

中国城市减碳降霾的 协同效应分析

刘 杰 刘紫薇 焦珊珊 王 丽 唐智亿

摘 要 发挥减碳降霾的协同效应有助于更加有效地推进中国经济低碳化和绿色化发展，为生态文明建设和全球生态安全作出贡献。由于二氧化碳减排和大气 $PM_{2.5}$ 浓度控制存在双向因果关系，协同效应评估有必要将二者纳入一个分析框架。作者利用脱钩弹性指数测算中国城市减碳降霾的协同趋势，并基于中国 2000—2015 年省会城市面板数据构建联立方程模型对二者的协同效应进行定量评估。从协同趋势角度看，中国大多数省会城市处于从高碳、高 $PM_{2.5}$ 排放模式向低碳、低 $PM_{2.5}$ 排放模式转型过程中，但城市低碳转型与 $PM_{2.5}$ 治理呈现不协调特征。从协同效应测算结果看，二氧化碳减排与大气 $PM_{2.5}$ 浓度控制存在显著正向协同效应，并表现出空间和时间上的异质性。提升城市低碳发展水平、发挥技术创新和政策规制的有效作用是进一步提升城市减碳降霾协同效应的有效途径。

关键词 城市 二氧化碳减排 大气 $PM_{2.5}$ 浓度 协同效应

【中图分类号】F06 【文献标识码】A 【文章编号】2095 - 851X (2019) 04 - 0080 - 18

一、引言

“十三五”期间（2016—2020 年）中国需要重点应对减缓气候变化和大气污染

【基金项目】中央高校基本科研业务费专项资金项目“陕西关中城市群雾霾治理绩效的测度及提升路径研究”（批准号：18SZYB20）；陕西省社会科学基金项目“陕西贫困农村适应气候变化与精准扶贫协同政策设计研究”（批准号：2017D004）；西安市社会科学规划基金项目“西安市雾霾治理绩效评价及对策研究”（批准号：18F56）。

【作者简介】刘杰（1985 -），陕西师范大学国际商学院讲师，邮政编码：710119；刘紫薇（1998 -），陕西师范大学国际商学院本科生，本文通讯作者；焦珊珊（1999 -）陕西师范大学国际商学院本科生；王丽（1986 -），西安市气象局工程师，邮政编码：710016；唐智亿（2000 -），西安交通大学航天学院本科生，邮政编码：710049。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

治理两个重大挑战，大力推进低碳经济、绿色经济发展，建设美丽中国，为全球生态安全作出贡献。在《巴黎气候协定》中，中国国家自主贡献（Nationally Determined Contributions, NDCs）温室气体减排方案明确提出了2020年碳排放强度相较于2005年下降40%~45%的目标，承诺于2030年左右实现碳排放达峰且碳排放强度相较于2005年下降60%~65%。2018年7月中国制定的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》提出，经过三年努力，大幅减少主要大气污染物排放总量，协同减少温室气体排放，进一步明显降低细颗粒物（PM_{2.5}）浓度，明显改善环境空气质量，明显增强人民的蓝天幸福感。由于二氧化碳和大气污染物主要来源于传统化石能源的燃烧，表现为同源性特征（郑佳佳等，2015）。因此，在减少二氧化碳排放的同时也能够减少PM_{2.5}等大气污染物的排放。定量研究中国城市减少碳排放与大气污染物控制的协同效应（Co-effects），可以为中国城市的“减碳降霾”提出针对性政策建议。

国内外关于协同效应的研究文献中，为强调其经济货币内涵，部分文献又称之为协同效益（Co-benefits）。协同效益一词最早出现在政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）发布的第三次评估报告中，其定义为减缓温室气体排放的政策所产生的非气候效益，并且这些效益是明确地包含在最初制定的减缓排放政策之中（IPCC, 2001）。经济合作与发展组织（Organization of Economic Cooperation and Development）指出，协同效益是除了直接的气候影响效益以外，气候变化减缓政策还会产生其他广泛而深入的效益，例如针对清洁能源技术或提高能效的政策很可能使地方局部或室内空气质量改善，从而降低人体健康风险（Bollen et al., 2009）。中国原环境保护部环境与经济政策研究中心相关研究认为，协同效应包括两方面内容，一方面，在控制温室气体排放的过程中减少了其他局域污染物排放；另一方面，控制局域污染物排放以及生态建设过程同时也可以减少或者吸收温室气体排放（李丽平等，2012）。现有研究文献对协同效应的定义主要集中于减缓气候变化政策带来的各种附加收益，并且这种效益一般是单向的。

二、协同效应方法论研究进展

从20世纪70年代开始，国内外已有大量文献对减缓气候变化和大气污染治理的协同效应进行了研究。按照研究方法分类，现有研究主要采用定性分析方法、大气环境模型、计量经济学模型、综合评估模型等分析方法开展区域、城市以及行业层面的协同效应分析。

在定性探讨方面，杨曦等（2013）从协同效益的概念出发，分析了国内外关于温室气体减排政策对于减少环境污染、提高人类健康效益和社会福利协同效益研究现状，并指出未来应利用混合模型分析提高协同效益的区域优化政策。Puppim de Oliveira等（2013）则对亚洲各城市关于协同效益的研究成果进行了述评，不仅详细说明了废物管理、运输和建筑以及工业等部门实现协同效益的重要性，而且与新兴的

绿色经济联系起来,并论证了协同效益对解决当地环境质量和全球碳排放的作用。2019年,《美国科学院院刊(PNAS)》发表了安芷生研究团队关于中国北方重霾形成机制的综述论文,指出人为排放与大气过程之间的相互协同效应是重霾形成和发展的关键,其中北极海冰融化、青藏高原地形地貌、厄尔尼诺等因素也通过改变东亚季风及中高层西风环流等气候背景影响重霾事件发生(An et al., 2019)。

在大气环境模型研究方面,中国科学院大气物理研究所已有研究指出,全球气候变暖导致北极海冰减少,这显著加剧了中国东部霾污染天气,将温室气体排放与大气污染紧密联系起来(Wang et al., 2015)。另一项近似研究也发现,全球气候变暖造成北极海冰减少与欧亚降雪增加进一步改变了区域大气环流结构,进而加剧了近几年中国冬季严重空气污染问题(Zou et al., 2017)。来自工业与机动车排放的空气污染物在冬季不能通过水平扩散或垂直混合得到有效清除,空气污染物持续累积并最终造成2013年1月中国区域严重雾霾污染事件的发生。在未来气候变暖背景下,Cai等(2017)进一步指出,温室气体排放造成的全球气候变暖将增加北京市未来冬季雾霾污染发生的频率和持续时间。可见,运用大气环境模型研究气候变化与大气污染的相关文献侧重于温室气体排放与大气污染物相互关系的物理机理分析,但对协同效应缺乏定量研究。

