

# 中部六省减污降碳 时空演变特征及驱动因素研究

崔连标<sup>1</sup>, 李宇<sup>1</sup>, 段梅<sup>2</sup>

1. 安徽财经大学 统计与应用数学学院, 安徽 蚌埠 233000;
2. 安徽财经大学 图书与信息中心, 安徽 蚌埠 233030

**摘要:**采用耦合协调度模型测算中部六省2010—2021年减污降碳的耦合协调度,运用基尼系数、核密度估计法和Tobit回归模型,探索中部六省减污降碳耦合协调度的动态演进特征和影响因素,发现:中部六省治理大气污染取得一定成效,但二氧化碳排放量的持续上升导致减污降碳的协同效应未达预期,减污降碳耦合协调度整体偏低,并在2016年后出现下降趋势,凸显了区域内大气减污与碳减排之间的复杂关系;减污降碳耦合协调度地区差异明显,随着时间推移地区间的差距逐渐缩小,区域间的结构性差异是影响减污降碳协调度地区差异的主要因素;能源消费强度、产业结构、城镇化水平、人均GDP和对外开放程度等多重因素共同作用于减污降碳的协同增效,但不同省份之间驱动因素有所差异。

**关键词:**减污降碳;协同增效;中部六省;耦合协调度;地区差异

**中图分类号:**F124.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.12186/2025.01.006

**文章编号:**2096-9864(2025)01-0039-11

目前,推进减污降碳协同治理已成为我国生态环境保护的核心问题。为应对气候变化和环境污染的双重压力,我国积极落实“双碳”目标,大力推进污染防治工作,在实现经济高质量发展的同时,最大限度地减少对环境的负面影响。减污降碳作为实现碳达峰、碳中和“1+N”政策体系的重要内容,已经成为我国应对气候变化、推动生态文明建设的重要组成部分<sup>[1]</sup>。2021年,生态环境部发布《关于统筹加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》,强调协同推进减污降碳与生态环境保护

工作,实现“双碳”目标的重要性,并为后续政策的制定和实施提供了指导原则<sup>[2]</sup>。2022年,国务院七部门联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》,进一步明确了协同推进碳达峰、碳中和与生态环境保护工作的具体目标和实施机制,为政策的落实提供了操作性和实效性支持。近年来,中部地区经济发展迅速,但是经济增长伴随大量能源资源消耗,导致大气污染物排放和碳排放的日益增加。因此,分析中部六省大气污染排放和碳排放时空变化特征,探讨大气污染减排系统和碳减排系统耦合协调度的变化

收稿日期:2024-11-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(72374001,71974001);安徽省哲学社会科学规划课题重大项目(AHSKZD2022D01);安徽省社会科学创新发展研究课题重大项目(2022ZD006)

作者简介:崔连标(1987—),男,安徽省蒙城县人,安徽财经大学教授,博士生导师,主要研究方向:资源环境统计;李宇(2000—),男,安徽省淮北市人,安徽财经大学硕士研究生,主要研究方向:资源环境统计。

特征和影响因素,提出可行性的政策措施,对中部六省科学谋划减污降碳具有重要意义。

目前有关中部六省减污降碳的研究主要关注碳排放的时空特征和影响因素。例如,刘玉珂等<sup>[3]</sup>通过经典收敛回归方法对中部六省碳排放的时空特征和收敛性进行分析,并运用对数平均迪氏指数分解法对该地区碳排放影响因素与空间特征进行研究;齐绍洲等<sup>[4]</sup>利用脱钩模型、面板协整检验和碳排放峰值预测模型,研究中六省经济增长方式对区域碳排放的影响;戴胜利等<sup>[5]</sup>则通过脱钩模型、对数平均迪氏指数分解法和熵值法,探索了中部六省9种工业能源碳排放量与生产总值之间的脱钩效应,并据此对所得驱动因素效应值进行分析。

但目前对中部地区减污降碳时空演变特征与驱动因素进行研究的文献较少。作为我国重要的工业基地,中部地区工业总量大,污染排放量高,对该地区减污降碳开展全面系统评估具有重要理论意义和决策价值。鉴于此,本文拟以中部六省为研究对象,运用耦合协调度模型深入剖析大气污染物减排与二氧化碳减排之间的交互作用,基于基尼系数和核密度估计法分析减污降碳协同效应的动态演变特征和地区结构性差异,利用Tobit回归模型识别影响中部六省减污降碳协同效应的主要驱动因素,旨在为中部六省的绿色发展提供实证支持,为制定更具针对性的减污降碳协同政策提供参考。

## 一、研究方法和数据来源

### 1. 污染物当量计算方法

为综合比较中部六省不同城市减污降碳的协同效应,借鉴毛显强等<sup>[6]</sup>的研究,采用3种典型大气污染物(二氧化硫、烟粉尘、氮氧化物)测算大气污染排放当量。在《环境保护税法》中,针对不同的污染物设定了相应的大气污染物当量系数,这些系数可以用于对多种污染物

进行归一化处理,从而将排放量转换为相应的计量单位,以便进行比较和评估。参考Q. Y. Zhang等<sup>[7]</sup>的研究,大气污染物排放当量表达式为:

$$E_{it} = \delta E_{it,SO_2} + \gamma E_{it,PM} + \theta E_{it,NO_x} \quad (1)$$

