李翊宸,许 文,孙园园,等.基于增效内涵与机制的减污降碳协同增效研究进展 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1139-1152.
Li Y C, Xu W, Sun Y Y, et al. Research progress on synergistic pollution reduction and carbon reduction based on the connotation and mechanism of efficiency enhancement [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1139-1152.

基于增效内涵与机制的减污降碳协同增效研究进展

李翊宸[1,2],许 文[1],孙园园[1,2],乔 琦[1],张 玥[1,2],朱 旭[1],白 璐[1,2*] (1.中国环境科学研究院,生态工业实验室,北京 100012；2.黄河流域生态保护和高质量发展联合研究中心,北京 100028)

摘要：针对当前减污降碳协同增效研究偏重协同而忽视增效问题,采用文献计量法,凝练研究热点,讨论增效内涵与机制.结果显示:减污降碳协同增效的研究还处在早期探索阶段,热点集中于协同效应的量化表征、实现路径、特征分析与效果评估、效益评价四阶段;增效是污碳协同减排在系统层面引发的环境、生态、经济、气候、社会、健康等多方效益,体现为提高政策效率、降低社会减排成本等;从多维协同到多维增效依托于多要素联动的复杂系统,包括管理主体协同分工和区域联防联控等路径.未来需明确增效的共识,完善减污降碳协同增效的系统性界定;探究从多维协同到多维增效的科学机制,揭示协同与增效间的复杂关联.

关键词：减污降碳；协同增效；增效内涵；增效机制；文献述评
中图分类号：X32 **文献标识号**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1139-14

Research progress on synergistic pollution reduction and carbon reduction based on the connotation and mechanism of efficiency enhancement. LI Yi-chen[1,2], XU Wen[1], SUN Yuan-yuan[1,2], QIAO Qi[1], ZHANG Yue[1,2], ZHU Xu[1], BAi Lu[1,2*] (1.Ecological Industry Laboratory, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012；2.Joint Research Center for Ecological Protection and High-quality Development of the Yellow River Basin, Beijing 100028, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1139~1152

Abstract：Current research on the synergistic reduction of pollution and carbon emissions emphasizes "synergy" while neglecting "effectiveness," limiting a systemic understanding. This study aims to integrate and analyze bibliometric findings, further discussing the connotation and mechanisms of "efficiency enhancement". The results reveal that:(1) Research on synergistic pollution-carbon reduction remains in the early exploratory stage, with hotspots focusing on four phases: quantitative characterization of synergy, implementation pathways, feature analysis and effectiveness evaluation, and benefit assessment;(2) "Effectiveness" refers to the multi-dimensional benefits—environmental, ecological, economic, climatic, social, and health-related—triggered by pollution-and-carbon synergy at the systemic level, manifested as enhanced policy efficiency, reduced societal abatement costs, etc.;(3) The transition from multi-dimensional synergy to multi-dimensional effectiveness hinges on complex systems driven by multi-factor interactions, such as collaborative governance among stakeholders and regional joint prevention or control mechanisms.Future directions include: (i) clarifying the definition and consensus on "efficiency enhancement" to refine the systemic understanding of synergistic pollution-carbon reduction; (ii) investigating the scientific mechanisms linking multi-dimensional synergy to efficiency enhancement, thereby unveiling their intricate relationship.

Key words：pollution reduction and carbon mitigation；synergistic effects；connotation of synergistic effects；mechanisms of synergistic effects；critical review

2022 年,生态环境部等 7 部门联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》,强调坚持系统观念,强化目标、区域、领域、任务、政策、监管协同[1].相较以往各类政策与研究中屡次提及的“减污降碳”或“减污降碳协同”,该实施方案进一步提出“减污降碳协同增效”的更高目标和要求.从政策及研究历程来看,“减污降碳协同增效”的发展经历了协同效应——协同控制——协同增效的递进式转变.2014 年 IPCC 第五次报告将协同效应定义为温室气体政策或措施的正面附加影响[2],而国内更强调将协同效应定义为温室气体减排与污染物控制之间对等的相互影响.为有效实现污碳协同减排,中国学者首先将协同控制这一概念定义为实现最大化协同效应的手段和途径[3].具体而言,协同控制可以理解为

收稿日期：2025-07-18
基金项目：黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-0404)
* 责任作者, 研究员, bailu@craes.org.cn

在有限的经济资源技术等约束下,实现最大程度削减温室气体和污染物的双赢.随着污染防治攻坚战等任务的推进使得中国生态环境质量持续改善,碳排放强度显著降低,但结构性、根源性、趋势性压力尚未根本缓解,加之同时面临实现生态环境根本好转和碳达峰碳中和两大战略任务,减污降碳是一项复杂的系统性工程,涉及自然、社会、经济、技术、能源、环境等诸多领域,需要统筹考虑和系统谋划[4].在实现协同效应的基础上,还需要在系统层面统筹效益最大化,这些效益体现在环境、生态、经济、气候、社会、健康等诸多方面,即协同增效.

2016 年《巴黎协定》签署后,关于减污降碳、协同减排的研究呈爆发式增长,随着中国“双碳”目标的提出,相关中文文献也大量涌现[5].已有学者采用文献计量的方法对已发表研究的数量、时间、国家和机构等外部特征进行分析[5-6],或从环境标准体系[7]和政策[8]等角度对减污降碳开展研究述评.但此类分析多聚焦于减污降碳、或减污降碳协同的理念及应用等方面[9-13],鲜少探讨“增效”,一定程度上制约了对“减污降碳协同增效”的系统性界定及研究.

本研究基于文献计量方法跟踪凝练了“减污降碳协同增效”研究的热点聚类和演变趋势,聚焦协同增效的内涵与机制,探讨了从区域、领域、政策等多维协同到实现多维增效的机制,并从增效内涵完善、探究从协同到增效机制的潜在方向等角度提出研究展望,以期为相关学者提供参考.

1.1 数据来源

本文选取中国知网(CNKI)和 Web of Science (WoS)作为核心数据来源.综合考虑研究对象的全面性和准确性,CNKI 数据库检索式为(SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同')AND ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')),文献文种为中文,文献类型选择为研究论文,文献来源选择为学术期刊,去重后整理得到 176 篇文献,最早的发文年份为 2021 年.WoS 数据库检索式为 TS=(("pollut* reduc*" OR "emission reduc*" OR "air pollut* control") NEAR/3 ("carbon reduc*" OR "carbon mitigat*" OR "CO_2mitigat*" OR "decarb*") AND ("synerg*" OR "co−benefit*" OR "co−control" OR "coordina* effect*")),文献文种为英文,文献类型选择为 Aticles 和 Review Articles,数据库选择为 Web of Science Core Collection,去重后整理得到 107 篇文献,最早发文年份为 2012 年.以上内容检索日期均为 2025 年 4 月 1 日.

1.2 研究方法

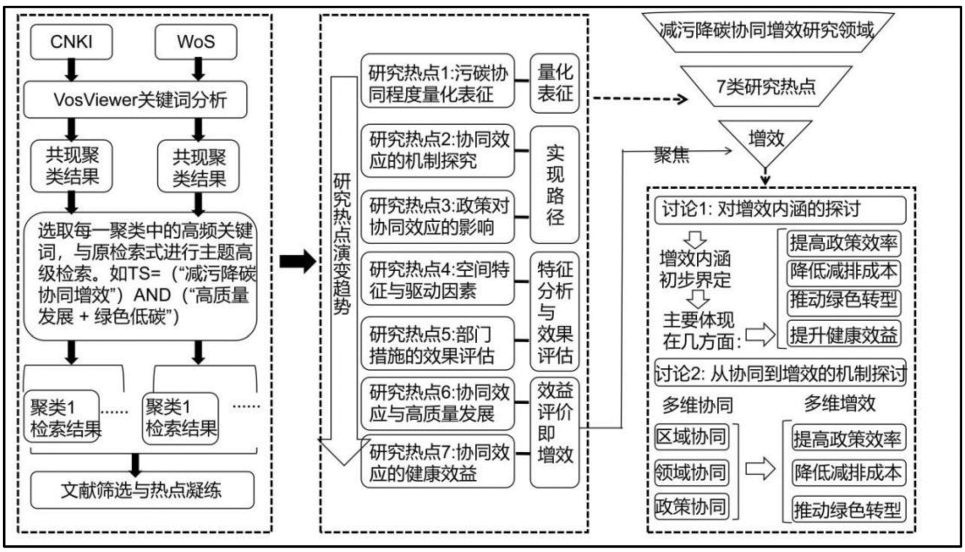


图 1 研究框架示意

Fig.1 Research framework

结合 Citespace 和 VOSviewer 各自优势,对中英文文献分别进行文献计量的初步分析,包括总发文量趋势、地区发文量、主要研究机构、研究热点分析等.其中,研究热点采用对文献关键词进行共现和

聚类的方法进行识别,在 VOSviewer1.6.20 中选择“Keywords”作为共现和聚类节点,算法选取“fractional counting”,基于 Network Visualization 和 Overlay Visualization 分析功能,分别得到中文文献和英文文献重叠交叉可视化的关键词分布共现聚类网络及其时间分布.基于上述共现聚类结果,选取每一聚类中的高频关键词与原检索式进行主题检索,去重筛选后得到各聚类的文献检索结果,在聚类结果的基础上分析文献内容进而归纳凝练出“减污降碳协同增效”的研究热点.

