

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.02.007

基于 GTWR 模型的长江经济带城市群 减污降碳及其影响因素分析

谭德明, 张 宇

(南华大学 经济管理与法学学院, 湖南 衡阳 421200)

摘 要: 以长江经济带三大城市群 71 个城市为研究对象, 使用耦合协调度模型测度 2011—2020 年三大城市群减污降碳协调度, 使用时空地理加权回归 (GTWR) 模型探究各城市群减污降碳影响因素的时空异质性。结果表明, 研究期内长江经济带三大城市群减污降碳协调度整体呈上升趋势, 截至 2020 年, 三大城市群减污降碳均达到协调状态, 其协调度由高到低依次为成渝城市群、长江中游城市群、长三角城市群; 影响因素回归结果显示, 城镇化、科技创新和环境规制能够促进减污降碳协同, 人口集聚、产业结构则会抑制减污降碳, 而经济发展水平、对外开放在三大城市群间表现出明显的时空异质性。基于此, 从经济发展、社会进步、科技创新以及政策规制层面提出差异化的减污降碳协同治理策略, 助力各城市群乃至长江经济带减污降碳目标的实现。

关键词: 减污降碳; 长江经济带; 城市群; 污染物减排; 碳减排

中图分类号: F124.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)02-0042-10

引文格式: 谭德明, 张 宇. 基于 GTWR 模型的长江经济带城市群减污降碳及其影响因素分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(2): 42-51.

Analysis of Pollution and Carbon Reduction with Its Influencing Factors in the Yangtze River Economic Belt Urban Agglomeration Based on GTWR Model

TAN Deming, ZHANG Yu

(School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang Hunan 421200, China)

Abstract: Taking 71 cities in the three major urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt as the research object, the coupling coordination degree model is used for a measurement of the coordinated efforts of pollution reduction and carbon reduction in the three urban agglomerations from 2011 to 2020, followed by an inquiry into the spatiotemporal heterogeneity of the influencing factors in each urban agglomeration by using GTWR model. The results indicate that during the research period, the overall coordination of pollution reduction and carbon reduction among the three major urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt shows an upward trend. By 2020, all three urban agglomerations have reached a coordinated state of pollution reduction and carbon reduction, with the degree of coordination in a descending order being the Chengdu-Chongqing urban agglomeration, the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration, and the Yangtze River Delta urban agglomeration. The regression results of the influencing factors show that urbanization, scientific and technological innovation and environmental

收稿日期: 2023-11-19

基金项目: 湖南省自然科学基金资助面上项目 (2024JJ5328)

作者简介: 谭德明, 男, 南华大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为生态规划与治理,

E-mail: 1499686214@qq.com

regulation can promote the synergy of pollution and carbon reduction, while population agglomeration and industrial structure can inhibit the reduction of pollution and carbon reduction. However, the level of economic development and opening up to the outside world exhibits a significant spatio-temporal heterogeneity among the three major urban agglomerations. Based on this, differentiated collaborative governance strategies have thus been proposed for pollution and carbon reduction from the perspectives of economic development, social progress, technological innovation, and policy regulation, so as to help achieve the pollution and carbon reduction goals of various urban agglomerations, even including the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: pollution and carbon reduction; Yangtze River Economic Belt (YREB); urban agglomeration; pollutant reduction; carbon emission reduction

0 引言

2013年,全国范围内出现大规模PM_{2.5}浓度爆表问题,严重雾霾危机引起了国家和社会对环境污染的高度关注。随后,为治理日益严重的环境问题,各项污染防治攻坚行动陆续开展。然而,作为我国过去粗放式经济发展模式的负产品,环境污染和生态破坏问题在近10a的治理和修复中,虽有所好转但并未完全消除。此外,《BP世界能源统计年鉴2022》显示,2021年中国的CO₂排放量达105.23亿t,约占全球总量的31%^[1]。为展现我国应对气候变化的决心,2020年习近平总书记提出“30·60目标”,随后关于实现“碳达峰·碳中和”的国家战略决策被不断完善。当前,我国整体处于减污与降碳压力叠加阶段,考虑到我国经济发展存在模式粗放、产业结构不合理、区域发展不平衡等问题,这种压力叠加持续时间将更长、强度将更大。为推进污染物与温室气体的协同控制,2021年国家七部委联合发布《减污降碳协同增效实施方案》,减污降碳协同推进成为新发展阶段我国经济社会发展全面绿色转型的必然选择。

减污降碳作为当前的热点问题之一,国内外研究主要集中于以下3个方面。1)关于减污降碳协同效应的识别与评估。现有研究表明,温室气体与污染物具有共生性,二者都主要来源于人类生产生活中的化石能源消耗^[2-3],这一特征成为减污降碳协同治理的前提和基础。Wang B.等^[4]对中国省级层面工业减污降碳效应进行了探究,其研究结果显示,工业部门每减少1000t碳排放就能够带来1t以上的大气污染物减排。张瑜^[5]、刘杰^[6]等通过对减污政策和降碳政策效果的双向研究,验证了我国环境治理政策的减污降碳协同效应。学者们验证协同效应的方法包括协同效应评估指数^[7]、耦合协调模型^[8]、综合指数法^[9-10]、数据包络法^[11]等多种方法,极大地丰富了当前关于减污降碳的研究。2)对减污降碳的影响因素进行探