其中, $E_{it}$ 表示中部六省*i*城市在*t*年的大气污染物排放当量, $E_{it,SO_2}$ 、 $E_{it,PM}$ 、 $E_{it,NO_x}$ 分别表示中部六省某城市*i*在*t*年的二氧化硫、烟粉尘和氮氧化物排放量; $\delta$ 、 $\gamma$ 和 $\theta$ 分别表示二氧化硫、烟粉尘、氮氧化物排放量的当量系数,其值具体见表1。

表1 大气污染物排放当量系数值

大气污染物	系数	当量系数值
二氧化硫	$\delta$	1/0.95
烟粉尘	$\gamma$	1/0.95
氮氧化物	$\theta$	1/2.18

## 2. 耦合协调度模型

温室气体与大气污染物排放具有“同根同源”的特征<sup>[8]</sup>,两者存在一定的关联。耦合协调度模型通常用于描述系统内部各要素之间的相互作用和协调程度,本文使用该模型分析中部六省各城市大气污染物排放和二氧化碳排放系统的协调性,模型设定如下:

$$C = \frac{\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \quad (2)$$

$$T = \rho U_1 + \sigma U_2 \quad (3)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (4)$$

其中, $U_1$ 为标准化处理后中部六省某地级市大气污染排放当量和二氧化碳排放量的最大值; $U_2$ 为标准化处理后两者的最小值; $C$ 为大气污染物排放和二氧化碳排放两系统的耦合度; $T$ 为系统间的协调指数,两系统处于同等重要地位,故设定 $\rho = \sigma = 0.5$ ; $D$ 为减污降碳耦合协调度,取值为 $[0,1]$ , $D$ 值越接近1,说明该城市的减污降碳协同水平越高, $D$ 值越接近0,说明两者的协同性越差。本文参考王淑佳等<sup>[9]</sup>的划

分方法,将耦合协调度协调等级划分为 10 类,具体见表 2。

表 2 耦合协调度协调等级

耦合协调度	协调等级
(0.0,0.1]	极度失调
(0.1,0.2]	严重失调
(0.2,0.3]	中度失调
(0.3,0.4]	轻度失调
(0.4,0.5]	濒临失调
(0.5,0.6]	勉强协调
(0.6,0.7]	初级协调
(0.7,0.8]	中级协调
(0.8,0.9]	良好协调
(0.9,1.0]	优质协调

### 3. 核密度估计法

为更全面评价中部六省减污降碳耦合协调度的动态演进特征,借助 Kernel 密度估计法对其动态特征进行分析。通过估计随机变量的概率密度,利用核密度曲线的位置和形态来显示随机变量的动态特征,随机变量  $x$  的密度函数表示如下:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{X_i - \bar{X}}{h}\right) \quad (5)$$

其中, $h$  为带宽, $X_i$  为独立同分布的观测值, $\bar{X}$  为平均值, $n$  是观测值的个数, $K(\cdot)$  为 Kernel 密度函数。选取较为常用的高斯核函数对分布动态进行估计,其表达式为:

$$k(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (6)$$

### 4. Tobit 回归模型

本文借助 Tobit 回归模型探究中部六省减污降碳协同效应的影响因素,该模型的基本形式如下:

$$D_{it} = \beta_0 + \beta_1 PGDP_{it} + \beta_2 ECI_{it} + \beta_3 IS_{it} + \beta_4 UR_{it} + \beta_5 EOG_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中, $D_{it}$  表示减污降碳耦合协调度值, $PGDP_{it}$  表示人均生产总值, $ECI_{it}$  表示能源消费强度, $IS_{it}$  表示产业结构, $UR_{it}$  表示城镇化水平, $EOG_{it}$  表示对外开放程度, $\varepsilon_{it}$  表示随机扰动项且服从

$\varepsilon_{it} \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $i$  为地区,  $t$  为年份,  $\beta_0$  为常数项,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  分别为各解释变量的待估参数。

### 5. 数据来源

本文利用中部六省 2010—2021 年地区生产总值、能源消费量、大气污染物排放与二氧化碳排放等数据展开研究。碳排放的测算参考吴建新等<sup>[10]</sup>的研究,从两方面考虑产生碳排放的原因。碳排放的直接来源包括煤炭、石油等化石燃料的燃烧,间接来源包括电能等的消耗,其中,折标准煤系数源自《综合能耗计算通则》,能源碳排放系数源自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,电力碳排放系数取华东、华中和南方电网均值。污染物排放、地区生产总值和能源消费量等数据来源于《中国能源统计年鉴》与中部六省地级市统计年鉴。此外,采用线性差值和 ARIMA 填补方法对缺失值进行处理,一方面利用线性趋势对中间缺失值进行填充,另一方面利用时间趋势通过拟合 ARIMA 模型预测缺失值并填补,以确保数据的准确性和可靠性。

中部六省在减污降碳的过程中,面临着经济发展与环境保护的双重挑战。经济的发展推动了能源消费与产业结构的转型,但也带来了更高的污染排放。大多研究认为,影响区域大气污染物和碳排放的因素包括结构、技术和规模因素<sup>[11-12]</sup>。因此本文基于李云燕等<sup>[3,13-15]</sup>的研究,结合中部六省的实际情况,以减污降碳耦合协调度作为被解释变量,综合考虑经济、社会与技术因素选取了以下指标,具体见表 3。

## 二、实证结果与分析

### 1. 大气污染物与二氧化碳排放量的时空特征

2010—2021 年中部六省大气污染和二氧化碳排放量的总体变化情况见图 1。可以看出,中部六省在 2010—2012 年呈现上升趋势,

2012年后逐渐下降,在2016年骤然下降,随后保持在一个较低的水平。与之不同,碳排放则是呈现逐年增长的趋势。中部六省对大气污染的治理效果显著,在污染物源头治理和末端处理过程中减少了污染物排放,而碳减排的效果不佳。这可能是由于我国传统环境治理政策较多关注的是二氧化硫、氮氧化物等污染物排放,这些指标在短期内对公民健康和环境影响显著,因此易于成为政策制定的优先目标。而碳减排通常需要较长的周期和更多的结构性调整,在短期内未能反映出明显成效<sup>[16]</sup>。