在运用计量经济学模型和综合评估模型研究协同效应方面,严雅雪(2017)基于中国29个省份的面板门槛回归模型证实了碳排放与雾霾污染的显著协同关系,特别实证研究了城市化水平对碳排放与雾霾污染协同关系的影响存在门槛效应。Anenberg等(2012)使用气候综合评估模型模拟温室气体减缓措施对室外 $PM_{2.5}$ 和臭氧的浓度的影响,并使用流行病学推导浓度响应函数计算 $PM_{2.5}$ 和臭氧相关过早死亡的相关变化,实施甲烷和黑碳排放控制措施可以将全球人口加权平均 $PM_{2.5}$ 和臭氧浓度降低,并减少全球死亡人数。Rafaj等(2013)基于温室气体和空气污染相互作用及协同作用模型(Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies Model, GAINS模型)发现全球温室气体减排政策可以减少全球以及欧盟、中国、印度和美国区域传统空气污染物(SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$)排放水平。Xie等(2018)基于动态综合气候经济模型(Dynamic Integrated Climate Economy, DICE)探讨二氧化碳减排对减少氮氧化物排放的共同效益,在减排政策情景中减少二氧化碳排放可同时减少至少15%的 NO_x 排放量。Fang等(2019)耦合跨区域投入产出模型和大气化学传输模型,研究发现大气污染、碳减排和水资源节约可以通过环境要素耦合管理模型(Nexus Management Model)实现协同治理。计量经济学模型和综合评估模型建立在经济学理论基础之上,对多因素、多层次的复杂问题应用效果较好,能够科学量化减缓气候变化与大气污染治理政策之间的协同效应。

在其他分析方法方面,覃小玲(2012)基于情景分析法研究了气候变化减排政策对大气污染物排放的影响,也研究了大气污染控制政策对温室气体排放的影响,证明二者之间存在协同效应,并提出深圳市未来温室气体减排和大气污染物控制的政策建议。李丽平等(2010)基于分类式污染减排的协同效应评价方法研究了攀枝花市、湘潭市

污染减排的协同效应，不同污染物减排技术和措施对减缓全球温室气体排放既有正效益也有负效应，但总体上有显著的正协同效益。Shih 和 Tseng (2014) 使用系统动力模型与情景分析法，对可再生能源政策与提高能效政策进行了成本-效益评价，并指出在两者综合实施情境下，温室气体和大气污染排放都有一定程度的减少。Xu 等 (2017) 利用结构分解分析方法研究了中国能源消耗对空气污染物排放的影响，结果指出能源强度对空气污染物排放有很大的抑制作用，与经济增长相关的因素大大增加了空气污染物排放。

综上所述，关于温室气体减排与大气污染治理协同效应的国内外研究主要围绕两个方面展开：(1) 区域大气污染减排导致温室气体减排的协同；(2) 温室气体减排导致区域大气污染减排的协同。与温室气体减排的长期收益相比，短期内比较容易实现减少大气污染物排放的收益，例如污染物减排产生的健康效益和额外的生态效益。鉴于温室气体减排政策实施的全部或部分成本将与政策附带的效益抵消，使得第二类研究方向目前受到更多关注。必须注意的是，减缓气候变化与大气污染治理存在双向关联性，即二者存在内生性。协同效应评估需要将二者纳入一个分析框架之中，定量分析二者的相互影响机制。基于以上原因，本文将从二氧化碳减排与大气 PM_{2.5} 浓度控制的双向作用机制出发，定量分析中国城市减碳降霾的协同趋势与协同效应，以及影响城市减碳降霾协同效应的关键因素。

三、变量选取与数据说明

(一) 被解释变量

为研究二氧化碳减排与 PM_{2.5} 浓度控制之间的协同效应，本文选取二氧化碳排放量(吨/年)与大气 PM_{2.5} 浓度(微克/立方米)分别作为被解释变量。中国现有城市碳排放数据存在着不确定性，本文以万德数据库中 30 个省会城市 2000 年至 2015 年城市能源消费数据为基础，根据公式 (1) 计算城市 CO₂ 排放量：

$$c = \sum_{i=1}^{16} e_i \times \lambda_i \quad (1)$$

其中， c 为 CO₂ 排放量， e_i 为第 i 种基础能源消耗量， λ_i 第 i 种基础能源消耗量所对应的排放系数(见表 1)， i 为基础能源消耗量的种类。基于 2000—2014 年数据进行多项式外推差值计算得到部分省会城市 2015 年碳排放数据缺失值。

在大气污染物组成成分中，PM_{2.5} (粒径在 2.5 微米以下的细微颗粒物) 和 PM₁₀ (粒径在 10 微米以下的可吸入颗粒物) 是加重大气污染的主要来源。PM_{2.5} 相较于 PM₁₀ 粒径更小、活性更强、易附有毒有害物质，对人体的伤害更大。因此，空气中的 PM_{2.5} 浓度已成为衡量大气污染程度的重要表征指标。由于中国城市 PM_{2.5} 统计数据始于 2013 年，样本数据量较少，因此本文综合选取了美国哥伦比亚大学国际地球科学

表1 二氧化碳排放系数

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数	二氧化碳排放系数
原煤	20 908 kJ/kg	0.714 3 kgce/kg	1.900 3 kg CO ₂ /kg
焦炭	28 435 kJ/kg	0.971 4 kgce/kg	2.860 4 kg CO ₂ /kg
原油	41 816 kJ/kg	1.428 6 kgce/kg	3.020 2 kg CO ₂ /kg
燃料油	41 816 kJ/kg	1.428 6 kgce/kg	3.170 5 kg CO ₂ /kg
汽油	43 070 kJ/kg	1.471 4 kgce/kg	2.925 1 kg CO ₂ /kg
煤油	43 070 kJ/kg	1.471 4 kgce/kg	3.017 9 kg CO ₂ /kg
柴油	42 652 kJ/kg	1.457 1 kgce/kg	3.095 9 kg CO ₂ /kg
液化石油气	50 179 kJ/kg	1.714 3 kgce/kg	3.101 3 kg CO ₂ /kg
炼厂干气	46 055 kJ/kg	1.571 4 kgce/kg	3.011 9 kg CO ₂ /kg
油田天然气	38 931 kJ/m ³	1.330 0 kgce/m ³	2.162 0 kg CO ₂ /m ³

资料来源：上表第2、3列来源于《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2008），第4列来源于《省级温室气体清单编制指南》（发改办气候〔2011〕1041号）。

信息网络中心（Columbia University Center for International Earth Science Information Network, CIESIN）公布的PM_{2.5}浓度统计数据以及国内统计年鉴统计的PM_{2.5}浓度数据。另外需要说明的是，已有学者研究证实哥伦比亚大学利用卫星搭载设备对气溶胶光学厚度（Aerosol Optical Depth）进行测定得到的PM_{2.5}数据与生态环境部公布的数据基本一致（白俊红、聂亮，2017），因而具有较高的可信度。