究。现有研究多基于可拓展的随机性的环境影响评估模型(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIRPAT)^[12]、对数平均迪氏指数法(logarithmic mean division index, LMDI)分解法^[13]、Kaya模型等基本框架^[14],从省级或国家尺度探究影响污染减排或碳减排的主要因素、解析不同要素对污染物和温室气体排放的贡献程度。目前认为影响污染物和碳排放的因素主要包括人口规模、经济发展水平、工业化水平、能源结构、科技水平、城镇化水平、政策因素等^[15-16],二者存在高度重叠。3)对减污降碳的实现路径探索。国内学者们从不同领域、不同层面提出了实现减污降碳的建议。杜祥琬认为,应通过节能提效和推进能源清洁化、低碳化的路径实现减污降碳^[17]。冯相昭等^[18]主张推进污染物与温室气体协同控制标准体系建设。孙佑海^[19]、姜晓群^[20]等认为,要推进气候变化单独立法进程,塑造能够促进减污降碳协同机制的法制保障体系。陈菡等^[21]认为要搭建减污降碳协同治理体系,以实现减排措施协同、管理机制协调、区域协同。

现有文献从协同效应的识别、因素探究和路径优化等方面,对不同行业、不同区域的减污降碳进行了研究,这些研究极大程度证明了减污降碳协同治理是当前应对环境污染和温室气体减排双重压力最有效、最经济的手段。但已有研究更多地关注污染减排或碳减排单一方面,对减污降碳协同效果的探讨不足;研究尺度多为国家或省级层面,关注的是宏观层面减污降碳情况,对特定区域或更小尺度的研究较少;对减污降碳影响因素的分析多基于时空均质性的假设,忽视了不同因素在不同样本区域中存在时空变化,对影响因素作用的识别不够精准。鉴于此,本研究在已有研究基础上,将长江经济带三大城市群71个地级以上城市作为研究样本,使用耦合协调度模型和时空地理加权回归模型,探究三大城市群减污降碳协同状态以及城市群减污降碳影响因素的时空差异。以期准

确识别不同城市群所处的减污降碳状态,探究影响城市群减污降碳的因素,为推进长江流域整体实现减污降碳协同增效提供可行建议。

1 研究方法、指标选取及数据来源

1.1 研究方法

1) 耦合协调度模型。已有研究表明,污染物排放与温室气体排放具有同根同源性,主要来源于能源活动、工业生产过程以及废弃物处置过程。污染物与温室气体排放密不可分,这为碳污协同控制提供了基础和条件。本文把减污与降碳视作隶属于生态文明建设系统中的两个不同子系统,二者之间相互影响,紧密联系。本研究通过借用王淑佳等^[22]修正后的耦合协调度模型计算减污降碳协调度,从而反映研究对象减污降碳协同状态。耦合协调度越高,表明减污与降碳子系统之间的协同性越好,反之则越差。耦合协调度计算公式如下:

$$C = \sqrt{\left[1 - \sqrt{(U_2 - U_1)^2}\right] \times \frac{U_1}{U_2}} = \sqrt{\left[1 - (U_2 - U_1)\right] \times \frac{U_1}{U_2}}, \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times U_i = \alpha_1 \times U_1 + \alpha_2 \times U_2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: C 为耦合度,且 $C \in [0, 1]$, C 值越大,表明子系统间离散程度越小,子系统间耦合度越高,反之越低; U_i 为各子系统标准化值,且 $U_i \in [0, 1]$,此处假设 $U_2 = \text{Max} U_i$; T 为协调发展度; α_i 为第 i 个子系统权重,参考已有研究,认为减污与降碳子系统同等重要,因而 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$; D 为耦合协调度, $D \in [0, 1]$, D 值越大,表明子系统间协调性越高,反之越低。

借鉴已有研究^[23],根据 D 值将协调度划分为 10 个不同状态,具体划分情况见表 1。

表 1 耦合协调状态划分

Table 1 Coupling coordination state division

耦合协调度 D 值区间	耦合协调 状态	耦合协调度 D 值区间	耦合协调 状态
[0~0.1)	极度失调	[0.5~0.6)	勉强协调
[0.1~0.2)	严重失调	[0.6~0.7)	初级协调
[0.2~0.3)	中度失调	[0.7~0.8)	中级协调
[0.3~0.4)	轻度失调	[0.8~0.9)	良好协调
[0.4~0.5)	濒临失调	[0.9~1]	优质协调

2) 时空地理加权回归 (geographical and temporal weighted regression, GTWR) 模型。传统的线性回归模型忽略了变量之间可能存在的空间异质性,回归结果体现的是整个研究区域的平均值,很大

程度上掩盖了不同区域之间的实际空间特征。地理加权回归 (geographical weighted regression, GWR) 模型虽然考虑到变量之间的空间异质性,但缺乏对于时间因素的考量,忽略了不同因素在不同时间下影响效果的变化。时空地理加权回归模型通过在地理加权回归模型基础上引入时间效应^[24],很大程度上优化了这一缺陷,使得 GTWR 模型可以使用时空面板数据,既解决时空非平稳性与参数无法估计的问题,又提高回归结果的稳健性,其公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

式中: X 、 Y 分别为解释变量和被解释变量; (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个城市的时空坐标; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为模型常数项; X_{ik} 为第 i 个城市第 k 个影响因素数值; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个城市第 k 个影响因素在时间 t 上的回归系数; ε_i 为误差项。

在 GTWR 模型带宽选择上,根据 AICc 准则,使用自适应带宽进行回归。

1.2 减污降碳影响因素选取

为探究影响城市减污降碳协同效应的因素,参考 STIRPAT 模型、Kaya 恒等式基本框架和已有研究的影响因素选择,本文从社会、经济、科技以及政策规划 4 个层面选取各指标探究其对长江经济带城市减污和降碳的影响。减污降碳影响因素汇总说明见表 2。

表 2 减污降碳影响因素指标选取

Table 2 Selection of indicators for factors affecting pollution and carbon reduction

变量类型	符号	量 化 方 式
污染综合指数	γ_{POL}	熵值法计算二氧化硫排放量、烟尘排放量、废水排放量的综合指数
碳排放量	V_{CO_2}	城市温室气体排放量
人口集聚	η_{PEO}	地区人口总量 / 辖区面积
城镇化	η_{UR}	城镇人口占地区总人口比例
经济发展水平	V_{PGDP}	人均 GDP
产业结构	η_{IND}	第二产业增加值占 GDP 比例
对外开放	V_{FDI}	实际利用外资金额
科技创新	V_{RD}	专利授权数 / 地区人口总量
环境规制	η_{ER}	地级市政府工作报告中“环保”相关词汇出现频率 ^[25]

