

引用格式: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. [Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2387-2398.] DOI: 10.18402/resci.2022.12.01

# 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制

陈晓红<sup>1,2</sup>, 张嘉敏<sup>3</sup>, 唐湘博<sup>1</sup>

(1. 湖南工商大学前沿交叉学院, 长沙 410205; 2. 中南大学商学院, 长沙 410083;

3. 湖南工商大学理学院, 长沙 410205)

**摘要:**工业是大气污染物和CO<sub>2</sub>排放的主要部门,也是国家推行减污降碳协同增效的主力军。本文基于2011—2019年中国工业省际面板数据,运用固定效应模型、并行多重调节模型分析工业减污降碳协同效应及其影响机制。研究表明:①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;②能源效率、能源消费结构、产业结构和投资规模是影响协同效应的重要调节变量,其中能源效率对减污降碳协同效应呈正向调节效应,而能源消费结构、产业结构和投资规模对协同效应呈负向调节效应;③东部、中部和西部地区工业减污降碳协同效应及影响机制差异明显,不同调节因素对协同效应的影响程度也存在明显的区域异质性,其中产业结构因素对各地区协同效应均产生较强的调节效果。最后,本文从能源结构调整、产业结构优化、能源效率提升和区域差异化策略等方面提出工业减污降碳协同增效建议。

**关键词:**工业;减污降碳;协同效应;调节效应;固定效应模型;并行多重调节模型;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.12.01

## 1 引言

在第75届联合国大会上,习近平主席正式提出“中国CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的国家自主贡献目标;党的二十大报告也指出:“要协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”;中央财经委员会第九次会议更是明确提出要实施重点行业领域减污降碳行动,这充分显示了党中央对减污降碳的高度重视。工业是CO<sub>2</sub>和大气污染物排放的主要部门,2019年工业碳排放量占全国碳排放总量的63.06%<sup>[1]</sup>,2020年工业源SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和颗粒物排放分别占全国排放总量的79.6%、40.9%和65.6%<sup>[2]</sup>。因此,工业既承担大气污染物减排的重任,又面临CO<sub>2</sub>减排的压力,如何协调两者之间的相

互关系,并明晰两者协同关系的影响机制,是实现重点领域重要部门减污降碳协同增效的迫切需求。基于大气污染物和碳排放同根、同源、同过程的特点<sup>[3]</sup>,本文着眼于工业大气污染物排放变动对碳排放的协同影响,探究中国工业减污降碳协同效应及其影响机制,对协同推进工业大气污染控制和碳减排具有重要意义。

协同效应的定义最早产生于物理学领域,即两个或以上组分调配在一起产生的作用大于各自单独作用的总和(即 $1+1>2$ )<sup>[4]</sup>。在应用于大气污染物与碳减排协同效应(即减污降碳协同效应)时,许多研究对其赋予了新的定义<sup>[5,6]</sup>,归纳起来可表述为:在进行大气污染物减排的同时也对CO<sub>2</sub>产生协同减排或者控制温室气体排放的同时协同减排大气污

收稿日期:2022-05-24 修订日期:2022-11-30

基金项目:国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101);国家自然科学基金面上项目(72174060);湖南省自科基金青年项目(2020JJ5103)。

作者简介:陈晓红,女,江西永新人,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要研究方向为资源能源环境管理、生态文明与绿色发展。E-mail: c88877803@163.com

通讯作者:唐湘博,男,湖南湘潭人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为环境大数据分析、环境政策评估。E-mail: birry@163.com

染物。关于减污降碳协同效应的已有研究,大多针对某一政策或措施的效果进行评估和测算,如Jiang等<sup>[7]</sup>运用可计算的一般均衡模型CGE(Computable General Equilibrium Model)分别对单一实施硫税、氮税政策的协同减排效果进行测算;Pan等<sup>[8]</sup>基于低排放分析平台LEAP(Low Emissions Analysis Platform),将能源消费结构和需求与北京市长远发展规划相结合,预测主要大气污染物和温室气体的减排效果;宋鹏等<sup>[9]</sup>以重庆市为案例构建本地化LEAP模型,结果显示控制工业能耗和调整产业结构之后的协同减排效果良好;俞珊等<sup>[10]</sup>构建了一种协同控制效应分级评估方法,对不同情景下大气污染和CO<sub>2</sub>协同控制效应进行量化评估。此外,也有部分学者针对减污降碳协同体系构建“耦合协调模型”进行研究<sup>[11]</sup>,如王涵等<sup>[12]</sup>构建“政府-科研机构-市场-社会组织”多元减污降碳协同共治体系“耦合协调模型”,通过命令控制与非命令控制的协同,实现治理方式转变,提高协同治理水平;狄乾斌等<sup>[13]</sup>、唐湘博等<sup>[14]</sup>分别从城市和省域层面构建减污降碳协同效应模型及其评价指标体系,并对其影响路径进行分析。

然而,以往研究大多只针对某一政策的减污降碳协同效果进行评估,或通过“耦合协调模型”等方法构建减污降碳评价指标体系,从理论层面对减污降碳协同效应的影响路径进行分析,较少涉及减污降碳协同效应影响机制及其量化研究;此外,以往研究大多关注区域或城市的减污降碳协同效应,较少涉及重点领域或行业减污降碳协同效应影响机制研究。因此,本文基于工业大气污染物排放变动对碳排放的协同影响视角,构建固定效应模型和并行多重调节模型,量化分析工业减污降碳协同效应,并进一步运用调节效应模型分别探究全国和地区工业减污降碳协同效应的影响机制及其影响程度。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 计量模型的构建

考虑大气污染物与碳排放同根同源的特性以及工业行业的特点,同时结合已有研究,一般把影响环境的直接因素归纳为3类,即结构因素、技术因素和规模因素<sup>[15]</sup>,选取相关变量并基于固定效应模