（二）解释变量

基于已有相关研究文献，本文综合考虑影响二氧化碳和大气PM_{2.5}排放的社会、经济、技术、政策以及自然因素，选择的解释变量有人口数量（*popu*）、经济发展水平（*pgdp*）、产业结构（*indus*）、能源结构（*ener*）、城市化水平（*urban*）、技术进步（*tech*）、环境规制（*policy*）、城市交通（*trans*）以及气候因素（*prep*）。这些解释变量两两相关系数计算结果表明，人口数量与城市交通相关系数为0.672，经济发展水平与环境规制的相关系数为0.671，绝大多数相关系数均小于0.5，表明解释变量之间不存在严重多重共线性问题（见表2和表3）。

（1）人口数量。IPCC第五次评估报告指出，人口增长和经济发展是温室气体排放增加的两大驱动因子。人类活动也是城市大规模扩张、能源消耗快速增加的主要原因。为了分析城市人口数量对碳排放与PM_{2.5}浓度的影响，本文选取城市人口总量作为人口规模的表征指标。

（2）经济发展水平。城市经济生产活动需要消耗各类能源，产生碳排放与PM_{2.5}。为衡量经济发展对城市碳排放与PM_{2.5}浓度协同控制的影响，本文选择城市人均国内生产总值作为经济发展水平的测算指标，并以2000年为基准年，利用GDP平减指数对历年的人均国内生产总值进行了调整，得到各省会城市的实际人均国内生产总值。

（3）产业结构。产业结构调整会引起能源消耗总量及结构发生改变，进而影响

碳排放量。中国仍处于工业化后期阶段，经济发展表现出显著的区域性特征，工业化程度的差异对城市碳排放与 PM_{2.5}浓度的影响程度不同。本文用城市第二产业产值占国内生产总值的比重作为城市工业化水平的表征指标。

表 2 变量数据说明

变量	含义	指标	单位	数据来源
碳排放	二氧化碳排放总量	<i>carb</i>	吨/年	万德数据库
大气污染物	PM _{2.5} 浓度	<i>pm</i>	微克/立方米	美国哥伦比亚大学国际地球科学信息中心;中国城市统计年鉴
人均 GDP	人均国内生产总值	<i>pgdp</i>	万元/人	中国城市统计年鉴
产业结构	第二产业产值/GDP	<i>indus</i>	%	中国城市统计年鉴
能源结构	煤炭消费量/能源消费总量	<i>ener</i>	%	中国城市统计年鉴
人口	城市年末总人口	<i>popu</i>	万人/年	中国城市统计年鉴
城市化水平	城镇人口/年末总人口	<i>urban</i>	%	中国城市统计年鉴
技术进步	技术市场成交额	<i>tech</i>	万元	中国城市统计年鉴
政策	废气治理投资总额	<i>policy</i>	万元/年	中国城市统计年鉴
交通	年末实有城市道路面积	<i>trans</i>	万平方米/年	中国城市统计年鉴
降雨量	年平均降水量	<i>prep</i>	毫米	中国城市统计年鉴

资料来源：作者整理。

表 3 变量数据统计描述

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>carb</i>	4357.0750	3863.5920	461.6194	28936.8200
<i>pm</i>	49.0723	24.4527	8.7506	154.0000
<i>pgdp</i>	3.7001	2.4348	0.5215	14.8966
<i>indus</i>	43.4838	7.6687	19.3000	60.1000
<i>ener</i>	65.7241	22.1082	12.1449	151.4223
<i>popu</i>	799.8410	593.5533	83.0300	3130.0000
<i>urban</i>	58.8092	16.2662	23.9900	93.0000
<i>tech</i>	744777.2000	3146052.0000	159.4132	34538855.0000
<i>policy</i>	57630.9800	77592.3400	129.7000	471487.1000
<i>trans</i>	4173.9320	3440.8750	384.0000	21490.0000
<i>prep</i>	894.9792	521.8489	74.9000	2678.9000

资料来源：作者计算。

(4) 能源结构。煤炭是一次能源，不清洁的煤炭燃烧会造成大量的碳排放和严重的环境污染。陈强等(2017)的研究表明，中国北方冬季燃煤供暖是雾霾污染形成及加剧的重要原因。2017—2018年冬季，中国北方多个城市通过限制煤炭燃烧或“煤改气”的形式来治理大气污染。本文将城市煤炭消耗量占能源消费总量的比重作为

能源结构的指标变量,以分析能源结构变化对碳减排和 $PM_{2.5}$ 浓度控制协同效应的影响。

(5) 城市化水平。城市化水平的提高实际上是居民整体生产与消费水平的提高。在中国城市化进程中,城镇规模不断扩张,建筑扬尘增加,机动车数量快速增加都将导致能源消耗和碳排放增加。本文拟用城市常住人口数量占总人口的比重作为城市化水平的测度指标。

(6) 技术进步。绿色技术创新是实现碳排放与大气污染减排的有效手段。为了探究中国城市的技术创新水平对碳减排和 $PM_{2.5}$ 浓度控制协同效应的影响,本文用城市技术市场成交额代表各省会城市的技术创新水平。

(7) 环境规制。政府环境规制是有效减少碳排放和大气污染物排放的有效手段,包括节能减排政策、环境税政策、机动车限行政策等。为了分析环境规制强度对城市碳减排与大气污染治理协同效应的影响,本文引入城市大气污染治理投资总额作为环境规制强度的表征指标。城市投入的环境污染治理投资额越多,相应的治理设施越完善,大气污染物排放量越少。

(8) 城市交通。交通车辆尾气排放是 $PM_{2.5}$ 的重要来源,机动车数量变化对不同经济发展水平的城市大气污染程度影响差异显著。为减少解释变量存在内生性的可能性,城市交通发展水平用年末实有城市道路面积表示。

(9) 气候因素。城市气候条件的差异对大气污染程度有显著影响,比如中国冬半年的重度雾霾污染多发生于空气相对干燥的京津地区,而空气相对湿润的珠三角地区的雾霾污染程度则相对较轻。本文拟加入城市年平均降雨量分析气候因素对城市大气污染物排放的影响。

四、结果分析

(一) 中国城市碳减排与 $PM_{2.5}$ 浓度控制的协同性分析

国际上通常用“脱钩弹性”(Decoupling Elasticity)来反映经济增长与物质消耗不同步变化的事实。本文根据公式(2)和(3)分别计算中国30个直辖市和省会城市的二氧化碳与 $PM_{2.5}$ 排放的脱钩指数。二氧化碳排放的脱钩指数 η_{CO_2} 表示城市经济增长过程中二氧化碳排放变化趋势。 $PM_{2.5}$ 排放的脱钩指数 $\eta_{PM_{2.5}}$ 表示城市经济增长过程中 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势。

$$\eta_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2}{\Delta gdp} \times \frac{gdp}{CO_2} \quad (2)$$

$$\eta_{PM_{2.5}} = \frac{\Delta PM_{2.5}}{\Delta gdp} \times \frac{gdp}{PM_{2.5}} \quad (3)$$