1.3 数据来源与处理

本研究以长江经济带三大城市群为研究对象,选取 2011—2020 年三大城市群 71 个城市作为研究样本,研究的相关数据主要分为以下 3 部分:

1) 污染综合指数^[26-27]。考虑数据可获得性和完整性,本文选择地级市废水排放量、二氧化硫排放量及烟(粉)尘排放量指标,通过熵值法计算地级市污

染综合指数以代表城市污染物综合排放情况。污染综合指数越高地区污染物排放量越大;反之越小。

2) 碳排放量。当前我国未公布地级市温室气体排放数据,地级市也尚未公布具体的能源消费数据。因而本文参考吴建新等^[28]的研究,通过统计地级市电能、煤气和液化石油气以及热能消耗总量,计算得到各类能源消耗排放的碳排放量,继而通过相加得到地级市碳排放总量。

3) 其余相关数据主要来自 2012—2021 年《中国城市统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、长江经济带各城市统计年鉴及统计局、政府网站、Easy Professional Superior 数据平台(EPS 数据库)等,部分缺失数据用线性插值法补充。进行 GTWR 模型回归前,对所有回归指标数据进行 Z-score 标准化处理。

2 城市群减污降碳协同情况分析

根据式(1)~(3),计算得出长江经济带三大城市群 2011—2020 年减污降碳协调度,以此反映三大城市群的减污降碳协同情况,结果如图 1 所示。

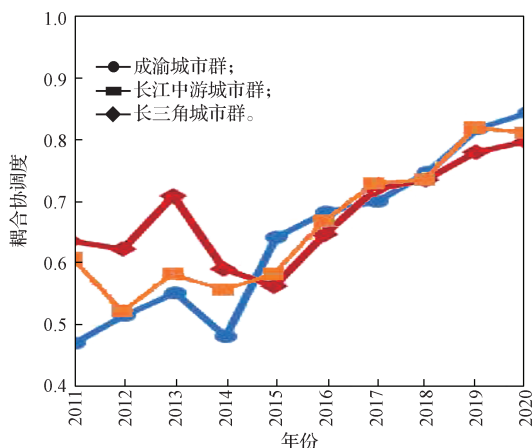


图1 2011—2020 年长江经济带三大城市群
减污降碳协调度

Fig. 1 Coupling coordination of pollution and carbon reduction among the three urban agglomerations in the YREB, 2011—2020

从空间差异上看,研究期内三大城市群减污降碳协调度的差异逐渐缩小,2011 年协调度最高的长三角城市群与协调度最低的成渝城市群之间的差值为 0.164;但到 2020 年,协调度最高的成渝城市群与最低的长三角城市群之间的协调度差值仅为 0.048。从时间演变上看,三大城市群减污降碳协调度经历了先波动下降再持续上升的发展历程。到 2020 年,三大城市群减污降碳协调情况均达到中等协调水平以上,其中成渝城市群和长江中游城市群达到良好协调水平,三大城市群协调度的发展趋势大致相同。

根据三大城市群减污降碳协调度变化情况,可将其分为 2 个阶段。

1) 第一阶段,2011—2014 年。此阶段中,三大城市群的减污降碳协调度均处于波动下降状态。此时各城市群之间减污降碳协调度差异较大,从大到小排序依次为长三角城市群、长江中游城市群、成渝城市群。此阶段协调度波动下降的主要原因在于,长江经济带在这一时期仍是以粗放式经济发展方式为主导,以传统化石能源为驱动,依托大量“三高—低”企业带动地区经济增长,造成污染物大量排放,加剧了环境污染。其中,以成渝城市群地区尤甚,因而此阶段成渝城市群减污降碳协调度最低。而下游长三角地区的经济发展起步早、进展快,对污染治理行动开展较早,且地区内企业经过数轮工艺改进和技术升级后,资源利用效率较高,单位 GDP 污染物排放量、碳排放量较少,因而减污降碳协调度较高。

2) 第二阶段,2015—2020 年。此阶段中,长江经济带三大城市群的减污降碳协调度持续上升,且城市群间的差距逐渐缩小。到 2020 年,减污降碳协调程度从大到小排序依次为成渝城市群、长江中游城市群、长三角城市群。此阶段协调度持续上升,主要得益于十八大后中央对于环境保护、节能减排等生态文明建设问题的高度重视,以及 2013 年大气污染防治行动计划成效的显现。为开展大气污染防治,长江经济带各城市通过加大综合治理力度、推动产业结构优化和提升绿色创新能力等举措,实现了 SO₂、PM_{2.5}、氮氧化物等多种污染物的综合减排。同时,这也从源头上减少了 CO₂ 等温室气体的排放,实现了温室气体的协同控制。2018 年,污染防治攻坚战打响,蓝天、碧水、净土保卫战相继开展,进一步推动了减污降碳协同治理成效的提升。其中成渝城市群相较于其他两城市群来说,小规模、高污染、高能耗企业更多,因而在淘汰落后产能、严控“两高”行业准入、推广清洁生产等举措的规制下,地区取得的减污和降碳效果更为显著,减污降碳的协调度提升幅度更大。

3 城市群减污降碳影响因素时空异质性

3.1 GTWR 模型拟合

利用 ArcGIS 10.8 软件,对长江经济带三大城市群减污降碳协调度的影响因素进行时空地理加权回归分析,并将 GTWR 模型参数与 GWR 模型、OLS 模型回归参数进行对比,最终选择 GTWR 模型回归