型进行协同效应基准回归分析,模型构建如下:

$$C_{it} = \beta_0 + \beta_1 AP_{it} + \beta_2 ES_{it} + \beta_3 EE_{it} + \beta_4 IS_{it} + \beta_5 I_{it} + \gamma Z_{it} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:  $C_{it}$ 、 $AP_{it}$  分别表示  $i$  地区在  $t$  时期的工业碳排放量和工业大气污染物排放当量;  $ES_{it}$ 、 $EE_{it}$ 、 $IS_{it}$  和  $I_{it}$  分别表示工业能源消费结构、工业能源效率、工业产业结构和工业投资规模;  $Z_{it}$  表示控制变量;  $\gamma$  表示控制变量的待估参数;  $\beta_0 - \beta_5$  为待估参数;  $\eta_i$ 、 $\mu_t$  和  $\varepsilon_{it}$  分别为个体固定效应、时间固定效应和随机误差项。

在工业大气污染物与碳排放协同效应基准回归分析的基础上,本文引入调节效应进行协同效应影响机制分析。式(1)中大气污染物排放当量  $AP_{it}$  对碳排放量  $C_{it}$  的影响称为主效应,也即减污降碳协同效应。调节效应是指调节变量对主效应的影响方向和程度会因个体特征或环境条件而异,这种特征或条件被称作调节变量<sup>[16]</sup>。由此,式(1)中能源消费结构  $ES_{it}$ 、能源效率  $EE_{it}$ 、产业结构  $IS_{it}$  和投资规模  $I_{it}$  均为对协同效应的调节变量,中国工业减污降碳协同效应的并行多重调节效应示意如图1。

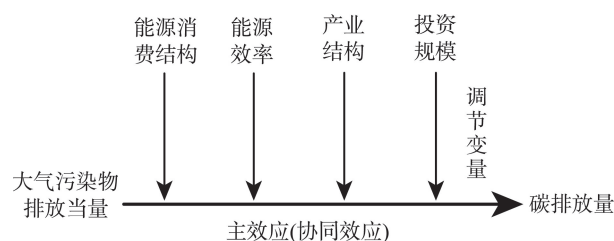


图1 中国工业减污降碳协同效应的并行多重调节效应示意图

Figure 1 Schematic diagram of the parallel multiple modulation effects for the synergistic effect of China's industrial pollution and carbon emission reduction

交互项模型是对调节效应进行建模的主要方式,构建上述4个调节变量与工业大气污染物排放当量的交互项,在式(1)的基础上构建并行多重调节模型,如式(2)所示:

$$C_{it} = \beta_0 + \beta_1 AP_{it} + \beta_2 ES_{it} + \beta_3 EE_{it} + \beta_4 IS_{it} + \beta_5 I_{it} + \xi_1 AP_{it} \times ES_{it} + \xi_2 AP_{it} \times EE_{it} + \xi_3 AP_{it} \times IS_{it} + \xi_4 AP_{it} \times I_{it} + \gamma Z_{it} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中:交互项变量  $AP_{it} \times ES_{it}$ 、 $AP_{it} \times EE_{it}$ 、 $AP_{it} \times IS_{it}$

2022年12月

和  $AP_{it} \times I_{it}$  分别表示工业大气污染物排放当量与能源消费结构、能源效率、产业结构和投资规模的交互项;  $\xi_1 - \xi_4$  为待估参数。在构建交互项之前对自变量与调节变量进行中心化处理,减少因构造交互项而与原变量产生的多重共线性问题<sup>[17]</sup>。在实证研究中,调节作用具体表现为调节变量对解释变量与被

解释变量两者关系的强化与削弱,即正向调节效应和负向调节效应。一般来说调节作用的探讨是基于主效应,并且是建立在交互项通过显著性检验的基础上。总结前人的研究经验<sup>[18-22]</sup>,结合主效应和调节效应的符号,可将调节变量对主效应的影响归纳为8种类型,如图2所示。

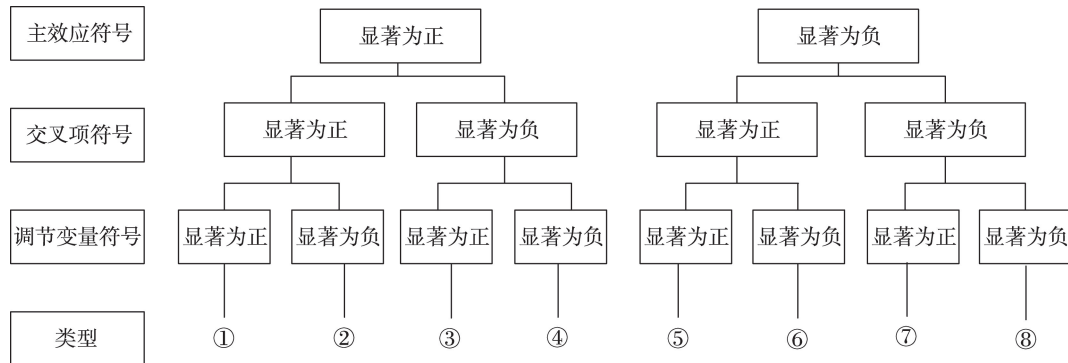


图2 调节效应的8种类型示意图

Figure 2 Schematic diagram of eight types of moderating effects

## 2.2 变量选择与数据说明

基于上述模型研究,本文主要变量的具体说明如下:

工业碳排放量( $C$ ):根据《中国统计年鉴》中的工业行业列表,从中国碳排放核算数据库(CEADs)获取各省级分部门碳排放核算清单<sup>[23-26]</sup>,对各工业子行业进行加总,得出各省份年度工业碳排放量数据。

工业大气污染物排放当量( $AP$ ):工业主要的大气污染物排放源数据为  $SO_2$ 、 $NO_x$  和烟(粉)尘,对3种大气污染物排放量进行折算得出综合大气污染物排放当量。计算方法参考《中华人民共和国环境保护税法》中对于大气污染物排放当量的定义,以及毛显强等<sup>[27]</sup>对局地大气污染物排放当量的计算方法,计算公式如下:

$$AP = \alpha D_{SO_2} + \lambda D_{NO_x} + \psi D_{Dust} \quad (3)$$

式中: $AP$  为大气污染物排放当量;  $D_{SO_2}$  为  $SO_2$  排放量;  $D_{NO_x}$  为  $NO_x$  排放量;  $D_{Dust}$  为烟尘排放量;  $\alpha$ 、 $\lambda$ 、 $\psi$  分别为不同污染物的当量系数,如表1所示。