通过对中部六省2010—2021年大气污染物和二氧化碳排放的空间分布特征进行研究,发现大气污染物排放整体呈下降趋势,而二氧化碳排放则逐年上升,各省的排放状况和趋势

表3 指标选取

指标维度	具体指标	计算方法
被解释变量	减污降碳耦合协调度(D)	耦合协调度值
解释变量	人均生产总值(PGDP)	地区生产总值/人口数
	能源消费强度(ECI)	能源消费量/地区生产总值
	产业结构(IS)	第三产业增加值/第二产业增加值
	城镇化水平(UR)	年末城镇人口比例
	对外开放程度(EOG)	进出口贸易总额/地区生产总值

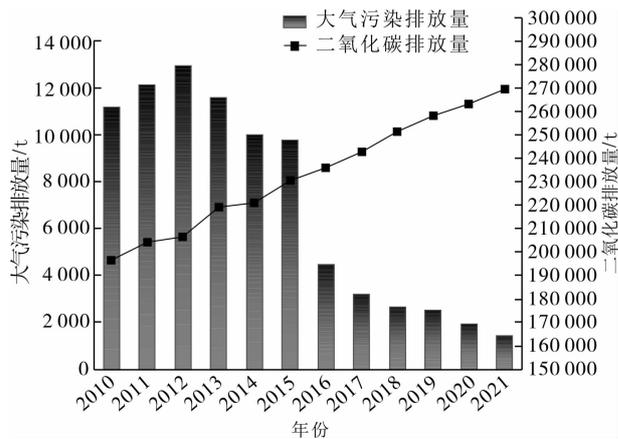


图1 2010—2021年中部六省大气污染物和二氧化碳排放量总体变化情况

存在显著差异,具体结果见图2。中部六省大气污染物排放量在此期间呈现整体下降趋势,尤其在2015—2016年间显著减少,二氧化碳排放水平则呈现逐年上升态势。具体来看,各省的大气污染排放量由高到低依次为山西省、河南省、湖南省、安徽省、江西省和湖北省,二氧化碳排放量的排序则是湖南省、湖北省、河南省、安徽省、江西省和山西省<sup>[15]</sup>。中部六省中,河南省和湖南省的大气污染排放量和二氧化碳排放量都相对较高,这是因为这两个省份能源消费量较大,两省应根据实际情况制定相关能源政策。相较而言,湖北省的二氧化碳排放量较高,而大气污染排放量相对较低,故该省政策应侧重于碳减排效果的提升。山西省表现为较高的大气污染排放和相对较低的二氧化碳排放量,故应制定以减排大气污染为核心的环境政策。安徽省和江西省在大气污染和二氧化碳排放量方面均处于中部六省的较低水平,表明两

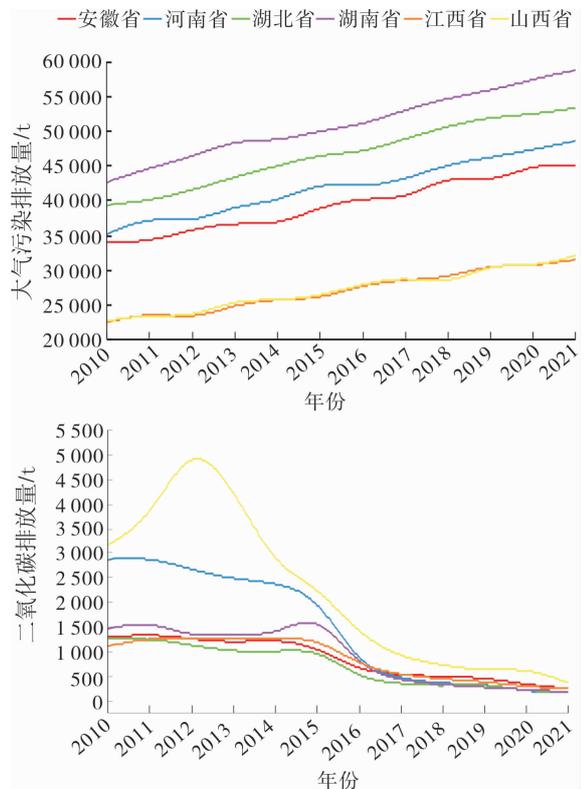


图2 2010—2021年中部各省份大气污染物和二氧化碳排放量变化情况

省在减污或降碳政策的实施上相对有效,但仍需加强减污和降碳的协同治理。总体而言,各省大气污染物排放与二氧化碳排在变化趋势上并未同步,显现出明显的时空差异。

## 2. 减污降碳耦合的时空特征

2010—2021 年中六省减污降碳耦合协调度变化特征见图 3。从整体趋势看,中部六省减污降碳耦合协调水平表现出先上升后下降的态势,整体减污降碳的协同效应有所下降。根据变化幅度,具体可分为两个阶段:2010—2015 年,缓慢增长阶段,耦合协调水平较低,由中度失调缓慢上升至轻度失调;2016—2021 年,由轻度失调下降到中度失调,耦合协调度缓慢下降。其中,大气污染排放量在 2015—2016 年出现了显著的下降,这是因为当时我国大气污染防治整体上取得了显著成效。2013 年《大气污染防治行动计划》等环境政策文件的发布有效促进了各省市对大气污染的治理,但由于未能同时管控二氧化碳排放量,导致无法实现减污降碳协同增效。从各城市耦合协调度分布来看,大多数城市集中位于箱形图的 25% 和 75% 分位数之内,2010—2021 年“分布沿中值集中”。从 2010—2021 年各地区耦合协调度分布逐渐向中值靠拢,表明区域间的差异性逐渐减小,这可能源于政策实施后导致地区间在减污降碳能力上逐渐趋同,形成了更为一致的协调水平<sup>[17]</sup>。