结果进行分析。在使用 GTWR 模型进行拟合前,先使用 Moran 指数对被解释变量“减污降碳耦合协调度”的空间相关性进行检验,检验结果显示被解释变量具有显著的空间相关性。其次,对影响因素间的共线性进行检验。经过检验,各因素的 VIF 值均小于 10,表明解释变量之间不存在显著的多重共线性,可以使用 GTWR 模型进行回归分析。从表 3 中可见,GTWR 模型的 AICc 值小于 OLS 模型和 GWR 模型的估计值,且调整后 R^2 值大于 OLS 模型和 GWR 模型估计值。这说明相较于 GWR 模型和 OLS 模型,GTWR 模型对本研究数据具有更好的拟合效果,因而选择 GTWR 模型回归结果分析各影响因素对长江经济带三大城市群减污降碳协同度的时空差异性。

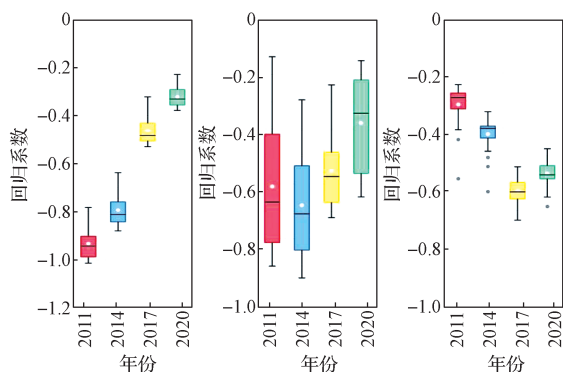
表 3 模型拟合参数

Table 3 Model fitting parameters

参数	模 型		
	GTWR	GWR	OLS
AICc	-1 610.05	-1 351.87	-974.887
R^2	0.821 5	0.689 0	0.408 5
R^2 Adjusted	0.819 7	0.685 9	0.403 6

3.2 时空差异分析

本文使用 GTWR 模型,分析 2011—2020 年不同因素对长江经济带三大城市群减污降碳协同的影响,并将三大城市群 2011、2014、2017 和 2020 年的回归结果绘制成箱型图,用以分析不同影响因素对长江经济带三大城市群影响的时空异质性。图 2 给出了三大城市群人口集聚回归系数分布情况。



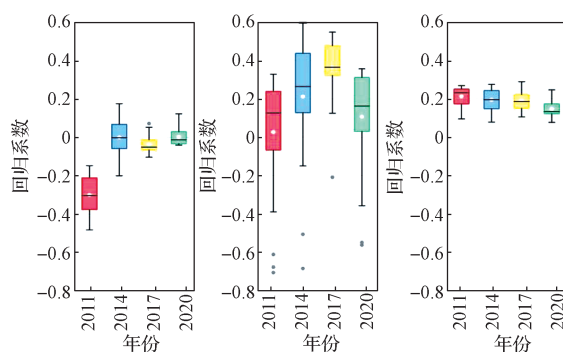
a) 成渝城市群 b) 长江中游城市群 c) 长三角城市群
图 2 人口集聚回归系数分布图

Fig. 2 Population agglomeration regression coefficient distribution map

从图 2 中可以看出,人口集聚对长江经济带三大城市群减污降碳协调度均具有负向影响,即地区人口密度的增加会阻碍减污降碳的协同治理。这主要是因为人类生产生活均涉及能源的消耗,地区人口密度的提升会导致对能源需求量大幅增加,加大地区生态承

载压力。从变动趋势来看,成渝城市群和长江中游城市群的回归系数在研究期内波动上升,表明人口集聚对减污降碳协同的抑制作用减弱。而研究期内长三角城市群回归系数的演变趋势则呈现出波动下降的态势,从 2011 年的 $-0.41 \sim -0.24$ 下降至 2020 年的 $-0.70 \sim -0.45$,人口密度增加对减污降碳的负向影响增强。长三角城市群作为长江经济带人口最为密集的地区,近年来人口密度仍在不断提升。截至 2020 年,长三角地区平均人口密度约为 $664 \text{ 人}/\text{km}^2$,是全国平均水平的 4.5 倍。多数城市人口密度已逼近或超过其最大承载力,无论是对地区环境保护还是对于减排温室气体来说都具有不利影响。

图 3 展示了三大城市群 2011—2020 年城镇化水平对减污降碳回归系数的变动情况。



a) 成渝城市群 b) 长江中游城市群 c) 长三角城市群

图 3 城镇化水平的回归系数分布图

Fig. 3 Regression coefficient distribution map of urbanization level

从图 3 中可以看出,对于城镇化水平的回归系数来说,三大城市群组间以及组内都存在较大的差异。城镇化水平对长三角城市群城市减污降碳始终具有正向影响,长三角城市城镇化水平提升有利于地区减污降碳协同状态的提升。对成渝城市群来说,2011 年各城市的回归系数均小于 0,经过 10 a 的发展演变,到 2020 年已有部分城市回归系数稳定为正。因而对于成渝城市群中回归系数为负的城市,需要在城镇化水平提升中树立高质量城镇化的理念,考虑城市污染排放与污染处理能力的平衡。对长江中游城市群来说,研究期内大多数城市的回归系数为正,城市群内东西部差异明显。城市群东部城镇化水平较高的地区回归系数为正,而西北部城镇化水平较低的地区回归系数为负。因而对于长江中游城市群来说,需要推进区域内部城市间的均衡发展,促进资金、资源、技术等要素在不同城市间的合理流动,带动西北部城市经济发展,推进新型城镇化建设。