能源消费结构( $ES$ ):选用工业终端煤消费量占能源消费总量的比重作为  $ES$  衡量指标。煤炭能源消耗是大气污染物和  $CO_2$  排放的主要来源,因此能

源消费结构变动对碳和大气污染物排放也会产生影响。

能源效率( $EE$ ):用单位能源消耗所产出的工业增加值表示。能源效率提升一定程度上代表能源技术进步,单位能源消耗量减少对碳和大气污染物的减排具有促进作用。

产业结构( $IS$ ):用高耗能产业的资产总值占工业行业资产总值的比重表示。高耗能产业是中国重工业的典型代表,是工业大气污染物和碳排放的主要部门,若地区重工业比重提高,大气污染物和碳排放也会增加<sup>[28]</sup>。

投资规模( $I$ ):用工业固定资产与流动资产总额来度量<sup>[29]</sup>。工业投资规模的增加代表着工业生产规模扩大,在一定程度上加剧工业大气污染和碳排放的扩张效应。

表1 大气污染物污染当量系数表

Table 1 Table of equivalent coefficients of air pollutants

大气污染物	污染当量值/kg
$SO_2$	0.95
$NO_x$	0.95
烟尘	2.18

注:污染物的当量系数值来自《中华人民共和国环境保护税法》。



考虑到部分变量对工业碳排放的影响复杂,在不同情况下具有较大差异性,因此,选择技术创新( $RD$ )和人均工业产出( $PG$ )作为控制变量。具体解释如下:

技术创新( $RD$ ):用规模以上工业企业R&D经费支出占主营业务收入的比重表示。研发强度提高会促进技术进步,从而对碳排放产生影响,但不同种类技术创新对工业碳排放的影响效果存在显著差异<sup>[30]</sup>。

人均工业产出( $PG$ ):用人均工业增加值表示。以往研究中环境污染与经济增长大多呈非线性关系<sup>[31]</sup>,因此,引入人均工业产出的一次项( $PG$ )和平方项( $PG^2$ )。

本文所使用数据为2011—2019年30个省份(由于数据连续性和可获得性未包含中国港澳台地区和西藏自治区)的工业相关面板数据,相关数据主要来源于中国碳排放核算数据库、《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》以及各省统计年鉴。对于个别缺失数据采用插值法进行补齐,为了消除不同量纲之间的差距,对其中部分数据进行取对数处理;同时,为了消除价格变动的影响,分别对工业增加值、固定资产与流动资产总额等数据进行平减处理。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基准回归结果

在进行回归之前,首先需要对面板数据进行组间异方差、组间同期相关和组内自相关检验,在进行Wooldridg检验、Wald检验、Frees检验等一系列检验后,发现大气污染物与碳排放协同面板数据中存在组间异方差、组内自相关和组间同期相关问题,因此,一般的固定效应模型不再适用。为了解决上述问题,本文选择考虑异方差和序列相关因素的固定效应模型(DK模型)进行回归,结果如表2中序列(1)所示。

从基准回归的结果可以发现,工业大气污染物排放当量( $AP$ )显著正向影响碳排放量( $C$ )的变动,表明工业大气污染物排放减少的同时会显著影响 $CO_2$ 的减排,即同增同减。由于大气污染物与碳排放具有同根同源的特点,大气污染治理的过程中,

除了针对大气污染物的末端治理外,许多措施同样对碳排放产生效果,如“大气污染防治行动计划”中明确提出的产业结构升级、能源消费结构调整等措施,在减少 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、烟尘排放的同时也会降低 $CO_2$ 排放<sup>[32]</sup>。

其他解释变量中,能源消费结构( $ES$ )、产业结构( $IS$ )对碳排放的影响系数均显著为正,表明随着高耗能行业比重的降低以及工业能源消费结构中煤占比减少,碳排放也会随之下降;能源效率( $EE$ )的影响系数为-0.038,且在1%的水平下显著,说明随着能源效率的提升,当工业规模和总产值一定的情况下,包括化石能源在内的能源消耗总量下降,所产生的碳排放量也会减少,该结论与Liu<sup>[33]</sup>的结果一致。投资规模( $I$ )对碳排放的影响显著为正,说明随着工业投资规模扩大,碳排放也随之增加。这可能是由于:一方面,如果投资更多是用于绿色生产设备更新改造或发展绿色低碳行业,则投资所带来的绿色要素配置率提升以及低碳行业发展将有助于碳减排;另一方面,如果投资主要用于生产规模的提升,则会加大能源消耗,从而增加碳排放<sup>[34]</sup>。中国工业整体上已向集约型增长方式转变,对于低碳经济发展而言工业资本流向是有效的,但资本流入高技术行业的增速相对较小,大量资本流入高耗能行业<sup>[35]</sup>,因此,伴随着投资规模的增加,碳排放也增加。

#### 3.2 稳健性与内生性检验

考虑到本文控制变量选取有限,模型在变量选取的过程中可能有变量被遗漏,同时因为数据可能存在测量偏误以及变量间相互影响,从而导致内生性问题。本文采用工具变量法对内生性进行缓解,结果如表2所示。在进行DWH内生性检验后,检验结果在5%的显著性水平下拒绝“所有解释变量均为外生”的假设,故可以认为 $AP$ 为内生解释变量。由于滞后一阶的工业大气污染物排放当量并不能直接对当期的碳排放量产生影响,因此,本文选取滞后一阶的工业大气污染物排放当量( $LAP$ )作为工具变量。在GMM方法下 $AP$ 的估计系数显著为正,在考虑内生性之后,实证结果依然稳健。

