

工业行业降碳减污协同效应与管理方法

温宗国*, 许毛, 张蓝心

(清华大学环境学院, 北京100084)

【摘要】 二氧化碳(CO₂)与多污染物减排的协同效应及路径管理方法,是国际上应对气候变化和改善生态环境质量的关键科学问题。以工业为代表的重点行业作为CO₂和污染物的主要来源,其降碳减污协同增效受到广泛关注。然而,由于工业行业降碳减污的工艺技术复杂、排放协同机理不明、参数不确定性大、管理目标数量多等难题,对“协同效应”的科学认识还不足。本文首先归纳总结了行业降碳减污“协同效应”的科学内涵,其既包括正向的“共生效益”,也包括负向的“冲突关系”,为降碳减污协同增效管理提供理论基础;其次系统剖析了降碳减污协同效应的内在机理及数值化表征方法,探讨了高维多目标优化方法在支撑降碳减污管理决策方面的适用性和科学性;最后提出了未来行业降碳减污研究需关注的重点科学问题,以期为我国降碳减污相关政策的制定提供参考依据。

【关键词】 协同效应;降碳减污;共生效益;冲突关系;环境治理

【中图分类号】 X32; X38; X192

【文章编号】 1674-6252(2025)02-0005-11

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.02.005

引言

多污染物与温室气体协同减排是应对气候变化和改善生态环境质量的关键科学问题,也是环境管理学科领域的国际研究热点和难点^[1-3]。2022年生态环境部等七部门联合发布了《减污降碳协同增效实施方案》,明确了未来中国降碳减污协同控制的主要目标、重点区域/领域。党的二十大报告进一步指出,要积极稳妥推进碳达峰碳中和,深入推进污染防治,加强污染物协同控制。然而,中国以煤炭为主的能源结构和以钢铁、水泥等重工业为主的产业结构使得多污染物和温室气体复合污染严重,且工业部门工艺技术耦合关系复杂、污染物与二氧化碳(CO₂)协同减排机理不明^[4]、降碳减污协同的结构和效率存在显著的空间差异。此外,学界尚未建立关于行业降碳减污协同效应的系统科学认识,相关理论体系亟待完善,针对协同效应的模

拟表征存在一定的局限性^[5],难以有效支撑相关管理目标的实现。本研究对行业降碳减污的“协同效应”进行了系统阐述,剖析协同效应在不同行业间的内在机理、交互规律及数值化模拟表征方法,并归纳总结基于协同效应的典型环境管理方法,以期为行业降碳减污协同增效管理提供理论基础和技术方法支撑。

1 协同效应的科学内涵演进

国内相关研究中“协同效益”一词翻译自“co-benefits”^[6],重点关注的是协同的正向影响。不同组织对协同效益的阐述各异,尚无统一论,相关概念的演变历程如图1所示。美国环境保护署^[7]对协同效益进行了专门的阐述,是指以减缓气候变化等为主要目标的政策产生的额外但同等重要的效益,例如,节能效益、经济效益、空气质量效益和公共

资助项目: 国家自然科学基金委专项项目“重点行业碳达峰、碳中和路径优化及应用研究”(72140008);上海同济高廷耀环保科技发展基金会青年博士生态出人才项目。

作者简介: 温宗国(1978—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为行业碳减排系统工程、城市固废处置与资源化、环境大数据与智能大模型等, E-mail: wenzg@tsinghua.edu.cn。