图 4 所示为三大城市群经济发展水平的回归系数分布图。

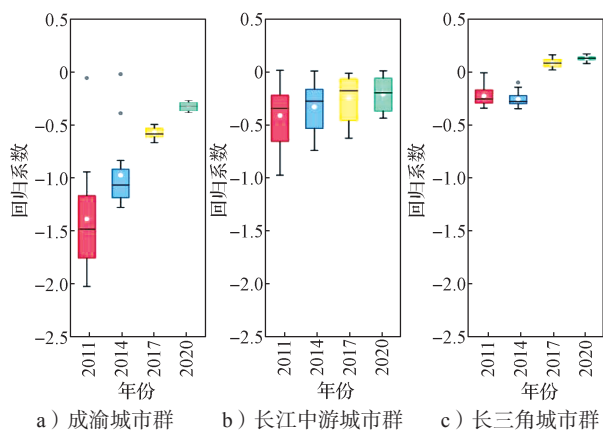


图4 经济发展水平的回归系数分布图

Fig. 4 Regression coefficient distribution chart of economic development level

由图4可知,经济发展水平对成渝和长江中游城市群减污降碳的影响均为负,且研究期内两城市群回归系数均呈上升趋势。成渝城市群回归系数从-2.0~-0.9上升至-0.45~-0.2,长江中游城市群回归系数从-1.0~0提升至-0.45~0,城市群内部差异显著降低。回归结果表明,对于成渝和长江中游两城市群而言,经济发展水平提升会造成碳污协同减排效果下降,但这种负向影响在研究期内逐渐弱化。其原因可能是研究期内两城市群经济增长方式逐步从粗放式经济发展向绿色发展、高质量发展转变,有效制约了污染物与碳排放规模的迅速扩大。对于长三角城市群来说,其2011—2015年的经济发展水平回归系数为负,但2016—2020年由负转正,意味着对长三角城市群来说,经济发展水平的提升可促进减污降碳协同效应。这主要是由于“十四五”时期长三角地区经济发展逐步迈入高质量发展阶段,发达的经济水平带来人民消费需求的转变,新型生活方式和绿色消费模式被接受和推广,推动了地区污染物和温室气体的协同减排。

图5为三大城市群产业结构回归系数分布图。

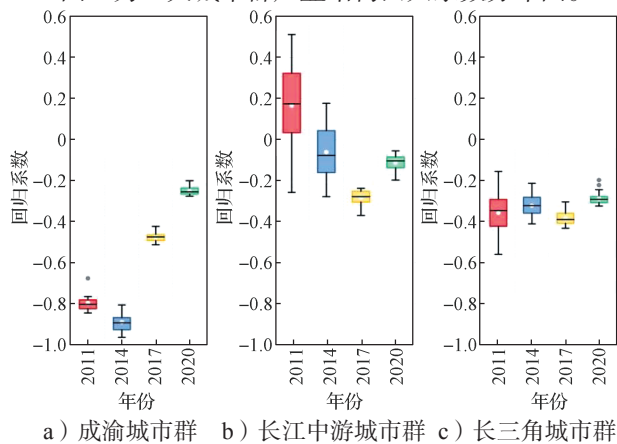


图5 产业结构的回归系数分布图

Fig. 5 Distribution diagram of regression coefficients for industrial structure

由图5可以得知,2011—2020年,产业结构对长江经济带三大城市群的减污降碳主要表现为负向影响,即第二产业所占比例越高,减污降碳的协调性越差。第二产业创造价值需要耗费的资源和能源要远高于第一产业和第三产业的对应值,既是主要的污染排放源也是重要的温室气体排放源。因而第二产业产值占GDP比例越高,相应的污染物与温室气体排放量越多,越不利于减污与降碳的协同推进。其中,产业结构对长三角和成渝城市群减污降碳稳定呈现为负向影响。但是相较之下,成渝城市群的回归系数要小于长三角城市群的,这表明产业结构对成渝城市群减污降碳的负向影响作用更强。成渝城市群的回归系数在研究期内呈上升趋势,意味着第二产业所占比例对成渝地区减污降碳的抑制作用随着时间推移被弱化。而长三角城市群中各城市回归系数变动较小,表明产业结构对减污降碳协同的影响较为稳定。长江中游城市群的回归系数在研究期内变动最大:以2017年为分界,2017年前长江中游城市群的产业结构回归系数正负皆有,意味着对城市群内部各城市来说,第二产业所占比例的提升对减污降碳的影响存在明显差异。2017年后,长江中游城市群中各城市的回归系数一致为负,表明产业结构调整对减污降碳效应开始显现。

图6给出了三大城市群对外开放的回归系数分布情况。

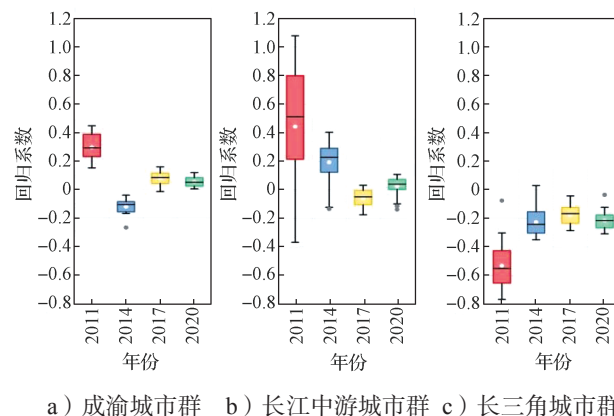


图6 对外开放的回归系数分布图

Fig. 6 Regression coefficient distribution chart of opening up to the outside world

从图6中可以看出,对外开放对减污降碳的影响在不同区域存在明显差异。对于长三角城市群来说,研究期内对外开放对减污降碳协同的回归系数普遍为负,意味着外商投资额的增加会阻碍该地区减污降碳协同效果的提升。但对于成渝城市群和长江中游城市群来说,其中大多数城市对外开放的回归系数大于0,表明外商投资能够促进成渝城市群和长江中游城

