

典型化工集中区高精度减污降碳协同效应研究

夏忠燕

上海市奉贤区环境监测站

DOI:10.12238/eep.v7i11.2318

[摘要] 针对长三角典型化工集中区,运用相关性分析、弹性系数法和耦合协调度模型,评估了同时产生大气污染物和CO₂的七个二级排放源的减污降碳协同效应。结果表明:(1)在相关性分析中,电力供热和工业锅炉作为重要排放源,其NO_x、CO排放与CO₂排放呈现显著正相关性;进一步分析工业锅炉不同燃料类型,燃油锅炉燃烧产生的大气污染物排放当量与CO₂排放相关性明显高于燃气锅炉;(2)弹性系数分析发现,各年份及不同二级源之间,协同效应表现不一,如民用锅炉等在某些年份展现良好协同减排,而工业锅炉等则有增排现象;(3)耦合协调度分析显示,电力供热与工业锅炉的碳减排与大气污染控制协同性逐步增强,为制定更加有效的区域协同减排策略提供了科学依据。

[关键词] 大气污染物; 二氧化碳(CO₂); 减污降碳; 协同控制; 弹性系数; 耦合协调模型

中图分类号: X51 文献标识码: A

Research on Synergistic Effect of High-precision Pollution and Carbon Reduction in Typical Chemical Concentrated Areas

Zhongyan Xia

Shanghai Fengxian District Environmental Monitoring Station

[Abstract] This study, focusing on typical chemical industrial clusters in the Yangtze River Delta, employed correlation analysis, elasticity coefficient method, and coupling coordination degree model to evaluate the synergistic effects of pollution reduction and carbon emission reduction for seven secondary emission sources that concurrently generate atmospheric pollutants and CO₂. The findings revealed: (1) In the correlation analysis, NO_x and CO emissions from significant emission sources such as power generation and heating, and industrial boilers showed a notable positive correlation with CO₂ emissions. Further analysis of different fuel types in industrial boilers demonstrated that the correlation between the equivalent emissions of atmospheric pollutants and CO₂ emissions was significantly higher for oil-fired boilers compared to gas-fired boilers; (2) The elasticity coefficient analysis uncovered varying degrees of synergistic effects across different years and secondary emission sources. For instance, domestic boilers exhibited favorable synergistic reduction in certain years, whereas industrial boilers displayed an increase in emissions in some instances; (3) The coupling coordination degree analysis indicated a progressive enhancement in the synergy between carbon emission reduction and air pollution control in sectors like power generation and heating and industrial boilers, providing a scientific basis for formulating more effective regional strategies for synergistic emission reduction.

[Key words] air pollutants; carbon dioxide(CO₂); pollution and carbon emission reduction; coordinated control; elasticity coefficient; coupling coordination model

在中国新发展阶段中,经济社会发展向全面绿色转型迈进的过程中,实现减污降碳的协同作用是必经之路。这一协同效应体现在两个层面:一是借助多种策略与手段,在实施减少温室气体排放的措施同时,能附带达成削减其他污染物排放的效果,即所谓的降碳行动带来的减污效益;二是当采取措施控制污染物排放时,也能同步实现温室气体排放的减少或通过某些方式吸

收,体现了减污举措对降低碳排放的积极作用^[1]。

关于减污效应方面,Burtraw等^[2]的研究显示,美国电力部门采取减少二氧化碳(CO₂)排放政策后,显著减少了传统的空气污染物。Cao等^[3]模拟表明,适度的碳税通过促进能源节约,不仅大幅减少CO₂排放,还有效减少当地空气污染。Wang等^[4]以中国工业部门二氧化碳和大气污染物综合排放数据为切入点发现,

工业部门每减少1,000tCO₂排放,综合大气污染物排放就会减少1t。Yang等^[5]研究发现,当CO₂排放达到峰值时,空气质量也能达到标准,中国碳达峰目标实现将使中国2030年PM_{2.5}、SO₂和氮氧化物的排放量相比2010年分别下降83.32%、78.85%、77.56%。赵立祥等^[6]模拟发现,碳交易政策利用倒逼技术进步和改善能源强度等手段促进大气污染物协同减排效应。薛飞等人^[7]考察了碳交易市场的规模对于碳减排的影响,结论指出,增大该市场规模能有效促进试点区域减少二氧化碳排放。Yan等^[8]和刘亦文等^[9]也都研究发现,碳交易政策对污染物有显著的协同减排效应。

