

引用格式: 罗良文, 雷朱家华. 中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 53–68. [Luo L W, Leizhu J H. Synergetic effect of China's carbon market policies on pollution reduction and carbon reduction[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 53–68.] DOI: 10.18402/resci.2024.01.05

中国碳市场政策的减污降碳协同效应

罗良文, 雷朱家华

(中南财经政法大学经济学院, 武汉 430073)

摘要:【目的】面对“碳达峰、碳中和”的目标约束, 探讨不同碳交易政策工具对减污降碳效果的影响, 为实现区域经济绿色低碳转型提供理论依据。【方法】本文基于2003—2021年30个省份的数据, 以CO₂和SO₂构建耦合协调度模型, 采用双向固定效应的双重差分模型, 分析碳交易政策的减污降碳效果及其作用机制, 并进一步分析碳市场政策工具的减污降碳作用。【结果】①碳交易政策能够显著地降低碳污排放之间的耦合度和协调度, 产生减污降碳效果, 并且逐渐趋向于“高水平耦合与优质协调”的协同关系。②异质性的结果表明碳交易政策对北京、上海、广东的碳污排放耦合度与协调度的影响大于天津、湖北、重庆、福建, 并且对碳排放相对较低地区碳污耦合度、协调度的影响更显著, 同时碳交易政策的“降碳”效果相对高于“减污”效果。③碳交易政策的减污降碳效应主要由碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模、惩罚工具通过产业结构效应、能源结构效应和技术进步效应实现, 各项政策工具也具有优化产业结构水平, 降低产业间差异的作用, 但现阶段无法显著改善能源结构清洁化水平和提升绿色技术创新水平。【结论】因此, 应进一步建立健全碳污协同治理体系, 提高绿色低碳技术和污染治理技术, 实现产业结构升级和能源结构转型, 扩大碳市场规模, 完善碳市场政策工具, 进而实现“减污降碳协同增效”的共赢局面。

关键词: 碳市场; 减污降碳; 协同增效; 政策工具; 耦合协调度; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.01.05

1 引言

国际社会高度关注全球气候变暖问题, 中国提出“30·60”目标, 但现实中碳减排难度与日俱增, 能源供给不足、环境污染严重、企业产能受限等社会经济问题矛盾凸显。此外, 环境污染与经济增长之间难以协调的矛盾也加剧了减排的难度。一方面, 扩大经济规模极易增加非期望产出, 加剧能源消耗, 造成环境污染^[1]; 另一方面, 碳排放与环境污染具有同源性, 燃烧化石燃料既产生CO₂等温室气体, 也会产生颗粒物等空气污染物^[2]。因此, 中国政府应当把握气候治理与污染防治的内在联系, 通过“降碳、减污、扩绿、增长”协同推进的生态文明建设要求, 既可以实现“碳达峰”和“碳中和”的政策目标, 缓解气候变化带来的负面影响, 又能推动产业结构绿色转型, 实现经济高质量发展的目的, 同时

还能推动环境污染源头治理, 实现环境、气候、经济“协同增效”的共赢局面。

碳交易政策已成为学术界广泛热议的话题。学界普遍认为碳市场不仅能够实现低碳减排的目的, 还能够提升碳生产率^[3]、优化结构效应^[4]、革新技术^[5], 甚至能够产生减污降碳的协同效果^[6]。理论上, 波特假说提出的创新补偿效应和遵循成本效应解释了环境规制政策的作用机制, 这也进一步引申出部分学者采用技术进步^[7,8]、产业结构^[9,10]、能源结构^[11,12]等因素作为衡量波特效应的替代指标。但现实中, 企业不仅面对碳交易政策的约束^[13], 还受到排污权交易^[14]、能耗双控制度^[15]、中央环保督察制度^[16]等一系列外部政策冲击。在多重环境规制政策约束下, 企业生产经营受到冲击, 生存空间不断压缩, 由于政策间的不协调, 反而容易造成“报复性反弹”

收稿日期: 2023-05-09 修订日期: 2023-11-11

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21&ZD072); 国家社会科学基金项目(21BJY111); 国家社会科学基金青年项目(21CJY031)。

作者简介: 罗良文, 男, 河南信阳人, 教授, 主要研究方向为低碳经济与国际贸易。E-mail: llw@zuel.edu.cn

通讯作者: 雷朱家华, 男, 浙江金华人, 博士研究生, 主要研究方向为资源环境与低碳经济。E-mail: 13554147369@163.com

的局面。相关研究表明,“波特效应”产生的前提是适当的环境规制政策能够刺激企业产生创新驱动行为,既保证了企业生产绩效,又能够减少非期望产出^[17,18]。面对气候治理与环境防治的复杂局面,碳交易政策能否在能源消耗、减污降碳、经济增长3个方面产生协同效应,既保证充足的清洁能源供给,又能降低碳排放与污染排放,还能够保证企业、行业、地区的经济增长,逐渐成为重要的研究课题。

“减污降碳协同增效”是实现经济社会发展全面绿色转型的重要举措,其本质是通过环境规制实现“减污、降碳、扩绿、增长”等多目标层面的帕累托最优或者帕累托改进,但目前关于“减污降碳”的研究主要集中于两个方面:第一,环境规制对碳污排放的政策效果,包括测度、政策评价等内容。如涂正革^[19]构建了降碳与减污的SBM效率模型,并测度了高耗能企业的硫碳减排效率。第二,围绕减污降碳的作用机制展开研究。如陈晓红等^[20]分析了大气污染物从能源消费结构、能源效率、产业结构、投资规模4种途径降低碳排放的过程。现有文献关于“减污降碳协同增效”的研究思路拘泥于环境规制政策单一的“减污”或者“降碳”作用,不仅忽略了碳排放与污染物之间的协同关系,更忽略了环境规制对企业的影响。基于碳市场框架和已有研究,当控排企业进入碳交易流程,不仅面临利益最大化的目标,还需要满足低碳减排的约束。为了避免政府处罚的风险,控排企业在保证自身正常运行的前提下,需要尽可能减少碳排放量。短期内,企业可以选择适当减少产品产量,通过减少能耗以此实现低碳减排的目标,该措施虽然能够实现优化能源结构,倒逼高耗能企业实现绿色低碳转型,优化产业结构,但极大程度损害了控排企业的生存空间,不利于企业持续发展,甚至产生“脱实向虚”的现象^[21]。在长期,企业可以通过提高绿色创新技术,降低长期减排成本,增加相对碳配额拥有量,从根源上缓解企业生产和减排之间的矛盾,但该措施不仅需要耗费高额的研发成本,还具有不确定性的风险。因此,碳市场约束能否促进企业通过提升企业绿色技术创新,优化能源结构和产业结构,实现减污降碳的目标,仍需进一步检验。据此,提出以下理论假设:

H1:碳交易政策能够加强碳排放与污染排放之间的协同关系。

H2:碳交易政策工具通过产业结构(H2a)、能源结构(H2b)与技术进步(H2c)强化碳排放与污染排放之间的协同关系。

H3:产业结构、能源结构和技术进步能够减少碳排放进而降低污染排放。

综上,本文认为关于减污降碳效应的现有研究存在以下不足之处:①已有文献在衡量减污降碳效果时,采用双重差分模型,估计碳交易政策对污染物或者碳排放的影响,无法识别政策效果是政策冲击产生的影响还是替换被解释变量产生的影响。②忽视了环境规制政策中不同政策工具产生的影响。将碳交易政策简单的界定为市场激励型环境规制政策,而不考虑控排企业面对该政策中具体政策工具产生的减污降碳行为和生产经营行为,是具有局限性的。③忽略了碳排放与污染物之间的“协同”关系。已有文献分析作用机制的方式主要采用中介效应模型,聚焦于碳交易政策与碳排放、污染物之间的影响,忽略了碳排放与污染物之间的内在联系,并且不易解释中介效应产生的内生性问题。有鉴于此,本文的边际贡献体现在以下两个方面:①构建碳污排放的耦合协调度模型以衡量碳排放与污染之间的关联性,并以此表征碳排放与污染排放的“协同”关系,不仅分析了“减污”和“降碳”效果,更解释了碳交易政策影响碳排放与污染物之间的“协同”关系。②深化了碳交易政策的研究。通过量化碳交易政策的具体工具,分析碳价、碳市场活跃度、碳市场规模、惩罚工具对减污降碳协同关系的影响及其作用机制,为环境规制研究提供了“异质性政策工具”的视角。

2 研究设计

2.1 模型构建

如何表征“减污降碳协同增效”的帕累托最优状态受制于数据、模型等约束,因此本文基于碳排放与污染排放“同根同源”的前提,通过构建“碳系统”与“污染系统”之间的关联性,进而采用双向固定效应的多时点双重差分模型,引入DID变量,衡量碳交易政策对碳排放与污染排放关联性的影响,并进一步分析碳交易政策在“降碳”过程中产生的“减污”效果。基本的理论模型设定如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DID_{it} + \mathbf{Z}\alpha + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: Y_{it} 为被解释变量,是指 i 地区第 t 年碳排放和