依据不同脱钩弹性值,将中国城市二氧化碳排放与经济发展水平的关系划分为负脱钩($\eta > 1$,高碳)、相对脱钩($0 < \eta < 1$,相对高碳)、弱脱钩($-1 < \eta < 0$,相对低碳)、强脱钩($\eta < -1$,低碳)四种状态。同理,中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度与经济发展水平的关系也可

以划分为负脱钩 ($\eta > 1$, $PM_{2.5}$ 高排放)、相对脱钩 ($0 < \eta < 1$, $PM_{2.5}$ 相对高排放)、弱脱钩 ($-1 < \eta < 0$, $PM_{2.5}$ 相对低排放)、强脱钩 ($\eta < -1$, $PM_{2.5}$ 低排放) 四种状态 (见表4)。

表4 中国30个直辖市和省会城市 CO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放脱钩特征

城市	指标	2001—2006年	2007—2012年	2013—2015年
北京市	CO_2	负脱钩	强脱钩	强脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
天津市	CO_2	相对脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
石家庄市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
太原市	CO_2	负脱钩	强脱钩	强脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
呼和浩特市	CO_2	负脱钩	强脱钩	强脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
沈阳市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	负脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
长春市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	$PM_{2.5}$	负脱钩	相对脱钩	弱脱钩
哈尔滨市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
上海市	CO_2	负脱钩	弱脱钩	强脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
南京市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
杭州市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
合肥市	CO_2	负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
福州市	CO_2	负脱钩	弱脱钩	强脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
南昌市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
济南市	CO_2	负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	弱脱钩	弱脱钩
郑州市	CO_2	负脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
武汉市	CO_2	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	$PM_{2.5}$	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩

续表

城市	指标	2001—2006年	2007—2012年	2013—2015年
长沙市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	负脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
广州市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
南宁市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	负脱钩	相对脱钩	强脱钩
海口市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
重庆市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	相对脱钩	弱脱钩
成都市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
贵阳市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
昆明市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
西安市	CO ₂	相对脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
兰州市	CO ₂	负脱钩	弱脱钩	强脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	弱脱钩	强脱钩
西宁市	CO ₂	相对脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	PM _{2.5}	相对脱钩	相对脱钩	强脱钩
银川市	CO ₂	弱脱钩	相对脱钩	负脱钩
	PM _{2.5}	弱脱钩	相对脱钩	弱脱钩
乌鲁木齐市	CO ₂	负脱钩	相对脱钩	相对脱钩
	PM _{2.5}	弱脱钩	相对脱钩	强脱钩

资料来源：作者计算。

2001—2015年中国30个直辖市和省会城市低碳发展水平变化规律表明（见图1），二氧化碳排放增长与经济增长整体呈现从相关到脱钩的趋势。从2001年到2006年，30个城市的二氧化碳脱钩弹性指数类型主要为相对脱钩或负脱钩，没有明确的空间分布格局，例如负脱钩城市既包括东部的北京、上海、合肥、福州和济南，中部的呼和浩特和郑州，还包括西部的兰州和乌鲁木齐。从2007年到2012年，逐步过渡为相对脱钩和弱脱钩，少数城市还出现了强脱钩现象，其中2006年之前的负脱钩城市大部分转化为弱脱钩状态，还有其余一部分迅速转化为强脱钩状态，空间分布格局仍不明显。从2013年到2015年，二氧化碳脱钩指数的四种类型趋于均衡，强脱钩城市不断增多。另外，中国城市低碳发展水平也呈现明显的地区差异。低碳发展水平较高的城市包括北京、上海、兰州和太原（均为强脱钩状态）等。低碳发展水平较低

的城市分布在湘赣鄂地区（长沙、南昌和武汉）、陕甘宁地区（西安、银川）以及黔桂滇地区（贵阳、南宁和昆明）。

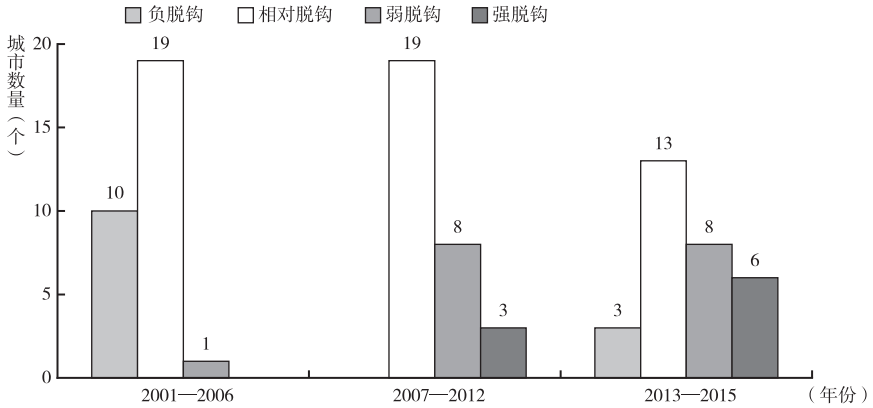


图1 CO₂ 脱钩指数类型与城市个数

资料来源：作者绘制。

2001—2015年中国30个直辖市和省会城市PM_{2.5}排放脱钩水平变化规律表明（见图2），PM_{2.5}排放增长与经济增长也经历了从相关到脱钩的过程，且与二氧化碳脱钩弹性指数的变化相比，趋势更为明显，变化更为显著。从2001年到2006年，PM_{2.5}脱钩弹性指数状态以相对脱钩为主，少数城市处于负脱钩（长春、南宁）和弱脱钩（银川、乌鲁木齐）状态。从2007年到2012年，相对脱钩和弱脱钩成为中国城市的主要状态，但是两种状态在东部地区、中部地区、西部地区均有分布，空间格局并不明显。从2013年到2015年，所有城市都转化为弱脱钩和强脱钩，且强脱钩城市个数超过所有城市个数的三分之二。从2001年至2015年，PM_{2.5}排放增长与经济增长的演变过程表明，尽管近年来大气污染形势严峻，环境质量不断下降，但中国省会城市的大气污染物排放增长率与经济增长率逐步呈现不平行发展，并产生脱钩现象。

基于2014年至2015年二氧化碳和PM_{2.5}脱钩弹性平均值，将中国30个直辖市和省会城市进一步分类（见表5）。PM_{2.5}脱钩弹性值大于-1（ $-1 < \eta_{PM_{2.5}} < 0$ ），城市分别处于强-弱脱钩（低碳-PM_{2.5}相对低排放）、弱-弱脱钩（低水平低碳-PM_{2.5}相对低排放）、相对-弱脱钩（相对高碳-PM_{2.5}相对低排放）、负-弱脱钩（高碳-PM_{2.5}相对低排放）；PM_{2.5}脱钩弹性值小于-1（ $\eta_{PM_{2.5}} < -1$ ），城市分别处于强-强脱钩（低碳-PM_{2.5}低排放）、弱-强脱钩（低水平低碳-PM_{2.5}低排放）、相对-强脱钩（相对高碳-PM_{2.5}低排放）、负-强脱钩（高碳-PM_{2.5}低排放）。虽然大多数省会城市摆脱了高碳-PM_{2.5}高排放模式，逐步向低碳-PM_{2.5}低排放模式转变，但PM_{2.5}排放与二氧化碳排放脱钩变化呈现出不协调、不一致的特征。