关于降碳效应方面,李新等^[10]研究发现,京津冀地区的钢铁行业在综合减排情景下可以发挥最大的协同减排潜力。Morgenstern等^[11]对太原地区逐步淘汰燃煤小锅炉政策进行调查发现,二氧化硫控制政策带来了巨大的碳减排效益(减排量约为50%~95%)。Qian等^[12]通过分析我国主要工业部门采取提高能源强度、规模结构调整和电气化方式可以减少大气污染SO₂、NO_x、颗粒物排放的同时减少工业部门的CO₂排放。生态环境公报^[13]显示,北京市在“十三五”期间采用调整退出工业污染企业、节能改造建筑、优化机动车结构、使用清洁能源等方式促进大气污染治理和碳减排,PM_{2.5}年均浓度下降了53%,SO₂、NO_x及人为源VOCs排放量分别减排97.0%、43.0%及48.8%以上,单位GDP二氧化碳排放显著降低。XING等^[14]研究发现,采取VOCs排放有关的源头替代等控制措施,不仅能有效促进PM_{2.5}和O₃污染的综合管控,还能促成碳减排协同效应。Du等^[15]构建了企业层面的污染物排放强度和碳排放指数综合指标后发现,环境法规的严格执行对促进工业企业同步削减温室气体排放及污染物排放具有积极作用。

现在已有众多文献分别对减污效应和降碳效应进行了深入探讨^[16-20],但研究依旧不够完善:碳污排放同根同源同过程,工业生产过程^①是大气污染物排放的主要来源,工业园区污染物与CO₂排放紧密联系,极少数研究同时关注典型化工集中区的减污和降碳。基于此,本研究采用通过“自下而上”的方法获取活动水平数据,并通过市辖生态环境局大口径数据“自上而下”进行校验编制的长三角某化工集中区大气污染物排放清单,对同时涉及大气污染物排放和CO₂排放的二级源进行重点分析,以期对化工集中区制定减污降碳协同管理的环境政策提供指导,并为推动“双碳”目标提供路径和决策参考。

1 方法与数据

1.1 相关性分析

对每一类二级源的大气污染物与CO₂排放量进行相关性分析,并计算出皮尔逊相关系数r,用于度量SO₂、NO_x、CO等大气污染物排放量与CO₂排放量两个变量之间的相关程度;再对各大气污染物排放量与CO₂排放量间进行回归分析,计算回归方程及决定系数R²(拟合优度),一般地,样本点越多,拟合效果越准确,故对一些数据量较小的二级污染源,不进行本部分相关性分析。

1.2 协同减排弹性系数

弹性系数法能消除绝对减排量带来的巨大差异,更能客观

的反映各项减排措施的协同减排效果。为了全面评估碳排放削减与大气污染物综合管控之间的协同作用,利用《环境保护税法》中提供的大气污染物当量系数对各类大气污染物排放指标进行归一化处理。具体计算方法如下^[21]:

$$E_p = \frac{1}{\alpha} E_{SO_2} + \frac{1}{\beta} E_{NO_x} + \frac{1}{\gamma} E_{CO} + \frac{1}{\delta} E_{VOCs} + \frac{1}{\varepsilon} E_{NH_3} + \frac{1}{\omega} E_{PM_{10}} + \frac{1}{\varphi} E_{PM_{2.5}} \quad (1)$$

$$S = \frac{\Delta E_p / E_p}{\Delta E_{CO_2} / E_{CO_2}} \quad (2)$$

式中: E_p 表示大气污染物排放当量, E_{SO_2} 、 E_{NO_x} 、 E_{CO} 、 E_{VOCs} 、 E_{NH_3} 、 $E_{PM_{10}}$ 、 $E_{PM_{2.5}}$ 、 E_{CO_2} 分别代表该区的SO₂、NO_x、CO、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5}、CO₂排放量,单位为t; α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε 、 ω 、 φ 分别为SO₂、NO_x、CO、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5}的当量系数值,参考《中华人民共和国环境保护税法》和相关文献;S为协同效应系数,无量纲; ΔE_p 、 ΔE_{CO_2} 表示当年相对于上一年大气污染物排放当量及CO₂排放量变化率。

协同控制效应级别划分参照俞珊^[21]等。

1.3 耦合协调度

碳排放减少与大气污染治理构成了同一系统下的两个紧密相连的分支系统,其间存在着复杂的动态相互作用与反馈机制,彼此间的影响深刻且交织。基于此,本研究采用了一种耦合协调模型来深入分析和评估不同二级源减污与降碳间的协同效益。模型计算方法参考唐湘博^[22]等,计算公式如下:

$$c = \frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} = \sqrt{\frac{1 - (U_2 - U_1) \frac{U_1}{U_2}}{1}} \quad (3)$$

$$T = aU_1 + bU_2 \quad (4)$$

$$D = \sqrt{c \times T} \quad (5)$$

式中: U_1 为碳排放量和污染物当量二者的最小值; U_2 为二者最大值; C 表示两系统的耦合度; T 表示综合协调指数; a 、 b 表示待定系数,本研究模拟过程中设置 $a=b=0.5$,即碳减排和大气污染物控制同等重要; D 表示两系统的耦合协调度,范围为[0, 1]。