2024年1月

污染排放的耦合度或者协调度; DID_{it} 为碳交易政策的双重差分变量; Z 为控制变量矩阵; α_0 为常数项; α_1 为政策冲击的系数; α 为控制变量的参数矩阵; η_i 为个体固定效应,用以控制影响被解释变量但不随时间变化的个体差异; ν_t 为时间效应,表示所有随时间变化的共同因素; ε_{it} 为服从正态分布的随机误差项。进一步参考王巧等^[22]的机制分析方法,首先考察碳交易政策具体工具对产业结构、能源结构、技术进步3个作用机制的影响,再分别将碳交易工具与作用机制的交乘项引入模型,考察其对减污降碳过程中碳污排放耦合度、协调度的影响。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 tool_{it} + Z\beta + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中: M_{it} 为作用机制变量,分别指代 i 地区第 t 年的产业结构、能源结构、技术进步; β 和 γ 均为控制变量的参数矩阵; β_0 和 γ_0 为常数项; β_1 和 γ_1 分别为政策工具变量对机制变量和被解释变量的估计系数。为了消除内生性的影响,在公式(2)的基础上,选取滞后1期的碳排放量对数值 $\ln co_{2,it-1}$ 作为工具变量IV,采用两阶段最小二乘法(IV-2SLS)估计减污降碳过程中的协同作用:

$$\begin{aligned} \ln co_{2,it} &= \varphi_0 + \varphi_1 IV_{it} + \varphi_2 M_{it} + Z\varphi + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \\ \ln so_{2,it} &= \lambda_0 + \lambda_1 \ln co_{2,it} + \lambda_2 M_{it} + Z\lambda + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: λ_2 为消除内生性后减污降碳过程中机制的作用效果; φ 和 λ 均为控制变量的参数矩阵; φ_0 和 λ_0 为常数项; φ_1 和 φ_2 分别为第一阶段中工具变量和

机制变量对 $\ln co_{2,it}$ 的估计系数; λ_1 和 λ_2 分别为第二阶段中 $\ln co_{2,it}$ 与机制变量对 $\ln so_{2,it}$ 的估计系数。

为了保证双重差分模型的有效性,在基准估计之前需要进行平行趋势检验。参考Sun等^[23]的思路,采用事件研究法检验碳交易政策实施前后的动态效应。以碳交易政策实施年份为基准,引入年份虚拟变量,识别政策实施前后的DID系数是否显著。具体模型如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \sum_{s=1}^{n_{pre}} \alpha_{1,pre-s} DID_{pre-s} + \alpha_{1,current} DID_{current} + \sum_{s=1}^{n_{post}} \alpha_{1,post-s} DID_{post-s} + Z\alpha + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{1,pre-s}$ 、 $\alpha_{1,current}$ 和 $\alpha_{1,post-s}$ 分别为碳交易政策实施前 s 期、政策实施当期和政策实施后 s 期; DID_{pre-s} 、 $DID_{current}$ 和 DID_{post-s} 分别为对应年份的虚拟变量; n_{pre} 和 n_{post} 分别为政策实施的前 n 期和后 n 期。

2.2 指标构建与数据来源

2.2.1 指标构建

(1)被解释变量

耦合度反映了系统中各子系统之间相互关联、相互依赖、相互作用的强弱关系,协调度反映了各子系统在高水平阶段相互促进还是在低水平阶段相互制约^[24]。为了反映减污降碳之间的协同关系,参考廖文梅等^[25]的方法,引入耦合协调度模型,并根据耦合度和协调度的数值范围划分不同阶段(表1),并以极差归一化后的CO₂和SO₂排放量为基础,

表1 中国各省份碳污耦合协调分布情况

Table 1 Coupling coordination of carbon emissions and environmental pollution among 30 provinces in China's mainland

协调阶段	耦合阶段				总计
	低水平耦合	磨合阶段	瓶颈阶段	高水平耦合	
	0.8 < c ≤ 1.0	0.5 < c ≤ 0.8	0.3 < c ≤ 0.5	0.0 ≤ c ≤ 0.3	
极度失调 0.9 < d ≤ 1.0	11	0	0	0	11
严重失调 0.8 < d ≤ 0.9	55	0	0	0	55
中度失调 0.7 < d ≤ 0.8	118	0	0	0	118
轻度失调 0.6 < d ≤ 0.7	66	0	48	0	114
濒临失调 0.5 < d ≤ 0.6	19	5	73	0	97
勉强协调 0.4 < d ≤ 0.5	0	44	21	0	65
初级协调 0.3 < d ≤ 0.4	3	17	0	15	35
中级协调 0.2 < d ≤ 0.3	1	0	0	10	11
良好协调 0.1 < d ≤ 0.2	0	0	0	4	4
优质协调 0.0 ≤ d ≤ 0.1	0	0	0	60	60
总计	273	66	142	89	570

分别定义耦合度和协调度作为被解释变量(表2)。

$$c = \frac{2\sqrt{co_2 \times so_2}}{co_2 + so_2} \quad (5)$$

$$d = \sqrt{c \times (0.5co_2 + 0.5so_2)} \quad (6)$$

式中: c 为“碳系统”与“污染系统”之间的耦合度; d 为协调度。耦合协调并不是直接指征碳污之间的协同效应,而是表明碳排放与污染排放之间的“关联性”,耦合度和协调度越大说明“碳系统”与“污染系统”之间相互依赖的关系越明显。由于 CO_2 和 SO_2 均是负向指标,因此公式(5)和(6)的数值越小代表碳排放与污染排放耦合协同状况越好。

(2) 核心解释变量

根据碳排放权交易试点成立的时间^①,当 i 代表广东(包括深圳)、北京、天津、上海、湖北、重庆、福建时, $treat_i = 1$, 为处理组;当 i 代表其他地区时, $treat_i = 0$, 为控制组。同时,当 i 代表广东、北京、天津、上海且 $t \geq 2013$, 或者当 i 代表湖北、重庆且 $t \geq 2014$, 或者当 i 代表福建且 $t \geq 2016$ 时, $post_{it} = 1$; 除此之外,其余 $post_{it} = 0$ 。

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 treat_i \times post_{it} + \mathbf{Z}\alpha + \eta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

(3) 机制变量与政策工具

产业结构高级化(ES)与产业结构合理化

(TL)。参考干春晖等^[26]衡量产业结构变迁的方法,将产业结构划分为“高级化”和“合理化”两个维度。定义第三产业增加值与第二产业增加值之比作为产业结构高级化的替代指标。若 ES 值上升,表明该地区经济发展方向趋向服务化,产业结构逐渐升级。产业结构合理化水平采用 Theil 指数计算,以反映产业间的协调程度。

$$TL = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{Y_j}{Y} \right) \ln \left(\frac{Y_j}{Y} \times \frac{L_j}{L_j} \right) \quad (8)$$

式中: Y 表示产值; L 表示劳动力就业人数; j 表示产业。若 $TL \neq 0$, 表示产业结构偏离均衡状态,且数值越大,产业间差异性越大,产业结构越不合理^②。

能源结构清洁化(EN)。本文采用煤炭消耗占能源消耗比例定义能源结构的清洁化程度。由于煤炭消耗量和能源消耗量计算单位不同,参考蒋金荷^[27]的方法将原煤的折标煤系数作为煤炭消耗量的折标煤系数(0.7143 kg 标准煤/kg)。

$$EN = 1 - \frac{0.7143 \times coal}{energy} \quad (9)$$

式中: $coal$ 为煤炭消耗量; $energy$ 为能源消耗量。若 $EN \geq 0.5$, 说明该地区使用非煤炭能源比例较高,能源结构较为清洁; $0.0 < EN < 0.5$, 表明该地区使用煤炭能源比例较高,能源结构相对不清洁;

表2 主要变量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of the main variables

类型	变量	含义	样本量	平均值	标准误	最小值	最大值
被解释变量	c	耦合度	570	0.670	0.321	0.000	1.000
	d	协调度	570	0.559	0.245	0.000	0.995
	co_2	碳排放量/亿t	570	3.443	2.805	0.430	20.591
	so_2	二氧化硫排放量/亿t	570	56.101	45.753	0.140	200.300
核心解释变量	DID	碳交易政策 DID 变量	570	0.102	0.303	0.000	1.000
机制变量	ES	产业结构高级化水平	570	1.094	0.618	0.500	5.297
	TL	产业结构合理化水平	570	0.490	0.316	0.000	1.000
	EN	能源结构清洁化比重	570	0.615	0.162	0.189	0.988
	MI	绿色全要素生产率 GTFP	540	1.020	0.120	0.316	3.281
政策工具	$\ln price$	碳价年均对数值	570	0.328	1.005	-2.050	4.463
	$\ln nonzero$	碳市场活跃度	570	0.540	1.611	0.000	5.999
	$\ln scale$	碳市场规模	570	1.747	5.281	0.000	20.022
	$punishment$	惩罚变量	570	0.933	1.950	0.000	7.000

注:限于篇幅,仅保留主要变量的估计结果,其余变量留存备索。

① 8个碳排放交易试点成立的时间分别为:深圳(2013年6月)、北京(2013年11月)、天津、上海、广东(2013年12月)、湖北(2014年4月)、重庆(2014年6月)、福建(2016年12月)。

② 由于 TL 在数量级上与其他机制变量不同,且分布呈偏态特征,故采用极差归一化处理。

2024年1月

$EN < 0$, 表示该地区在煤炭消耗数量大于能源消耗数量, 需要进口煤炭, 能源结构过度依赖煤炭。

绿色全要素生产率(MI)。参考Färe等^[28]、Tone等^[29]的研究, 采用相邻两期交叉参比的方式计算SBM-Malmquist-Luenberger指数。其中, 期望产出为各省份实际GDP(亿元), 非期望产出为CO₂排放量(亿t)和SO₂排放量(亿t), 投入指标包括劳动力投入、资本投入和能源投入, 分别采用各省份就业人数(万人)、资本存量(亿元)和电力消费量(亿kW·h)作为替代变量。资本存量以2002年为基期, 采用永续盘存法, 计算公式为 $K_{it} = I_{it} + (1 - \delta_{it})K_{it-1}$, I_{it} 为各省份全社会固定资产投资总额^③, δ_{it} 根据张军等^[30]的研究取值9.6%。