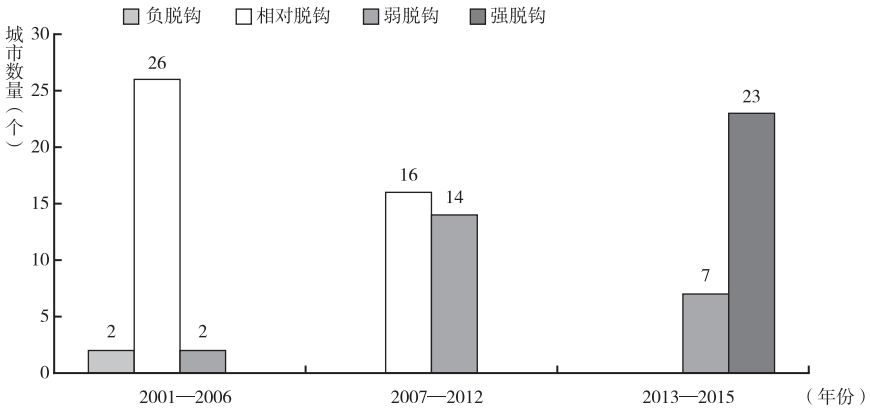


图2 PM_{2.5}脱钩指数类型与城市个数

资料来源：作者绘制。

表5 中国30个直辖市和省会城市 CO₂ 和 PM_{2.5}脱钩弹性值分布

PM _{2.5} 脱钩弹性	CO ₂ 脱钩弹性	城市	地区类型
$-1 < \eta_{PM_{2.5}} < 0$	$\eta_{CO_2} < -1$	北京	低碳 - PM _{2.5} 相对低排放
	$-1 < \eta_{CO_2} < 0$	郑州、济南	相对低碳 - PM _{2.5} 相对低排放
	$0 < \eta_{CO_2} < 1$	长春、重庆	相对高碳 - PM _{2.5} 相对低排放
	$\eta_{CO_2} > 1$	银川、沈阳	高碳 - PM _{2.5} 相对低排放
$\eta_{PM_{2.5}} < -1$	$\eta_{CO_2} < -1$	上海、兰州、太原、福州、呼和浩特	低碳 - PM _{2.5} 低排放
	$-1 < \eta_{CO_2} < 0$	合肥、天津、广州、杭州、西宁、哈尔滨	相对低碳 - PM _{2.5} 低排放
	$0 < \eta_{CO_2} < 1$	贵阳、海口、武汉、南京、南昌、成都、西安、南宁、昆明、石家庄、乌鲁木齐	相对高碳 - PM _{2.5} 低排放
	$\eta_{CO_2} > 1$	长沙	高碳 - PM _{2.5} 低排放

资料来源：作者绘制。

综上，中国30个直辖市和省会城市的低碳发展和PM_{2.5}排放控制呈现从相关到脱钩的共同趋势，存在明显的协同作用，且近几年来PM_{2.5}排放控制较低碳发展更为迅速，逐步从高碳 - 高PM_{2.5}排放模式转化为低碳 - 低PM_{2.5}排放模式。

(二) 中国城市碳减排和PM_{2.5}浓度控制的协同效应分析

1. 联立方程模型

本文对协同效应的定义为碳减排与PM_{2.5}浓度控制之间的双向因果关系，因此科学评估中国城市减碳降霾的协同效应需要将二者纳入一个分析框架之中，定量分析两个被解释变量的相互影响机制。鉴于联立方程模型是一个多方程的系统，可以将两个或多个被解释变量纳入一个分析框架，同时估计模型参数。本文构建二氧化碳排放与PM_{2.5}浓度联立方程，即公式(4)和(5)，揭示二者之间的双向影响机制，并采用

普通最小二乘法 (OLS)、两阶段最小二乘法 (TSLS) 以及三阶段最小二乘法 (3SLS) 估计并且比较模型参数结果。OLS 是单方程估计方法, TSLS 能够消除解释变量与随机误差项相关性, 但没有考虑到模型系统中不同方程的随机误差项之间的相关性, 因此进一步使用 3SLS 系统估计方法。

根据表 1 所选变量列出联立方程组, 如下所示:

$$\ln carb_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln pm_{it} + \alpha_j \sum_{j=2}^8 \ln X_{ij} + \mu_{it} \quad (4)$$

$$\ln pm_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln carb_{it} + \alpha_k \sum_{k=2}^8 \ln X'_{ik} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $\ln carb_{it}$ 为城市二氧化碳排放对数值, $\ln pm_{it}$ 为城市 $PM_{2.5}$ 浓度对数值, $\ln X_{ij}$ 为影响城市二氧化碳排放的控制变量, 包括城市人口规模、经济发展水平、产业结构、能源结构、城市化水平、技术进步以及环境规制政策。 $\ln X'_{ik}$ 为影响城市 $PM_{2.5}$ 浓度的控制变量, 包括人口规模、经济发展水平、能源结构、城市交通、技术进步、环境规制政策以及城市降雨量。 α_1 为城市二氧化碳排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的弹性值, β_1 为城市 $PM_{2.5}$ 浓度对二氧化碳排放的弹性值。

为使模型可被识别, 要使每个方程都包含至少一个其他方程所未包含的变量, 并且互不相同。那么所有方程的任意线性组合都不能构成与该模型中任意一个方程相同的统计形式。

由于公式 (4) 含有公式 (5) 未包含的变量产业结构 (*indus*), 同时公式 (5) 中含有公式 (4) 未包含的变量城市降雨量 (*prep*) 和城市交通 (*trans*), 因此联立方程系统可以被恰好识别。

2. 减碳排与 $PM_{2.5}$ 浓度控制协同效应的地区差异

利用公式 (4) 和 (5) 分别对中国城市二氧化碳排放与 $PM_{2.5}$ 浓度的交叉弹性展开定量参数估计。以 $PM_{2.5}$ 浓度对二氧化碳排放的弹性系数为横坐标, 以二氧化碳排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的弹性系数为纵坐标, 可以描绘二者减排协同效应的城市差异 (见图 3)。中国 30 个直辖市和省会城市二氧化碳排放与 $PM_{2.5}$ 浓度之间均具有显著的协同效应, 其中 $PM_{2.5}$ 浓度对二氧化碳排放的弹性值大多分布在 0.0658 至 0.2531 区间内, 除海口、昆明、西宁和乌鲁木齐四个城市外, 弹性值均能通过 5% 的显著性水平检验; 二氧化碳排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的弹性值大多分布在 -0.0241 至 0.7219 区间内, 除哈尔滨、昆明和西宁三个城市外, 弹性系数均能通过 5% 的显著性水平检验。