1.4 数据来源

本研究选择2018-2021年长三角某化工集中区大气污染物排放清单数据和温室气体排放清单数据,对其中同时涉及大气污染物排放和CO₂排放的二级源进行重点碳污协同效应分析。涉及碳污排放的二级源有:电力供热、工业锅炉、民用锅炉、民用燃烧(所属一级源为化石燃料固定燃烧源);建材(所属一级源为工艺过程源);道路移动源、非道路移动源(所属一级源为移动源);工业生物质锅炉(所属一级源为生物质燃烧源^②)。

2 结果与讨论

2.1 大气污染物与CO₂排放量相关性分析

2.1.1 电力供热

研究区2021年二级源电力供热主要涉及12家企业,所属排放源均为电厂,涉及生产设备为燃气锅炉(燃料类型:天然气)、燃油锅炉(燃料类型:柴油)、生物质锅炉(生物质成型燃

料), 经计算, 电力供热二级源大气污染物中NO_x、CO排放量和CO₂排放量间的相关性系数r分别为0.8401和1.000, 表明具有较强的正相关性, 对应的回归方程拟合优度也较佳, R²分别为0.7058和1.000; VOCs、TSP、PM₁₀和PM_{2.5}排放量与CO₂排放量表现出中等程度相关。12家企业中, 有8家企业SO₂、BC、OC排放量为零, 仅有3个非零值数据, 拟合效果不佳, 故对于电力供热二级源未进行SO₂、BC、OC排放与CO₂排放间的相关性分析。

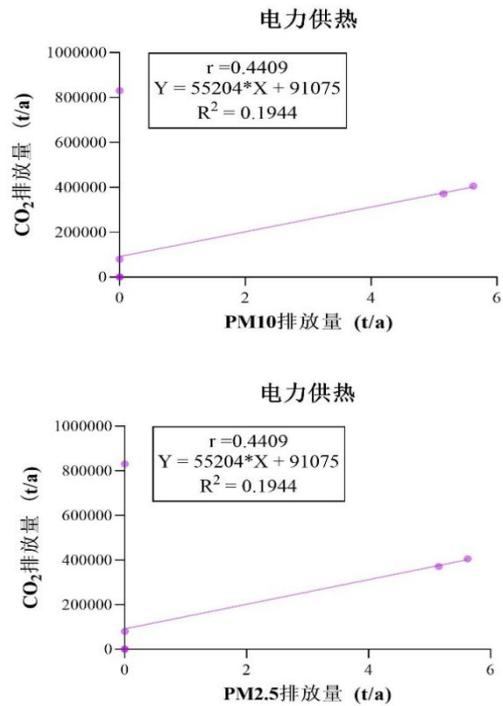
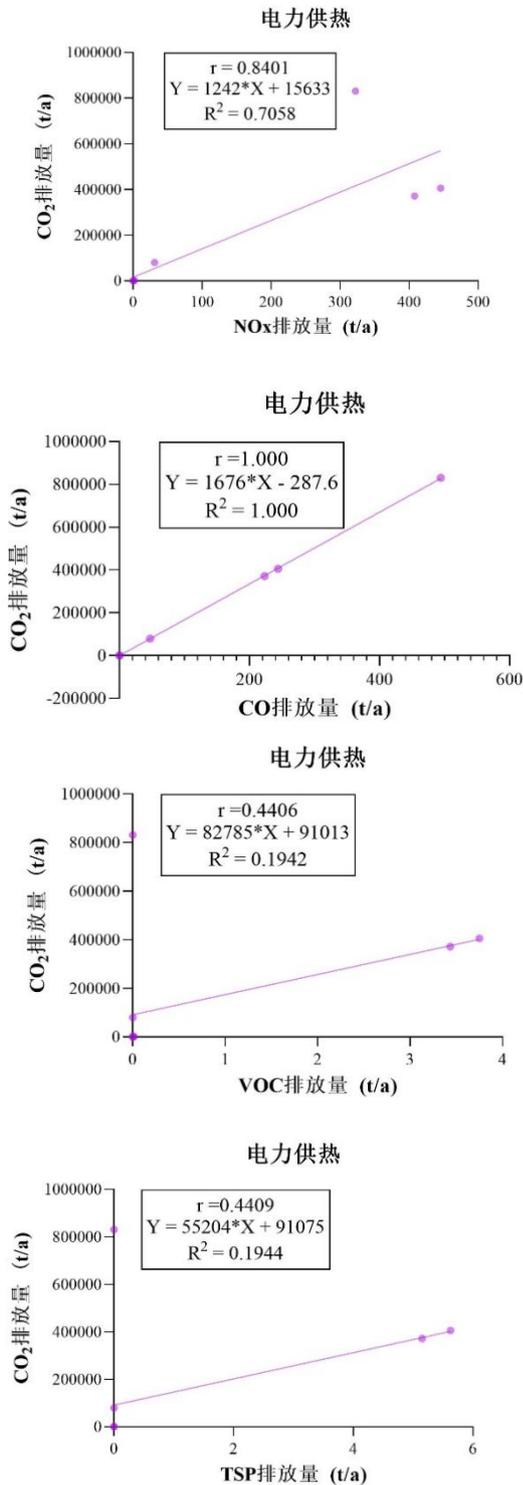
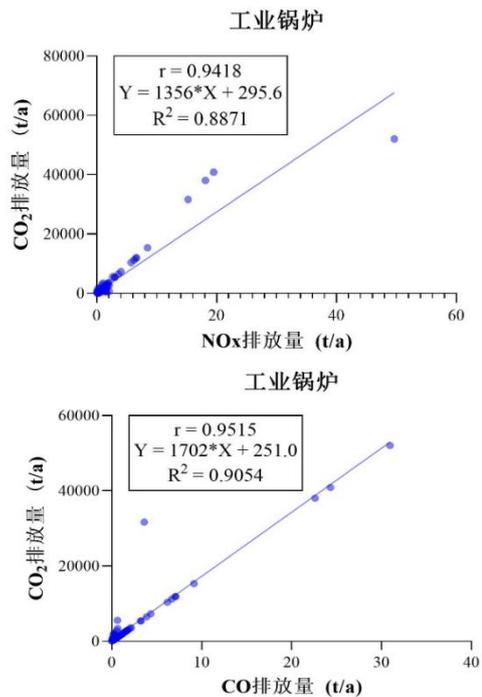