总体来看,当前研究热点可归类为协同效应的量化表征、实现路径、特征分析与效果评估、效益评价四个方面,具体表现为 7 类研究热点.针对研究呈现出逐步深入至协同产生的效益,也即“增效”等方向探索,重点围绕“增效”内涵、从“协同”到“增效”的机制展开讨论.研究框架如图 1 所示.

2　结果与分析

2.1　研究特征概述

一个国家或地区文献发表数量一定程度上反映了其在某领域研究的活跃度和影响力[14].用 CiteSpace 对 WoS 核心数据库中英文文献的主要发文国家分析结果显示,中国是发表有关“减污降碳协同增效”研究文献的主要国家,发文量为 83 篇,占到了检索总数的近 80%,是发文量排名第二的美国的 4.61 倍,表明中国是该领域最主要的研究力量.检索出的关于减污降碳协同增效的中英文文献发文量的年际变化分析结果(图 2)显示出,国内的研究起步较晚,中英文文献自 2022 年后快速增长.发文量变化趋势与生态环境部于 2020 年印发的《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》中首次明确“减污降碳协同增效”的政策表述,后于 2021 年印发《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》中将“减污降碳协同”列为基本原则,并在 2022 年印发《减污降碳协同增效实施方案》的政策历程相一致,表明政策对该领域学术研究存在导向作用.

利用 CiteSpace 结合发文量和中心性对国内外有关“减污降碳协同增效”的主要研究机构进行分析,结果表明(表 1),主要研究机构为中国的科研单位和政府部门,其中心性关系比较分散,说明各机构间合作和引用关系稀疏,未形成紧密联系的网络核心,原因在于该研究领域仍处于早期探索阶段,机构间尚未建立稳定的合作模式.

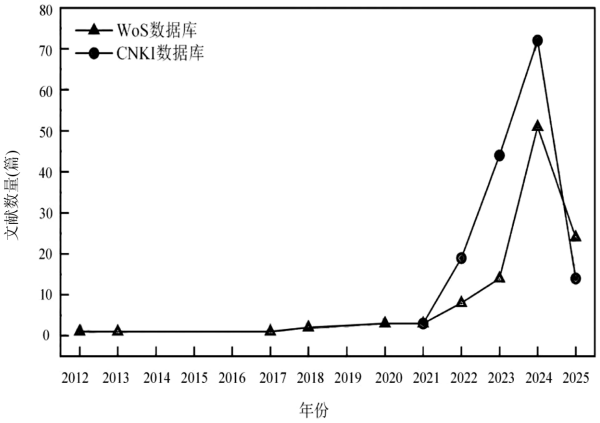


图 2　“减污降碳协同增效”中英文文献发表数量

Fig.2　Number of publications in both Chinese and English on “Synergistic pollution reduction and carbon reduction”

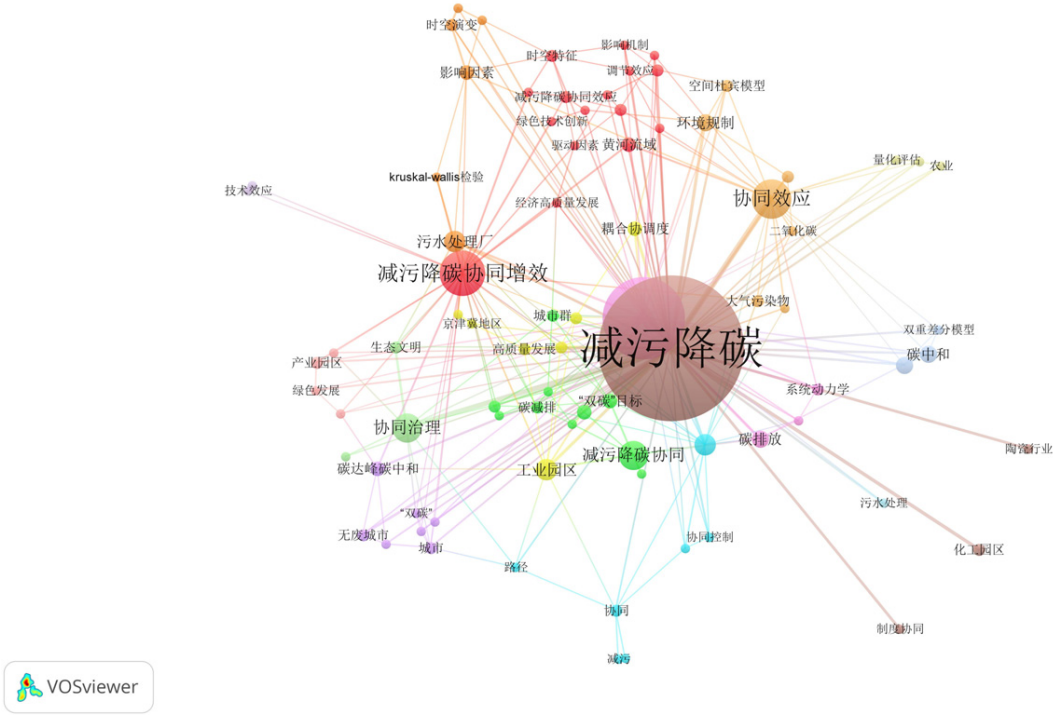
表 1　“减污降碳协同增效”研究论文发表的主要研究机构

Table 1　Main research institutions on “Synergistic pollution reduction and carbon reduction”

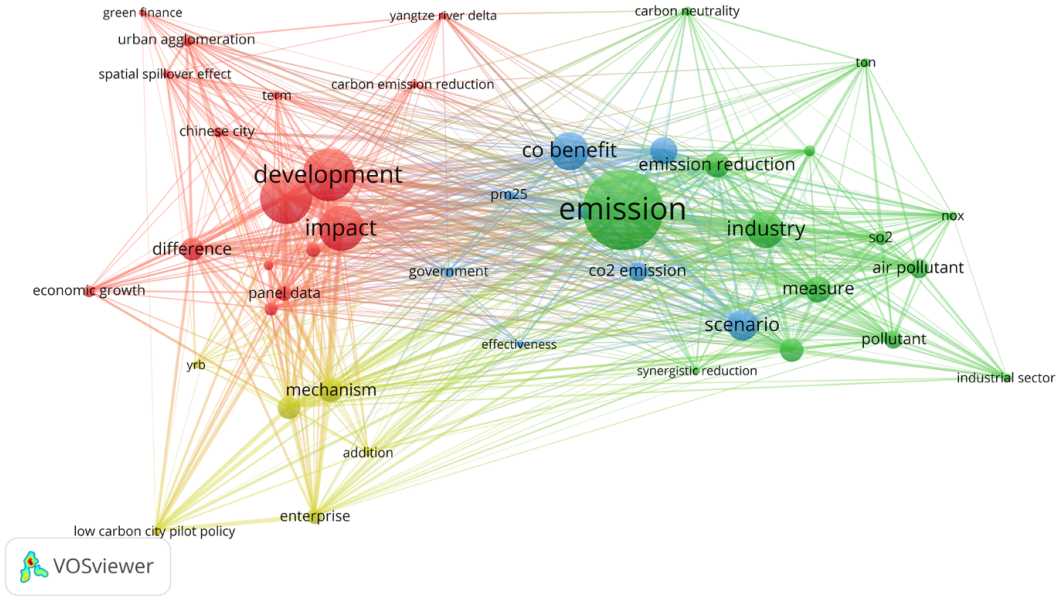
排序	机构	发文量	中心性
1	中国环境科学研究院	12	0.00
2	清华大学环境学院	8	0.00
3	生态环境部环境与经济政策研究中心	7	0.00
4	生态环境部对外合作与交流中心	5	0.01
5	清华大学碳中和研究院	4	0.00
6	生态环境部环境规划院	4	0.00

2.2　研究热点与述评

2.2.1　研究热点与趋势分析　如图 3 所示,整合后结果显示,以“减污降碳协同增效”为主题的中文文献中,出现频次较高且具有代表性的关键词主要包括:路径、时空特征+空间分布、高质量发展+绿色低碳、协同治理、量化评估.对上述聚类分别提取高频关键词,并与“减污降碳协同增效”进行主题检索,对初步的检索结果进行去重,删除报道、法律类文献等与聚类主题偏离较远的记录,得到最终筛选结果,见图 4(a).以“减污降碳协同增效”为主题的英文文献中,出现频次较高的关键词主要包括:developmet+economic growth+impact、Mechanism+enterprise、Industry+measure、effectiveness+government.对上述聚类分别提取高频关键词,并与原检索式进行主题检索,对初步的检索结果进行去重,得到最终筛选结果,见图 4(b).