政策工具变量。参考吴茵茵等^[31]的研究, 将碳市场中的主要政策工具划分为市场机制(碳价、碳市场活跃度、碳市场规模)和行政干预(行政处罚)两种类型。其中以碳市场成交价年均值的对数值作为碳价格变量(lnprice), 以每年非零成交量天数的对数值作为碳交易市场的活跃度指标(lnnonzero), 以年碳成交额总量的对数值作为碳市场交易规模指标(lnscale)。根据生态环境部和各碳交易试点颁布的《碳排放权交易管理办法(试行)》中经济处罚与下一年度碳配额处罚, 采用虚拟变量的方式构造惩罚变量(punishment), 非碳交易试点, 惩罚变量为0; 当碳交易试点依次为湖北、上海、广东、北京、福建、重庆、天津时, 惩罚变量由7至1依次递减^④。

(4) 控制变量

在保证实证结果稳健的前提下, 本文选取以下8个方面11个指标作为控制变量。①经济发展指标, 以2002年为基期计算的各地区人均实际GDP对数值(lnz1)及其二次项(lnz2)。②经济结构指标, 分别采用第二产业比重(z3)、第三产业比重(z4)和社会商品零售额占GDP比重(z5)作为替代指标。③人口指标, 为各地区年末总人口数的对数值(lnz6)。④创新能力指标, 为发明专利授权数的对

数值(lnz7)。⑤能源消耗指标, 为火力发电量占发电量比重(z8)。⑥对外开放程度, 为外商直接投资总额占GDP比重(z9)。⑦财政依存度, 为一般公共预算收入占GDP比重(z10)。⑧市场化程度, 选取樊纲等^[32]提出的市场化进程总得分(z11)作为替代变量。

2.2.2 数据来源

本文采用2003—2021年中国30个省(市、区)的面板数据进行研究(西藏及港澳台地区由于数据缺失, 暂不考虑)。其中, 碳排放数据借鉴CEADs(Carbon Emission Accounts and Datasets)的计算方法, 以能源平衡表中终端能源消耗量为基础, 参考IPCC碳排放计算公式, 得到2003—2021年各省份碳排放量数据^[33]。市场化指数采用樊纲等^[32]的数据, 并采用韦倩等^[34]的方法进行合并与估算, 得到2003—2020年中国各省份的市场化指数, 并在此基础上估计2021年的市场化指数。其余数据均来源于中国国家统计局、《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《中国财政年鉴》。

3 结果与分析

3.1 特征事实

图1是分别按照时间趋势(图1a)和碳污排放关系绘制(图1b)的碳污排放耦合度与协调度特征事实。由图1a可知, 中国的碳污排放协同关系呈明显的倒U型分布。实施碳交易政策之前, 碳污之间的耦合度与协调度处于较低水平, 并且呈逐年上升趋势, 说明2013年之前碳污排放偏向于高水平耦合与优质协调的关系。但这种“高水平”和“优质”的耦合协调关系仅代表了碳排放与污染排放之间的匹配关系, 并不代表高质量的经济发展阶段, 而随着经济快速发展, 碳污排放关系逐渐趋于失调状态。当实施碳交易政策后, 碳污排放的耦合度与协调度逐渐下降, 两者关系趋向于高水平的耦合协同关系。这直观地印证了H1的假设, 碳交易政策能够加强碳排放与污染排放之间的协同关系, 实现减污

③ 2018和2019年的固定资产投资总额采用2017年数据和《中国统计年鉴》公布的“分地区按领域分固定资产投资(不含农户)比上年增长情况”数据计算得到。

④ 为了便于构造碳排放权交易制度中的惩罚变量, 考虑到各试点政策的差异性, 仅从经济处罚和碳配额惩罚两个角度衡量, 忽略碳交易配套措施以及对第三方机构、碳交易所、行政部门人员的处罚。经济惩罚中的金额均是按照情节严重的最高金额设定, 且经济惩罚包括定额罚款和超额排放罚款两个部分。部分地区碳交易管理办法中未详细公布相应的处罚细节, 采用《全国碳排放权交易管理办法(试行)》中的经济惩罚。

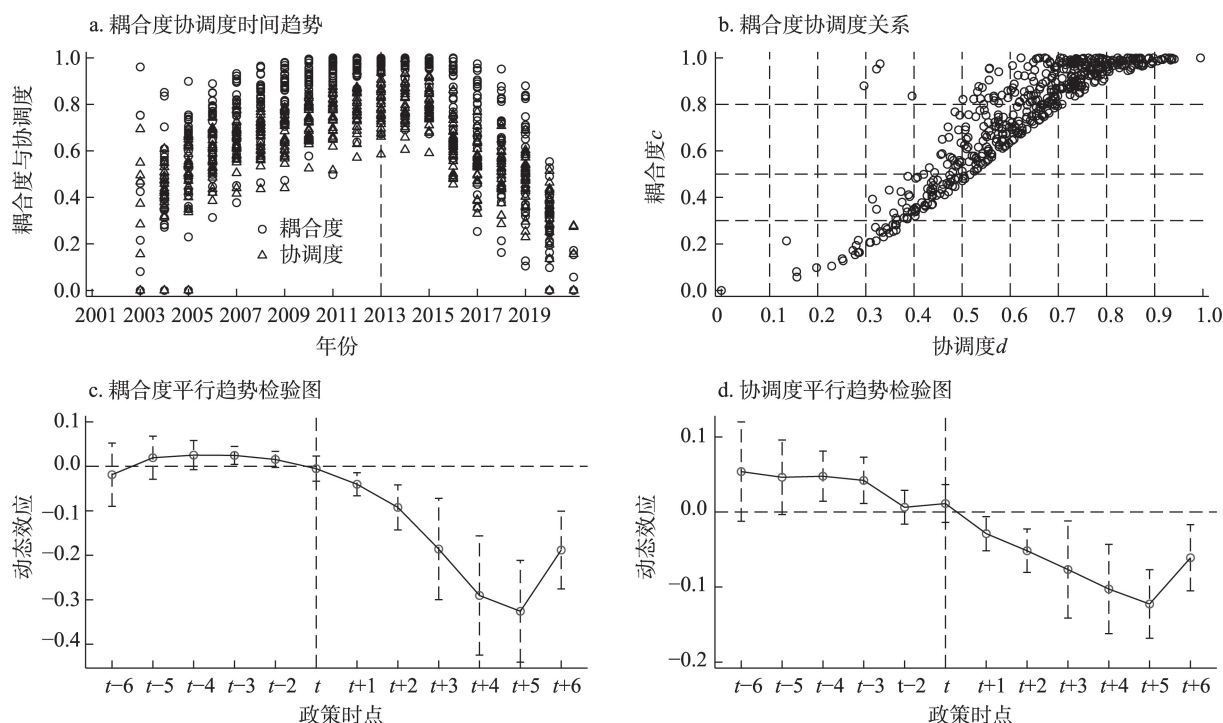


图1 特征事实与平行趋势图

Figure 1 Feature facts and parallel trend charts

注:图中系数的置信区间为90%的置信度下计算的区间范围。

降碳的目的。图1b进一步显示出碳污排放关系具有正向相关的特征,其耦合度与协调度存在明显的线性关系,结合表1的数据,样本期内大部分地区的碳污协同关系仍偏向于“低水平耦合与失调”的状态。

3.2 平行趋势检验

根据图1c和图1d以及估计系数显示,在碳交易政策实施当年及前6年,耦合度和协调度的动态效应大部分均未通过显著性检验,而当政策实施后1年内,耦合度与协调度的动态效应均通过1%~10%置信水平的显著性检验,说明控制组与处理组的耦合度与协调度的变动趋势满足平行趋势假设。不仅如此,根据政策实施后的动态效应可知,碳交易政策显著地降低了CO₂和SO₂之间的耦合度和协调度,加强了碳污排放之间的协同关系,再次验证H₁的假设,该结果不仅与基准回归的结果保持一致,也进一步验证了碳交易政策的减污降碳作用。

3.3 基准回归与内生性

表3中列(1)~(4)列示了公式(1)的基准回归结果。其中,列(1)、(3)未添加控制变量,列(2)、(4)添加了控制变量,所有结果均控制了个体固定效应

与时间固定效应,括号中的值为省级层面聚类标准误计算的t统计量。不难发现,DID系数均在1%的置信水平上显著为负,说明碳交易政策能够有效降低碳污排放的耦合度与协调度,能够强化碳污排放之间的协同关系,既满足了统计意义,也满足了经济意义。因此,由基准回归的结果可知,H1的假设得到验证,但仍需进一步检验其内生性与稳健性。

由于双重差分法很难解释样本选择偏误产生的内生性问题,本文采用Heckman两步法进行检验。首先,构建Probit模型,估计样本地区是否属于低碳地区的概率,并计算出每个样本的逆米尔斯概率值IMR,用于修正样本的自选择偏误;其次,在基准回归的基础上,将IMR值作为控制变量引入模型,估计DID变量的参数。表3的内生性检验结果显示,逆米尔斯概率值IMR均通过5%置信水平的显著性检验,意味着碳交易政策对碳污排放协同关系的影响存在样本选择偏误现象,即有必要采用Heckman两步法修正。此外,表3中列(6)、(8)的DID结果与基准模型的估计结果一致,并且其系数通过1%~10%置信水平的显著性检验,说明基准模型具有较好的稳健性。