为了进一步验证结论的可靠性,本文使用两种

2022年12月

表2 基准回归及相关检验结果

Table 2 Benchmark regression and related test results

	DK	稳健性检验				内生性检验
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	GMM
<i>AP</i>	0.099*** (0.000)	0.061*** (0.006)				0.053** (0.014)
<i>D<sub>SO<sub>2</sub></sub></i>			0.069*** (0.000)			
<i>D<sub>NO<sub>x</sub></sub></i>				0.075** (0.018)		
<i>D<sub>Dust</sub></i>					0.024* (0.058)	
<i>EE</i>	-0.038*** (0.009)	-0.030** (0.028)	-0.040*** (0.007)	-0.043*** (0.008)	-0.047** (0.010)	-0.040*** (0.000)
<i>ES</i>	0.001*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.001 (0.155)
<i>IS</i>	0.106*** (0.007)	0.103*** (0.009)	0.116*** (0.008)	0.108*** (0.009)	0.113** (0.013)	0.135** (0.014)
<i>I</i>	0.113** (0.047)	0.143*** (0.038)	0.024 (0.733)	0.039 (0.508)	0.077 (0.188)	-0.219*** (0.000)
<i>PG</i>	-1.505*** (0.000)	-1.696*** (0.000)	-1.775*** (0.000)	-1.748*** (0.000)	-1.624*** (0.000)	-1.236* (0.091)
<i>PG<sup>2</sup></i>	0.176*** (0.000)	0.198*** (0.000)	0.212*** (0.000)	0.210*** (0.000)	0.195*** (0.000)	0.158* (0.062)
<i>RD</i>	-0.019 (0.356)	-0.031 (0.122)	-0.033* (0.099)	-0.024 (0.290)	-0.018 (0.436)	0.019 (0.302)
<i>Constant</i>	4.817*** (0.000)	5.230*** (0.000)	5.752*** (0.000)	5.606*** (0.000)	5.297*** (0.000)	5.207*** (0.001)
<i>N</i>	270	234	270	270	270	240

注:括号中为*t*值;\*\*\*表示1%水平显著,\*\*表示5%水平显著,\*表示10%水平显著。下同。

方法进行稳健性检验:改变样本容量和替换自变量。首先,北京、上海等地具有特殊的政治和经济地位,环境管控可能存在其特殊性,因此,剔除北京、上海、重庆、天津四大直辖市数据再次进行回归。其次,相对于工业综合大气污染物排放当量,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和烟尘排放对于碳排放的协同效果也存在差异,因此,本文分别用3种主要工业大气污染物排放量替代工业大气污染物排放当量进行回归,探究不同大气污染物和碳排放之间的敏感程度。稳健性检验结果如表2中序列(2)–(5)所示,无论是剔除特殊样本还是替换核心解释变量,协同效应都存在,同时其他变量的系数也未产生大幅度变化,进一步说明回归结果是稳健的。

## 4 影响机制分析

### 4.1 全国工业减污降碳协同效应的影响机制分析

基于并行多重调节模型进行回归,通过分析工业大气污染物排放当量(*AP*)与能源效率(*EE*)、能源消费结构(*ES*)、产业结构(*IS*)和投资规模(*I*)的交互项,探究全国工业总体减污降碳协同效应的影响机制,结果如表3所示。

从结构层面(包括能源消费结构和产业结构)来看,*AP*×*ES*和*AP*×*IS*的影响系数均显著为负,表明能源消费结构和产业结构对减污降碳协同效应呈负向调节效应,即随着煤炭消费占比和高耗能行业占比的提高,会弱化大气污染物减排过程中对CO<sub>2</sub>的协同减排效应。对比产业结构和能源消费结

表3 全国工业减污降碳协同效应影响机制的回归结果

Table 3 Regression results of synergistic effect influencing mechanism of national industrial pollution and carbon emission reduction

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>AP</i>	0.077*** (0.001)	0.053** (0.018)	0.088*** (0.000)	0.092*** (0.000)	0.039** (0.034)
<i>EE</i>	-0.031*** (0.004)	-0.031** (0.015)	-0.038** (0.011)	-0.034*** (0.009)	-0.026** (0.013)
<i>ES</i>	0.001*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.001*** (0.000)
<i>IS</i>	0.118*** (0.005)	0.126*** (0.002)	0.125*** (0.007)	0.104*** (0.006)	0.148*** (0.003)
<i>I</i>	0.108* (0.054)	0.097* (0.058)	0.103 (0.102)	0.147*** (0.003)	0.120** (0.017)
<i>PG</i>	-1.553*** (0.000)	-1.559*** (0.000)	-1.520*** (0.000)	-1.218*** (0.000)	-1.300*** (0.000)
<i>PG</i> <sup>2</sup>	0.182*** (0.000)	0.181*** (0.000)	0.180*** (0.000)	0.140*** (0.000)	0.151*** (0.001)
<i>RD</i>	-0.022 (0.229)	-0.041** (0.011)	-0.013 (0.496)	-0.035 (0.107)	-0.043** (0.020)
<i>AP</i> × <i>EE</i>	0.022*** (0.001)				0.011* (0.059)
<i>AP</i> × <i>ES</i>		-0.002*** (0.000)			-0.001*** (0.000)
<i>AP</i> × <i>IS</i>			-0.135** (0.040)		-0.180*** (0.004)
<i>AP</i> × <i>I</i>				-0.100*** (0.000)	-0.098*** (0.000)
<i>Constant</i>	4.982*** (0.000)	5.117*** (0.000)	4.877*** (0.000)	4.149*** (0.000)	4.504*** (0.000)
<i>N</i>	270	270	270	270	270

构的调节效应大小可以发现,产业结构的调节系数远大于能源消费结构,这说明在工业行业的减污降碳过程中,相对于能源消费结构优化,产业结构调整(以钢铁、电力等为代表的高耗能行业比重降低)的作用更大。这可能是因为相对于工业产业结构调整,能源消费结构优化的过程更为艰难,工业现有大量的生产技术及设备依赖于煤炭消耗,改变现有情况所需要的巨大的经济 and 机会成本限制了能源消费结构的优化调整<sup>[36]</sup>。

从技术层面(能源效率)看,能源效率和工业大气污染物排放当量的交互项(*AP*×*EE*)系数显著为正,这表明能源效率正向调节了协同效应,随着能源效率的提升会促进大气污染物与CO<sub>2</sub>的协同减