2010—2021 年中六省减污降碳耦合协

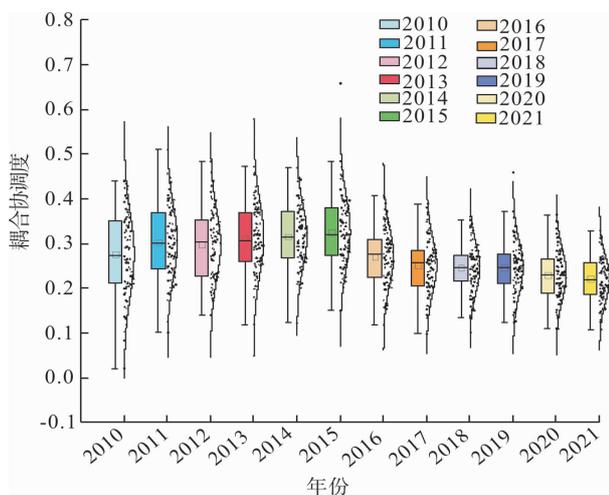


图 3 2010—2021 年中六省减污降碳耦合协调度变化特征

调度变化情况见表 4。从变化趋势来看,中部六省减污降碳协调度水平均是先上升后下降;从耦合协调度协调等级来看,各省份的耦合协调度等级主要处于中度和轻度失调状态。

安徽省减污降碳耦合协调度较低,处于中度失调状态,2010—2015 年,耦合协调度稳步上升,但在 2016 年后有所下降,2021 年进一步降至 0.200 7,这可能与安徽省环境政策较多关注大气污染物、对碳排放治理考虑较少有关。山西省在 2011—2016 年耦合协调度处于轻度失调状态,但自 2014 年后显著下降,2021 年降至 0.253 3,这可能反映出传统煤炭产业转型过程中面临的挑战,需加大减污降碳的技术和政策支持力度。江西省耦合协调的变化较为平稳,一直处于中度失调状态,这可能是由于该省

表 4 2010—2021 年中六省减污降碳耦合协调度变化情况

省份	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
安徽省	0.210 4	0.224 5	0.239 3	0.246 3	0.248 7	0.259 2	0.228 1	0.222 5	0.231 7	0.226 9	0.214 5	0.200 7
山西省	0.286 3	0.330 3	0.327 7	0.377 7	0.348 5	0.348 4	0.315 3	0.294 9	0.269 9	0.278 4	0.280 2	0.253 3
江西省	0.212 0	0.262 9	0.239 3	0.275 6	0.287 7	0.290 2	0.271 6	0.250 3	0.240 0	0.246 0	0.227 9	0.226 3
河南省	0.246 1	0.287 6	0.270 3	0.291 2	0.295 5	0.308 8	0.224 8	0.206 0	0.200 9	0.203 1	0.181 1	0.179 3
湖北省	0.357 4	0.365 3	0.360 7	0.336 4	0.361 8	0.374 5	0.299 5	0.279 6	0.277 0	0.286 1	0.254 3	0.251 3
湖南省	0.369 4	0.386 6	0.376 3	0.389 0	0.386 7	0.406 2	0.328 2	0.295 3	0.283 5	0.270 9	0.261 8	0.248 2

未能重视减污降碳协同治理,导致二氧化碳减排系统与大气污染系统失调。河南省的耦合协调度在2010—2015年逐渐增长,由中度失调转为轻度失调,但其后逐年递减,2020年后转为严重失调。河南省作为经济大省,其高污染、高能耗行业的转型和环境治理面临较大压力。湖北省耦合协调度在2010—2015年有明显提升,但此后耦合协调度突然下降,由轻度失调转为中度失调。湖南省是六省中耦合协调度最高的省份,2010—2015年耦合协调度由轻度失调转为濒临失调,稍后回落到中度失调,这表明,虽然减污降碳政策在湖南省起到了一定的效果,但仍需长期贯彻落实。

中部六省的耦合协调度变化反映了区域经济与环境治理之间的复杂关系。尽管整体趋势是在政策的推动下形成的,但各省的具体表现却差异明显,中部六省需要继续深化政策联动,加强区域间合作和信息共享,提升整体减污降碳的协调能力。

### 3. 减污降碳耦合协调度的动态演进特征

为探究中部六省耦合协调度的地区差异,利用基尼系数法测算2010—2021年中六省减污降碳耦合协调度变动的整体和地区基尼系数。

#### (1) 整体差异与演变趋势

2010—2021年中六省减污降碳耦合协调度整体基尼系数变化情况见图4。在整个样本区间内,中部六省减污降碳耦合协调度的地区差异呈显著下降趋势。具体来看,2010—2014年其减污降碳耦合协调度的整体差异波动