市群大部分城市的减污降碳。但这种促进作用整体呈波动下降的发展趋势,不同年份间的回归系数变动较大。成渝城市群和长江中游城市群相较于长三角城市群来说,对外资的吸引力较低,除以省会为代表的主要城市外,其他城市接收到的实际外商投资数规模较小。但尽管如此,相对于此类地区原有企业来说,吸引来的外资通常带来了较为先进的技术,有利于当地产业技术升级,从而减少污染物和温室气体的排放,促进减污与降碳的协同发展。但随着我国对科技发展的重视和自身科技实力的增强,外商投资的技术优势逐渐降低,因而其对减污降碳协同的促进作用也逐渐降低。

图 7 给出了三大城市群科技创新的回归系数分布情况。

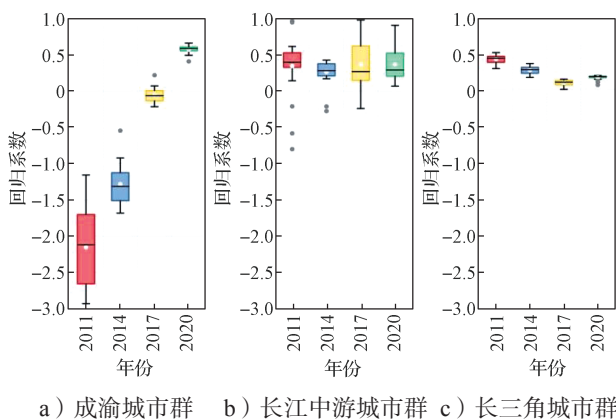


图 7 科技创新的回归系数分布图

Fig. 7 Technological innovation regression coefficient distribution chart

如图 7 所示,科技创新对三大城市群减污降碳的影响以正向影响为主,说明科技创新是促进减污降碳协同的重要因素。2011 年成渝城市群科技创新对减污降碳协同的回归系数为负,此后其回归系数持续提升,在研究末期实现了回归系数的由负转正,以及城市群内部各城市回归系数差异明显缩小。对于长江中游城市群来说,研究期内绝大部分城市的回归系数为正,仅有少数城市的回归系数小于 0。并且直到研究末期,城市群内各城市的作用方向才一致趋于正,科技创新表现出对减污降碳的正向促进作用。而对长三角城市群来说,研究期内所有城市科技创新的回归系数均为正,表明长三角地区科技水平的提升能够有效促进地区污染物与温室气体的协同控制。但从时间发展趋势来看,这种促进作用的效果略有下降,区域内部各城市间的回归系数集中于 0.05~0.18,作用强度逐渐趋于一致。

图 8 展示了三大城市群环境规制的回归系数分布情况。

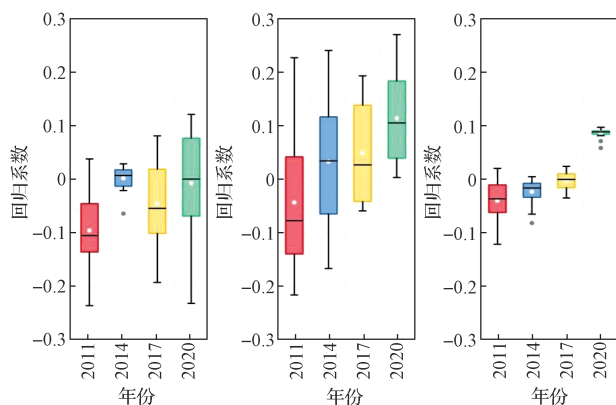


图 8 环境规制的回归系数分布图

Fig. 8 Environmental regulation regression coefficient distribution chart

从图 8 所示回归结果看,研究初期,三大城市群城市环境规制的回归系数多为负数,并且回归系数随着时间推移波动上升。表明环境规制对三大城市群大部分城市的减污降碳协同具有负向影响,但这种负向影响随着地区经济社会的发展逐渐减弱。到 2020 年,长江中游城市群和长三角城市群城市回归系数均为正,环境规制对减污降碳的影响已实现从负向影响向正向影响的转变。这意味着,在以上地区,通过提升环境规制强度能够促进减污降碳协同作用。但从图 8 中也能看出,长江中游城市群内部回归系数的差异性要远大于长三角城市群,可能是因为长江中游城市群内部环境规制实施效果参差不齐,部分城市仍未贯彻落实绿色发展理念,导致环境规制作用未得到充分发挥。而对于成渝城市群来说,到 2020 年仍未实现环境规制回归系数的全部为正,但各城市回归系数整体有所优化。2011 年,成渝城市群中重庆市、达州市及广安市 3 个城市的回归系数为正,其余城市的回归系数均为负;到 2020 年,回归系数大于 0 的城市增加至 9 个,其余各城市回归系数较 2011 年也有所提升。这表明研究期内,成渝城市群环境规制对减污降碳协同的影响由负向正转变,多数城市已能通过提升环境规制强度促进减污与降碳的协同控制。

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于耦合协调度模型和时空地理加权回归模型,分别探究了 2011—2020 年长江经济带三大城市群减污降碳协同状态演变和影响因素的时空异质性,得到如下结论:

1) 长江经济带三大城市群的减污降碳耦合协调度均呈波动上升趋势,其中成渝城市群协调度提升

幅度最大,长三角城市群协调度平均值最高。截至2020年,三大城市群减污降碳均达到协调状态,协调度由高到低依次为成渝城市群、长江中游城市群、长三角城市群。成渝城市群和长江中游城市群减污降碳协同状态达到良好协调水平,长三角城市群达到中级协调水平。

2)在减污降碳影响因素探究上,各因素对三大城市群减污降碳协同的影响均具有明显的时空异质性。其中城镇化、科技创新和环境规制对减污降碳协同具有正向影响,通过推动高水平城镇化、提升科技创新能力和加强环境规制力度,能够有效促进其减污降碳协同。人口集聚、产业结构对三大城市群减污降碳协同具有负向影响,需要控制地区人口密度过快增长、推动产业结构转型升级以降低其负向影响。经济发展水平在长三角城市群能够促进减污降碳的协同,但在其他城市群则会导致减污降碳的失调;对外开放在长三角城市群表现为对减污降碳协同的抑制作用,在成渝城市群则表现为正向的促进作用,在长江中游城市群则正负皆有,未实现作用方向的统一。