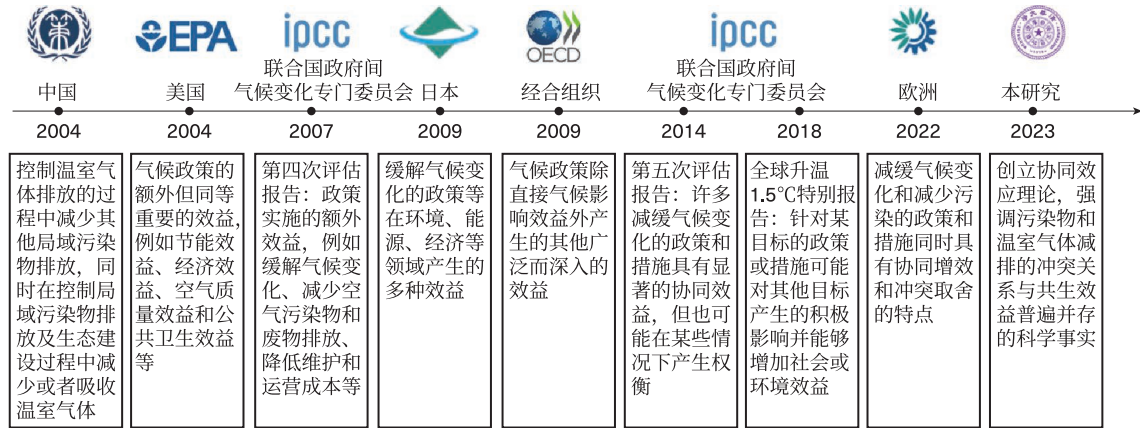


图 1 “协同效应”概念演变历程

卫生效益等。2007年联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在第四次评估报告^[8]中明确提出, 协同效益是指政策实施所产生的额外效益, 例如缓解和适应气候变化、减少空气污染物和废物排放、降低维护和运营成本、改善工作环境等。日本环境省^[9]认为协同效益是缓解气候变化的政策、战略或行动计划在环境、能源、经济等不同领域产生的多种效益。2018年《IPCC 全球升温 1.5°C 特别报告》^[10]也强调了协同效益的正向作用: “针对一个目标的政策或措施可能对其他目标产生的积极影响, 并能够增加社会或环境的总效益。”国内越来越多的研究将“协同效益”等同于“协同效应”, 例如胡涛等给出的“协同效应”定义为: 控制温室气体排放的过程中减少其他局域污染物排放, 同时在控制局域污染物排放及生态建设过程中也可以减少或者吸收温室气体^[11]。

目前, 现有研究主要聚焦于降碳减污策略产生的正向协同效益。例如, 削减温室气体排放可推动大气污染物协同减排^[12], 反之大气污染物减排亦可产生温室气体减排效益^[13-15], 即气候减缓政策和空气污染控制政策互相具有正向的协同作用^[16-18]。除此之外, 温室气体减排或污染物减排还可产生包括空气质量改善^[19,20]、促进人类健康^[21]、提升环境公平性^[22]、推动经济和社会发展^[23]在内的多重其他协同效益。然而, 在某些情况下, 降碳减污不一定会带来协同效益, 有时甚至会产生“非协同”效果, 即导致某些环境指标排放的增加^[24,25], 即降碳与减污之间存在冲突关系, 这一现象也逐渐引发了学界的关注。例如, IPCC 分别在 2014 年和 2021

年发布的第五次^[26]和第六次综合评估^[1]报告中均区分了气候政策产生的有利的协同效益 (synergy) 和不利的副作用 (trade-off)。欧洲环境署^[27]最新的报告中也认为减缓气候变化和减少污染的政策和措施同时具有协同增效和冲突取舍的特点。未来, 随着碳达峰碳中和及“美丽中国”等战略目标的不断推进, 降碳减污之间的“非协同”效果可能将进一步凸显, 因此相关研究还应进一步深入。

综上, 基于多介质污染物与碳排放冲突关系与协同效益普遍并存的科学事实, 本文对“降碳减污协同效应”理论进行了系统阐述。在原有协同效益的基础上, 引入“冲突关系”。“降碳减污协同效应”不仅存在正向的“协同效益”, 也存在负向的“冲突关系”。综上, 本研究认为, 使用“共生效益” (co-benefits) 表示“协同效应” (synergistic effect) 的积极方面、使用“冲突关系” (trade-off) 表示“协同效应”的消极方面更为准确。

2 协同效应机理与模拟表征

2.1 协同效应机理

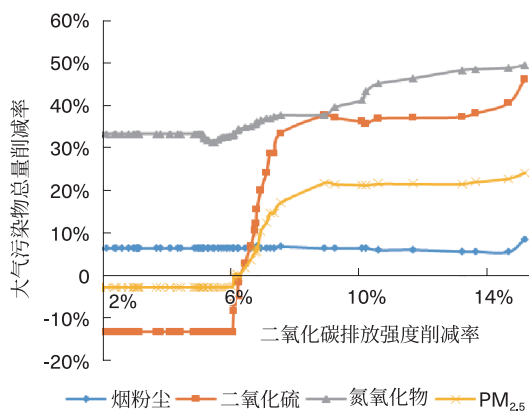
降碳减污协同效应在工业行业中是普遍存在的。例如, 在水泥行业中开展水泥窑协同处置固废, 可降低大气污染物及 CO₂ 排放, 同时也有效减少了固废的填埋量^[28], 即此时的协同效应为共生效益。燃煤电厂通过采用脱硫脱硝技术工艺可大幅降低二氧化硫 (SO₂) 及氮氧化物 (NO_x) 排放, 但同时会导致 CO₂ 排放增加^[29,30], 即此时减污与降碳存在冲突关系。为了揭示协同效应的内在机理和交互规律, 许多学者开展了大量研究。