图1 电力供热大气污染物排放量与CO₂排放量相关性分析

2. 1. 2工业锅炉

共计算研究区内167个工业锅炉的排放情况, 其中NO_x、CO排放量和CO₂排放量间的相关性系数r分别为0.9418和0.9515, 表明具有强正相关性, 对应的回归方程拟合优度也较佳, R²分别为0.8871和0.9054; 其次, TSP、PM₁₀和PM_{2.5}排放量与CO₂排放量相关性程度接近, 相关性系数r均为0.7572, 亦表现出较强的相关性; VOCs、BC、OC排放量与CO₂排放的相关性较差, 相关性系数r均小于4。



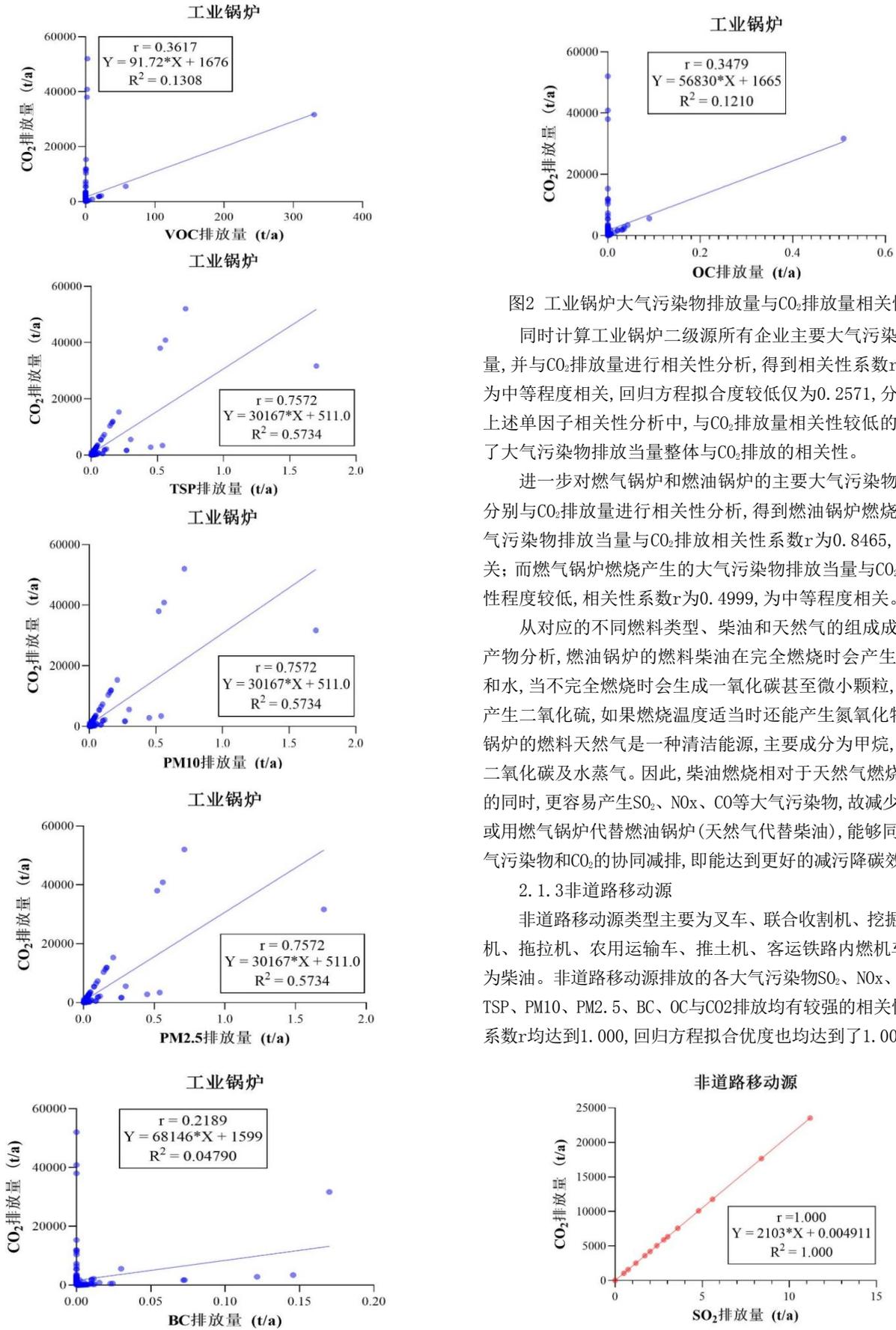


图2 工业锅炉大气污染物排放量与CO₂排放量相关性分析

同时计算工业锅炉二级源所有企业主要大气污染物排放当量,并与CO₂排放量进行相关性分析,得到相关性系数r为0.5071,为中等程度相关,回归方程拟合度较低仅为0.2571,分析原因为上述单因子相关性分析中,与CO₂排放量相关性较低的因子影响了大气污染物排放当量整体与CO₂排放的相关性。