(a) CNKI 共现聚类结果



(b) WoS 共现聚类结果

图 3 CNKI 和 WoS 共现聚类结果

Fig.3 Co-occurrence clustering results of CNKI and WoS

从上述筛选结果可知,所收集的文献基本能反映当前国内外“减污降碳协同增效”研究的热点.对文献内容进行归纳和凝练后发现,“减污降碳协同增效”的研究热点主要聚焦于 7 个方面.(1)污碳协同程度的量化表征;(2)协同效应的机制探究,(3)特定政策对协同效应的影响,(4)部门减污降碳措施的效果评估,(5)空间特征和驱动因素分析,(6)协同效应与高质量发展的耦合研究,(7)协同效应的健康效益评估.

如图 5 所示,根据关键词时空分布,归纳出“减污降碳协同增效”中文文献研究热点、主要研究方法和研究范围的演进过程,以及英文文献研究热点、研究尺度和讨论的主要污染物的演进过程,如图 6 所示.

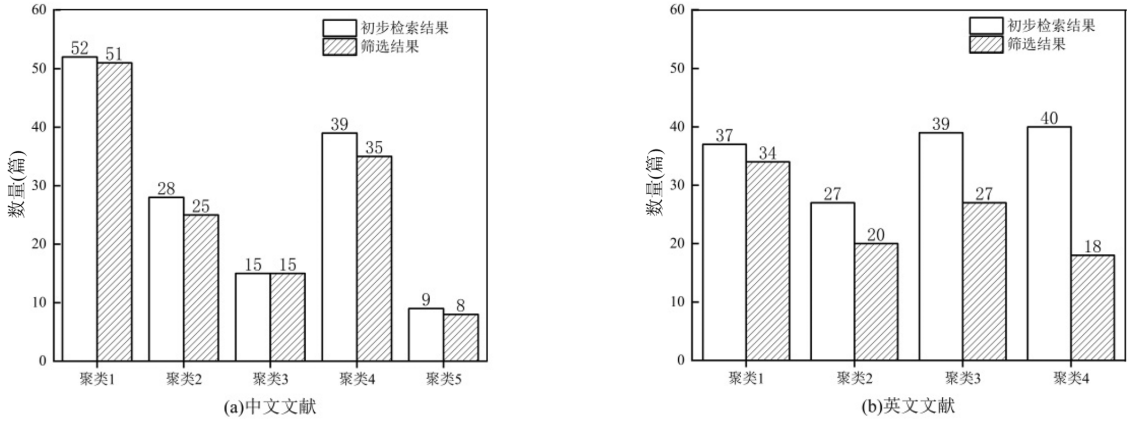


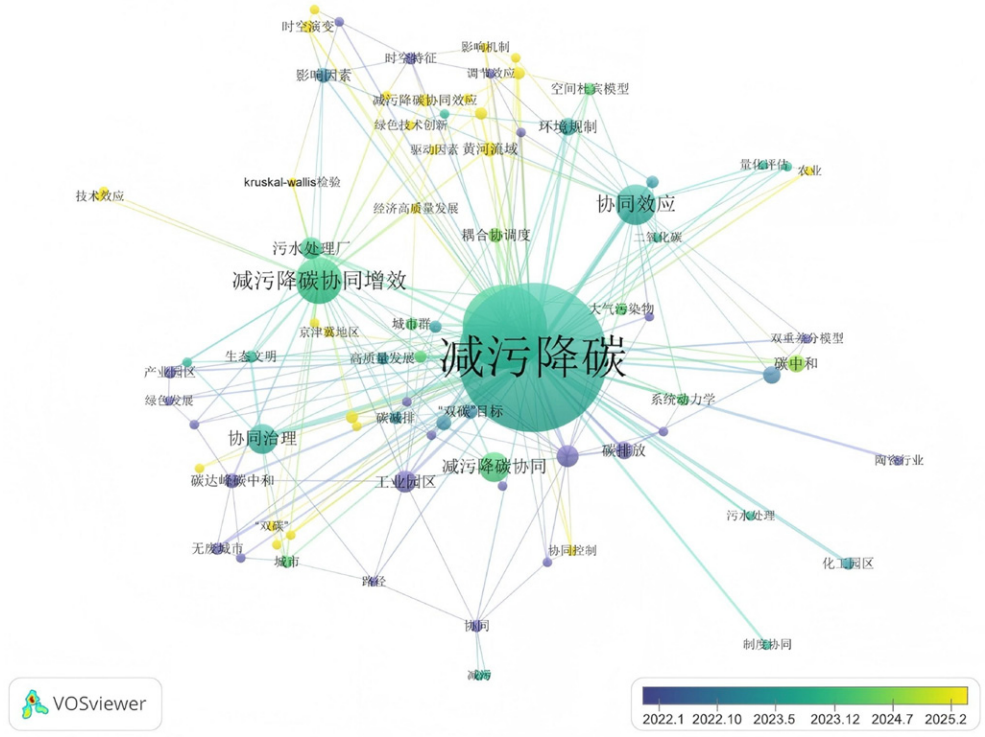
图 4　文献聚类检索和筛选结果

Fig.4　Results of literature clustering retrieval and screening

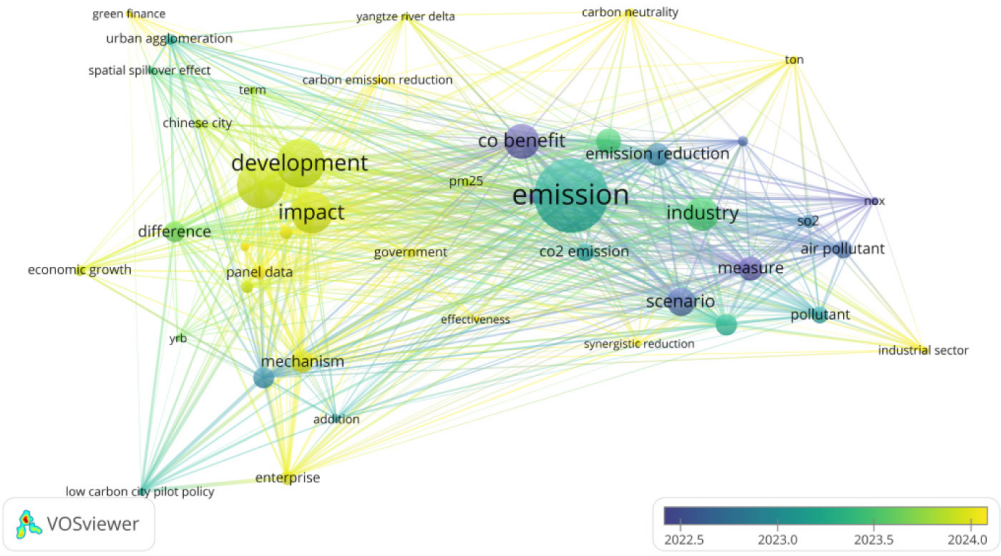
(a):聚类 1 (SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同')* ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')) AND (SU= '路径'))、聚类 2 (SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同') AND ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')) AND (SU='时空' + '空间'))、聚类 3 (SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同') AND ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')) AND (SU='高质量发展' + '绿色低碳'))、聚类 4　(SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同')* ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')) AND (SU='协同治理'))、聚类 5　(SU=(('减污' + '污染减排') AND ('降碳' + '碳减排' + '双碳') AND ('协同')AND ('增效')) OR (KY='减污降碳协同增效')) AND (SU='量化评估'+'系统动力学')).(b):聚类 1TS=(("pollut* reduc*"OR "emission reduc*" OR "air pollut* control") NEAR/3 ("carbon reduc*" OR "carbon mitigat*" OR"CO2mitigat*"OR "decarb*") AND ("synerg*" OR"co-benefit*" OR"co-control" OR "coordina* effect*")、聚类 2TS=(("pollut* reduc*" OR "emission reduc*" OR "air pollut* control") NEAR/3 ("carbon reduc*" OR "carbon mitigat*" OR"CO2mitigat*" OR "decarb*") AND ("synerg*" OR "co-benefit*" OR "co-control" OR "coordina* effect*") AND (“mechanism” OR“enterprise”))、聚类 3TS= (("pollut* reduc*" OR "emission reduc*" OR "air pollut* control") NEAR/3 ("carbon reduc*" OR "carbon mitigat*" OR "CO2mitigat*" OR "decarb*") AND ("synerg*" OR "co-benefit*" OR "co-control" OR "coordina* effect*") AND (“industry” OR “measure”)聚类 4TS=(("pollut* reduc*" OR "emission reduc*" OR"air pollut* control") NEAR/3 ("carbon reduc*" OR "carbon mitigat*" OR "CO2mitigat*" OR "decarb*") AND ("synerg*" OR"co-benefit*" OR "co-control" OR "coordina* effect*") AND (“effectiveness” OR“government”))

2.2.2　研究热点述评　(1)协同效应的量化表征:总体来看,无论国内外,在进行减污降碳协同增效研究时首先需要对研究目标的污碳协同程度进行量化评估,一般采用协同度进行表征,即研究热点之 1.多数观点认为,污染物和碳排放同步减少的水平是政策实施效能最直观的体现,例如《减污降碳协同增效实施方案》首次提出了减污降碳协同度的概念[1].协同度量化表征方法可以概括为指标体系法[15-23]、耦合协调度模型[24-27]、系统动力学[28-30]和计量模型[31-33]四类.不同量化方法基于对协同效应的多角度理解,其主要差异如表 2 所示.