2024年1月

表3 基准回归结果与内生性检验结果

Table 3 Benchmark regression results and endogeneity test results

	基准回归				内生性检验:Heckman 两步法			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
<i>DID</i>	-0.162*** (-3.164)	-0.137*** (-3.423)	-0.095*** (-3.138)	-0.085*** (-4.169)	-0.765* (-1.797)	-0.151** (-2.103)	-0.783* (-1.910)	-0.235*** (-2.862)
常数项	0.686*** (131.988)	-0.078 (-0.011)	0.569*** (185.194)	-3.545 (-0.939)	-6.138 (-0.345)	-0.246 (-0.034)	0.097 (0.006)	-3.144 (-0.821)
<i>IMR</i>						0.031 (0.274)		0.276** (2.068)
样本量	570	570	570	570	570	570	570	570
<i>R</i> ²	0.826	0.832	0.846	0.855		0.832		0.857
控制变量	no	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
个体固定效应	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
时间固定效应	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

注:括号中的值为*t*统计量,采用聚类-稳健标准误计算;*,**、***分别表示系数在10%、5%、1%的置信水平下显著。限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备索。

3.4 稳健性检验

3.4.1 安慰剂检验

为了避免政策实施后处理组和控制组趋势的变化受到其他政策的影响,保证政策效果的稳健性,借鉴宋弘等^[35]非参数置换检验的方法,估计虚构政策变量系数并判断其显著性,从而验证政策结果的稳健性。首先,从全样本中随机抽取7个地区作为“伪”处理组,构建虚拟*DID*变量;其次,根据虚拟*DID*变量估计参数;最后,采用Bootstrap的方法重复1000次上述过程,以避免发生小概率事件。由于虚拟*DID*变量是在全样本中随机抽样得到,原则上不会对被解释变量产生显著影响。图2a和图2b中横坐标是采用非参数置换检验后得到的*DID*估计系数,纵坐标为每一次估计结果对应的核密度值,散点为随机抽样的结果,符合正态分布曲线,说明安慰剂检验的结果均值显著为0。虚线为真实政策冲击下的政策效应,即表3中列(2)、(4)的*DID*系数,该线远离非参数置换检验系数的低尾分布区,说明基准回归结果通过安慰剂检验,即真实的碳交易政策冲击能够显著地降低碳污排放的耦合度和协调度水平,强化碳排放和污染排放之间的协同关系。

3.4.2 替换被解释变量

为了直观地显示碳交易政策产生的减污降碳效果并验证基准回归的稳健性,将耦合度*c*与协调度*d*替换成碳排放量($\ln\text{co}_2$)与二氧化硫排放量

($\ln\text{so}_2$),并估计*DID*系数的结果(图2c)。结果表明,碳交易政策能够显著地降低CO₂排放量,但无法显著地降低SO₂排放量,其系数分别为-0.229和-0.308。该结果表明碳排放与污染排放虽然在生产过程中具有同源性,但从两组数据的统计与计算方式看,碳排放偏重于生产的能耗投入,二氧化硫则是产出的体现,因此针对于低碳减排的碳交易政策能更显著地降低碳排放量,而并不能显著影响二氧化硫排放。

3.4.3 剔除同期相关政策

由于碳交易政策实施的样本期内,部分样本叠加了排污权交易政策的效果,为了保证基准模型的稳健性,采用更改碳交易政策时间窗口的方式,重新构建*DID*变量,以剔除同期相关政策的影响。鲁贺玉等^[7]、齐绍洲等^[36]认为2007年的排污权交易政策比2002年的更有效。因此,参考吴茵茵等^[31]的构造方式,将2013年碳交易政策与2007年排污权交易政策时间进行对齐,构建排污权交易政策的多期*DID*变量:当*i*为山东、山西、江苏、河南、上海、天津、浙江、河北、重庆、湖北、陕西、内蒙古、湖南时, $\text{treat}_{p,i}=1$,为处理组,下标*p*表示排污权交易政策;当*i*取其他地区时, $\text{treat}_{p,i}=0$,为控制组。当*t*≥2002且*i*为山东、山西、江苏、河南、上海、天津,或者当*t*≥2007且*i*为浙江、河北、重庆、湖北、陕西、内蒙古、湖南时, $\text{post}_{p,it}=1$;除此之外,其余

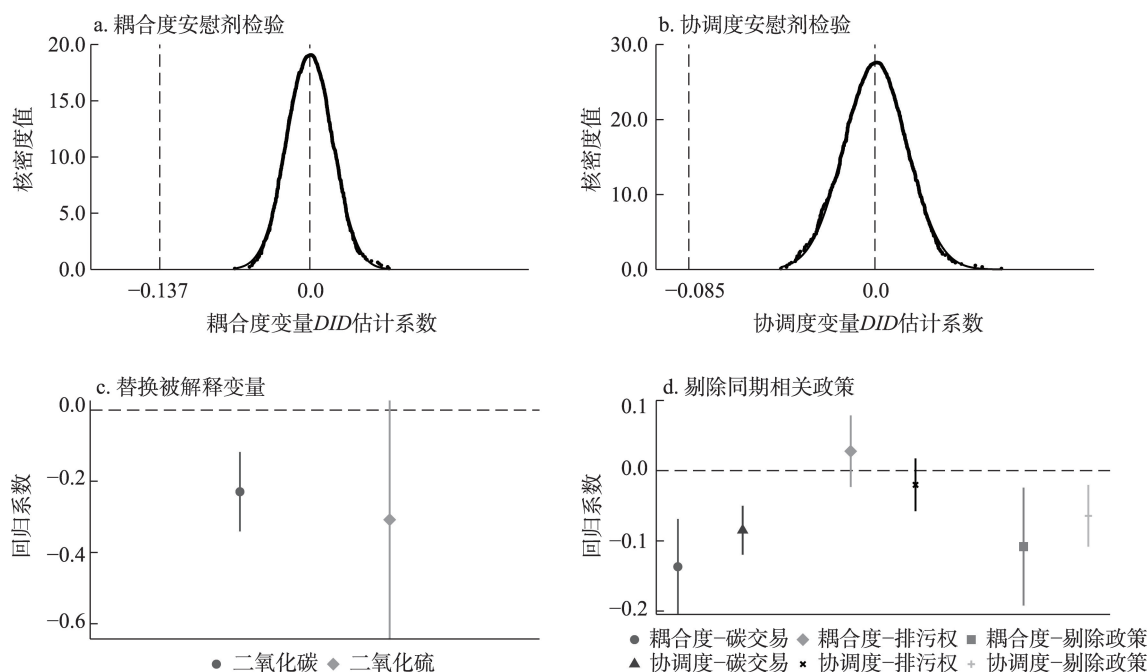


图2 稳健性分析结果

Figure 2 Results of robustness analysis

注:图中系数的置信区间为90%的置信度下计算的区间范围;限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备索。

$post_{p,ii}=0$ 。根据图2d可知,排污权交易政策对耦合度与协调度的影响系数分别为0.028与-0.020, DID系数均未通过显著性检验,而剔除同期排污权交易政策的干扰后, DID系数分别为-0.108和-0.065,均通过5%置信水平的显著性检验,说明当样本仅受到碳交易政策冲击时,碳污排放的耦合度与协调度受到抑制,CO₂和SO₂排放逐渐趋向“高水平耦合,优质协调”的协同关系,进一步验证了基准回归结果的稳健性。

3.5 异质性分析

3.5.1 区域异质性分析

本文认为由于区域经济发展差异,导致碳交易试点减污降碳效果存在异质性的现象,由于碳交易试点仅包括北京等7个地区,其余地区未受到碳交易政策冲击,因此本文的异质性对象仅为试点地区。借鉴吴茵茵等^[31]的方法,以福建作为参照对象,采用交乘项的方式估计并比较其他碳交易试点的减污降碳效果。由图3a和图3b可知,与福建相比,上海对碳污排放耦合度的影响最大(-0.289),其次为北京(-0.265),且均通过1%置信水平的显著性检验,而天津、广东、重庆、湖北与福建的减污降碳效果差异不大,均未通过显著性检验,而对碳污排放

协调度影响最大的地区为北京(-0.172),其次为上海(-0.158)、广东(-0.065),均通过1%~10%置信水平的显著性检验,而天津、湖北、重庆与福建无差异。其可能的原因主要包括两个方面:第一,北京、上海、广东3个碳交易试点启动时间早,碳市场构建相对完善,而其余地区起步相对较晚;第二,北京、上海、广东属于东部沿海发达地区,湖北与重庆属于中西部地区,两者在经济水平、产业结构、能源结构、技术进步等方面存在明显的差异,导致碳交易试点对碳污排放耦合度与协调度的影响存在区域差异特征。

3.5.2 碳排放与污染排放异质性分析

本文通过划分高(低)碳排放与高(低)污染的方式,判断碳交易试点对耦合度与协调度的影响是否存在异质性。由图3c可知,碳交易试点对低碳排放地区的耦合度与协调度都存在显著的降低作用(-0.152和-0.082),对高碳排放地区的影响也存在显著的抑制作用(-0.178和-0.125),均通过1%置信水平的显著性检验。由图3d可知,碳交易试点对低污染地区的碳污排放耦合度、协调度的抑制作用是显著的,其系数分别为-0.129和-0.076,且均在1%的置信水平上通过显著性检验,而在高污染地区仅