4.2 建议

1)长三角城市群减污降碳是推动长江流域下游生态文明建设、促进经济发展绿色低碳转型的必要举措。首先,实现长三角城市群整体的减污降碳,必然要推动长三角均衡发展,通过缩小城市间经济社会发展差距,合理疏散人口密度,缓解长三角核心城市因为人口集聚和产业集聚所面临的严重资源和环境压力。其次,长三角城市群产业以电子、汽车、纺织、石化等产业为主导,有极高的污染减排和碳减排潜力。对此,加快淘汰落后产能,推进清洁技术的推广和应用,提升能源利用效率,是实现长三角城市群减污降碳的重要举措。上海市作为长江经济带龙头,未来更需要进一步发挥创新中心的人才和技术优势,加大对于减污降碳技术的研发与成果转化,为长三角乃至长江经济带整体实现减污降碳提供可靠的技术支持。最后,当前长三角地区正处于生态绿色一体化推进进程中,更需着力推进集排污权交易和碳排放权交易为一体的排放权交易平台建设,构建更加成熟和完善的排污权交易体系,发挥市场型环境规制的减污降碳作用。

2)长江中游城市群是带动长江中游区域整体发展的重要力量,主导产业以传统机械制造、建材加工、化工冶炼等为代表,地区产业结构相似。要推进中游城市群实现减污降碳,需要加快地区产业结构的调整、推进新型产业的发展。例如武汉的半导体和光电产业、长沙的人工智能和大数据、南昌的航空工业及

新材料等。通过发展此类具有高技术含量、高附加值以及资源集约性质的产业,转变粗放式的发展模式,减少在经济发展过程中产生的污染物和碳排放量。此外,中游地区城市要注重推进高质量城镇化,遏制部分城市通过盲目基建提升城镇化水平的行为,合理引导农村及周围城市人口向此集聚,并大力倡导绿色低碳生活方式和消费模式,减轻人口数量增加对地区环境造成的压力。对于外商投资,长江中游城市群需提升环境准入审核标准,杜绝因盲目引进外资而成为“污染避难所”。

3)成渝城市群地处长江流域上游,多属于生态脆弱或生态敏感区,因而在经济社会发展过程中更需遵循“共抓大保护,不搞大开发”的发展理念,坚定走“生态优先,绿色发展”道路,以此倒逼区域内产业转型升级和清洁化改造。通过挖掘区域内生态旅游资源,推动以绿色旅游为代表的服务业发展,加快调整成渝区域内部的产业结构。成渝城市群作为长江上游地区的科研中心,可将自然资源禀赋与科技创新相结合,着力开展可再生能源开发与利用研究,打造长江上游可再生能源科技研发中心。通过技术扩散推动长江上游可再生能源装机总量,调整上游地区能源消费结构,减少化石能源消耗,推动减污降碳协同。最后,成渝城市群乃至长江上游各级政府需要加强与中、下游省市政府的联系,在流域范围内开展更有针对性、更有效的环境规制。如推动长江流域上下游生态补偿制度建设与落实,对上游重要生态功能区进行横向生态补偿,以提升上游地区污染治理和生态保护的积极性等。

参考文献:

- [1] BP. bp Statistical Review of World Energy 2022[EB/OL]. (2022-06-28)[2023-02-01]. https://www.bp.com.cn/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2022/bp-stats-review-2022-full-report_zh_resized.pdf.
- [2] FIGUERES C, LANDRIGAN P J, FULLER R. Tackling Air Pollution, Climate Change, and NCDs: Time to Pull Together[J]. *Lancet*, 2018, 392(10157): 1502-1503.
- [3] 王 慧, 孙 慧, 肖涵月, 等. 碳达峰约束下减污降碳的协同增效及其路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 96-108.
WANG Hui, SUN Hui, XIAO Hanyue, et al. Synergistic Effects and Paths of Pollution and Carbon Reduction Under the Constraint of Carbon Peak Goal[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022,