(2)协同效应的实现路径:在量化协同效应的基础上,回溯并揭示减污降碳协同发展的影响因素和实现路径也是重要的研究方向,目前这方面的研究可以概括为研究热点之 2 和研究热点之 3.研究热点之 2 基于宏观视角,应用 LMDI、STIRPAT 等模型探究减污降碳协同效应的影响因素,发现能耗强度、技术进步、人口规模和密度、产业结构、经济发展水平是主要影响因素[34-36],其中降低能耗强度产生的协同效果最为明显[35],经济发展与协同减排存在倒 U 关系[36].研究热点之 3 以准自然实验为代表的事后评估方法,探讨特定政策对减污降碳协同效应的影响及其空间溢出效应,这类研究基于机理分析提出假设,随后进行验证,再基于空间计量方法量化空间溢出效应.如 Du 等[37]验证中国环境规制促进工业企业协同减排;Cheng 等[38]发现命令和控制型环境政策的减排效果更强;Wang 等[39]验证了加大环境监管力度是协同效应的主要拓展路径.众多学者同样遵循上述思路,验证了构建碳市场[40-41]、强制性清洁生产审核[42]、推动数智融合发展[43]、发展数字经济[44]、“蓝天保卫战”[45]等政策会增强减污降碳的协同效应.这些研究从宏观层面识别减污降碳的关键因素,量化政策实施的效能,为相关政策制定提供实证支持与科学依据.



(a) CNKI 关键词时间分布



(b) WoS 关键词时间分布

图 5 CNKI 和 WoS 关键词时间分布

Fig.5 Time distribution of keywords in CNKI and WoS

(3)协同效应的特征分析与效果评估:在量化协同效应的基础上,分析协同效应的空间特征并对部门具体减污降碳措施的协同性进行评估是重要的研究方向,目前这方面的研究可以分别概括为研究热点之 4 和研究热点之 5.研究热点之 4 聚焦于探究协同效应的空间异质性及驱动因素.当前在长三角、长江经济带、环渤海地区和黄河流域等区域尺度上探究减污降碳协同效应的地区差异和空间联系的方法多样,包括空间自相关[46]、泰尔指数和空间马尔科夫链[47]、探索性空间数据分析(ESDA)[48]、空间引力模型[49]等.对于空间异质性驱动因素的分析,地理加权回归(GWR)[50-51]和地理探测器[52]是目前应用最广泛的两种模型.这类研究呈现污碳协同的空间依赖性与异质性,为探究多区域尺度协同发展的潜在路径和优化政策资源配置奠定基础.研究热点之 5 聚焦于对部门减污降碳措施的协同性评估.这类研究多从污染物—碳

排放协同减排、成本效益分析和环境效益分析等角度,对技术的协同控制效果进行评估.主要采用“单位污染物减排成本”“边际减排成本”等指标,并结合生命周期评价等环境效益的量化方法,对钢铁企业技改措施[53]、广州市区增城区减污降碳措施库[54]、水泥行业共性技术[55]进行评估.此外,有研究者以中国煤电行业[56]、钢铁行业[57]、交通运输行业[58]为对象,应用上述指标评估具体减排措施的环境-经济合理性,再以“减排成本-效果”最优为目标,规划行业或区域协同控制路径[59].这类研究将各类技术可行的减排措施进一步精准聚焦至可落地、可应用层面,切实解决了部分行业企业的现实需求.

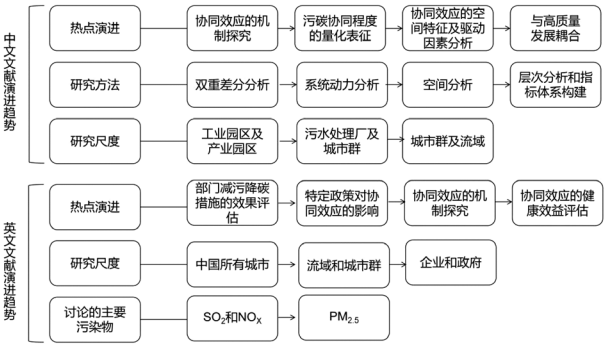


图 6　中英文文献演进趋势

Fig.6　Evolution trend of Chinese and English literature

(4)协同效应的效益评价(增效):在量化协同效应的基础上,量化协同效应产生的效益也是重要的研究方向,目前这方面的研究可以概括为研究热点之 6 和研究热点之 7.

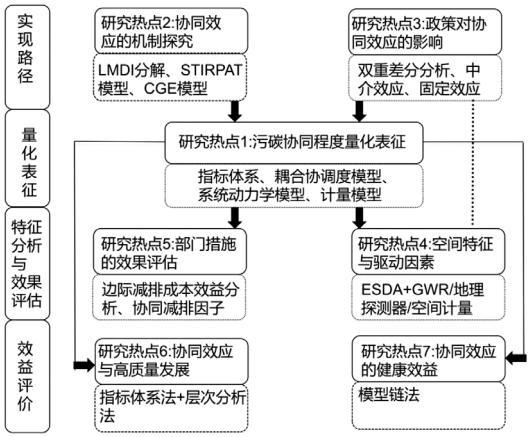


图 7　减污降碳协同增效研究热点

Fig.7　Research hotspots on synergistic pollution reduction and carbon reduction

研究热点之 6 聚焦于减污降碳协同效应与高质量发展耦合研究,国内诸多学者通过构建指标体系方法开展此类研究(图 7,表 3),其特点是多为回顾性研究,存在客观性不足和缺乏从协同到增效层次的共性问题.部分研究即使采用熵权法等进行客观赋权,但资源能源环境等效益指标仍需要主观选取甚至量化.指标体系构建缺乏“压力-状态-响应”的层次性,体现在同一层次上耦合污碳减排及环境、气候、社会效益等响应指标,所选取的响应指标改善并不完全由污碳协同减排引起.

表 2　协同效应量化表征的主要方法梳理及述评

Table 2　Overview and review of major methods for quantitative characterization of synergistic effects

协同度量化方法	方法述评	对协同效应的理解
指标体系法[15-23]	指标选择和权重设置上存在主观性,且忽略了污染物控制与碳减排的相互影响	将协同效应视为气候政策和污染控制政策并举的效果
耦合协调度[24-27]	可用于分析污染物控制和碳减排两个子系统的动态变化和趋势	
系统动力学[28-30]	可刻画复杂的反馈机制并进行动态分析,但存在结构简化风险且依赖高精度历史数据校准模型	
计量模型[31-33]	引入控制变量减少混杂因素的影响,但也存在需要大量高质量数据为支撑,易存在内生性和共线性等局限	将协同效应视为降碳政策的减污效应和减污政策的降碳效应两方面

表 3　协同效应与高质量发展耦合研究的指标体系梳理

Table 3　Overview of the indicator system for the study on the coupling of synergistic effects and high-quality development

路线	研究对象	方法	减污降碳协同与高质量发展的耦合评价指标
自下而上	燃煤电厂[60]	指标体系法	联合能源资源、经济、社会、管理相关指标
	钢铁行业技术[61]		涵盖技术应用潜力、环境效益、气候效益、经济效益
自上而下	长江经济带[62]		经济资源—减污降碳指标体系
	工业园区[63]		综合产业发展、能源结构、循环经济、运营管理相关指标
	中国 30 省份[64]		构建降碳-减污-扩绿-增长综合评价指标体系

研究热点之 7 聚焦于协同效应对以死亡率为表征的健康效益影响.这类研究多以气候变化政策为中心,分析大气污染物减少的协同效应,进而探究其带来的健康效益.此类研究一般采用模型法,且多使用 GAINS 模型,另外部分学者采用模型链进行更深入的前瞻性研究.GAINS 模型用于评估成本最优情况下不同政策措施集合的协同效应及其健康效益,由于广泛地覆盖空间和部门,因此不适用于小区域的研究[65].Wagner 等[66]、Zheng 等[67]、Lu 等[68]使用 GAINS 模型分别对《联合国气候变化框架公约》附件 1 国家、长江流域、京津冀地区、欧洲、协同减排进行模拟和预测,并评估其健康效益.另外一部分学者采用模型链法,探究气候变化政策对未来能源消耗的影响,预测碳污协同减排程度,再结合各类浓度响应函数以死亡人数或病例数为表征衡量健康效益,最后货币化[69-73],如图 8 所示.模型链可将健康效益的量化结果视为协同效益的纯粹表征,从而揭示从协同到增效的层次性.但也存在模型链过长,各环节模型的假设和不确定因素叠加,最终结果可信度降低,以及模型情景设置过多,各国之间缺乏兼容,从而无法评估各国的效益增量[74]等问题.