进一步对燃气锅炉和燃油锅炉的主要大气污染物排放当量分别与CO₂排放量进行相关性分析,得到燃油锅炉燃烧产生的大气污染物排放当量与CO₂排放相关性系数r为0.8465,为极强相关;而燃气锅炉燃烧产生的大气污染物排放当量与CO₂排放相关性程度较低,相关性系数r为0.4999,为中等程度相关。

从对应的不同燃料类型、柴油和天然气的组成成分、燃烧产物分析,燃油锅炉的燃料柴油在完全燃烧时会产生二氧化碳和水,当不完全燃烧时会生成一氧化碳甚至微小颗粒,含硫时会产生二氧化硫,如果燃烧温度适当时还能产生氮氧化物。而燃气锅炉的燃料天然气是一种清洁能源,主要成分为甲烷,主要产生二氧化碳及水蒸气。因此,柴油燃烧相对于天然气燃烧,产生CO₂的同时,更容易产生SO₂、NO_x、CO等大气污染物,故减少柴油燃烧或用燃气锅炉代替燃油锅炉(天然气代替柴油),能够同时促进大气污染物和CO₂的协同减排,即能达到更好的减污降碳效果。

2.1.3 非道路移动源

非道路移动源类型主要为叉车、联合收割机、挖掘机、装载机、拖拉机、农用运输车、推土机、客运铁路内燃机车,燃料均为柴油。非道路移动源排放的各大气污染物SO₂、NO_x、CO、VOC、TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC与CO₂排放均有较强的相关性,相关性系数r均达到1.000,回归方程拟合优度也均达到了1.000。