排。不管是以CO<sub>2</sub>为代表的温室气体,还是以NO<sub>x</sub>等为代表的大气污染物,其主要来源均为化石能源燃料<sup>[37]</sup>,而能源效率提高则是在能源消耗规模不变的情况下获取更大的经济效益,从根本上减少化石能源消耗,促进减污降碳。

从规模层面(投资规模)看,工业投资规模与工业大气污染物排放当量的交互项(*AP*×*I*)的影响系数为-0.098,即投资规模对协同效应呈负向调节效应。这是由于在工业行业中,以高耗能行业为主的传统制造业消耗大量化石能源的同时也会排放大量的大气污染物和CO<sub>2</sub>,随着投资规模迅速扩大,工业资本大量流向重工业<sup>[38]</sup>,从而导致化石能源消费量和相应的大气污染物和碳排放量激增。

2022年12月

表3序列(5)考虑了多种调节因素并行的情况下对减污降碳协同效应的影响,对协同效应起正向调节作用的主要因素为能源效率,起负向调节作用的主要因素为能源消费结构、产业结构和投资规模。在多种调节因素共同作用下,产业结构的调节作用得到了大幅提升。这是由于中国工业整体以传统制造业为主,高耗能行业作为最主要的能源消耗部门,同时也是吸纳投资的主要部门,在工业整体的能源结构调整和能源效率提升中发挥着重要作用,当多种调节作用共同对协同效应产生影响时,进一步强化了产业结构对减污降碳协同的调节作用。因此,未来工业减污降碳协同增效的过程中产业结构优化应当是重点之一。

#### 4.2 地区工业减污降碳协同效应的影响机制分析

为进一步揭示不同区域工业减污降碳协同效应影响机制及其程度,本文按东部、中部和西部<sup>①</sup>的地区划分,分别进行减污降碳的协同效应及其影响

机制分析,结果如表4所示。

由表4可知,东部地区工业大气污染物排放对碳排放的影响在1%的情况下显著为正,工业大气污染物与CO<sub>2</sub>之间存在协同减排效应。影响机制方面,东部地区的能源效率与工业大气污染物排放当量的交互项系数( $AP \times EE$ )显著为正,表明能源效率通过与大气污染物排放交互作用对碳排放产生影响,从而强化了大气污染物与碳排放的协同减排效应;产业结构对减污降碳协同效应呈负向调节作用,即随着高耗能产业占工业比重的上升,会削弱大气污染物与CO<sub>2</sub>的协同减排效应。中部地区工业大气污染物排放当量( $AP$ )对碳排放( $C$ )的系数为0.215且在1%的水平下显著,表明中部地区同样存在协同效应。影响机制方面,仅有结构因素(能源消费结构、产业结构)的交叉项系数显著,且均对减污降碳协同效应呈负向调节效应;相比东部地区,中部地区结构因素对协同效应的调节作用更加明

表4 地区工业减污降碳协同效应影响机制的回归结果

Table 4 Regression results of synergistic effect influence mechanism of regional industrial pollution and carbon emission reduction

	东部地区		中部地区		西部地区	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$AP$	0.112*** (0.000)	0.040* (0.080)	0.215*** (0.001)	0.143** (0.041)	-0.182** (0.034)	-0.182*** (0.000)
$EE$	-0.025* (0.057)	-0.007 (0.189)	-0.037** (0.050)	-0.024 (0.249)	-0.250*** (0.001)	-0.183*** (0.000)
$ES$	0.000 (0.601)	-0.000 (0.878)	0.001*** (0.005)	0.001** (0.010)	-0.001 (0.616)	0.001 (0.395)
$I$	0.046 (0.596)	0.061 (0.290)	0.004 (0.770)	0.054* (0.086)	0.338* (0.055)	0.694*** (0.000)
$IS$	0.091 (0.388)	0.056 (0.554)	0.182 (0.351)	0.274* (0.089)	-0.158 (0.451)	-0.199 (0.104)
$AP \times EE$		0.023*** (0.006)		0.042 (0.375)		0.397*** (0.000)
$AP \times ES$		-0.002 (0.136)		-0.004** (0.012)		-0.013*** (0.000)
$AP \times IS$		-0.174** (0.024)		-0.391** (0.024)		1.803*** (0.000)
$AP \times I$		-0.056 (0.159)		-0.135 (0.158)		0.176*** (0.003)

① 东部地区:北京、天津、河北、辽宁、上海、浙江、山东、江苏、广东、广西、海南、福建;中部地区:黑龙江、吉林、山西、内蒙古、河南、湖北、湖南、安徽、江西;西部地区:陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、四川、贵州、云南、重庆。



显,这是因为中部地区能源消费中的煤炭占比在各区域中是最高的<sup>[39]</sup>,对煤炭等化石能源的依赖远高于东部地区,据《中国能源统计年鉴》数据测算,2019年中部地区各省份工业终端能源消费中煤的平均占比超过40%,远高于东部地区。

与其他地区不同的是,西部地区大气污染物与CO<sub>2</sub>的协同减排效应不明显,工业大气污染物排放当量(AP)对碳排放(C)的影响系数为-0.182,表明随着大气污染物排放量的减少,碳排放量反而增加。其原因在于,西部地区经济和技术基础较弱,能源利用效率低,技术减排效应弱;同时,高污染高排放产业的发展与环境规制的矛盾进一步降低了工业大气污染物和CO<sub>2</sub>的协同减排效应;此外,由于主要实行命令型环境规制致使工业企业更倾向于采用末端治理的方式来减少大气污染物排放,而非进行清洁生产技术创新<sup>[40]</sup>,导致即便工业大气污染物排放量减少,高耗能产业状况并没有根本改善,CO<sub>2</sub>排放依旧较高。从影响机制来看,能源消费结构对减污降碳协同效应呈负向调节效应;能源效率正向调节了协同效应且其调节作用大于中部和东部地区,说明能源利用效率的提升可以大幅改善西部“减污不降碳”的情况,其相比东部和中部而言更大的能源技术创新效益也进一步说明了西部地区能源利用效率提升对促进减污降碳的重要性。投资规模与产业结构均正向调节减污降碳协同效应,表明投资规模扩大和高耗能产业占比提升促进了减污降碳协同。与东部能源消耗大但能源资源匮乏不同,西部地区人口相对稀少且能源资源丰富,大量的电力能源输送到东部地区,同时大量高耗能产业从东往西迁移,工业投资规模快速扩张,直接导致煤炭消耗量的快速增加,2013—2019年,东部地区煤炭消耗量有所下降,西部地区煤炭使用量却大幅增加,增幅高达40.7%<sup>[41]</sup>。因此,当西部工业大气污染物与碳排放集中于少部分高耗能产业时,大气污染物与碳排放治理的目标更加单一,对二者的治理措施均主要作用于同一部门,反而一定程度促进了减污降碳的协同。