幅度最大,从期初的0.189下降到期末的0.121,这可能是因为中部地区崛起战略提出要协同推进生态环境保护和绿色低碳发展之后,中部六省之间区域协调发展水平提升,促进了中部六省减污降碳整体水平的提升。2017年以后,整体差异一直处于波动的状态,说明仍需加强中部六省之间的合作以减少区域间差异。

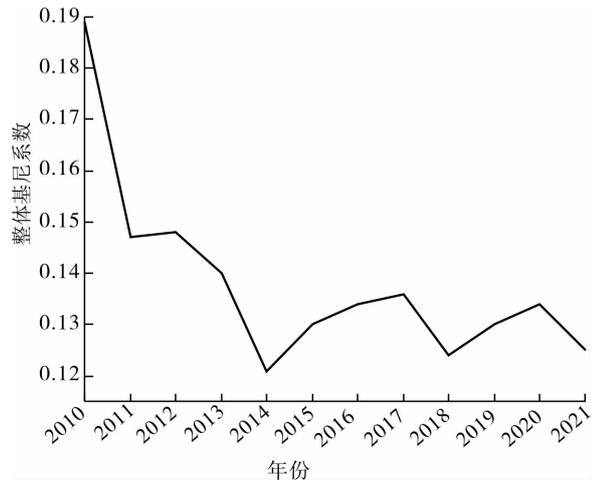


图4 2010—2021年中六省减污降碳耦合协调度整体基尼系数变化情况

#### (2) 地区内差异与演变趋势

2010—2021年中六省减污降碳耦合协调度基尼系数见表5。中部六省减污降碳耦合协调度变动存在明显的地区差异。具体来看,河南省的地区内差异程度最大,基尼系数均值为0.117;而山西省地区内差异程度最小,基尼系数均值为0.083。从时间变化趋势来看,安徽省、河南省、江西省、山西省地区内差异程度整体表现为下降趋势,湖南省和湖北省则呈上升趋势。

表5 2010—2021年中六省减污降碳耦合协调度基尼系数

省份	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
安徽省	0.178	0.152	0.112	0.113	0.096	0.099	0.111	0.117	0.093	0.086	0.114	0.103
山西省	0.134	0.084	0.106	0.095	0.066	0.056	0.094	0.059	0.053	0.066	0.110	0.067
江西省	0.164	0.075	0.101	0.072	0.081	0.082	0.095	0.12	0.088	0.101	0.077	0.111
河南省	0.183	0.123	0.137	0.095	0.092	0.109	0.113	0.108	0.128	0.131	0.095	0.093
湖北省	0.086	0.083	0.082	0.141	0.091	0.094	0.094	0.127	0.113	0.136	0.114	0.104
湖南省	0.070	0.076	0.055	0.064	0.062	0.110	0.077	0.095	0.092	0.117	0.094	0.106

### (3) 地区内差异的来源

2010—2021 年中部六省减污降碳耦合协调度变动的地区差异来源见图 5。由图 5 可知,2010—2021 年区域间差异对地区差异的贡献度最高,超变密度次之,贡献率最小的是地区内差异。这说明区域间差异是减污降碳耦合协调度地区差异的主要贡献者,这也反映了不同省份在经济发展、能源结构和减污降碳政策实施效果等方面的差异。同时,超变密度的影响也不可忽视,提示内部均衡性的重要性,而地区内差异的较低贡献率则意味着整体协调性相对较强。综上所述,改善减污降碳协调度的关键在于关注区域间的结构性差异,同时综合考虑多方面因素,以制定更有效的环境治理政策。

### (4) 减污降碳耦合协调度动态演进特征

为展示减污降碳协同效应的分布演化及其延展趋势,绘制了三维动态核密度图,具体见图 6。由图 6 可知,峰值中心向左偏移,表明中部地区六省大部分城市的耦合协调度水平值比较低,核密度峰值出现先升后降趋势,显示出中部六省的耦合协调度水平经历了先上升后下降的变化过程。从曲线峰度来看,2010—2021 年耦



图 5 2010—2021 年中部六省减污降碳耦合协调度变动的地区差异来源

合协调度的密度分布曲线顶端逐渐由扁平转为陡峭,出现耦合协调极端的城市数量较少,样本期间峰点数量逐渐变为单峰,说明中部地区六省耦合协调发展尚未表现出明显的多极化趋势。

### 4. 减污降碳耦合协调度的驱动因素分析

在研究了减污降碳耦合协调的时空特征基础上,为进一步探究中部六省减污降碳协同效应的驱动因素,本文以耦合协调度作为被解释变量,以人均生产总值、能源消费强度和产业结构等影响因素作为解释变量,构建 Tobit 回归模型以探究上述影响因素对中部六省减污降碳系统的作用机理。