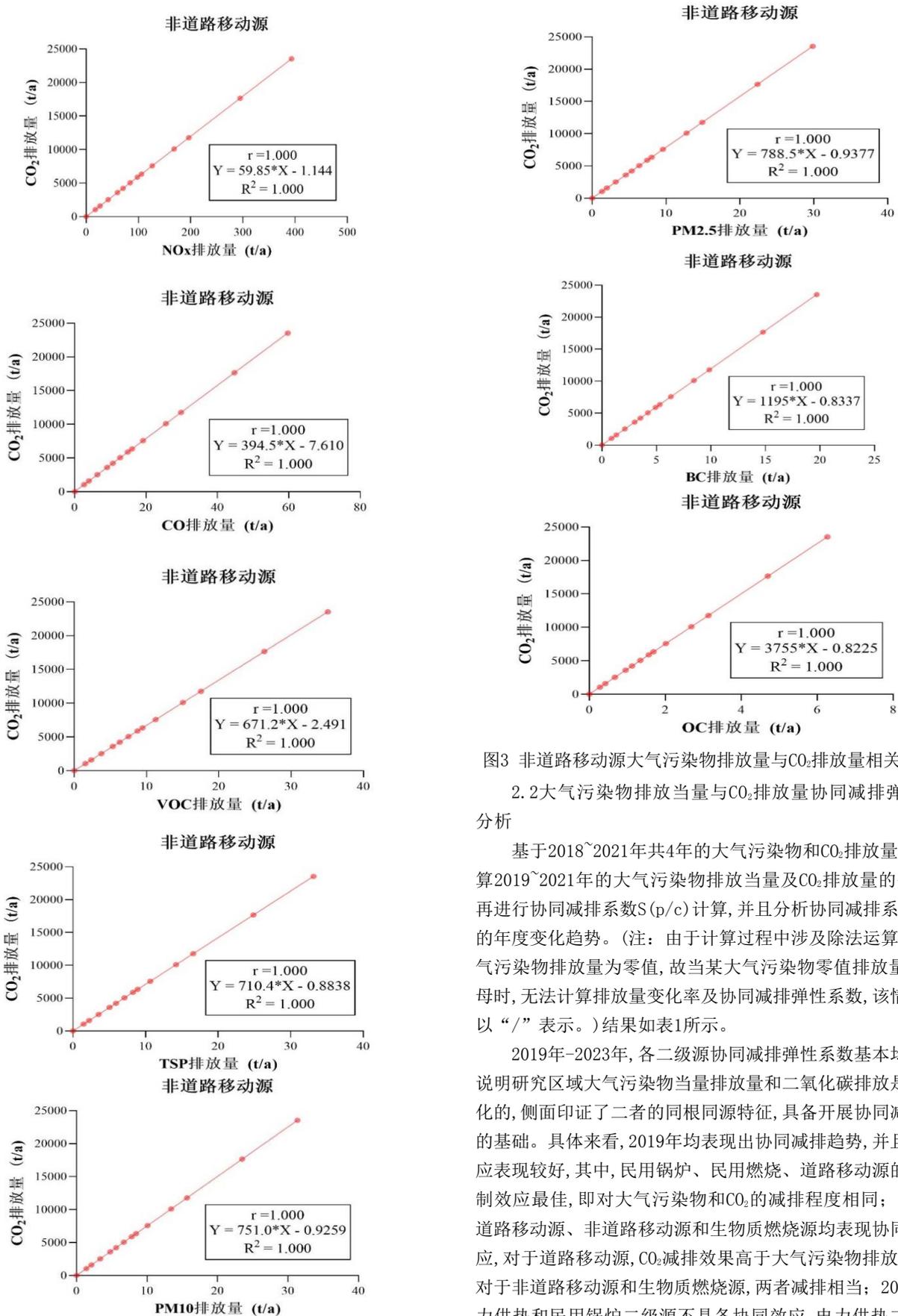


图3 非道路移动源大气污染物排放量与CO₂排放量相关性分析

2.2 大气污染物排放当量与CO₂排放量协同减排弹性系数

分析

基于2018~2021年共4年的大气污染物和CO₂排放量,分别计算2019~2021年的大气污染物排放当量及CO₂排放量的变化率,再进行协同减排系数S(p/c)计算,并且分析协同减排系数S(p/c)的年度变化趋势。(注:由于计算过程中涉及除法运算,部分大气污染物排放量为零值,故当某大气污染物零值排放量作为分母时,无法计算排放量变化率及协同减排弹性系数,该情况表中以“/”表示。)结果如表1所示。

2019年-2023年,各二级源协同减排弹性系数基本均大于0,说明研究区域大气污染物当量排放量和二氧化碳排放是同向变化的,侧面印证了二者的同根同源特征,具备开展协同减排研究的基础。具体来看,2019年均表现出协同减排趋势,并且协同效应表现较好,其中,民用锅炉、民用燃烧、道路移动源的协同控制效应最佳,即对大气污染物和CO₂的减排程度相同;2020年,道路移动源、非道路移动源和生物质燃烧源均表现协同减排效应,对于道路移动源,CO₂减排效果高于大气污染物排放当量,而对于非道路移动源和生物质燃烧源,两者减排相当;2021年,电力供热和民用锅炉二级源不具备协同效应,电力供热二级源中