2024年1月

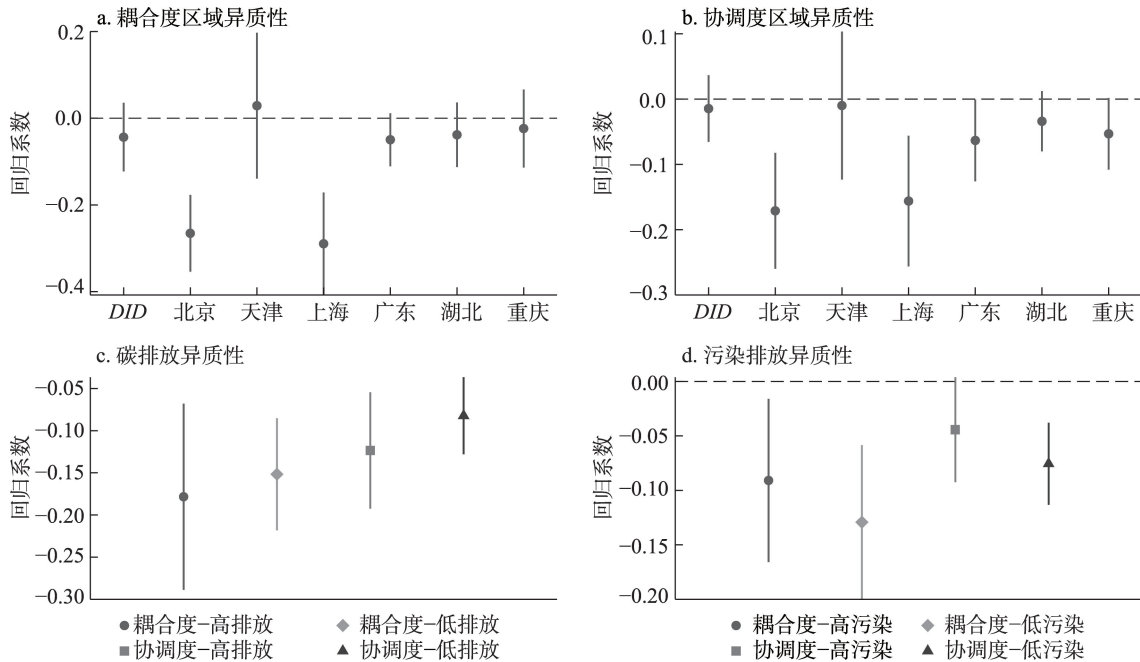


图3 异质性分析结果

Figure 3 Results of heterogeneity analysis

注:图中系数的置信区间为90%的置信度下计算的区间范围;限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备索。

对耦合度存在显著地抑制作用(-0.091),对高污染地区碳污协调度的抑制作用虽然未通过显著性检验,但其系数仍为负值。首先,由碳排放异质性可知,碳交易政策对碳污耦合度和协调度的影响,高碳排放地区的系数显著地低于低碳排放地区,这说明“降碳”过程具有趋同性,即碳排放越高,减排效果越明显,碳排放越低,减排的难度越大。其次,从污染排放的异质性可知,碳交易政策在低污染地区对碳污协同的影响比在高污染地区的影响更显著,这意味着碳交易政策虽然能产生“减污”效果,但其中存在其他相关政策的冲击,导致“减污”过程不具备趋同特征。最后,对比图3c和图3d的系数大小可知,碳交易政策对碳排放异质性的影响系数绝对值比对污染排放异质性的绝对值更大,说明碳交易政策的“降碳”效果相对高于“减污”效果,这进一步说明降碳是实现污染减排与资源节约的关键^[37]。

3.6 机制分析

为了进一步厘清碳交易市场的减污降碳协同机制,基于公式(2)的方法,引入4种碳市场工具——碳价格($\ln price$)、碳市场活跃度($\ln nonzero$)、碳市场规模($\ln scale$)、惩罚($punishment$),从产业结构

高级化(ES)、产业结构合理化(TL)、能源结构清洁化(EN)、绿色全要素生产率(MI)4个途径,讨论碳市场如何通过具体的政策工具对碳污排放耦合度和协调度产生影响。首先检验碳市场工具对作用机制的影响,然后再检验碳市场工具与作用机制交乘项对耦合度或者协调度的影响,具体回归结果如图4和图5所示^⑤。

3.6.1 产业结构效应

为了验证碳市场工具在减污降碳过程中的产业结构效应,本文从产业结构高级化(ES)和产业结构合理化(TL)两个层面进行论述。根据图4a和图5a的估计结果,仅碳价格能够显著提升产业结构高级化程度,而碳活跃度和碳市场规模仅能在经济意义上提高产业结构高级化程度,但4种政策工具均能够通过产业结构高级化,降低碳污排放的耦合度与协调度,从而实现减污降碳协同增效的目的,并且均能够通过1%~10%置信水平的显著性检验。图4b和图5b的结果表明,一方面碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模能够显著地降低产业结构合理化水平,缩小产业间差距,实现产业均衡发展的目的,另一方面碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模能够通

⑤ 由于惩罚工具 $punishment$ 与各项作用机制存在共线性现象,因此惩罚变量的机制分析仅考虑 $punishment$ 与作用机制交乘项的结果。

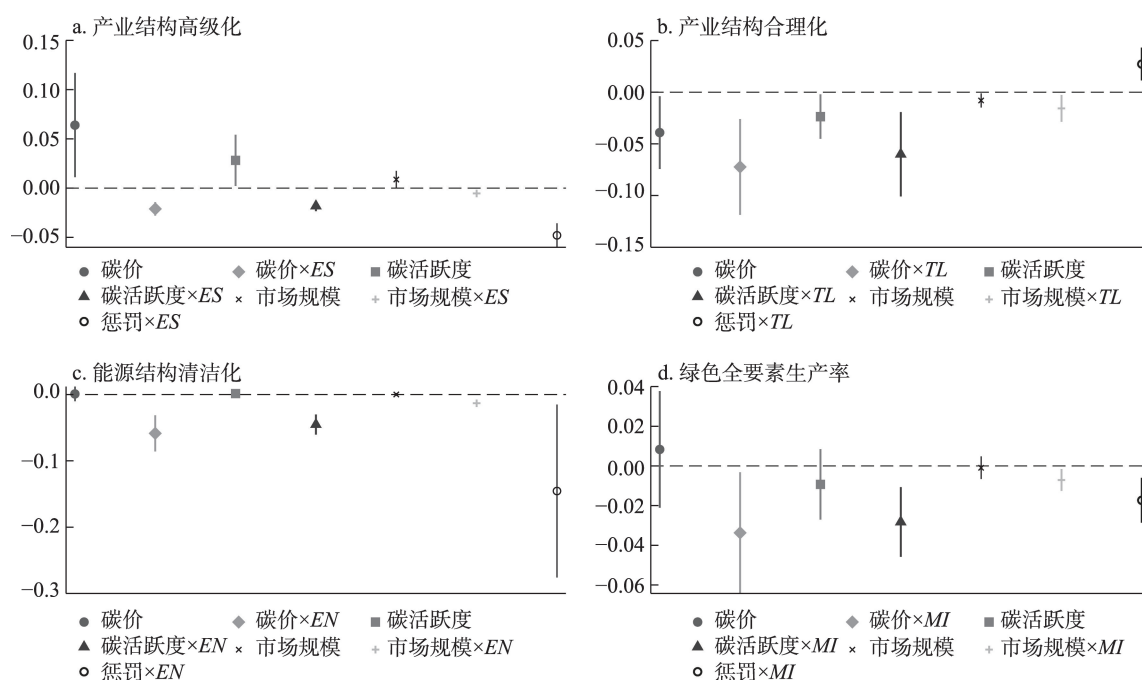


图4 碳市场工具减污降碳协同机制:耦合度分析

Figure 4 Synergistic mechanism of carbon market tools for pollution reduction and carbon emission reduction: analysis of coupling degree

注:图中系数的置信区间为90%的置信度下计算的区间范围;限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备案。