#### (1) 描述性统计

各变量的描述性统计结果见表 6。由表 6 可知,各变量的方差膨胀因子(VIF)均小于 10,表明不存在多重共线性的问题,确保了模型的稳健性。

#### (2) 单位根检验与面板协整检验

采用单位根检验对数据的平稳性进行判别,具体结果见表 7。其中,减污降碳耦合协调度、人均生产总值、城镇化水平和能源消费强度经检验后为平稳,对外开放程度和产业结构两

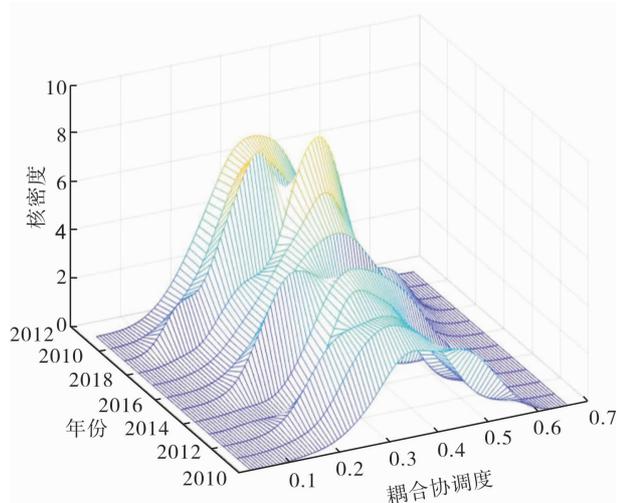


图 6 2010—2021 年中部六省减污降碳耦合协调度三维动态核密度图

表6 描述性统计结果

变量	符号	样本数量	平均值	标准差	最小值	最大值	VIF
减污降碳耦合协调度	<i>D</i>	960	0.276 1	0.077 3	0.022 4	0.659 3	—
人均生产总值	<i>PGDP</i>	960	4.546 2	2.369 5	0.906 7	14.554 5	3.37
对外开放程度	<i>EOG</i>	960	0.083 7	0.092 2	0.002 1	0.777 9	3.26
产业结构	<i>IS</i>	960	0.890 0	0.436 9	0.251 3	5.072 1	1.43
城镇化水平	<i>UR</i>	960	0.528 2	0.112 3	0.233 9	0.892 3	1.31
能源消费强度	<i>ECI</i>	960	0.694 6	0.361 3	0.193 3	2.723 7	1.09

个变量被判定为不平稳,因此需要对数据进行差分处理。

变量一阶差分后的检验结果见表8。由表8可知,上述各变量经过差分处理后已转化为平稳状态。为了确定变量之间是否存在长期稳定的关系,对变量进行 Pedroni 协整检验,具体结果见表9。表9列出了三种检验统计量,其对应的 *P* 值均小于 0.01,因此可以强烈拒绝“不存在协整关系”的原假设。

(3) 回归结果

根据 LR 检验的结果,需要使用随机效应的 Tobit 回归模型,回归结果见表10。

由表10可知,能源消费强度对减污降碳协同效应表现出显著的负向影响。这意味着通过降低能源消费总量能够降低能源消费强度,从

而提高减污降碳的耦合协调度。具体来说,减少能源消费量有助于在源头上降低大气污染物和二氧化碳的排放,从而有效达到减污与降碳的协同增效目标<sup>[18]</sup>。这种源头治理的理念强调能源使用效益与环境保护之间的密切关系,表明降低能源强度并非单一的环保措施,而是实现经济与生态双重利益的重要策略。

产业结构同样对减污降碳协同效应产生负向影响。随着经济的发展,产业结构重心逐步从第一产业向第二和第三产业转移,虽然这种转移有助于优化能源使用效率,进而降低污染物和碳排放,但我国的二氧化碳排放量仍持续

表7 单位根检验结果

变量	IPS 检验		HT 检验		结果
	Z-t-tilde-bar	<i>P</i> 值	Z 值	<i>P</i> 值	
<i>D</i>	-12.194 9	0.000 0	-14.527 8	0.000 0	平稳
<i>PGDP</i>	-4.237 4	0.000 0	-2.713 9	0.003 3	平稳
<i>EOG</i>	-1.175 4	0.119 9	1.608 7	0.946 2	非平稳
<i>IS</i>	1.934 6	0.973 5	4.120 6	1.000 0	非平稳
<i>UR</i>	-3.777 5	0.000 1	-2.124 3	0.016 8	平稳
<i>ECI</i>	-6.368 9	0.000 0	-3.459 1	0.000 3	平稳

表8 单位根滞后一阶检验结果

变量	IPS 检验		HT 检验		结果
	Z-t-tilde-bar	<i>P</i> 值	Z 值	<i>P</i> 值	
<i>D</i>	-14.906 4	0.000 0	-21.713 1	0.000 0	平稳
<i>PGDP</i>	-12.172 4	0.000 0	-12.383 9	0.000 0	平稳
<i>EOG</i>	-10.653 7	0.000 0	-8.404 4	0.000 0	平稳
<i>IS</i>	-7.982 8	0.000 0	-9.080 3	0.000 0	平稳
<i>UR</i>	-13.575 0	0.000 0	-13.075 6	0.000 0	平稳
<i>ECI</i>	-13.089 4	0.000 0	-14.481 8	0.000 0	平稳

表9 Pedroni 协整检验结果

检验方法	统计量	<i>P</i> 值
Modified Phillips-Perron 检验	9.984 9	0.000 0
Phillips-Perron 检验	-17.904 6	0.000 0
Augmented Dickey-Fuller 检验	-20.539 3	0.000 0

表10 中部六省减污降碳耦合协调度影响因素的 Tobit 回归结果

变量	系数	标准差	<i>z</i>	<i>P</i> >   <i>z</i>	显著性
<i>PGDP</i>	-0.006 0	0.002 0	-3.060 0	0.002 0	***
<i>EOG</i>	-0.100 6	0.041 7	-2.410 0	0.016 0	**
<i>IS</i>	-0.074 2	0.007 2	-10.370 0	0.000 0	***
<i>UR</i>	-0.118 9	0.053 1	-2.240 0	0.025 0	**
<i>ECI</i>	-0.035 8	0.009 9	-3.610 0	0.000 0	***
<i>Constant</i>	0.465 7	0.027 2	17.090 0	0.000 0	***
<i>Sigma_u</i>	0.068 7	0.005 8	11.750 0	0.000 0	***
<i>Sigma_e</i>	0.045 0	0.001 1	41.800 0	0.000 0	***
<i>rho</i>	0.700 0	0.037 4			
<i>LR Test of Sigma_u = 0:</i>		<i>Prob ≥ Chibar2 = 0.000</i>			