综合4.1和4.2小节的研究结果,总结归纳中国工业整体和地区(东部地区、中部地区和西部地区)协同效应的影响机制如图3所示。

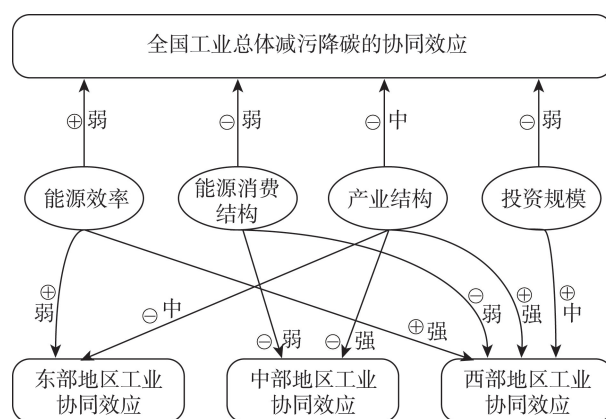


图3 中国工业减污降碳协同效应的影响机制

Figure 3 Mechanism of influence of synergistic effect of industrial pollution and carbon emission reduction in China

注: ⊕表示正向调节效应;弱、中、强表示影响程度,分别对应交互项的回归系数为:(0.0, 0.1)、[0.1, 0.2)、[0.2, +∞); ⊖表示负向调节效应;弱、中、强表示影响程度,分别对应交互项的回归系数为:(-0.1, 0.0)、(-0.2, -0.1)、(-∞, -0.2]。

## 5 结论与政策建议

### 5.1 结论

本文基于2011—2019年30省份工业面板数据对减污降碳协同效应进行研究,并分别分析了全国和地区的工业减污降碳协同效应影响机制。主要结论如下:

(1)中国工业大气污染物与碳排放之间存在明显的协同效应,即在大气污染物排放当量减少的同时碳排放量也显著减少,稳健性与内生性检验的结果均验证了该结论。

(2)基于全国工业总体减污降碳协同效应的影响机制研究发现,能源效率对减污降碳协同效应呈正向调节效应,投资规模、能源消费结构、产业结构对协同效应呈负向调节效应;各调节变量对协同效应的影响程度由强到弱依次为产业结构、投资规模、能源效率、能源消费结构。即能源效率的提升、煤炭消耗占比的降低、重工业投资规模的缩小、高耗能产业占比的降低,均有利于强化减污降碳协同效应。此外,当多个变量的调节效应并行时,产业结构对协同效应的调节效果大幅增强。

(3)基于地区工业减污降碳协同效应的影响机制研究发现,东部和中部地区工业存在明显的减污降碳协同效应,而西部地区协同效应不明显且呈现



2022年12月

出“减污不降碳”现象;从影响机制的差异性来看,东部地区的能源效率对减污降碳协同效应呈正向调节效应,产业结构呈负向调节效应且效果较强;中部地区仅有能源消费结构和产业结构对协同效应调节效果明显且均呈负向调节效应,且产业结构的调节效果明显强于东部;西部地区的能源消费结构对减污降碳协同效应呈负向调节效应,投资规模、能源效率和产业结构则对协同效应呈正向调节效应,其影响程度均强于东部和中部;产业结构因素的变化对东部、中部和西部地区减污降碳协同效应的影响程度均较强。

## 5.2 政策建议

基于本文得出的结论,提出以下政策建议:

(1)调整能源消费结构,推进清洁能源的工业应用。加强煤炭安全绿色开发和清洁高效利用,鼓励工业行业(尤其是高耗能行业)使用可再生能源、清洁能源替代燃煤;加快高效发电技术研发与应用,提高发电用煤利用效率;在具备条件的工业企业、工业园区,加快发展分布式光伏、分散式风电等新能源应用,支持工业绿色微电网和源网荷储一体化项目建设,建立多能互补的新型能源供应网络。

(2)优化工业产业结构,推动战略性新兴产业发展。以新型工业化作为发展方向,进行传统制造业的绿色升级改造,淘汰高能耗落后产能,严格控制高污染行业发展;立足各区域战略性新兴产业基础,促进生产要素合理流动和创新资源优化配置,构建战略新兴产业协同发展格局;合理引导更多工业资本流向绿色低碳和高新技术产业。

(3)提升能源利用效率,促进工业绿色技术创新。促进工艺流程技术与全产业链的绿色创新,从源头减少大气污染物和CO<sub>2</sub>排放;聚焦重点用能行业、用能领域和用能设备,持续推进节能技术装备创新应用;加强全链条、全维度、全过程用能管理,强化标准引领和节能服务,协同提升大中小企业、工业园区能效水平;分业施策、分类推进,系统化提升工业能效水平。

(4)结合地区工业发展特征,实施差异化的协同治理策略。按照东部、中部和西部地区的要素禀赋、产业特征和经济社会发展水平,实施差异化的

减污降碳协同治理政策,对东部和中部地区,加快产业结构优化升级,同时优化投资结构,鼓励绿色工业产业投资;对西部地区,注重能源效率提升与新能源技术开发利用;从制度设计上避免各地区减污降碳“不平衡、不协调、不可持续”,从整体上促进中国工业领域减污降碳协同增效。