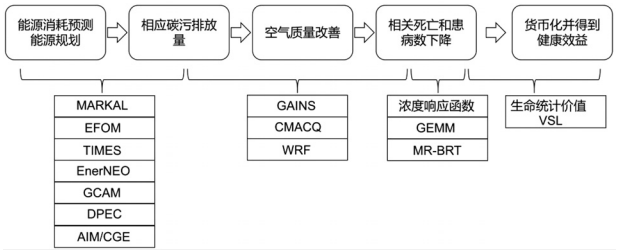


图 8 减污降碳协同健康效益的研究路径(模型链法)

Fig.8 Research path of health benefits from synergistic pollution reduction and carbon reduction (model chain)

2.3 “增效”内涵与机制探讨

从对减污降碳协同增效文献计量的热点分析结果以及热点述评发现:一方面,目前的研究多集中在协同效应的量化、实现路径、特征分析及效果评估等方面,鲜少有研究探讨增效;另一方面,当前研究重点正逐步向协同的效益评价等增效方向演进.为此,本研究进一步聚焦增效的研究进展,初步界定增效的内涵和实现机制,并对提升政策效率、降低减排成本、推动绿色转型等维度增效的内涵和实现机制展开讨论.

2.3.1 对“增效”内涵的探讨与研究进展 实施污碳协同减排策略的成本效益要优于独立实施污染物和温室气体减排策略[75],而部分减污与降碳措施之间又存在冲突关系.在此背景下,减污降碳协同增效的内涵包含以协同效应为机制,协同控制为手段,统筹资源能源节约等目标,实现温室气体和环境污染物协同减排的中心目标,减污与降碳相互支撑,从而在系统层面产生环境、生态、经济、气候、社会、健康等多方效益,即“增效”,如环境质量提升、生态系统质量改善、绿色低碳产业发展、气候变暖趋势减缓、社会可持续发展、污染相关发病率及死亡率下降等范畴,如图 9 所示.基于上述分析,增效的内涵可以概括为污染物和温室气体协同减排在系统层面引发的多方效益.在对研究热点之 6 和研究热点之 7 的文献内容分析后发现,“增效”的内涵主要体现在提高政策效率、降低社会减排成本、推动绿色转型、提升健康效益等四个方面.

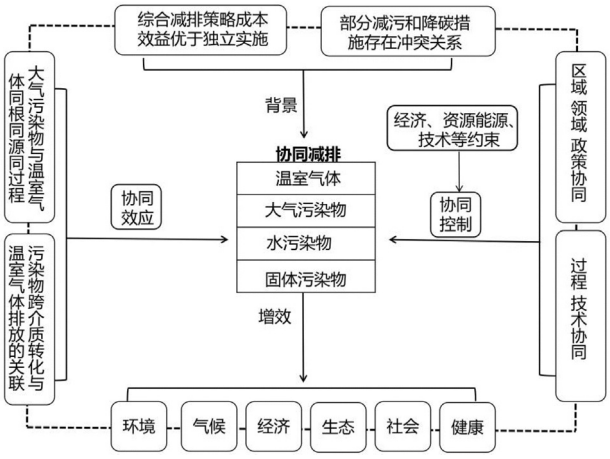


图 9 “增效”的内涵

Fig.9 The connotation of synergistic enhancement

实施污碳协同减排提高政策执行的效率.一方面,污碳协同减排通过识别污染物与碳排放的同源性和技术耦合性,能够以单一管理手段同步实现多项环境目标,提高政策执行的边际效益,如燃煤锅炉超低排放改造政策同时减少 SO_2 和 CO_2 排放.另一方面,污碳协同减排强调系统化分析政策优先级,合理权衡政策的执行方向,从而避免政策叠加导致的效率损失,但目前鲜有学者对这方面展开研究.

实施污碳协同减排降低社会减排成本.协同减排通过同一政策或干预同时减少 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 等多种污染物和温室气体,实现“一措多效”,从而

分摊治理成本、降低减排成本.已有多项实证研究验证了协同治理的成本效益,Chae 等[76]的研究表明,联合减排政策的成本小于单独实施污染物或碳减排政策,能够较经济地实现减污降碳的双重政策.Van 等[77]的研究表明,在气候措施的基础上,欧洲通过烟气脱硫等附加技术实现的 SO_2 平均减排成本可降低 50%~70%,NO_x 平均减排成本可降低约 50%.Jiang 等[78]的研究表明,考虑到协同效益后,中国各省份的减排成本将被抵消 4.3%~18.9%.

实施污碳协同减排推动绿色转型.协同减排的效果主要通过优化能源消费结构、降低碳排放强度两条路径来实现[32].绿色转型聚焦于向低碳、清洁、可持续的发展模式全面转变,其主要内涵包含技术革新和能源结构优化等方面.因此,实施协同减排,必须将工作重心从末端治理转向源头防控,倒逼能源结构和产业结构的转型升级[79],进而推动产业和社会绿色转型.实践层面,自“十四五”以来,“1+N”政策体系下的污碳协同减排实现能源绿色低碳转型的重大突破.中国水电、风电、太阳能发电、生物质发电和在建核电装机均居世界第一,建成了世界上最大的清洁电力供应体系[80].已有学者在这方面展开实证分析,构建减污降碳指数和能源绿色低碳转型评价指标分别量化协同水平和绿色转型程度,对二者关联展开探讨[47].

实施污碳协同减排提升健康效益.协同减排提升健康效益主要体现在污染减排的直接效应和气候改善的间接效应两个层面.第一层面是降低空气污染相关疾病负担.Yue 等[81]评估了《大气污染防治行动计划》的健康效益,发现该政策推动的空气质量改善带来了显著健康效益,2017 年相关死亡较 2013 年减少 6.4 万例,降幅为 6.8%.第二层面是缓解气候变化相关的健康风险.碳排放控制有助于减缓全球气候变暖,降低高温暴露等公共卫生威胁发生的频率,已有团队基于高温—死亡率模型对高温相关的死亡风险负担造成的健康效益损失进行评估[82],研究表明每年约有 50 万人的死亡与高温暴露相关,占全球死亡风险的 0.91%.然而,污碳协同减排对高温暴露等威胁发生频率的影响尚缺乏评估,其因气候改善产生的间接健康效益有待研究.

2.3.2　对“增效”机制的探讨与研究进展　在辨析“增效”的内涵后,一个自然的问题是“协同”如何对“增效”产生影响,即从“协同”到“增效”的机制.从“协同”到“增效”机制的核心在于通过协同控制实现污染物减排与碳减排的相互促进,从而在系统层面引发多方效益.然而,协同控制不仅包含区域、领域、政策等宏观层面的协同,还包含源头减量、过程控制、末端减排等过程和技术微观层面的协同.系统层面的多方效益包含环境、生态、经济、气候、社会、健康等诸多方面.可以发现,从多维“协同”到多维“增效”的运行机制依托于一个多要素相互关联、相互作用的复杂系统,仍需持续性探索.鉴于此,本文将从跨区域尺度协同、多领域部门协同、政策协同、过程和技术协同等维度的“协同”出发,初步讨论其对提升政策效率、降低减排成本、推动绿色转型等维度的“增效”的影响机制.

跨区域、多领域的减污降碳政策协同可通过管理主体协同分工、区域联防联控等路径,提高政策的执行效率.政策执行效率的核心是从政策制定到落地的过程中,用最小的成本实现最优的政策效果,主要包含达成目标的速度和质量、社会公平等评价维度.首先,减污降碳政策协同通过管理主体协同分工提升达成目标的速度和质量.如欧盟各国在解决环境污染问题时多依赖中央政府主导的、行政权威支撑的、自上而下的直接强制型机制,在应对气候变化时多依赖中央政府、地方政府、公司企业、非政府组织、利益集团等的互动机制,如碳排放交易机制,已形成高效减排示范.其次,减污降碳政策协同通过区域联防联控提升社会公平.区域联防联控不仅避免高排放企业向监管宽松的地区转移,抑制“污染天堂”和碳泄露风险,而且还可通过生态补偿等政策促进区域公平,如长江流域生态补偿政策促进区域生态公平.

跨区域、多领域的减污降碳过程和技术协同可通过产业链传导、重点行业关键共性技术突破等路径,降低社会减排成本.一方面,在整个产业链中,污染物和碳排放通过上下游部门的产品投入和产出在工业部门之间不断传播,意味着产业链中任一环节的减排成果,都将有效抑制污碳在部门间的传播,从而降低全产业链的边际减排成本.产业链中污碳排放路径一致性程度越高,实现污碳协同减排的潜力越大,进而显著降低全产业链的边际减排成本.

已有研究发现 CO_2、SO_2 和 PM 在产业链中排放路径重叠程度较高,如 Song 等[83]的研究显示,“资

本形成—建设—非金属矿物产品”和“资本形成—建设—金属冶炼”是污碳排放的最关键路径,Lin等[84]基于部门投入产出表,研究发现 2002~2020 年关键排放产业链中,“双高”产业链占比基本都为50%左右.另一方面,重点行业关键共性技术突破通过规模经济效应和技术溢出效应,降低边际减排成本.电力、钢铁、建材、化工、交通等重点行业的关键共性技术主要是绿氢和碳捕集、利用与封存等技术.规模经济效应是指这些技术由于具有跨行业、跨企业的普适性,其研发成果可通过大规模应用薄摊单位减排成本.技术溢出效应是指共性技术还会在不同行业间形成技术扩散,从而降低减排成本,如氢能冶炼技术在钢铁行业的成熟,可快速迁移至有色金属冶炼等领域,降低有色行业的减排成本.