表1 2019~2021年大气污染物排放当量与CO₂排放量协同减排弹性系数

一级源	化石燃料固定燃烧源				工艺过程源	移动源		生物质燃烧源	
二级源	电力供热	工业锅炉	民用锅炉	民用燃烧	建材	道路移动源	非道路移动源	工业生物质锅炉	
$\Delta E_p/E_p$	2019	-96.24%	-96.64%	-97.93%	-96.00%	-96.89%	-95.08%	-97.92%	-95.40%
	2020	-9.63%	29.71%	0.00%	0.00%	-25.83%	-53.27%	-16.61%	-100.00%
	2021	-0.30%	30.07%	0.00%	-90.53%	462.09%	-19.60%	24.12%	/
$\Delta E_{co_2}/E_{co_2}$	2019	-98.32%	-96.07%	-97.99%	-95.99%	-100.00%	-95.18%	-94.72%	-92.55%
	2020	30.20%	-27.07%	0.00%	0.00%	/	-65.31%	-16.67%	-100.00%
	2021	16.01%	25.17%	-0.18%	-90.94%	/	-19.58%	24.15%	/
S(p/c)	2019	0.98	1.01	1.00	1.00	0.97	1.00	1.03	1.03
	2020	-0.32	-1.10	/	/	/	0.82	1.00	1.00
	2021	-0.02	1.19	0.00	1.00	/	1.00	1.00	/

表2 CO₂排放与大气污染物排放当量协调程度的变化

一级源	化石燃料固定燃烧源				工艺过程源	移动源		生物质燃烧源	
二级源	电力供热	工业锅炉	民用锅炉	民用燃烧	建材	道路移动源	非道路移动源	工业生物质锅炉	
C(耦合度)	2018	0.461340	0.658558	0.758621	0.506639	0.771745	0.974718	0.729064	0.861675
	2019	0.645777	0.620255	0.765419	0.506161	0.000000	0.976848	0.934955	0.747759
	2020	0.558204	0.763158	0.765419	0.506161	0.000000	0.997675	0.934849	/
	2021	0.523736	0.772616	0.765866	0.515909	0.015725	0.997667	0.934890	0.635808
T(综合协调指数)	2018	/	/	0.416204	/	0.685954	21.096491	5.847619	0.033611
	2019	0.633886	0.220285	0.008403	0.076395	0.017456	1.025748	0.151103	0.002269
	2020	0.795477	0.174131	0.008403	0.076395	0.012948	0.404344	0.125975	0.000000
	2021	0.911813	0.219464	0.008390	0.006943	0.072785	0.325144	0.156367	0.001238
D(耦合协调度)	2018	/	/	0.561908	0.982528	0.727586	/	/	0.170181
	2019	0.639804	0.369639	0.080197	0.196642	0.000000	/	0.375865	0.041188
	2020	0.666362	0.364540	0.080197	0.196642	0.000000	0.635141	0.343173	/
	2021	0.691049	0.411778	0.080161	0.059848	0.033832	0.569548	0.382342	0.028052

大气污染物排放当量同步减少-0.30%，表现减排，CO₂排放量同比增加16.01%，表现增排；其他二级源表现协同效应，其中工业锅炉和非道路移动源表现协同增排效应，民用燃烧源和道路移动源表现协同减排效应，且减排速度相当。综上，民用燃烧、道路移动源、非道路移动源和工业生物质锅炉的大气污染物和CO₂排放的同根源性较强，是协同减排的关键二级源。为今后实证研究影响二氧化碳减排与大气污染治理协同效应的主要影响因素提供依据。

2.3 大气污染物排放当量与CO₂排放量耦合协调度分析

运用上述耦合协调模型计算出2018年~2021年碳排放量和大气污染物当量间的耦合度、协调指数及耦合协调度，如表2所示，并通过三个指数的变化趋势比较分析2018年~2021年4年间碳排放与大气污染物排放协调程度的变化。

根据计算出的2018~2021年涉及CO₂排放的各二级源耦合度C、综合协调指数T、耦合协调度D变化，可看出电力供热二级源及工业锅炉二级源耦合协调度D呈增加趋势，表明电力供热及工业锅炉碳排放与大气污染物控制间的协调性逐年增强。根据计算结果其他二级源尚未表现出该趋势。