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10% 统计水平上显著。

增长,这反映出在转型过程中,部分高耗能、高污染的产业依然占据较大份额,导致减污降碳耦合协调度的下降<sup>[19]</sup>。因此,在推动产业结构优化的同时,需注重绿色技术的应用与清洁能源的推广,以实现真正的减排目标。

城镇化水平的提升也对减污降碳的协同效应造成负面影响。城镇人口的快速增长使得城镇人均能源消费量显著高于农村地区,且城镇的能源消费结构多呈现重型化趋势。这导致能源需求的不断上升,进而推动了碳排放和大气污染物的增加<sup>[20]</sup>。随着城镇化进程的加速,城市的能源消耗模式愈发凸显出对环境的破坏力,突显出在城镇化过程中必须重视可持续发展的重要性。

此外,人均 GDP 水平的上升同样对减污降碳协同效应产生负向影响,这是因为高经济发展水平的背后是高能源需求,因此在追求经济高质量发展的同时,也要注重生态保护。对外开放水平的提高也对减污降碳协同效应产生了不利影响。随着对外开放程度的加深,我国可

能会引入国外一些高耗能、高污染的企业,导致能源消耗增加。这样的经济增长模式在短期内或许能够促进地方经济发展,但从长远来看,则可能抑制减污降碳的协同效应。在推动对外开放的同时,我国应加大对高污染企业的审查力度,以确保能源消费与环境保护能够实现平衡。

为进一步探究各省份减污降碳耦合协调度的影响因素和空间异质性,本文从各省份的回归结果出发,探讨人均生产总值、能源消费强度、产业结构、城镇化水平和对外开放程度等变量对减污降碳耦合协调度的影响,具体结果见表 11。

从表 11 可知,产业结构在多个省份中表现出负向显著影响。安徽省和湖南省的高污染和高能耗产业占比高,导致减污降碳的协同效应未能显著提升,产业结构转型面临挑战。河南省和湖北省由于其经济结构中高耗能产业占比较大,产业结构的负向影响更为显著,进一步表明优化产业结构的必要性。能源消费强度的影响也不容忽视。江西省能源消费强度的负向影

表 11 中部六省减污降碳耦合协调度影响因素的 Tobit 回归结果

变量	山西省	安徽省	江西省	河南省	湖北省	湖南省
<i>PGDP</i>	-0.015 7*** (0.004 6)	0.001 1 (0.003 6)	-0.000 3 (0.004 9)	-0.013 3** (0.006 5)	0.001 7 (0.004 3)	-0.016 8*** (0.005 3)
<i>EOG</i>	0.246 3*** (0.090 3)	-0.017 8 (0.063 9)	-0.065 0 (0.054 1)	0.029 9 (0.098 9)	0.521 8*** (0.197 6)	-0.216 2* (0.123 4)
<i>IS</i>	-0.020 3 (0.018 6)	-0.054 9*** (0.013 7)	-0.046 6** (0.020 7)	-0.112 2*** (0.022 6)	-0.131 8*** (0.028 2)	-0.077 8*** (0.010 5)
<i>UR</i>	-0.168 4* (0.095 7)	0.009 1 (0.082 0)	-0.227 0 (0.146 1)	0.012 0 (0.175 4)	-0.001 3 (0.100 7)	-0.165 8 (0.178 5)
<i>ECl</i>	-0.036 4** (0.016 3)	-0.020 8 (0.015 8)	-0.165 5*** (0.036 2)	-0.039 0* (0.022 8)	0.089 8*** (0.034 7)	-0.106 1** (0.048 3)
<i>Sigma_u</i>	0.000 0 (0.015 9)	0.030 5*** (0.006 7)	0.034 3*** (0.008 5)	0.053 9*** (0.011 6)	0.050 1*** (0.011 9)	0.055 8*** (0.013 8)
<i>Sigma_e</i>	0.053 9*** (0.003 3)	0.033 8*** (0.001 8)	0.033 5*** (0.002 2)	0.044 3*** (0.002 3)	0.045 4*** (0.002 8)	0.039 3*** (0.002 4)
<i>Constant</i>	0.516 6*** (0.052 3)	0.285 7*** (0.041 6)	0.505 6*** (0.072 6)	0.407 6*** (0.074 9)	0.334 7*** (0.066 9)	0.645 2*** (0.086 4)
<i>Observations</i>	132	192	132	204	144	156

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示 1%、5%、10% 统计水平上显著。

响显著,说明该省在减少能源消费和提升能效方面存在提升减污降碳耦合协调度的潜力;山西省的回归结果同样表明,降低能源消费强度有助于提升减污降碳的耦合协调度,这与源头治理的理念相一致;湖南省则需在能源管理方面采取更为严格的措施,以减少能源消费并增强减污降碳的协调性。在对外开放程度方面,山西省和湖北省的回归结果均显示出显著的正向影响,对外开放政策可能有助于提升各省的绿色投资环境和技术水平从而促进减污降碳的协同发展。湖南省则显示出显著的负面影响,对外开放水平的提高也可能引入一些高耗能、高污染企业,从而对减污降碳的协同效应产生不利影响。山西省、河南省和湖南省的人均GDP均对减污降碳产生了负向影响,反映出其经济增长模式依赖高能耗和高排放产业,这种增长模式显著降低了减污降碳的耦合协调度。从城镇化水平的角度来看,虽然城镇化可能在一定程度上推动能源消费和资源利用的效率提升,但若缺乏有效的环境管理措施,城镇化进程亦可能对减污降碳目标的实现产生不利影响。