基于协同效应的地区差异, 可以将中国 30 个直辖市和省会城市划分为三个组。协同效应较高的城市有 13 个, 包括上海、北京、天津、郑州、济南、广州、武汉、成都、长沙、合肥、南京、西安以及石家庄; 协同效应较低的城市有 8 个, 包括海口、西宁、哈尔滨、昆明、呼和浩特、乌鲁木齐、长春以及重庆; 其余城市的协同效应处于上述两者之间, 包括福州、贵阳、兰州、南宁、杭州、沈阳、南昌、银川以及太原 9 个城市。协同效应较高的大多数城市为我国东部地区经济发展水平高、人口多的省会城市, 协同效应较低的大部分城市为我国西部地区经济发展水平相对较低、人口较少的省会城市。

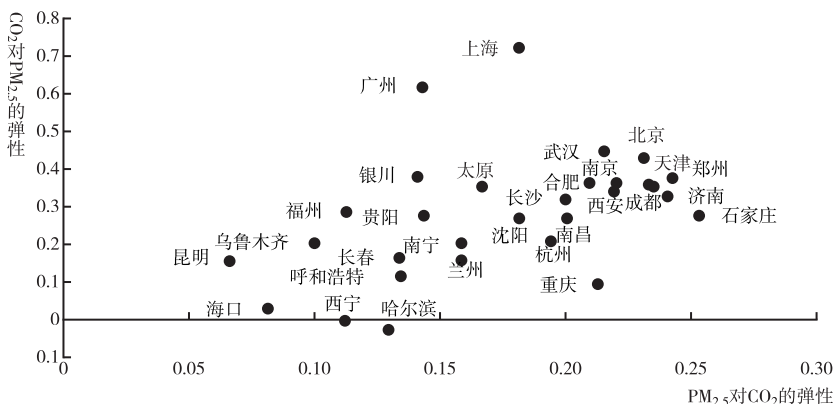


图3 减碳降霾协同效应的地区差异

资料来源：作者绘制。

上海的协同效应在30个直辖市和省会城市中最高，二氧化碳排放每减少1%将使得PM_{2.5}浓度下降0.1811%，并且PM_{2.5}浓度每下降1%将使得二氧化碳排放减少0.7219%。海口的协同效应在30个省会城市中最低，二氧化碳排放每减少1%将使得PM_{2.5}浓度下降0.0809%，并且PM_{2.5}浓度每下降1%将使得二氧化碳排放减少0.0330%。

3. 碳减排与PM_{2.5}浓度控制协同效应的时间变化

在估计中国城市二氧化碳排放与PM_{2.5}浓度的交叉弹性随时间变化的基础上，分析碳减排与PM_{2.5}治理协同效应的时间变化特征（见图4）。一方面，二氧化碳排放对PM_{2.5}浓度的影响特征分为两个阶段。2000—2012年PM_{2.5}浓度对二氧化碳排放的弹性值维持在0.3596至0.3722这一稳定范围内，2013—2015年增加到0.3821至0.4110的弹性区间，其中弹性最高值0.4110出现在2013年，即2013年中国城市二氧化碳

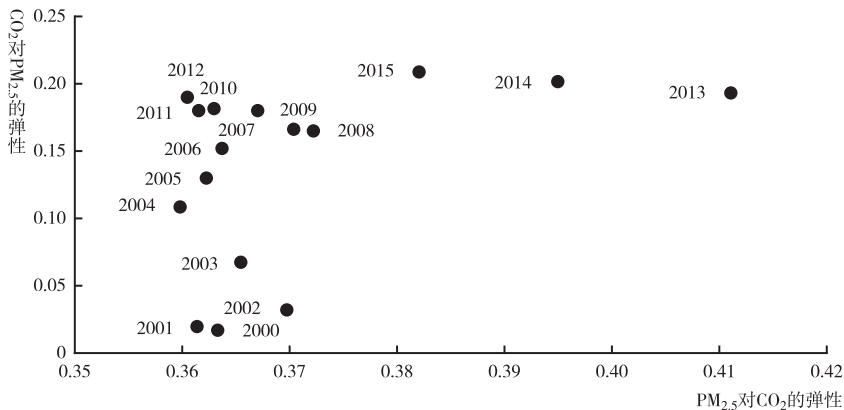


图4 减碳降霾协同效应的年际变化

资料来源：作者绘制。

排放每增加 1% 将使得 $PM_{2.5}$ 浓度升高 0.4110%。另一方面, $PM_{2.5}$ 浓度变化对二氧化碳排放的影响呈逐年增强趋势。2000—2015 年二氧化碳排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的弹性值处于上升趋势, 从 2000 年的最低值 0.0168 增加到 2015 年的最高值 0.2086, 即 2015 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度每增加 1% 将使得二氧化碳排放增长 0.2086%。

以上分析表明, 2000—2015 年中国 30 个省会城市二氧化碳减排与 $PM_{2.5}$ 浓度控制之间具有显著的协同效应, 并且二者协同效应表现出明显的地区差异和时间变化特征。本文将进一步实证研究影响中国城市二氧化碳减排与 $PM_{2.5}$ 治理协同效应的主要影响因素。

(三) 碳减排和 $PM_{2.5}$ 治理协同效应的影响因素

将二氧化碳排放和 $PM_{2.5}$ 浓度纳入一个方程系统, 用普通最小二乘法 (OLS)、两阶段最小二乘法 (TSLS) 和三阶段最小二乘法 (3SLS) 分别估计联立方程的参数。表 6 为城市 $PM_{2.5}$ 浓度变化对二氧化碳排放的影响及其主要影响因素, 表 6 为城市二氧化碳排放变化对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响及其影响因素。三种参数估计方法所得结果显示, 模型参数估计结果具有稳健性。

表 6 协同效应的影响因素 (被解释变量: CO_2 排放)

变量	模型参数		
	模型一 (OLS)	模型二 (TSLS)	模型三 (3SLS)
$\ln pm$	0.5946 *** (0.0477)	0.6378 *** (0.1615)	0.7358 *** (0.1590)
$\ln popu$	0.1870 *** (0.0551)	0.1736 ** (0.0732)	0.0988 (0.0713)
$\ln pgdp$	0.3327 *** (0.0486)	0.3187 *** (0.0696)	0.3078 *** (0.0689)
$\ln indus$	0.6898 *** (0.1222)	0.6664 *** (0.1482)	0.7285 *** (0.1464)
$\ln ener$	0.0348 (0.0778)	0.0176 (0.0990)	-0.0650 (0.0970)
$\ln urban$	0.6320 *** (0.0954)	0.6350 *** (0.0961)	0.4751 *** (0.0907)
$\ln tech$	-0.0093 (0.0215)	-0.0109 (0.0222)	-0.0011 (0.0220)
$\ln policy$	-0.0379 * (0.0217)	-0.0366 * (0.0222)	-0.0283 (0.0219)
R-squared	0.6738	0.6733	0.6648
SSR	92.35	92.52	94.90