以水泥行业细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 排放为例, 只有当碳减排幅度达到一定阈值时方可呈现正向共生效益 (图 2a)。具体来说, 当碳强度削减率低于 6% 时无法实现 $PM_{2.5}$ 的协同减排, 其原因是此时 NO_x 排放控制水平较低, 相关技术措施尚无法促使 $PM_{2.5}$ 排放总量削减; 当碳强度削减率大于 6% 后, NO_x 在得到进一步削减的基础上也导致 $PM_{2.5}$ 排放量有较大幅度的降低。此时, 水泥行业的 CO_2 减排和 $PM_{2.5}$ 减排呈现共生效益^[31]。此外, 在只有减碳约束的情况下, NO_x 同基准年相比排放量不减反增, 增幅约为 10% (图 2b)。原因在于水泥行业在减碳约束下, 为了寻求行业总成本最小的策略使 NO_x 治理技术未得到较大程度的普及。针对煤电行业的研究^[32]发现, 不同大气污染物减排措施对温室气体减排的协同效应存在差异, 关停小型煤电机组等结构调整措施将减少温室气体排放, 即存在共生效益; 而烟气脱硫等工程减排措施由于使用了石灰石脱硫, 碳排放增加, 即存在冲突关系。

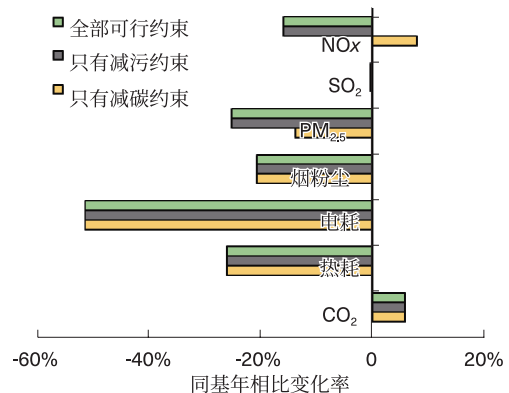
发达国家在国际上长期强调, 发展中国家实施严格气候政策必将带来大气污染物削减巨大的共生效益^[33]。事实上, CO_2 与大气污染物减排的共生效益与特定行业、污染物种类和排放削减率阈值密切相关。因此, 建立在国内数据基础上具有自身特色的碳及污染物减排协同效应研究, 有助于量化我国碳减排政策在污染物减排方面的共生效益, 同时能够避免发展中国家过早作出碳减排过度削减的不合理承诺, 从而在国际气候谈判中在相关议题上具有话语权和主动权。

鉴于行业降碳减污协同效应的存在, 为有效实现行业 CO_2 与污染物减排总量控制目标并兼顾技术经济性, 必须进行技术优选。以造纸行业为例^[25], 仅考虑碳减排时, 非木纤维干湿法备料 + 横管连蒸、纸浆高效洗涤、木材干法备料及改良型间接蒸煮等技术的减排贡献高达 80%, 应当优先推广。当仅考虑氨氮 (NH_3-N) 及化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 减排时, 无元素氯漂白、全无氯漂白、先进黑液碱回收、全封闭筛选、木材干法备料、中高浓度制浆、非木纤维干湿法备料 + 横管连蒸及纸浆高效洗涤等技术可降低其排放, 应当优先推广。然而, 上述氨氮及 COD 减排技术中, 无元素氯漂白、全无氯漂白等技术属于能源密集型技术, 其在应用时会导致能耗及碳排放的增加 (图 3)^[25]。例如, 2020 年无元素氯漂白技术可减排 118 t NH_3-N 及 1.3 t COD, 但其造成的额外 CO_2 排放约为 282 t。综合考虑碳减排与水污染物减排之间的协同 / 冲突关系及相应的成本效益, 造纸行业应优先推广纸浆高效洗涤、非木纤维干湿法备料 + 横管连蒸、中高浓度制浆及木材干法备料等清洁生产技术。