## 参考文献(References):

- [1] 张悦,王晶晶,程钰.中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J].资源科学,2022,44(7):1435-1448.[Zhang Y, Wang J J, Cheng Y. Spatiotemporal characteristics of China's industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1435-1448.]
- [2] 生态环境部.2020年中国生态环境统计年报[R/OL].(2022-02-18)[2022-11-30].[https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218\\_969391.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218_969391.shtml). [Ministry of Ecology and Environment. 2020 China Ecological Environment Statistical Annual Report[R/OL]. (2022-02-18) [2022-11-30]. [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218\\_969391.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218_969391.shtml).]
- [3] 易兰,赵万里,杨历.大气污染与气候变化协同治理机制创新[J].科研管理,2020,41(10):134-144.[Yi L, Zhao W L, Yang L. Innovation of collaborative governance mechanism on air pollution and climate change control[J]. Science Research Management, 2020, 41(10): 134-144.]
- [4] Haken H. Synergetics: An Introduction, Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry and Biology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- [5] 周丽,夏玉辉,陈文颖.中国低碳发展目标及协同效益研究综述[J].中国人口·资源与环境,2020,30(7):10-17.[Zhou L, Xia Y H, Chen W Y. Review of low carbon development targets and relative co-benefits in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(7): 10-17.]
- [6] 郑佳佳,孙星,张牧吟,等.温室气体减排与大气污染控制的协同效应:国内外研究综述[J].生态经济,2015,31(11):133-137.[Zhen J J, Sun X, Zhang M Y, et al. Review of researches on the synergistic effect of GHGs mitigation and air pollution control at home and abroad[J]. Ecological Economy, 2015, 31(11): 133-137.]
- [7] Jiang H D, Liu L J, Deng H M. Co-benefit comparison of carbon tax, sulfur tax and nitrogen tax: The case of China[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 29: 239-248.
- [8] Pan L J, Xie Y B, Li W. An analysis of emission reduction of chief air pollutants and greenhouse gases in Beijing based on the LEAP model[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 347-352.
- [9] 宋鹏,张慧敏,毛显强.面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径

- [J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1446–1455. [Song P, Zhang H M, Mao X Q. Research on Chongqing's carbon emission reduction path towards the goal of carbon peak[J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1446–1455.]
- [10] 俞珊, 张双, 张增杰, 等. 北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估[J/OL]. 环境科学, (2022-07-29) [2022-11-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20220729.1133.010.html>. [Yu X, Zhang S, Zhang Z J, et al. Scenario simulation and effects assessment of co-control on pollution and carbon emissions reduction in Beijing[J/OL]. Environmental Science, (2022-07-29) [2022-11-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20220729.1133.010.html>.]
- [11] 刘华军, 乔列成, 郭立祥. 减污降碳协同推进与中国3E绩效[J]. 财经研究, 2022, 48(9): 4–17. [Liu H J, Qiao L C, Guo L X. Coordinated promotion of pollution and carbon reduction and China's 3E performance[J]. Journal of Finance and Economics, 2022, 48(9): 4–17.]
- [12] 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(4): 936–944. [Wang H, Ma J, Chen M, et al. Analysis of needs and construction of coordinated multi-governance system for pollution reduction and carbon reduction[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(4): 936–944.]
- [13] 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(6): 1155–1167. [Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double-Carbon” targets [J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155–1167.]
- [14] 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 X B, Zhang Y, Cao L Z, 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.]
- [15] 刘满芝, 杨继贤, 马丁, 等. 基于LMDI模型的中国主要大气污染物的空间差异及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 333–341. [Liu M Z, Yang J X, Ma D, et al. Spatial disparity and factor analysis of major air pollutant emissions in China based on LMDI methods[J]. Resources Science, 2015, 37(2): 333–341.]
- [16] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022, (5): 100–120. [Jiang T. Mediating effects and moderating effects in causal inference[J]. China Industrial Economics, 2022, (5): 100–120]
- [17] 方杰, 温忠麟, 梁东梅, 等. 基于多元回归的调节效应分析[J]. 心理科学, 2015, 38(3): 715–720. [Fang J, Wen Z L, Liang D M, et al. Moderation effect analyses based on multiple linear regression [J]. Journal of Psychological Science, 2015, 38(3): 715–720.]
- [18] 王丽萍, 姚子婷, 李创. 环境战略对环境绩效和经济绩效的影响: 基于企业成长性和市场竞争性的调节效应[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 23–39. [Wang L P, Yao Z T, Li C. Effect of environmental strategy on environmental performance and economic performance: Based on the regulating effect of enterprise growth and market competition[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 23–39.]
- [19] 焦豪, 杨季枫, 金宇珂. 企业消极反馈对战略变革的影响机制研究: 基于动态能力和冗余资源的调节效应[J]. 管理科学学报, 2022, 25(8): 22–44. [Jiao H, Yang J F, Jin Y K. Negative feedback and firm strategic change: The moderating effect of dynamic capabilities and slack resources[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(8): 22–44.]
- [20] 李真, 李茂林. 减税降费对企业创新的激励机制与调节效应[J]. 上海经济研究, 2021, (6): 105–117. [Li Z, Li M L. The incentive mechanism and moderating effect of tax and fee reduction on enterprise innovation[J]. Shanghai Journal of Economics, 2021, (6): 105–117.]
- [21] 朱于珂, 高红贵, 丁奇男, 等. 地方环境目标约束强度对企业绿色创新质量的影响: 基于数字经济的调节效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 106–119. [Zhu Y K, Gao H G, Ding Q N, et al. Impact of local environmental target constraint intensity on the quality of enterprise green innovation: Moderating effects based on the digital economy[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 106–119.]
- [22] 黄送钦, 吕鹏, 范晓光. 疫情如何影响企业发展预期? 基于压力传导机制的实证研究[J]. 财政研究, 2020, (4): 44–57. [Huang S Q, Lv P, Fan X G. How does the epidemic affect corporate development expectations? Empirical research based on pressure transmission mechanism[J]. Public Finance Research, 2020, (4): 44–57.]
- [23] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. Earth's Future, 2021, DOI: 10.1029/2021EF002241.
- [24] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1–9.
- [25] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997–2015[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 1–14.
- [26] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO<sub>2</sub> emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. Applied Energy, 2016, 184: 742–750.
- [27] 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. [Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, et al. Study on GHGs and air pollutants co-control: Assessment and planning[J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3390–3398.]