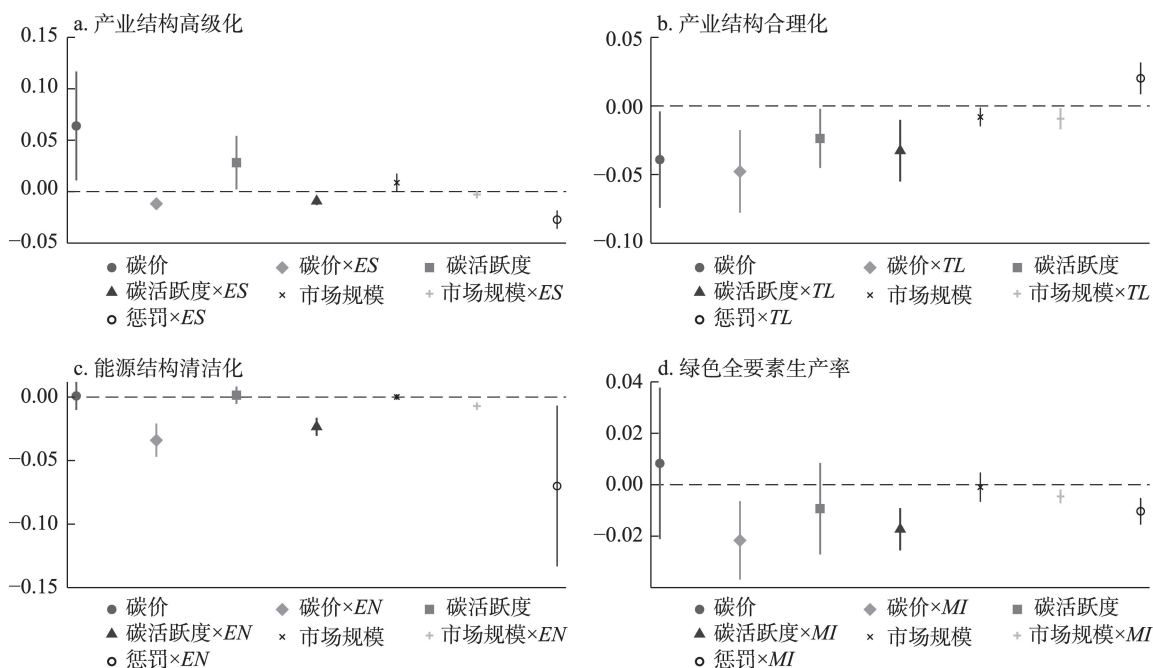


图5 碳市场工具减污降碳协同机制:协调度分析

Figure 5 Synergistic mechanism of carbon market tools for pollution reduction and carbon emission reduction: analysis of coordination degree

注:图中系数的置信区间为90%的置信度下计算的区间范围;限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备案。

过产业结构合理化的方式降低碳污排放的耦合度与协调度,进一步产生减污降碳的效果,其估计系数均能通过5%~10%置信水平的显著性检验。而碳

市场规模和惩罚工具并不能有效地通过产业结构合理化产生减污降碳效应。该结论部分验证了H2a的理论假设。

2024年1月

产业结构高级化的作用机制意味着碳交易政策工具直接影响了企业生产成本,约束了“高污染、高耗能”企业的生产行为,一方面促进企业通过技术创新的路径向更高附加值的产业转型,另一方面也逐步淘汰“高耗能-低附加值”的同行企业,改变原有产业结构,促进产业结构高级化^[38]。产业结构合理化则意味着碳交易政策工具推动了要素禀赋在各产业中分配合理化的过程,提高了生产资源的利用效率,避免了资源额外浪费的现象,进而减少能源消耗和污染排放,实现减污降碳的目的。但从政策工具的角度,不合理的碳交易政策工具也不利于实现减污降碳协同增效的目标。根据碳交易试点管理办法(试行)整理,惩罚方式主要包括经济惩罚、碳配额惩罚以及对第三方机构、碳交易所、行政部门人员的惩罚。其中,经济惩罚是以碳市场价的倍率法进行最高金额处罚,但是国内碳价在国际上缺乏竞争力,不仅缺乏信号形成机制,也没有体现与边际减排成本的关系^[39],这就导致国内碳市场的经济惩罚措施对企业很难形成有效的约束力^[40]。

3.6.2 能源结构效应

由图4c和图5c的结果可知,碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模和惩罚工具能够通过能源结构清洁化显著地降低碳污排放的耦合度和协调度,产生减污降碳效果,估计系数均在1%~10%的置信水平上通过显著性检验,验证了H2b的理论假设。但上述4种政策工具,无法显著地影响企业使用清洁能源。从能源消耗的角度,污染物与二氧化碳在排放上具有同根同源的特征^[41],因此在技术条件不变的前提下,企业既要满足生产需求,又要实现绿色低碳的目标,使用清洁能源成为最优选择。一方面决定企业使用清洁能源的因素在于清洁能源的价格与供求关系,而不是碳市场的政策约束,碳价格等低碳政策工具对企业而言只是增加使用清洁能源的可能性,另一方面,虽然国内清洁能源在消费端与生产端均有增长,但所占比例仍然不足。根据国家统计局公布数据,2022年中国清洁能源消费量占能源消费总量的25.9%,比2021年提高0.4%,清洁能源发电量为2.96万亿kW·h,比2021年增长8.5%^[42],因此发展清洁能源是实现中国绿色转型的重要措施,也是满足“降碳、减污、扩绿、增长”协同推进生态文明建设的要求。

3.6.3 技术进步效应

图4d和图5d的结果显示,碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模以及惩罚工具能够通过提升绿色全要素生产率显著地降低碳污排放的耦合度与协调度,改善其耦合协同关系,产生减污降碳效果,这验证了H2c的理论假设。但碳交易的具体政策工具无法显著地提高绿色全要素生产率。波特理论已经论证了技术进步在环境规制中的作用机制^[43,44],但忽略了具体措施产生的政策效果。一方面,碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模、惩罚工具受到现实中的具体约束,如国内碳价形成机制^[46]、碳配额分配方式^[46]等问题。另一方面,控排企业不仅需要通过碳交易的方式,降低绿色转型成本,更重要的是通过突破式的低碳技术实现减污降碳效果,关键路径是提高富有创新能力的超级发明家群体在企业中的占比^[47],即提高企业投入产出的生产前沿面,而不是改变企业的投入产出比例。

3.7 碳污协同分析

二氧化碳与污染物之间在排放上具有同根同源同过程、治理上具有同频同效同路径、管理上具有同时同步同目标的特征^[41],因此两者在因果推断的过程中可能存在反向因果关系,即由于污染排放衍生导致碳排放额外增加。本文选取滞后1阶的碳排放量对数值($L.\ln CO_2$)作为工具变量,采用两阶段最小二乘法估计碳排放与污染排放之间的协同关系,以消除内生性的影响。表4的结果显示,各机制过程的KP-LM统计量、CD-Wald F 统计量、KP-Wald F 统计量和Hansen J 统计量均大于其临界值,且在1%置信水平上通过显著性检验,拒绝原假设,即工具变量不存在识别不足、弱识别和过度识别的问题,说明工具变量具备有效性。根据第一阶段的结果, $L.\ln CO_2$ 的系数均在1%的置信水平上显著为正,说明工具变量与解释变量具备显著的相关性。第二阶段的结果显示, $\ln CO_2$ 的系数在1%~5%的水平上显著为正,说明在剔除内生性后,碳排放与污染排放具备较强的相关性,符合预期结果,这也为减污降碳提供了数据支撑。此外,4条路径中仅产业结构高级化和能源结构清洁化在1%的置信水平上通过显著性检验,其系数分别为-0.877和-1.582,而产业结构合理化与绿色全要素生产率的系数均未通过显著性检验,说明优化产业结构、发展清洁能源是目前实现减污降碳效果相对有效的措施,这也

表4 碳交易市场减污降碳协同机制结果

Table 4 Results of the synergistic mechanism of CET for pollution reduction and carbon emission reduction

	产业结构高级化ES		产业结构合理化TL		能源结构清洁化EN		绿色全要素生产率MI	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	第1阶段 lnco ₂	第2阶段 lnso ₂	第1阶段 lnco ₂	第2阶段 lnso ₂	第1阶段 lnco ₂	第2阶段 lnso ₂	第1阶段 lnco ₂	第2阶段 lnso ₂
L.lnco ₂	0.370*** (3.416)		0.397*** (3.584)		0.395*** (3.566)		0.399*** (3.563)	
lnco ₂		0.108 (0.624)		0.452** (2.557)		0.469*** (2.823)		0.483*** (2.747)
ES	-0.182*** (-3.456)	-0.877*** (-7.212)						
TL			0.052 (1.259)	0.003 (0.039)				
EN					0.739*** (2.646)	-1.582*** (-5.543)		
MI							-0.007 (-0.049)	-0.140 (-1.062)
常数项	-5.934* (-1.653)	-23.428*** (-2.909)	-11.889*** (-3.063)	-41.982*** (-4.222)	-11.456*** (-3.372)	-39.696*** (-4.227)	-10.470*** (-3.049)	-40.685*** (-4.212)
KP-LM值	55.350***		57.819***		61.036***		61.411***	
CD-Wald F值	87.050***		101.789***		109.313***		101.162***	
KP-Wald F值	11.672***		12.846***		12.714***		12.698***	
Hansen J值	0.000***		0.000***		0.000***		0.000	
样本量	540	540	540	540	540	540	540	540
R ²		0.961		0.954		0.957		0.954
控制变量	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
个体固定效应	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
时间固定效应	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

注:括号中的值为t统计量,采用稳健标准误计算;*,**、***分别表示系数在10%、5%、1%的置信水平下显著。限于篇幅,仅保留核心变量的估计结果,其余变量留存备案。

从侧面验证了H3的理论假设。而产业结构合理化和绿色全要素生产率虽然是实现减污降碳的重要途径,但现实中受到各方面的约束,导致产业间差异化程度以及绿色技术进步水平并没有发挥显著的减污降碳作用。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文以2003—2021年30个省份作为样本数据,通过计算碳排放与污染物之间的耦合协调度,以此衡量减污降碳的协同关系,并采用双向固定效应的双重差分模型,分析碳交易政策产生的减污降碳效果,并从产业结构效应、能源结构效应、技术进步效应3种作用机制分析碳交易政策中具体工具(碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模和惩罚工具)的减污降碳效应,进一步通过上述机制分析碳排放与污染物之间的内在联系。主要结论如下:

(1)碳交易政策能够显著地降低碳污排放之间的耦合度和协调度,产生减污降碳效果,并且逐渐趋向“高水平耦合与优质协调”的协同关系。该结论不仅通过平行趋势检验和内生检验,还通过非参数置换、替换被解释变量、剔除部分样本、剔除同期相关政策等方式的稳健性检验,证实了基准模型估计结果的稳健性。