此外, 我国工业行业降碳减污协同效应的科学内涵还需充分考虑新旧污染物的特征及其交互作用。我国工业以煤炭为主的能源结构导致 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 等传统污染物排放占比高, 在钢铁、火电等重工业中尤为显著。而随着工业转型升级, 挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs)、重金属 (如汞、镉) 和持久性有机污染物



(a) 水泥行业空气污染物削减率随碳强度削减率变化曲线



(b) 不同约束下 CO_2 排放、大气污染物排放、电耗及热耗同基准年变化率比较

图 2 水泥行业降碳减污协同效应模拟^[31]

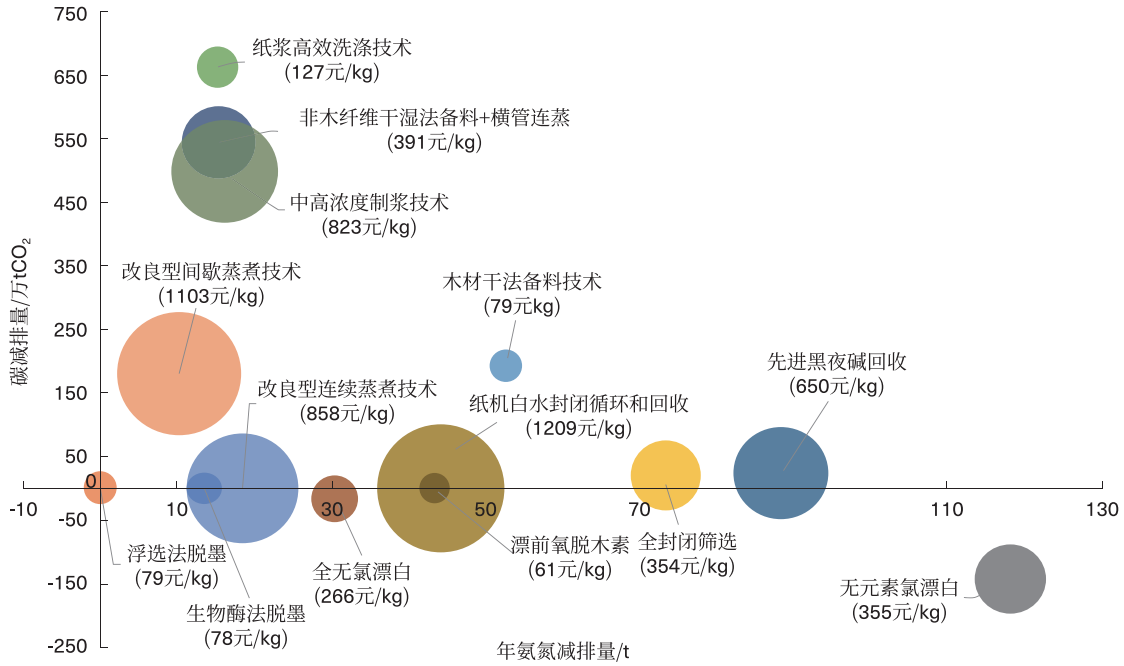


图3 造纸行业不同清洁生产技术的水污染物与CO₂减排效果及成本对比

数据来源：作者基于文献[25]整理所得。图中圆圈大小表示氨氮减排成本。

(Persistent Organic Pollutants, POPs) 等新兴污染物的排放带来了新的环境挑战。新旧污染物在排放源和技术控制中高度耦合，例如燃煤电厂NO_x与石化行业VOCs会共同促进臭氧(O₃)生成，加剧复合污染。在协同效益方面，超低排放技术可同时削减NO_x和CO₂，石化行业低VOCs排放工艺则兼顾VOCs与CO₂减排。然而，冲突关系同样普遍存在。例如，VOCs焚烧治理会增加NO_x与CO₂排放。上述现象反映了我国工业部门降碳减污技术体系的复杂性，同时凸显了协同效应理论需结合中国本土特征进一步完善的必要性。

2.2 协同效应模拟表征

建立关于协同效应的科学认识，一方面需要解析协同效应的机理，另一方面则需要对协同效应进行量化模拟表征。现有研究采用的模型方法主要为单个模型，例如，计量经济学^[34-36]、投入产出^[37]、系统动力学^[38]、GAINS-China^[39]及机器学习^[16]等。也有部分学者采用混合模型^[40,41]等，如Shi等^[41]利用排放清单模型、WRF-CAMx空气质量模型评估了碳减排带来的空气质量改善协同效应。上述模型在模拟表征协同效应时各有优劣，但其主要局限在于无法追溯技术、结构等因素的作用机制。