3 结论

(1) 根据相关性分析，不同二级源排放的大气污染物与CO₂排放之间的相关性存在差异。对于电力供热和工业锅炉二级源，NO_x、CO与CO₂相关性最强；对于非道路移动源，主要燃料为柴油，各大气污染物排放量与CO₂排放均有较强的相关性；进一步针对工业锅炉分燃油锅炉和燃气锅炉，与燃气锅炉相比，燃油锅炉燃烧产生的大气污染物排放当量与CO₂排放相关性程度更高，相关性系数r为0.8465，为极强相关，故减少柴油燃烧或用燃

气锅炉代替燃油锅炉(天然气代替柴油),能够同时促进大气污染物和CO₂的协同减排,即能达到更好的减污降碳效果。

(2)根据弹性系数分析,2019年-2023年,各二级源协同减排弹性系数基本均大于0,说明研究区域大气污染物当量排放量和二氧化碳排放是同向变化的,侧面印证了二者的同根同源特征,具备开展协同减排研究的基础。总体来说,民用燃烧、道路移动源、非道路移动源和工业生物质锅炉的大气污染物和CO₂排放的同根同源性较强,是协同减排的关键二级源。这可为今后实证研究影响二氧化碳减排与大气污染物治理协同效应的主要影响因素提供依据。

(3)根据耦合协调度分析,电力供热二级源及工业锅炉二级源耦合协调度D呈增加趋势(接近1),表明电力供热及工业锅炉碳排放与大气污染物控制间的协调性逐年增强。根据计算结果其他二级源尚未表现出该趋势。

[注释]

①对应大气污染物排放清单固定燃烧源中的第一级分类来源

②此处生物质燃烧源为大气污染物排放清单分类

[基金项目]

基于排污许可证的固定污染源温室气体监管体系研究(沪环科[2023]第26号)。

[参考文献]

[1]胡涛,田春秀,李丽平.协同效应对中国气候变化的政策影响[J].环境保护,2004(9):56-58.

[2]Burtraw D, Krupnick A, Palmer K, et al. Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector[J]. J Environ Econ Manage, 2003, 45(3): 650-673.

[3]Cao J, Ho M S, Jorgenson D W. An Integrated Assessment of the Economic Costs and Environmental Benefits of Pollution and Carbon Control[J]. Chin Econ, 2012: 274-305.

[4]Wang B, Wang Y, Zhao Y. Collaborative Governance Mechanism of Climate Change and Air Pollution: Evidence from China[J]. Sustainability, 2021, 13.

[5]Yang X, Teng F. Air quality benefit of China's mitigation target to peak its emission by 2030[J]. Clim Policy, 2018, 18(1/5): 99-110.

[6]赵立祥,赵蓉,张雪薇.碳交易政策对我国大气污染的协同减排有效性研究[J].产经评论,2020,11(3):148-160.

[7]薛飞,周民良.中国碳交易市场规模的减排效应研究[J].华东经济管理,2021,35(6):11-21.

[8]Emission trading system (ETS) implementation and its collaborative governance effects on air pollution: The China story[J]. Energy Policy, 2020, 138(Mar.): 111281-111282.

[9]刘亦文,邓楠.碳排放权交易制度对减污降碳协同治理的影响研究[J].湖南工业大学学报,2024,38(2):65-74.

[10]李新,路路,穆献中,等.京津冀地区钢铁行业协同减排成本-效益分析[J].环境科学研究,2020,33(9):2226-2234.

[11]Morgenstern R, Krupnick A, Zhang X. The Ancillary Carbon Benefits of SO₂ Reductions From a Small-Boiler Policy in Taiyuan, PRC[J]. J Environ Dev, 2004, 13(2): 140-155.

[12]Qian H, Xu S, Cao J, et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries[J]. Nat Sustain, 2021: 1-9.

[13]《2020年中国生态环境状况公报》发布[J].电力科技与环保,2021,37(03):38.

[14]Jia X, Xi L, Shuxiao W, et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2020, 117(47): 29535-29542.

[15]Du W, Li M. Assessing the impact of environmental regulation on pollution abatement and collaborative emissions reduction: Micro-evidence from Chinese industrial enterprises - ScienceDirect[J]. Environ Impact Assess Rev, 82.

[16]邵建建,王静,秦亚南.减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J].化工管理,2023(28):73-75.

[17]郑逸璇,宋晓晖,周佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J].中国环境管理,2021,13(5):45-51.

[18]孙世达,张改革,孙露娜,等.河北省2013~2020年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益[J].环境科学,2023,44(10): 5431-5442.

[19]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.

[20]陆敏,徐好,陈福兴.双碳[J].中国人口·资源与环境,2022,32(11):121-133.

[21]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].环境科学,2023,44(04):1998-2008.

[22]唐湘博,张野,曹利珍.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.

作者简介:

夏忠燕(1987--),女,汉族,上海人,本科,工程师。