跨区域、多领域减污降碳政策协同可通过减源效应加快能源消费结构转型、波特效应促进绿色技术创新等路径,推动绿色转型.跨区域、多领域减污降碳政策协同的重要支撑是市场激励型政策协同,尤其是排污权交易制度和碳交易制度(ETS)的协同,如欧盟碳排放交易体系(EU ETS)在各成员国间实现造纸、能源、航空等 8 大行业的 CO_2 配额交易,加州碳市场基于交叉行业折价系数在州内实现部分跨领域交易,中国分别在 2007 年和 2011 年开始试点 SO_2 排污权交易和碳排放权交易.一方面,市场型政策协同基于减源效应加快能源消费结构转型.市场型政策下,高排放企业为获得更多污碳排放权需支付高额费用,出于利润最大化考虑,企业会采取减少污染要素投入、增加清洁能源替代、提升能源利用效率等措施从源头减少排放.另一方面,市场型政策基于波特效应促进绿色技术创新.波特效应核心观点是:严格但设计合理的环境规制能够刺激企业技术创新,提升竞争力,甚至创造新的市场优势.波特效应具体表现为,市场型政策下,为节约排放权支付费用,企业将有动机增加清洁生产技术的研发投入,加大污染减排、碳捕集与利用技术的研发力度与试点应用,提升以污碳控制为导向的技术创新水平.

3 结论

3.1 从横向特征来看,减污降碳协同增效的研究还处在早期探索阶段,各机构间未形成紧密联系的网络核心,中国是最主要的研究力量.研究内容多集中于“协同”,鲜少探讨“增效”.当前的研究热点聚焦在协同效应的量化表征、实现路径、特征分析与效果评估、效益评价等四个方面,并分别为科学量化协同度、优化政策资源配置、促进减排措施落地、探讨多方效益提供了实证支持.此外,效益评价层面的研究方法存在从协同到增效层次不突出、各国之间缺乏兼容的共性问题.

3.2 从纵向特征来看,减污降碳协同增效的研究趋势呈现出“协同的量化表征与实现路径——特征分析与效果评估——增效”的演进特征.中文文献和英文文献在研究尺度演进上呈现相反趋势,中文文献选取的研究尺度呈现出“从工业园区到城市群及流域”的上移趋势,而英文文献选取的研究尺度则呈现出“从流域及城市群到企业”的下移趋势.随着治理阶段的发展,探讨的主要污染物从 SO_2、NO_x 逐步转移到 $PM_{2.5}$.

3.3 增效的内涵可以概括为污染物和温室气体协同减排在系统层面引发的环境、生态、经济、气候、社会、健康等多方效益,主要体现在提高政策效率、降低社会减排成本、推动绿色转型、提升健康效益等四个方面.实证研究进展方面,目前已有多项研究量化了协同减排降低的社会减排成本和提升的健康效益,但对提高政策效率、推动绿色转型等方面的研究还处在探索阶段.

3.4 从多维协同到多维增效的运行机制依托于一个多要素相互关联、相互作用的复杂系统,需开展持续性探索.从跨区域、多领域的政策协同到提高政策效率、降低社会减排成本、推动绿色转型等增效方面的机制分别可通过管理主体协同分工和区域联防联控、产业链传导和重点行业关键共性技术突破,减源效应和波特效应等路径发挥作用.实证研究进展方面,目前已有研究对碳交易或排污权交易制度推动绿色转型的机制进行分析,但并未拓展到政策、区域、领域等多维协同对推动绿色转型、提高政策效率、降低减排成本等多维增效的机制分析.

4 展望

确立“增效”内涵与共识,完善“减污降碳协同增效”系统性界定.减污降碳在系统层面产生多方效益,但对“增效”的预期还未达成共识.结合当前实际,国内的主要议题应当是高质量发展,但除了提高

政策效率、降低减排成本、推动绿色转型、提升健康效益之外,高质量发展的内涵还包括能源结构优化、全要素生产率提升、国际贸易竞争力重构、生态改善、资源效率提升、减缓全球变暖、抵御极端气候等诸多方面.然而,上述概念在内涵界定上存在复杂性和交叉性,并且减污降碳在上述方面可能产生效益尚未被充分揭示,导致难以明确界定“增效”的核心内容和具体内涵.未来应深入解析上述概念的内涵,基于中国国情从理论上界定“增效”核心议题,确立“增效”共识,从而完善“减污降碳协同增效”的系统性界定.

探究从多维协同到多维增效的科学机制.未来应探明多尺度区域协同、多部门领域协同、多重环境政策协同及其引发多方效益的机制,为揭示协同与增效之间的复杂关联提供学理支撑.多维协同方面,促进目标协同从“多污染物协同控制”向“多介质联动治理”转变,可引入博弈论寻求领域协同在能源、工业、交通、农业等关键领域的交叉联动,讨论社会心理对政策执行效能的影响及环境政策的正负效益权衡以完善政策协同的研究.从多维协同向提高政策执行效率、降低减排成本、推动绿色转型等多维增效机制方面,可分别从管理主体协同分工和区域联防联控、产业链传导和重点行业关键共性技术突破,减源效应和波特效应等路径切入进行研究.在这一过程中多采用宏观系统模型,是从方法层面优化系统性分析的重要路径.

参考文献:

[1] 生态环境部等.减污降碳协同增效实施方案 [EB/OL]. (2022-06-10) [2024-12-15].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.

[2] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Working Group III contribution to the IPCC Fifth Assessment Report [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[3] 毛显强,曾　桉,邢有凯,等.从理念到行动:温室气体与局地污染物减排的协同效益与协同控制研究综述 [J]. 气候变化研究进展, 2021,17(3):255-267.
Mao X Q, Zeng A, Xing Y K, et al. From concept to action: A review of synergistic benefits and co-control of greenhouse gases and local pollutants [J]. Advances in Climate Change Research, 2021,17(3): 255–267.

[4] 杨　静,刘会娟,吉庆华,等.降碳减污多维协同的基础科学问题 [J]. 中国科学基金, 2023,37(6):1021-1026.
Yang J, Liu H J, Ji Q H,et al. Fundamental scientific issues of synergizing the reduction of pollution and Carbon Emission[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(6):1021-1026.

[5] 顾斌杰,赵海霞,骆新燎,等.基于文献计量的减污降碳协同减排研究进展与展望 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(1):85-95.
Gu B J, Zhao H X, Luo X L, et al. Research progress and prospect of collaborative reduction of pollution and carbon dioxide based on bibliometrics [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(1):85-95.

[6] 孔少杰,易洪涛.基于文献计量学的减污降碳政策研究进展与展望 [J]. 环境科学研究, 2025,38(2):231-242.
Kong S J, Yi H T. Research progress and prospects of pollution reduction and carbon emission mitigation policies: a bibliometric analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(2):231-242.

[7] 谭玉菲,王宗爽,赵国华,等.中国减污降碳生态环境标准体系研究 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(9):1340-1345,1371.
Tan Y F, Wang Z S, Zhao G H, et al. Research on china's eco-environmental standards system for pollution reduction and carbon mitigation [J]. Environmental Pollution and Control, 2024, 46(9):1340-1345,1371.

[8] 孙雪妍,白雨鑫,王　灿.减污降碳协同增效:政策困境与完善路径 [J]. 中国环境管理, 2023,15(2):16-23.
Sun X Y, Bai Y X, Wang C. Synergizing pollution reduction and carbon mitigation: policy dilemmas and improvement pathways [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023,15(2):16-23.

[9] 王　灿,邓红梅,郭凯迪,等.温室气体和空气污染物协同治理研究展望 [J]. 中国环境管理, 2020,12(4):5-12.
Wang C, Deng H M, Guo K D, et al. Research prospects on synergistic governance of greenhouse gases and air pollutants [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020,12(4):5-12.

[10] 谭琦璐,温宗国,杨宏伟.控制温室气体和大气污染物的协同效应研究评述及建议 [J]. 环境保护, 2018,46(24):51-57.
Tan Q L, Wen Z G, Yang H W. Research review and recommendations on synergistic effects of controlling greenhouse gases and air pollutants [J]. Environmental Protection, 2018,46(24):51–57.

[11] 赵曼仪,王　科.减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(2):58-69.
Zhao M Y, Wang K. Research review and prospects on comprehensive assessment of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2024,34(2):58-69.

[12] 杨　霖,李丽平,杨儒浦.新发展,新思考——减污降碳协同研究 [J]. 环境保护科学, 2024,50(5):58-66.
Yang L, Li L P, Yang R P. New development, new thinking: research on synergistic control of pollution and carbon reduction [J]. Environmental Protection Science, 2024,50(5):58-66.

[13] 温宗国,许　毛,张蓝心.工业行业降碳减污协同效应与管理方法 [J]. 中国环境管理, 2025,17(2):5-15.
Wen Z G, Xu M, Zhang L X. Synergistic effects and management approaches for carbon reduction and pollution control in industrial sectors [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2025,17 (2):5-15.