- 32(11): 96–108.
- [4] 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.
- [5] 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(5): 1–13.
ZHANG Yu, SUN Qian, XUE Jinjun, et al. Synergistic Effects of Pollution Control and Carbon Reduction and Their Pathways[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 1–13.
- [6] 刘 杰, 刘紫薇, 焦珊珊, 等. 中国城市减碳降霾的协同效应分析 [J]. 城市与环境研究, 2019, 6(4): 80–97.
LIU Jie, LIU Ziwei, JIAO Shanshan, et al. Co-Effect of CO₂ Mitigation and PM_{2.5} Control in Chinese Cities[J]. Urban and Environmental Studies, 2019, 6(4): 80–97.
- [7] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 268–278.
GAO Qingxian, GAO Wenou, MA Zhanyun, et al. The Synergy Effect Assessment Method and Its Application for Air Pollutants and Greenhouse Gases Reduction[J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 268–278.
- [8] 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.
TANG Xiangbo, ZHANG Ye, CAO Lizhen, et al. Spatio-Temporal Characteristics and Influencing Mechanism of Synergistic Effect of Pollution and Carbon Emission Reduction in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(10): 2252–2263.
- [9] CAI Z Y, YANG X H, LIN H X, et al. Study on the Co-Benefits of Air Pollution Control and Carbon Reduction in the Yellow River Basin: An Assessment Based on a Spatial Econometric Model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(8): 4537.
- [10] 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.
MA Weibo, ZHAO Lijun, WANG Nan, et al. Study on Driving Factors of Pollution and Carbon Reduction in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1273–1281.
- [11] 李光亮, 谭春兰, 石珊珊. 公众参与的减污降碳效应及其作用机制研究 [J]. 调研世界, 2023(1): 22–32.
LI Guangliang, TAN Chunlan, SHI Shanshan. Study on the Effect and Mechanism of Public Participation in Reducing Pollution and Carbon[J]. The World of Survey and Research, 2023(1): 22–32.
- [12] 孙贵艳, 王 胜, 肖 磊. 基于夜间灯光数据的长江上游地区能源消费碳排放及影响因素研究 [J]. 地域研究与开发, 2020, 39(4): 159–162, 174.
SUN Guiyan, WANG Sheng, XIAO Lei. Research on Carbon Emission from Energy Consumption and Influencing Factors in the Upper Reaches of the Yangtze River Based on Nightlight Data[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(4): 159–162, 174.
- [13] 刘亦文, 阳 超, 蔡宏宇. 中国碳排放总量与强度的省际差异与因素分解 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 1–9.
LIU Yiwen, YANG Chao, CAI Hongyu. Inter-Provincial Diversity and Factor Decomposition of the Totality and Intensity of Carbon Emissions in China[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(1): 1–9.
- [14] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战: 基于技术进步的视角 [J]. 经济研究, 2019, 54(11): 118–132.
YANG Lisha, ZHU Junpeng, JIA Zhijie. Influencing Factors and Current Challenges of CO₂ Emission Reduction in China: A Perspective Based on Technological Progress[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(11): 118–132.
- [15] 周 侃, 李 会, 申玉铭. 京津冀地区县域环境胁迫时空格局及驱动因素 [J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1934–1947.
ZHOU Kan, LI Hui, SHEN Yuming. Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of Environmental Stress in Beijing-Tianjin-Hebei Region: A County-Level Analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1934–1947.
- [16] 黄 鑫, 邢秀为, 程文仕. 土地利用碳排放与 GDP 含金量的脱钩关系及驱动因素 [J]. 地域研究与开发, 2020, 39(3): 156–161.
HUANG Xin, XING Xiuwei, CHENG Wenshi. Decoupling and Driving Factors Related Analysis Between the Carbon Emissions of Different Land Use Types and GDP Gold Content[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(3): 156–161.
- [17] 朱 妍. 中国工程院院士杜祥琬: 减污降碳不是简单地拉闸限电 [N]. 中国能源报, 2021–10–18(02).
ZHU Yan. Du Xiangwan, Academician of Chinese Academy of Engineering: Reducing Pollution and Carbon Is Not Simply a Matter of Pulling the Plug on the Power Grid[N]. China Energy News, 2021–10–18(02).
- [18] 冯相昭, 王 敏, 梁启迪. 机构改革新形势下加强污染物与温室气体协同控制的对策研究 [J]. 环境与可持

- 续发展, 2020, 45(1): 146-149.
- FENG Xiangzhao, WANG Min, LIANG Qidi. Study on Countermeasures to Enhance the Co-Control of Air Pollutants and Greenhouse Gases in the New Context of National Institutional Reform[J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(1): 146-149.
- [19] 孙佑海. 依法构建降碳减污扩绿保供增长五位一体的协同机制 [J]. 郑州大学学报 (哲学社会科学版), 2022, 55(6): 26-29, 124.
- SUN Youhai. Construct a Five-in-One Coordination Mechanism to Reduce Carbon, Reduce Pollution, Expand Green and Ensure Supply Growth According to Law[J]. Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 55(6): 26-29, 124.
- [20] 姜晓群, 王力, 周泽宇, 等. 关于温室气体控制与大气污染物减排协同效应研究的建议 [J]. 环境保护, 2019, 47(19): 31-35.
- JIANG Xiaoqun, WANG Li, ZHOU Zeyu, et al. Suggestions on Co-Benefits Between GHG Emission Control and Air Pollutant Reduction[J]. Environmental Protection, 2019, 47(19): 31-35.
- [21] 陈 菡, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 12-18.
- CHEN Han, CHEN Wenying, HE Jiankun. Pathway to Meet Carbon Emission Peak Target and Air Quality Standard for China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(10): 12-18.
- [22] 王淑佳, 孔 伟, 任 亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- WANG Shujia, KONG Wei, REN Liang, et al. Research on Misuses and Modification of Coupling Coordination Degree Model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.
- [23] 华 坚, 胡金昕. 中国区域科技创新与经济高质量发展耦合关系评价 [J]. 科技进步与对策, 2019, 36(8): 19-27.
- HUA Jian, HU Jinxin. Analysis on the Coupling Relationship Between Technology Innovation and High-Quality Economic Development[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2019, 36(8): 19-27.
- [24] 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(3): 383-401.
- [25] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展 [J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20-34.
- CHEN Shiyi, CHEN Dengke. Air Pollution, Government Regulations and High-Quality Economic Development[J]. Economic Research Journal, 2018, 53(2): 20-34.
- [26] 刘玉凤, 高良谋. 中国省域 FDI 对环境污染的影响研究 [J]. 经济地理, 2019, 39(5): 47-54.
- LIU Yufeng, GAO Liangmou. Influence of Chinese Provincial FDI on Environmental Pollution[J]. Economic Geography, 2019, 39(5): 47-54.
- [27] 田时中. 财政分权视角下中国环境污染综合评价: 1998—2015: 基于省际工业污染面板数据的实证 [J]. 华东经济管理, 2017, 31(5): 34-41.
- TIAN Shizhong. The Comprehensive Evaluation of Environmental Pollution from the Perspective of Fiscal Decentralization in China: 1998—2015: An Empirical Study Based on the Panel Data of Provincial Industrial Pollution[J]. East China Economic Management, 2017, 31(5): 34-41.
- [28] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析 [J]. 统计研究, 2016, 33(1): 54-60.
- WU Jianxin, GUO Zhiyong. Research on the Convergence of Carbon Dioxide Emissions in China: A Continuous Dynamic Distribution Approach[J]. Statistical Research, 2016, 33(1): 54-60.

(责任编辑: 廖友媛)