(2)碳交易政策的减污降碳效应存在区域异质性和碳污排放异质性。一方面,区域异质性的结果表明碳交易政策对北京、上海、广东的碳污排放耦合度与协调度的影响大于天津、湖北、重庆、福建,说明地区在经济水平、产业结构、能源结构、技术进步等方面的差异性会影响碳交易试点的减污降碳效应,另一方面,碳污排放异质性的结果表明碳交易试点对碳排放相对较低地区碳污耦合度、协调度的影响更为显著,即碳交易试点的设定存在一定程

2024年1月

度的样本选择偏误。

(3)碳交易政策的减污降碳效应主要由碳价格、碳市场活跃度、碳市场规模、惩罚工具通过产业结构效应、能源结构效应和技术进步效应实现。各项政策工具也具有优化产业结构水平,降低产业间差异的作用,但无法提高技术水平,增加清洁能源使用。此外,碳排放与污染物之间的内在协同机制表明优化产业结构、发展清洁能源是目前实现减污降碳效果相对有效的措施,而产业结构合理化与技术进步仍未达到显著的水平。

4.2 政策建议

基于上述结论,针对中国碳排放与污染排放协同治理措施,提出以下3点政策建议:

(1)建立健全碳污协同治理体系,以避免多重环境规制政策加剧治理交易成本,制约企业生存空间现象。在建立碳污协同治理体系方面,政府可通过设立碳治理协调机构,集成各类环境规制措施,形成具有“统一大市场”特征的政策框架。同时,建立健全碳治理相关信息数据库,为企业提供更便捷的准入和遵从政策的渠道,降低企业因政策不明晰而增加的交易成本与处罚成本。此外,设立减污降碳奖励制度,对在碳排放控制、减污降碳技术创新等方面取得显著成绩的企业给予奖励,鼓励企业更积极地参与碳污协同治理。

(2)持续优化产业结构,发展清洁能源,提高绿色低碳技术和污染治理技术,淘汰落后产能,从根本上实现产业结构升级和能源结构转型的目的。为了推动产业结构升级,政府可以引导企业增加在清洁能源领域的研发投入,加强与高校和研究机构的合作,促进绿色低碳技术的创新与转化,加速技术在产业中的落地。在淘汰落后产能方面,加强对高耗能、高污染产业的监管,逐步实施严格的环保标准。同时,建立产业转型基金,为受淘汰影响的企业提供贷款和培训等支持,帮助其更顺利地完产业结构升级过程,减缓其在经济结构调整中可能面临的困难。

(3)扩大碳市场规模,完善碳市场政策工具,充分发挥市场机制作用,避免过度的行政干预。政府应当积极鼓励企业参与碳交易,通过建立碳交易示范项目,引导更多企业体验碳市场机制的运作,制定税收激励政策,扩大碳市场覆盖范围,促进企业积极参与碳交易,从而形成更为活跃的碳市场。此

外,为了完善碳市场政策工具,建议政府进一步细化并明确碳排放权的分配方式,根据企业实际情况和行业特点进行差异化处理。同时,建立碳市场信息平台,提供实时的碳市场信息,帮助企业更准确地制定碳排放管理策略。

参考文献(References):

- [1] 尚勇敏, 宓泽锋. 长三角低碳技术创新合作对绿色经济增长的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(10): 135-145. [Shang Y M, Mi Z F. Impact of low-carbon technology innovation cooperation in the Yangtze River Delta on green economic growth[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(10): 135-145.]
- [2] 马爱民, 曹颖, 付琳. 积极应对气候变化, 实现减污降碳协同增效[N]. 中国环境报, 2021-11-25(3). [Ma A M, Cao Y, Fu L. Actively respond to climate change and achieve synergies in pollution reduction and carbon reduction[N]. China Environment News, 2021-11-25(3).]
- [3] 任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对工业碳生产率的影响及传导机制[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5427-5437. [Ren X S, Ma Q, Liu Y J, et al. The impact of carbon trading policy on industrial carbon productivity and its transmission mechanism[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5427-5437.]
- [4] 何可, 朱信凯, 李凡略. 聚“碳”成“能”: 碳交易政策如何缓解农村能源贫困[J]. 管理世界, 2023, 39(12): 122-144. [He K, Zhu X K, Li F L. Accumulating carbon to form “Energy”: How can carbon trading policy alleviate rural energy poverty?[J]. Journal of Management World, 2023, 39(12): 122-144.]
- [5] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 121-133. [Lu M, Xu H, Chen F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the ‘dual carbon’ goals[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 121-133.]
- [6] 田嘉莉, 付书科, 刘萧玮. 财政支出政策能实现减污降碳协同效应吗[J]. 财政科学, 2022, (2): 100-115. [Tian J L, Fu S K, Liu X W. Can fiscal expenditure policy achieve synergistic effects of pollution reduction and carbon reduction?[J]. Fiscal Science, 2022, (2): 100-115.]
- [7] 鲁贺玉, 吴宗法. 用能权政策与能源消费结构低碳化转型的关系[J]. 资源科学, 2023, 45(6): 1181-1195. [Lu H Y, Wu Z F. Relationship between Energy-consuming Right Trading System and low-carbon transformation of energy consumption structure[J]. Resources Science, 2023, 45(6): 1181-1195.]
- [8] 宋德勇, 陈梁, 陈姚. 排污权交易如何提升企业能源效率? 微观机理与模式差异[J]. 经济管理, 2023, 45(10): 168-187. [Song D Y, Chen L, Chen Y. How emissions trading improve enterprise energy efficiency? Micro-mechanism and mode difference[J]. Business and Management Journal, 2023, 45(10): 168-187.]

- [9] 周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 546-556. [Zhou D, Zhou F N, Wang X Q. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 546-556.]
- [10] 胡珺, 黄楠, 沈洪涛. 市场激励型环境规制可以推动企业技术创新吗? 基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J]. 金融研究, 2020, (1): 171-189. [Hu J, Huang N, Shen H T. Can market-incentive environmental regulation promote corporate innovation? A natural experiment based on China's carbon emissions trading mechanism[J]. Journal of Financial Research, 2020, (1): 171-189.]
- [11] 李治国, 王杰, 赵园春. 碳排放权交易的协同减排效应: 内在机制与中国经验[J]. 系统工程, 2022, (3): 1-12. [Li Z G, Wang J, Zhao Y C. The synergistic emission reduction effect of carbon emissions trading: Internal mechanism and China's experience[J]. Systems Engineering, 2022, (3): 1-12.]
- [12] 熊航, 静峥, 展进涛. 不同环境规制政策对中国规模以上工业企业技术创新的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(7): 1348-1360. [Xiong H, Jing Z, Zhan J T. Impact of different environmental regulatory tools on technological innovation of Chinese industrial enterprises above designated size[J]. Resources Science, 2020, 42(7): 1348-1360.]
- [13] 邵桂兰, 林燕. 碳中和背景下环境规制、企业环境行为对碳排放影响实证研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2022, (2): 63-74. [Shao G L, Lin Y. Environmental regulation, corporate environmental behavior and carbon emissions[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2022, (2): 63-74.]
- [14] 斯丽娟, 曹昊煜. 排污权交易制度下污染减排与工业发展测度研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(6): 107-128. [Si L J, Cao H Y. Research on the measurement of pollution reduction and industrial development with the emissions trading institution[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2021, 38(6): 107-128.]
- [15] 蔡伟光, 刘奇琪, 李睿, 等. 碳排放“双控”背景下的建筑能耗总量省际分配: 基于公平与效率耦合的视角[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(11): 100-109. [Cai W G, Liu Q Q, Li R, et al. Provincial allocation of total building energy consumption in the context of “double control” of carbon emissions: A perspective from coupling of equity and efficiency[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(11): 100-109.]
- [16] 李智超, 刘少丹, 杨帆. 环保督察、政商关系与空气污染治理效果: 基于中央环保督察的准实验研究[J]. 公共管理评论, 2021, 3(4): 105-131. [Li Z C, Liu S D, Yang F. Environmental protection inspections, government-business relations, and the effects of air pollution governance: A quasi-experimental study based on central environmental protection inspections[J]. China Public Administration Review, 2021, 3(4): 105-131.]
- [17] 李珊珊, 赵超越. 用能权交易制度对企业低碳技术创新的驱动效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(10): 124-134. [Li S S, Zhao C Y. Driving effects of energy-consuming right transaction system on corporate low-carbon technological innovation[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(10): 124-134.]
- [18] 杜克锐, 欧阳晓灵, 郑泳薇. 环境规制是否促进我国城市的绿色经济增长?[J]. 统计研究, 2023, 40(12): 39-49. [Du K R, Ouyang X L, Zheng Y W. Does environmental regulation promote green economic growth of Chinese cities?[J]. Statistical Research, 2023, 40(12): 39-49.]
- [19] 涂正革. 降碳减污增效的协同研究: 基于SBM方法对高能耗企业的硫碳减排效率测度[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 62(5): 161-174. [Tu Z G. On the synergy of carbon reduction, pollution reduction and efficiency enhancement: Measurement of sulfur and carbon emission reduction efficiency for high energy consumption enterprises based on SBM model[J]. Journal of Central China Normal University (Humanities and Social Sciences), 2023, 62(5): 161-174.]
- [20] 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.]
- [21] 张超, 宋华盛. 环境规制与企业金融资产配置: 来自新《环保法》颁布的证据[J]. 当代财经, 2022, (3): 53-65. [Zhang C, Song H S. Environmental regulations and corporate financial assets allocation: Evidences from the promulgation of the new environmental protection law[J]. Contemporary Finance and Economics, 2022, (3): 53-65.]
- [22] 王巧, 余硕, 曾婧婧. 国家高新区提升城市绿色创新效率的作用机制与效果识别: 基于双重差分法的检验[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 129-137. [Wang Q, She S, Zeng J J. The mechanism and effect identification of the impact of National High-tech Zones on urban green innovation: Based on a DID test[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(2): 129-137.]
- [23] Sun L Y, Abraham S. Estimating dynamic treatment effects in event studies with heterogeneous treatment effects[J]. Journal of Econometrics, 2021, 225(2): 175-199.
- [24] 徐翔, 邹莎. 湖北省循环经济与绿色金融协调发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(12): 2504-2518. [Xu X, Zhou S. Research on coordinated development of circular economy and green finance in Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2504-2518.]
- [25] 廖文梅, 虞娟娟, 袁若兰. 脱贫攻坚与乡村振兴的耦合协同性: 基于不同时期脱贫县(市)的比较[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 132-142. [Liao W M, Yu J J, Yuan R L. Coupling synergy between poverty alleviation and rural revitalization: A comparison between poverty alleviation counties (cities) based on different time series[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(10): 132-142.]
- [26] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, (5): 4-16. [Gan C H, Zheng R G, Yu D F. An empirical study on the effects of industrial structure on