[14] 许　文,周潇云,张　玥,等.土壤重金属污染源清单研究现状及进展 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(11):2472-2486.
Xu W, Zhou X Y, Zhang Y, et al. Research status and progress of heavy metal pollution source inventory in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(11):2472-2486.

[15] 毛显强,曾　桉,胡　涛,等.技术减排措施协同控制效应评价研究

[J]. 中国人口·资源与环境, 2011,21(12):1-7.
Mao X Q, Zeng A, Hu T, et al. Evaluation of co-control effects of technical emission reduction measures [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2011,21(12):1-7.

[16] 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. Assessment and planning of co-control effects of greenhouse gases and air pollutants [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3390-3398.

[17] 刘胜强,毛显强,胡 涛,等.中国钢铁行业大气污染与温室气体协同控制路径研究 [J]. 环境科学与技术, 2012,35(7):168-174.
Liu S Q, Mao X Q, Hu T, et al. Research on co-control pathways of air pollution and greenhouse gases in China's iron and steel industry [J]. Environmental Science & Technology, 2012,35(7):168-174.

[18] 毛显强,邢有凯,胡 涛,等.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(4):748-756.
Mao X Q, Xing Y K, Hu T, et al. Environmental economic pathway analysis of co-reduction of sulphur, nitrogen, and carbon in China's power industry [J]. China Environmental Science, 2022,32(4):748-756.

[19] Overseas Environmental Cooperation Center. Co-benefits approach to climate change and CDM in developing countries [R]. Tokyo: Overseas Environmental Cooperation Center, 2008.

[20] 高玉冰,毛显强,Gabriel Corsetti,等.城市交通大气污染物与温室气体协同控制效应评价——以乌鲁木齐市为例 [J]. 中国环境科学, 2014,34(11):2985-2992.
Gao Y B, Mao X Q, Gabriel Corsetti, et al. Evaluation of co-control effects of air pollutants and greenhouse gases in urban transportation: A case study of Urumqi [J]. China Environmental Science, 2014,34(11):2985-2992.

[21] Zhang Q Y, Wang P, Liu S Y, et al. City-level CO_2 and local air pollutants co-control performance evaluation: A case study of 113 key environmental protection cities in China [J]. Advances in Climate Change Research, 2022,13(1):118-130.

[22] 刘茂辉,岳亚云,刘胜楠,等.基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析 [J]. 环境科学, 2023,44(3):1277-1286.
Liu M H, Yue Y Y, Liu S N, et al. Multidimensional analysis of the synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in Tianjin based on the STIRPAT model [J]. Environmental Science, 2023,44(3):1277-1286.

[23] 罗红成,廖 琪,容 誉.湖北省能源消费 CO_2 与大气污染物协同减排研究 [J]. 环境污染与防治, 2022,44(2):266-271.
Luo H C, Liao Q, Rong Y. Collaborative reduction of CO_2 and air pollutants in Hubei Province's energy consumption [J]. Environmental Pollution & Control, 2022,44(2):266-271.

[24] 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. Spatiotemporal characteristics and influencing mechanisms of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(10):2252-2263.

[25] 李汶豫,文传浩,苏旭阳,等.长江经济带城市减污降碳协同效应时空演化及驱动因素研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(8):1641-1653.
Li W Y, Wen C H, Su X Y, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in cities of the Yangtze River Economic Belt [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(8):1641-1653.

[26] 崔连标,李 晓,段宏波.长三角地区减污降碳协同效应评估 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(6):21-32.
Cui L B, Li X, Duan H B. Assessment of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in the Yangtze River Delta region [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2024,34(6):21-32.

[27] Xu Y, Zhang L, Liu C X, et al. Spatio-temporal patterns and spillover effects of synergy on carbon dioxide emission and pollution reductions in the Yangtze River Delta region in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,107(Part A): 105432.

[28] 孙 建,冯常洁.中国工业用能权交易制度减污降碳协同效应研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2024,33(12):2727-2742.
Sun J, Feng C J. Synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in China's industrial energy-use rights trading system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(12):2727-2742.

[29] 贾书伟,高宇阳,郭钰莹,等.价格调控策略对城市道路交通减污降碳协同增效影响研究 [J]. 环境科学与管理, 2024,49(3):50-55.
Jia S W, Gao Y Y, Guo Y Y, et al. Impact of price regulation strategies on synergistic effects of pollution and carbon reduction in urban road traffic [J]. Environmental Science and Management, 2024,49(3):50-55.

[30] 孙 建,刘 波,饶光明.环境保护税、碳交易与中国工业减污降碳协同增效 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023,33(11):13-24.
Sun J, Liu B, Rao G M. Environmental protection tax, carbon trading, and synergistic effects of pollution and carbon reduction in China's industry [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(11):13-24.

[31] Huang Z N, Wu Q R, Chen X L, et al. Revealing the impact of China's clean air policies on synergistic control of CO_2 and air pollutant emissions: evidence from Chinese cities [J]. Journal of Environmental Management, 2023,344:118512.

[32] 张 瑜,孙 倩,薛进军,等.减污降碳的协同效应分析及其路径探究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(5):1-13.
Zhang Y, Sun Q, Xue J J, et al. Analysis of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation and exploration of pathways [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2022,32(5):1-13.

[33] 上官睿佳.黄河流域减污降碳协同效应及其作用机制研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2024.
Shangguan R J. Research on the synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in the Yellow River Basin and their Mechanisms [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.

[34] 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. Carbon reduction pathways for Chongqing to achieve the carbon peak target [J]. China Environmental Science, 2022,42(3):1446-1455.

[35] 俞 珊,韩玉花,牟 洁,等.北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素 [J]. 环境科学, 2024,45(4):1917-1925.
Yu S, Han Y H, Mu J, et al. Synergistic effect analysis and driving factors of pollution reduction and carbon mitigation in Beijing's manufacturing industry [J]. Environmental Science, 2024,45(4):1917-1925.

[36] Dong F, Zhang Y W, Long R Y, et al. Examining the synergistic effect of CO_2 emissions on $PM_{2.5}$ emissions reduction: evidence from China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,223:759-771.

[37] Du W J, Li M, Yang G F, et al. Assessing the impact of environmental regulation on pollutant abatement and collaborative emissions reduction: micro-evidence from Chinese industrial enterprises [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020,82:106345.

[38] Cheng Z H, Liu J, Zhang L X, et al. The emissions reduction effect and technical progress effect of environmental regulation policy tools [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,149:191-205.

[39] Wang B, Liu G C, Muhammad S, et al. Collaborative governance mechanism of climate change and air pollution: Evidence from China [J]. Nature Sustainability, 2021,13(12):1044-1053.

[40] 李胜兰,林沛娜.我国碳排放权交易政策完善与促进地区污染减排效应研究——基于省级面板数据的双重差分分析 [J]. 中山大学学报(社会科学版), 2020,60(5):182-194.
Li S L, Lin P N. Study on the improvement of carbon emission trading policy and its effect on regional pollution reduction in China: A difference-in-differences analysis based on provincial panel data [J]. Journal of Sun Yat-sen University (Social Science Edition), 2020,60(5):182-194.

[41] Li Z, Wang Y N, Zhang Y X, et al. Synergistic effect of carbon trading scheme on carbon dioxide and atmospheric pollutants [J]. Sustainability, 2021,13(10):5403.

[42] Zhang B, Ma L, Liu Y W, et al. Does a mandatory cleaner production audit have a synergistic effect on reducing pollution and carbon emissions? [J]. Energy Policy, 2023,182.

[43] 刘亦文,陈熙钧.数智融合发展对中国减污降碳协同治理的影响研究 [J]. 环境科学研究, 2023,36(11):2189-2199.
Liu Y W, Chen X J. The impact of integrated development of digitalization and intelligence on collaborative governance of pollution reduction and carbon mitigation in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(11):2189-2199.

[44] 李俊明,魏雯琪,张　鹏,等.中国市域数字经济发展对减污降碳协同的促进效应及其空间分异 [J]. 经济地理, 2023,43(12):169-180.
Li J M, Wei W Q, Zhang P, et al. The promoting effects and spatial differences of digital economy development on synergistic pollution reduction and carbon mitigation in Chinese cities [J]. Economic Geography, 2023,43(12):169-180.

[45] 刘　娜,高新伟.“蓝天保卫战”如何影响减污降碳协同度？[J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(7):66-75.
Liu N, Gao X W. How does the "Blue Sky Protection Campaign" affect the synergy degree of pollution reduction and carbon mitigation? [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2024,34(7):66-75.

[46] Xu Y, Li J, Zhang Q, et al. Spatio-temporal patterns and spillover effects of synergy on carbon dioxide emission and pollution reductions in the Yangtze River Delta region in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,107(2):105432-105444.

[47] 邢文婷,刘明珠,李利娟.长江经济带能源绿色低碳转型与减污降碳协同效应时空演进及地区差异 [J/OL]. 环境科学, 1-21[2025-03-20].
Xing W T, Liu M Z, Li L J. Spatio-temporal evolution and regional differences of energy green low-carbon transition and synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in the Yangtze River economic belt [J/OL]. Environmental Science, 1-21[2025-03-20].