综上,减污降碳的耦合协调度受到经济发展水平、能源消费强度、产业结构等因素的影响,各省之间由于地区差异造成了减污降碳协同效应具有空间分异性,各省在推动减污降碳协同治理时,需注意结合各省实际情况从经济增长模式的可持续性、优化产业结构、降低能源消费强度、积极引入绿色技术与外资等方面入手,以提升整体减污降碳的效率。

### 三、结论与建议

#### 1. 研究结论

本文基于耦合协调度模型对中部六省减污降碳协调程度及其驱动因素进行系统分析,揭示了在当前减污降碳背景下,地区内减污和碳减排系统间的复杂关系及其变化动态,主要得

出以下结论:尽管中部六省在大气污染物治理上取得了一定成效,但二氧化碳排放的持续增长使得减污降碳协同效应并未如预期那样显著提升,区域间的大气污染物排放和二氧化碳排放差异明显;中部六省的减污降碳耦合协调度在2010—2021年经历了波动且整体偏低,整体呈现出先上升后下降的趋势,2016年后由于大气污染物排放显著下降但二氧化碳排放并未相应减少,耦合协调度下降;减污降碳耦合协调度地区差异明显,但是随着时间推移地区间的差距逐渐缩小;能源消费强度、产业结构、城镇化水平、人均GDP和对外开放等多重因素共同影响着中部六省的减污降碳协同效应。

#### 2. 政策建议

首先,考虑到中部六省在减污降碳过程中面临的污染物排放量显著差异和减污降碳耦合协调度偏低的问题,未来应加强对二氧化碳排放的治理,可以从源头治理和末端防控两个方面着手,一方面减少化石能源的使用,另一方面可以利用碳捕捉和封存技术减少二氧化碳排放。

其次,鉴于中部六省在减污降碳过程中面临的区域差异和协调性不足,建议各省将减污和降碳政策整合,形成一体化的治理框架。明确各省的具体实施目标和责任,确保政策的一致性和协调性;加强区域间合作,建立跨省协作机制,共享减污降碳的最佳实践与经验,开展联合减排项目,以提升整体减污降碳的效率。

再次,考虑到产业结构和能源消费对中部六省的减污降碳过程具有重要影响,因此,应鼓励中部六省加快产业结构调整,推动高能耗、高污染产业向低碳绿色产业转型,鼓励发展服务业、现代农业和绿色制造业,以降低整体能源消费强度和碳排放;加大对清洁生产和环保技术的研发投入力度,支持企业引入新技术和设备,提升生产过程的资源利用效率,减少污染物和

二氧化碳的排放;实施能源消费强度控制政策,针对研究中发现的能源消费强度对减污降碳耦合协调度的负面影响,各省应制定相应的能源管理政策,设定能源消费总量和结构的控制目标,鼓励使用清洁和可再生能源。

### 参考文献:

- [1] 武金装,王静,黄丰华. “双碳”目标背景下城市面临的机遇、挑战和发展路径[J]. 低碳世界, 2022,12(2):13-15.
- [2] 田丰,王文琪,包存宽. 以降碳为目标的逆向战略环境评价:理念与模式[J]. 环境保护, 2021, 49(12):22-27.
- [3] 刘玉珂,金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理, 2019,39(1):182-191.
- [4] 齐绍洲,林岫,王班班. 中部六省经济增长方式对区域碳排放的影响:基于 Tapio 脱钩模型、面板数据的滞后期工具变量法的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015,25(5):59-66.
- [5] 戴胜利,张维敏. 中部六省工业碳排放影响效应及其变化趋势分析[J]. 工业技术经济, 2022,41(4):152-160.
- [6] 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(7):3390-3398.
- [7] ZHANG Q Y, CAI B F, WANG M D, et al. City level CO<sub>2</sub> and local air pollutants co-control performance evaluation: A case study of 113 key environmental protection cities in China [J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 13(1):118-130.
- [8] WAN P, ZHANG Z X, CHEN L. Environmental co-benefits of climate mitigation: Evidence from clean development mechanism projects in China [J]. China Economic Review, 2024:102182.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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(4):661-671.
- [12] 王雅楠,李冰迅,张艺芯,等. 中国减污降碳协同效应时空特征与影响因素[J]. 环境科学, 2024,45(9):4993-5002.
- [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] 易兰,杨田恬,杜兴,等. 减污降碳协同路径研究:典型国家驱动机制及对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(9):53-65.
- [15] 熊磊,章琦,严由亮,等. 长江中游城市群数智发展水平与碳生产率的耦合协调时空特征及驱动因素[J]. 经济地理, 2024,44(10):46-54.
- [16] 崔连标,李晓,段宏波. 长三角地区减污降碳协同效应评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(6):21-32.
- [17] 刘明亮,尹晶晶,李华清,等. 减污降碳协同效率时空演化特征及驱动机制研究:基于中国三大城市群[J]. 生态经济, 2024,40(7):174-183.
- [18] 涂正革,谌仁俊,韩生贵. 中国区域二氧化碳排放增长的驱动因素:工业化、城镇化发展的视角[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2015,54(1):46-59.

[责任编辑:侯圣伟]



引用格式:崔连标,李宇,段梅. 中部六省减污降碳时空演变特征及驱动因素研究[J]. 郑州轻工业大学学报(社会科学版), 2025,26(1):39-49.