexes had strong spatial agglomeration characteristics during 2007–2013 and in 2017, and the provincial industrial PRCR evaluation indexes showed significant spatial and temporal differentiation characteristics. (2) From 2006 to 2020, the overall spatial pattern of the industrial PRCR evaluation indexes was low in the Pearl River Delta core cities and high in the eastern, western and northern cities. In terms of spatial and temporal variation, the industrial PRCR evaluation indexes showed an obvious expansion trend in areas below the medium value, and the low range value spread from Guangzhou and Shenzhen in Pearl River Delta area to Meizhou, Shaoguan and Qingyuan, etc. in the ecological protection areas in northern Guangdong, and showed a changing trend of aggregation–dispersion in the spatial agglomeration characteristic. (3) The results were all negative in the GTWR model regression coefficients of the tertiary industry's support for the industry, the development level of high-tech manufacturing, energy consumption efficiency and carbon emission rights trading pilot, and its impact importance level was varied spatially. (4) During the 11th and 13th Five-Year Plan, the key factors in promoting industrial PRCR had always been the development level of high-tech manufacturing industries and the proportion of internal R&D expenditure of industrial enterprises above the designated size. In addition, other important factors for the green industry development are rising such as the degree of economic agglomeration, the level of industrial scale, and the support of the tertiary industry.

Keywords: Industrial Pollution Reduction and Carbon Reduction (PRCR); Spatial-temporal evolution; Influencing factors