2024年1月

- economic growth and fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, (5): 4-16.]
- [27] 蒋金荷. 中国碳排放量测算及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 597-604. [Jiang J H. An evaluation and decomposition analysis of carbon emissions in China[J]. *Resources Science*, 2011, 33(4): 597-604.]
- [28] Färe R, Grosskopf S, Lindgren B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980-1989: A non-parametric Malmquist approach[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, 3(1): 85-101.
- [29] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA-A third pole of technical efficiency[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3): 1554-1563.
- [30] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004, (10): 35-44. [Zhang J, Wu G Y, Zhang J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000 [J]. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.]
- [31] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 等. 中国碳市场的碳减排效应研究: 基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. *中国工业经济*, 2021, (8): 114-132. [Wu Y Y, Qi J, Xian Q, et al. The carbon emission reduction effect of China's carbon market: From the perspective of the coordination between market mechanism and administrative intervention[J]. *China Industrial Economics*, 2021, (8): 114-132.]
- [32] 樊纲, 王小鲁, 朱恒鹏. 中国市场化指数: 各地区市场化相对进程 2006 年报告[M]. 北京: 经济科学出版社, 2007. [Fan G, Wang X L, Zhu H P. China market index: 2006 report on the relative progress of marketization by region[M]. Beijing: Economic Science Press, 2007.]
- [33] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016-2017[J]. *Scientific Data*, 2020, DOI: 10.1038/s41597-020-0393-y.
- [34] 韦倩, 王安, 王杰. 中国沿海地区的崛起: 市场的力量[J]. *经济研究*, 2014, 49(8): 170-183. [Wei Q, Wang A, Wang J. The rise of China's coastal areas: Power of market[J]. *Economic Research Journal*, 2014, 49(8): 170-183.]
- [35] 宋弘, 孙雅洁, 陈登科. 政府空气污染治理效应评估: 来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. *管理世界*, 2019, (6): 95-108. [Song H, Sun Y J, Chen D K. Assessment for the effect of government air pollution control policy: Empirical evidence from “low-carbon city” construction in China[J]. *Journal of Management World*, 2019, 35(6): 95-108.]
- [36] 齐绍洲, 林岫, 崔静波. 环境权益交易市场能否诱发绿色创新? 基于我国上市公司绿色专利数据的证据[J]. *经济研究*, 2018, 53(12): 129-143. [Qi S Z, Lin S, Cui J B. Do environmental rights trading schemes induce green innovation? Evidence from listed firms in China[J]. *Economic Research Journal*, 2018, 53(12): 129-143.]
- [37] 庄贵阳. 协同推进降碳减污扩绿增长[N]. *经济日报*, 2023-4-29 (6). [Zhuang G Y. Promoting carbon reduction, pollution control, green expansion and growth in coordination [N]. *Economic Daily*, 2023-4-29(6).]
- [38] 周迪, 罗东权. 绿色税收视角下产业结构变迁对中国碳排放的影响[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 693-709. [Zhou D, Luo D Q. Green taxation, industrial structure transformation, and carbon emissions reduction[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 693-709.]
- [39] 杨长江, 阎晓璇. 市场型碳减排政策的价格竞争力效应分析[J]. *财贸经济*, 2023, 44(10): 144-160. [Yang C J, Yan X X. Analysis of the price competitiveness effect of market-based carbon emissions reduction policies[J]. *Finance & Trade Economics*, 2023, 44 (10): 144-160.]
- [40] 张晗, 孟倩贤. 激励约束视角下中国碳市场的碳减排效应[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1759-1771. [Zhang H, Meng J X. Carbon emission abatement effect of China's carbon market from the perspective of incentives and constraints[J]. *Resources Science*, 2022, 44(9): 1759-1771]
- [41] 罗良文, 马艳芹. “双碳”目标下环境多元共治的逻辑机制和路径优化[J]. *学习与探索*, 2022, (1): 102-107. [Luo L W, Ma Y Q. The logical mechanism and path optimization of environmental pluralism and co-governance under the “dual carbon” goal[J]. *Study & Exploration*, 2022, (1): 102-107.]
- [42] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2023-02-28)[2023-05-09]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html. [National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development of the People's Republic of China in 2022 [EB/OL]. (2023-02-28)[2023-05-09]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.]
- [43] 郭进. 环境规制对绿色技术创新的影响: “波特效应”的中国证据[J]. *财贸经济*, 2019, 40(3): 147-160. [Guo J. The effects of environmental regulation on green technology innovation: Evidence of the porter effect in China[J]. *Finance & Trade Economics*, 2019, 40(3): 147-160.]
- [44] 赵明亮, 冯健康, 孙威. 环境规制影响资源型城市绿色全要素生产率的途径与政策建议[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(1): 186-204. [Zhao M L, Feng J K, Sun W. Ways and policy suggestions of environmental regulation on green total factor productivity in resource-based cities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(1): 186-204.]
- [45] 严良, 熊伟伟, 王小林, 等. 供需错配下能源替代路径优化[J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1655-1664. [Yan L, Xiong W W, Wang X L, et al. Energy substitution path optimization under supply and demand mismatch[J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1655-1664.]
- [46] 王文举, 陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究: 基于责任与目标、公平与效率的视角[J]. *管理世界*, 2019, (3): 81-98. [Wang W J, Chen Z L. Research on initial regional carbon quota allocation at the provincial level in China: From the perspective of responsibility and goal, equity and efficiency[J]. *Journal of Management World*, 2019, (3): 81-98.]
- [47] 何彦妮. 碳交易市场对企业创新策略的影响及作用机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(7): 37-48. [He Y N. Impact and mechanism of carbon trading market on firms' innovation strategies[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(7): 37-48.]

Synergetic effect of China's carbon market policies on pollution reduction and carbon reduction

LUO Liangwen, LEIZHU Jiahua

(School of Economics, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

Abstract: [Objective] Facing the target constraints of “carbon peak and carbon neutrality”, this paper discusses the impact of different carbon trading policy tools on the effect of pollution reduction and carbon reduction, and provides theoretical basis for the green and low-carbon transformation of regional economy. [Methods] Based on the data of 30 provinces in China's mainland from 2003 to 2021, this study constructed a coupling coordination model incorporating CO₂ and SO₂, and applied a two-way fixed-effects difference-in-differences model to analyze the pollution reduction and carbon emission reduction effects of carbon trading policies and their mechanisms. Furthermore, we explored the pollution reduction and carbon emission reduction effects of carbon market policy tools. [Results] The results show that: First, carbon trading policies significantly reduced the coupling and coordination degree between carbon emissions and environmental pollution, resulting in pollution reduction and carbon emission reduction, and gradually tended towards a collaborative relationship of “high-level coupling and high-quality coordination”. Second, the results of heterogeneity test show that the impact of carbon trading policy on the coupling degree and coordination degree of carbon emissions and pollution in Beijing, Shanghai, and Guangdong was greater than that in Tianjin, Hubei, Chongqing, and Fujian, and the impact on the coupling degree and coordination degree of carbon emissions and pollution in areas with relatively low carbon emissions was more significant. Meanwhile, the carbon reduction effect of carbon market policy was higher than that of pollution reduction. Finally, the pollution reduction and carbon emission reduction effects of carbon trading policies were mainly realized by carbon prices, carbon market activity, carbon market size, and punishment tools through the impact of industrial structure, energy structure, and technological progress. Various policy tools also had the effect of optimizing industrial structure, as well as reducing differences between industries, but they did not significantly improve the cleanliness level of energy structure and promote the level of green technology innovation. [Conclusion] In order to achieve a win-win situation of synergetic control of environmental pollution and carbon emissions, it is necessary to take the following measures: Establishing and improving a collaborative control system for carbon emissions and environmental pollution, improving green low-carbon technologies and pollution control technologies, achieving industrial structure upgrading and energy structure transformation, expanding the carbon market scale, and improving carbon market policy tools.

Key words: carbon emissions trading market; pollution and carbon reduction; synergetic effect; policy tool; coupling coordination degree; China