注: * 表示 p 值显著性水平 < 0.1 , ** 表示 p 值显著性水平 < 0.05 , *** 表示 p 值显著性水平 < 0.01 。

资料来源: 作者计算。

解释变量 $PM_{2.5}$ 弹性系数及其统计显著性表明, 城市 $PM_{2.5}$ 排放与二氧化碳排放之间具有显著的正协同性, $PM_{2.5}$ 浓度每提高 1% 可以使得二氧化碳排放增加 0.6378%

至 0.7358%。表 5 所列控制变量中, 人口规模、经济发展水平、产业结构、城市化水平显著促进了中国城市二氧化碳排放。以两阶段最小二乘法参数估计结果为例, 在所有控制变量中, 产业结构是影响城市二氧化碳排放最大的因素, 弹性系数达到 0.6664, 即第二产业比重每增加 1% 将导致二氧化碳排放提高 0.6664%。城市化水平、经济发展水平、人口规模也是显著促进二氧化碳排放的因素。另外, 技术进步和环境规制可以起到抑制二氧化碳排放的作用。两阶段最小二乘法估计的环境政策弹性系数为 -0.0366, 表明中国城市大气污染治理投资每增加 1% 将显著减少 0.0366% 的二氧化碳排放量。上述分析表明, 减少城市 $PM_{2.5}$ 排放可以同步降低二氧化碳排放, 中国城市大气污染综合防治的一系列政策实施同时起到了抑制二氧化碳排放的作用; 以第二产业为主导的产业结构、快速提高的城市化水平、不断增长的城市人口和经济发展水平是中国城市二氧化碳排放的主要贡献因素。

表 7 中解释变量二氧化碳的弹性系数及其统计显著性表明, 城市二氧化碳排放与 $PM_{2.5}$ 浓度之间具有显著的正协同性, 二氧化碳排放每提高 1% 可以使得 $PM_{2.5}$ 浓度增加大约 0.31%。表 7 所列控制变量中, 人口规模、能源结构、城市交通显著提高了中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度水平。以两阶段最小二乘法参数估计结果为例, 在所有控制变量中, 能源结构是影响城市 $PM_{2.5}$ 浓度的最大因素, 弹性系数达到 0.3093, 即煤炭消费比重每增加 1% 将导致 $PM_{2.5}$ 浓度提高 0.3093%。人口规模和城市交通也是显著增加 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献

表 7 协同效应的影响因素 (被解释变量: $PM_{2.5}$)

变量	模型参数		
	模型一(OLS)	模型二(TSLS)	模型三(3SLS)
<i>lncarb</i>	0.3853 *** (0.0319)	0.3052 *** (0.0880)	0.3046 *** (0.0871)
<i>lnpopu</i>	0.2201 *** (0.0567)	0.2170 *** (0.0572)	0.1634 *** (0.0550)
<i>lnpgdp</i>	0.0460 (0.0518)	0.0697 (0.0575)	0.0277 (0.0559)
<i>lnener</i>	0.2741 *** (0.0618)	0.3093 *** (0.0719)	0.3249 *** (0.0711)
<i>lntrans</i>	0.1473 *** (0.0544)	0.1801 *** (0.0642)	0.2203 *** (0.0628)
<i>lntech</i>	-0.0240 (0.0183)	-0.0210 (0.0187)	-0.0156 (0.0184)
<i>lnpolicy</i>	-0.0300 * (0.0176)	-0.0280 * (0.0179)	-0.0220 (0.0176)
<i>lnprep</i>	-0.1062 *** (0.0321)	-0.1027 *** (0.0325)	-0.0597 ** (0.0302)
R-squared	0.5928	0.5873	0.5853
SSR	64.54	65.41	65.74

注: * 表示 p 值显著性水平 < 0.1, ** 表示 p 值显著性水平 < 0.05, *** 表示 p 值显著性水平 < 0.01。

资料来源: 作者计算。

因素，弹性系数分别达到 0.2170 和 0.1801。另外，技术进步、环境规制和降雨可以降低 $PM_{2.5}$ 浓度水平。两阶段最小二乘法估计的城市降雨量的弹性系数为 -0.1027 ，大于技术进步和环境规制对大气污染物的减排作用。上述分析表明，减少城市二氧化碳排放可以同步显著降低 $PM_{2.5}$ 浓度；城市煤炭消费量、快速增加的城市机动车数量和城市人口是中国城市大气污染物排放的主要贡献因素；旨在降低 $PM_{2.5}$ 浓度的大气污染治理投资起到了抑制污染物排放的作用，但不及降雨量对城市大气污染物抑制作用明显。

五、结论与讨论

本研究基于中国 2000—2015 年 30 个直辖市和省会城市的面板数据，构建脱钩弹性系数和联立方程模型对城市二氧化碳减排与 $PM_{2.5}$ 治理的双向协同效应展开实证分析，提出中国城市“减碳降霾”的针对性政策建议。

(1) 中国城市低碳发展和 $PM_{2.5}$ 浓度控制具有明显的协同趋势。2001—2015 年中国 30 个省会城市的二氧化碳排放和 $PM_{2.5}$ 浓度都呈现与经济增长相关到逐渐脱钩的共同趋势，特别是近几年大气污染治理力度不断加大， $PM_{2.5}$ 排放脱钩较低碳转型更为迅速，中国省会城市逐步从高碳—高 $PM_{2.5}$ 排放模式转化为低碳—低 $PM_{2.5}$ 排放模式。2013—2015 年 30 个直辖市和省会城市分类为四种类型：强脱钩城市 6 个、弱脱钩城市 8 个、相对脱钩城市 13 个、负脱钩城市 3 个。Li 等 (2019) 以中原城市群为例研究城市碳排放脱钩进程，29 个中原城市也可以分为四种类型：强脱钩城市 5 个、弱脱钩城市 13 个、增长连接城市 4 个、增长负脱钩城市 7 个，由此可见中国城市碳排放达到强脱钩的数量不足，脱钩进程地区差异十分显著。

(2) 中国城市二氧化碳减排与 $PM_{2.5}$ 治理具有显著的正协同效应，并表现出空间差异和时间变化特征。协同效应较高的城市分布在经济发展水平高、人口多的东部地区，协同效应较低的城市分布在经济发展水平相对较低、人口较少的西部地区。2000—2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度对二氧化碳排放的弹性值波动变化不大，但二氧化碳排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的弹性值总体处于上升趋势，从 2000 年的最低值 0.0168 增加到 2015 年的最高值 0.2086。