2022年12月

- [28] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2019, (10): 118-136. [Deng H H, Yang L X. Haze governance, local competition and industrial green transformation[J]. China Industrial Economics, 2019, (10): 118-136.]
- [29] 何小钢, 张耀辉. 中国工业碳排放影响因素与CKC重组效应: 基于STIRPAT模型的分行业动态面板数据实证研究[J]. 中国工业经济, 2012, (1): 26-35. [He X G, Zhang Y H. Influence factors and Environmental Kuznets Curve relink effect of Chinese industry's carbon dioxide emission: Empirical research based on STIRPAT model with industrial dynamic panel data[J]. China Industrial Economics, 2012, (1): 26-35.]
- [30] You J M, Zhang W. How heterogeneous technological progress promotes industrial structure upgrading and industrial carbon efficiency? Evidence from China's industries[J]. Energy, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123386.
- [31] 李竞, 侯丽朋, 唐立娜. 基于环境库兹涅茨曲线的我国大气污染防治重点区域环境空气质量与经济增长关系研究[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8845-8859. [Li J, Hou L P, Tang L N. Relationship between air quality and economic growth in key areas of air pollution control in China based on the Environmental Kuznets Curve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8845-8859.]
- [32] 李少林, 王齐齐. “大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应[J/OL]. 环境科学, (2022-08-01) [2022-11-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20220729.1434.025.html>. [Li S L, Wang Q Q. Evaluation of energy saving and carbon reduction effect of air pollution prevention and control action plan and innovation intermediary effect[J/OL]. Environmental Science, (2022-08-01) [2022-11-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20220729.1434.025.html>.]
- [33] Liu D D. Convergence of energy carbon emission efficiency: Evidence from manufacturing sub-sectors in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(21): 31133-31147.
- [34] 胡东兰, 申颢, 刘自敏. 中国城市能源回弹效应的时空演变与形成机制研究[J]. 中国软科学, 2019, (11): 96-108. [Hu D L, Shen H, Liu Z M. Study on the spatial-temporal evolution and formation mechanism of energy rebound effect in Chinese cities[J]. China Soft Science, 2019, (11): 96-108.]
- [35] 岳书敬. 基于低碳经济视角的资本配置效率研究: 来自中国工业的分析与检验[J]. 数量经济技术经济研究, 2011, 28(4): 110-123. [Yue S J. Study on capital allocation efficiency in a low carbon economy development perspective[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2011, 28(4): 110-123.]
- [36] Yang Z B, Shao S, Yang L L, et al. Improvement pathway of energy consumption structure in China's industrial sector: From the perspective of directed technical change[J]. Energy Economics, 2018, 72: 166-176.
- [37] Song C Z, Yin G W, Lu Z L, et al. Industrial ecological efficiency of cities in the Yellow River Basin in the background of China's economic transformation: Spatial-temporal characteristics and influencing factors[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 29(3): 4334-4349.
- [38] 黄志钢, 郭冠清. 重工业优先发展战略形成历程及其对构建新发展格局的启示[J]. 上海经济研究, 2022, (10): 99-114. [Huang Z G, Guo G Q. The forming process of priority development strategy of heavy industry and its enlightenment to the construction of new development pattern[J]. Shanghai Journal of Economics, 2022, (10): 99-114.]
- [39] 刘华军, 石印, 郭立祥, 等. 新时代的中国能源革命: 历程、成就与展望[J]. 管理世界, 2022, 38(7): 6-24. [Liu H J, Shi Y, Guo L X, et al. China's energy reform in the new era: Process, achievements and prospects[J]. Journal of Management World, 2022, 38(7): 6-24.]
- [40] 王丽霞, 陈新国, 姚西龙, 等. 环境规制对工业企业绿色经济绩效的影响研究[J]. 华东经济管理, 2018, 32(5): 91-96. [Wang L X, Chen X G, Yao X L, et al. The influences of environmental regulation on green economic performance of industrial enterprises[J]. East China Economic Management, 2018, 32(5): 91-96.]
- [41] 唐贵谦, 刘钰婷, 高文康, 等. 警惕大气污染和碳排放向西北迁移[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 230-237. [Tang G Q, Liu Y T, Gao W K, et al. Alert to the migration of air pollution and carbon emission to Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 230-237.]

# Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism

CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiamin<sup>3</sup>, TANG Xiangbo<sup>1</sup>

(1. School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

2. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Science, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

**Abstract:** The industrial sector is the main source of air pollutant and carbon dioxide emissions, and is also the main contributor to the implementation of promoting synergies and increasing efficiency of pollution and carbon emission reduction in China. Based on China's industrial provincial panel data from 2011 to 2019, this study used the fixed effect model and the parallel multiple modulation model to analyze the synergistic effect of industrial pollution reduction and carbon emission reduction and its influencing mechanism. The results show that: (1) There is obvious synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China's industry, that is, reducing the emission equivalent of air pollutants will significantly promote the reduction of carbon emissions; (2) Energy efficiency, energy consumption structure, industrial structure, and investment scale are important regulatory variables that affect the synergistic effect. Among them, energy efficiency has a positive regulatory effect on the synergistic effect of pollution and carbon emission reduction, while energy consumption structure, industrial structure, and investment scale have a negative regulatory effect on the synergistic effect; (3) The synergistic effect of industrial pollution and carbon emission reduction in the eastern, central, and western regions of China is evidently different, and there is a clear regional heterogeneity of different regulatory factors on the synergistic effect, among which industrial structure factors have a strong regulatory effect on the synergistic effect in all regions. Finally, this article put forward some recommendations on industrial pollution and carbon emission reduction synergy from the aspects of energy structure adjustment, industrial structure optimization, energy efficiency improvement, and regional differentiated strategies.

**Key words:** industry; air pollution and carbon emission reduction; synergistic effect; moderating effect; fixed effect model; parallel multiple modulation model; China