[48] Chen X, Wang Y, Liu Z, et al. Spatial patterns and evolution trend of coupling coordination of pollution reduction and carbon reduction along the Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 154:110723-110735.

[49] 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 paths identification of collaborative governance on pollution reduction and carbon mitigation in China's three major urban agglomerations under the "Dual Carbon" Goals [J]. Resources Science, 2022,44(6):1155-1167.

[50] 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 mechanisms of synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(10):2252-2263.

[51] Jiang F M, Chen B J, Li P H, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of synergizing the reduction of pollution and carbon emissions: Utilizing multi-source remote sensing data and GTWR model [J]. Environmental Research, 2023,229.

[52] Chen S Y, Tan Z X, Mu S Y, et al.Synergy level of pollution and carbon reduction in the Yangtze River economic belt: spatial-temporal evolution characteristics and driving factors [J]. Sustainable Cities and Society, 2023,98.

[53] 刘坤坤,李新创,刘　涛,等.钢铁企业技改项目减污降碳协同控制效应评价实例分析 [C]//中国环境科学学会环境工程分会.中国环境科学学会 2022 年科学技术年会--环境工程技术创新与应用分会场论文集(四). 2022.
Liu K K, Li X C, Liu T, et al. Case analysis of co-control effect evaluation of pollution reduction and carbon mitigation in steel enterprises' technological transformation projects [C]//Environmental Engineering Branch of Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2022 Annual Conference of Science and Technology of the Chinese Society for Environmental Sciences--Environmental Engineering Technology Innovation and Application Sub-forum (IV). 2022.

[54] 薛　强,于　雷,李敏辉,等.生态环境分区管控减污降碳协同试点实践探索——以广州市增城区为例 [J]. 环境工程技术学报, 2025,15(1):59-70.
Xue Q, Yu L, Li M H, et al. Practical exploration of synergistic pollution reduction and carbon mitigation in ecological environment zoning management: a case study of zengcheng district, Guangzhou [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025,15(1):59-70.

[55] Xi Y, Fei T, Ge H W. Quantifying co-benefit potentials in the Chinese cement sector during 12th Five Year Plan: an analysis based on marginal abatement cost with monetized environmental effect [J]. Journal of Cleaner Production, 2013,58:102-111.

[56] Mao X Q, Chen S Y, Zhang Y Q, et al. Co-control of local air pollutants and CO_2 from the Chinese coal-fired power industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,434:220-227.

[57] Mao X Q, Yang S Q, Liu Y K, et al. Co-control of local air pollutants and CO_2 in the Chinese iron and steel industry [J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(21):12002-12010.

[58] Mao X Q, Lu Z L, Chen S Y, et al. Achieving CO_2 emission reduction and the co-benefits of local air pollution abatement in the transportation sector of China [J]. Environmental Science & Policy,

2012,15(1):1−13.

[59] Zeng A, Li J M, Liu H Y, et al. Regional co−control plan for local air pollutants and CO_2 reduction: Method and practice [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,140:1226−1235.

[60] 李可心,杨儒浦,李丽平,等.燃煤电厂减污降碳协同增效综合评价体系构建及实证研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(7):1483−1491.
Li K X, Yang R P, Li L P, et al. Construction and empirical study of a comprehensive evaluation system for synergistic benefits of pollution reduction and carbon mitigation in coal−fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(7):1483−1491.

[61] 戴章艳,张丰麟,刘坤坤,等.钢铁行业减污降碳协同增效研究 [J]. 冶金经济与管理, 2024,(5):10−12.
Dai Z Y, Zhang F L, Liu K K, et al. Research on synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in the iron and steel industry [J]. Metallurgical Economics and Management, 2024,(5):10−12.

[62] 王常欣,张祥建,连欣燕.长江经济带实现绿色协同发展:基于区域减污降碳协同效应的量化分析 [J/OL]. 环境科学, 1−16[2025−03−20].
Wang C X, Zhang X J, Lian X Y. Realizing green synergistic development in the Yangtze River economic belt: a quantitative analysis based on regional synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation [J/OL]. Environmental Science, 1−16[2025−03−20].

[63] 杨儒浦,王 敏,胡敬韬,等.工业园区减污降碳协同增效评价方法及实证研究 [J]. 环境科学研究, 2023,36(2):422−430.
Yang R P, Wang M, Hu J T, et al. Evaluation methods and empirical study on synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in industrial parks [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(2):422−430.

[64] 崔新蕾,王冉冉.中国降碳−减污−扩绿−增长协同发展空间关联网络特征及影响因素研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(7):1446−1457.
Cui X L, Wang R R. Spatial correlation network characteristics and influencing factors of synergistic development of carbon mitigation, pollution reduction, green expansion, and economic growth in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(7):1446−1457.

[65] Markus A, Wagner F, Amann M, et al. Cost−effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modelling and policy applications [J]. Environmental Modelling & Software, 2011,26(12):1489−1505.

[66] Wagner F, Amann M, Borken−Kleefeld J, et al. Sectoral marginal abatement cost curves: implications for mitigation pledges and air pollution co−benefits for Annex I countries [J]. Nature Sustainability, 2012,7(2):169−184.

[67] Zheng J J, Li R, Huang Z N, et al. Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,114(2):232−241.

[68] Lu Z, Yang S, Chen X L, et al. Carbon dioxide mitigation co−benefit analysis of energy−related measures in the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in the Jing−Jin−Ji region of China [J]. Resources, Conservation & Recycling: X, 2019,5:100006−100016.

[69] Cai W J, Hui J X, Wang C, et al. The Lancet Countdown on $PM_{2.5}$ pollution−related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: A modelling study [J]. Lancet Planetary Health, 2018, 4(2):151−161.

[70] Xue W B, Lei Y, Liu X, et al. Synergistic assessment of air pollution and carbon emissions from the economic perspective in China [J]. Science of the Total Environment, 2023,858:159736−159750.

[71] LiuL, Wang K, Wang S S, et al. Assessing energy consumption, CO_2 and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050 [J]. Energy Policy, 2018,116:382−396.

[72] Mir K A, Purohit P, Cail S, et al. Co−benefits of air pollution control and climate change mitigation strategies in Pakistan [J]. Environmental Science & Policy, 2022,133:31−43.

[73] Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's $PM_{2.5}$ air quality 2015~2060 in the context of carbon neutrality [J]. National Science Review, 2021,8(12),11.

[74] Fujimori S, Krey V, Van Vuuren D, et al. A framework for national scenarios with varying emission reductions [J]. Nature Climate Change, 2021,11(6):472.

[75] Bollen J, van der Zwaan B, Brink C, et al. Local air pollution and global climate change: A combined cost−benefit analysis [J]. Resource and Energy Economics, 2009,31(3):161−181.

[76] Chae Y. Co−benefit analysis of an air quality management plan and greenhouse gas reduction strategies in the Seoul metropolitan area [J]. Environmental science & policy, 2010,13(3):205−216.

[77] Van Harmelen T, Bakker J, DE Vries B, et al. Long−term reductions in costs of controlling regional air pollution in Europe due to climate policy [J]. Environmental science & policy, 2002,5(4):349−365.

[78] Jiang H D, Porohit P, Liang Q M, et al. Improving the regional deployment of carbon mitigation efforts by incorporating air−quality co−benefits: a multi−provincial analysis of China [J]. Ecological economics, 2023,204:107675.

[79] 丁瑶瑶.减污降碳协同增效走向深入 [J]. 环境经济, 2022,(15): 18−21.
Ding Yaoyao. Synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation gain momentum [J]. Environmental Economy, 2022,(15): 18−21.

[80] 吉 喆,王海蕴.“双碳”引领协同推进降碳减污和扩绿增长——访国家发展改革委环资司副司长文华 [J]. 财经界, 2024,(7):12−13.
Ji Z, Wang H Y. "'Dual Carbon' leads the coordinated advancement of carbon reduction, pollution control, and green expansion' growth—interview with Wen Hua, deputy director of the department of resource conservation and environmental protection, National Development and Reform Commission" [J]. Finance World, 2024,(7):12−13.

[81] Yue Huanbi, He Chunyang, Huang Qingxu, et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from $PM_{2.5}$ pollution in China [J]. Nature Communications, 2020,11(1):1462.

[82] Yao Wu, Bo Wen, Tingting Ye, et al. Estimating the urban heat−related mortality burden due to greenness: a global modelling study [J]. The Lancet Planetary Health, 2025,9(7):11.

[83] Song J, Wang B, Yang W, et al. Extracting critical supply chains driving air pollution in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,276(124282).

[84] Lin Boqiang, Teng Yuqiang. Synergistic disparities of pollution reduction and carbon mitigation in the industrial chain: Evidence from China’s industrial sector [J]. Environmental Research, 2024,(248): 118226.

作者简介：李翊宸(2000−),女,甘肃陇南人,中国环境科学研究院硕士研究生,主要研究方向为能源环境经济与管理.liyichenii@163.com.