(3) 基于联立方程的实证研究表明，中国省会城市二氧化碳排放与 $PM_{2.5}$ 治理相互作用关系的影响因素具有显著差异。产业结构、城市化水平、经济发展水平和城市人口规模是显著促进二氧化碳排放的因素，旨在降低 $PM_{2.5}$ 浓度的大气污染治理措施起到了抑制二氧化碳排放的作用。能源结构、人口规模、城市交通是显著提高中国省会城市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素，大气污染治理政策起到了抑制污染物排放的作用，但不及降雨量对城市大气污染物抑制作用明显。

为进一步发挥城市二氧化碳减排与 $PM_{2.5}$ 治理的协同效应，相关政策建议如下。我国省会城市碳排放脱钩与 $PM_{2.5}$ 排放脱钩进程呈现出不协调特征，城市低碳发展水平相对落后。仍处于相对高碳、高碳阶段的城市应加强落实二氧化碳减排政策，特别

是持续优化产业结构,推进低碳城镇化建设。针对技术创新对碳排放抑制作用的不足,城市建设要进行高耗能行业的技术革新,大力支持绿色低碳技术创新。另外,环境规制能够发挥促进二氧化碳和 $PM_{2.5}$ 减排的作用,有利于进一步增强减碳降霾的协同效应,但环境规制的作用效果远不及预期。城市减碳降霾要加强协同政策设计,才能实现低碳发展和 $PM_{2.5}$ 治理的双赢。

参考文献

- 白俊红、聂亮(2017):《环境分权是否真的加剧了雾霾污染?》,《中国人口·资源与环境》第12期,第59~69页。
- 陈强、孙丰凯、徐艳娴(2017):《冬季供暖导致雾霾?来自华北城市面板的证据》,《南开经济研究》第4期,第27~42页。
- 李丽平、姜莘红、李雨青等(2012):《湘潭市“十一五”总量减排措施对温室气体减排协同效应评价研究》,《环境与可持续发展》第1期,第36~40页。
- 李丽平、周国梅、季浩宇(2010):《污染减排的协同效应评价研究:以攀枝花市为例》,《中国人口·资源与环境》第S2期,第91~95。
- 覃小玲(2012):《温室气体与大气污染控制的协同减排效益研究》,华南理工大学硕士学位论文。
- 严雅雪(2017):《碳排放与雾霾污染的协同关系分析》,《环境经济研究》第2期,第52~63页。
- 杨曦、滕飞、王革华(2013):《温室气体减排的协同效益》,《生态经济》第8期,第45~50页。
- 郑佳佳、孙星、张牧吟等(2015):《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》,《生态经济》第11期,第133~137页。
- An, Z. S., R. J. Huang and R. T. Zhang (2019), “Severe Haze in Northern China: A Synergy of Anthropogenic Emissions and Atmospheric Processes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (18), pp. 8657 – 8666.
- Anenberg, S. C., J. Schwartz and D. Shindell, et al. (2012), “Global Air Quality and Health Co-Benefits of Mitigating Near-Term Climate Change through Methane and Black Carbon Emission Controls”, *Environmental Health Perspectives*, 120 (6), pp. 831 – 839.
- Bollen, J., B. Guay and S. Jamet, et al. (2009), *Co-benefits of Climate Change Mitigation Policies: Literature Review and New Results*, Paris: OECD Publishing.
- Cai, W., K. Li and H. Liao, et al. (2017), “Weather Conditions Conducive to Beijing Severe Haze more Frequent under Climate Change”, *Nature Climate Change*, 7 (4), pp. 257 – 262.
- Fang, D., B. Chen and K. Hubacek, et al. (2019), “Clean Air for Some: Unintended Spillover Effects of Regional Air Pollution Policies”, *Science Advances*, 5 (4), eaav4707.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: Mitigation. A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Accra, Ghana.
- Li, L., Y. L. Shan and Y. L. Lei, et al. (2019), “Decoupling of Economic Growth and Emissions in China’s Cities: A Case Study of the Central Plains Urban Agglomeration”, *Applied Energy*, 244 (3), pp. 36 – 45.
- Puppim de Oliveira, J. A., C. N. H. Doll and T. A. Kurniawan, et al. (2013), “Promoting Win-win Situations in Climate Change Mitigation, Local Environmental Quality and Development in Asian Cities through Co-benefits”, *Journal of Cleaner Production*, 58, pp. 1 – 6.

Rafaj, P. , W. Schöpp and P. Russ, et al. (2013), “Co-benefits of Post – 2012 Global Climate Mitigation Policies”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18 (6), pp. 801 – 824.

Shih, Y. H. and C. H. Tseng (2014), “Cost-benefit Analysis of Sustainable Energy Development Using Life-cycle Co-benefits Assessment and the System Dynamics Approach”, *Applied Energy*, 119, pp. 57 – 66.

Wang, H. J. , H. P. Chen and J. P. Liu (2015), “Arctic Sea Ice Decline Intensified Haze Pollution in Eastern China”, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8 (1), pp. 1 – 9.

Xie, X. , Y. W. Weng and W. J. Cai (2018), “Co-Benefits of CO₂ Mitigation for NO_x Emission Reduction: A Research Based on the DICE Model”, *Sustainability*, 10 (4), p. 1109.

Xu, S. , W. Zhang and Q. Li, et al. (2017), “Decomposition Analysis of the Factors that Influence Energy Related Air Pollutant Emission Changes in China Using the SDA Method”, *Sustainability*, 9 (10), p. 1742.

Zou, Y. , Y. Wang and Y. Zhang, et al. (2017), “Arctic Sea Ice, Eurasia Snow, and Extreme Winter Haze in China”, *Science Advances*, 3 (3), e1602751.

Co-effect of CO₂ Mitigation and PM_{2.5} Control in Chinese Cities

LIU Jie¹, LIU Zi-wei¹, JIAO Shan-shan¹, WANG Li², TANG Zhi-yi³

(1. International Business School of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China;

3. School of Astronautics of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The co-effect of CO₂ mitigation and PM_{2.5} control will help to effectively promote the low carbon economy and green development in China, make contribution to ecological civilization construction and global ecological security. Because of the two-way relationship between carbon emission reduction and PM_{2.5} control, it is necessary to incorporate the two into one analytical framework. In this paper, the decoupling index is used to measure the synergistic trends of carbon emission reduction and PM_{2.5} control in China's provincial capitals. Based on the panel data of provincial capitals in the 2000 – 2015 period, a simultaneous equation model is utilized to analyze the synergies between carbon dioxide emission reduction and PM_{2.5} control. Most of the provincial capitals are in the process of transitioning from a high carbon-high PM_{2.5} emission model to a low carbon-low PM_{2.5} emission model, showing inconsistent characteristics of decoupling trends. There are significant positive synergies between carbon dioxide emission reduction and PM_{2.5} control, and they show spatial and temporal heterogeneity. Promoting the low carbon transformation and improving the effectiveness of technical innovation and environmental regulations are the effective ways to enhance the co-effect.

Key Words: cities; CO₂ mitigation; PM_{2.5} control; co-effect