基于自底向上的模拟表征方法可以有效地克服上述缺陷。部分学者^[24,31,42-44]通过引入“源头预防—过程控制—末端治理—循环利用”思想，开发了行业多污染物排放自底向上模拟表征方法并建立了相应的降碳减污潜力及路径分解模型，可追溯工业系统内部原料、工艺、规模等结构性因素及技术成因，详细分解每一项因子改变对降碳减污控制目标的影响。相关研究克服了发展中国家技术体系的复杂性，同时解决了国外已有成熟模型工艺体系单一、核算参量简单、数据底层绑定等问题。例如，谭琦璐等建立了工艺级细粒度的排放因子清单，从微观工艺层面论证了污染物与CO₂在产生来源、排放节点和工艺技术上具有高度关联性^[24,31]。此外，钢铁、水泥及火电行业超过半数的工艺技术在多介质污染物与碳排放上存在显著的协同效应或冲突关系，工业炉窑燃烧或工况的温度是导致排放因子发生冲突关系最重要的因素。例如，电力行业超临界机组随着规模增加CO₂排放降低，但在600MW规模机组出现拐点，SO₂、NO_x排放水平却先增加后下降。在淘汰300MW级及以下燃煤机组有可能在减碳的同时增加SO₂和NO_x的产生。

然而，任何单一模型都存在其固有的局限性。自底向上模型虽然能够很好地量化技术、结构等因

素对降碳减污的影响，但缺乏对于宏观政策的考量。未来，采用自底向上模型与自上而下模型耦合的混合模型工具开展协同效应研究可能更加科学合理。此外，制定行业降碳减污目标时应防范不同环境管理目标之间的“隐性”转移风险。行业规模控制、结构（原料—产品和主体工艺）升级、技术（清洁生产技术、末端治理技术、共生技术、新兴信息技术等）推广是实现降碳减污目标的三条关键路径。但需要注意的是，行业协同效应的表征模拟结果会受到宏观（如行业规模调整）、中观（如主体工艺结构或原料结构变动）及微观（如降碳减污技术推广应用情况）等多个维度不确定因素的影响，尤其是微观因素，行业降碳减污目标的实现要充分考虑到不同技术在污染物与 CO₂ 减排之间的共生效益或冲突关系。

工业行业 CO₂ 和大气污染物排放占比在所有部门中均为最高^[45]，是中国推进降碳减污工作的重点领域，且工业降碳减污协同效应的客观表现具有多维性特征。从减排潜力来看，工业行业具有显著的降碳减污共生效益^[5]。以钢铁行业为例，通过各类降碳减污措施的推广应用，2019—2025 年中国钢铁行业 CO₂、SO₂、NO_x 和烟粉尘（PM_{2.5}）排放可分别下降 42.6%、27.7%、71.9%、73.8%^[46]。从技术措施来看，在实现降碳减污目标过程中不同技术措施的共生或冲突关系普遍存在。例如，钢铁行业炼焦、烧结与炼铁工序可实现 CO₂ 与大气污染物减排目标的共生效益；球团与炼钢工序则存在冲突关系^[46]。从空间尺度来看，工业行业 CO₂ 和大气污染物排放存在空间集聚效应^[45]，且绝大多数的城市具有降碳减污的共生效益。例如，在中国具有钢铁行业产能的地市中，138 个城市可实现 CO₂ 与大气污染物减排的共生效益，11 个城市存在 CO₂ 与大气污染物减排的冲突关系^[46]。因此，要充分认识到协同效应的科学事实和内在机理，为行业降碳减污协同增效的管理方法提供理论基础。

尽管工业行业具有显著的降碳减污共生效益，其实现过程仍面临多重困难和技术瓶颈。首先，相关技术的普及受限于成本与适用性。例如，钢铁行业超低排放技术虽能协同减少 NO_x 和 CO₂ 排放，但高昂的改造成本和复杂工艺限制了其在中小企业的推广。其次，工艺耦合复杂性增加了优化难度，

如石化行业 VOCs 焚烧治理技术虽能够减少 VOCs 排放，但同时高温燃烧导致 NO_x 和 CO₂ 排放增加，该技术应用时需精细调节温度与燃料以平衡整体环境效益。此外，数据获取与模型精度不足也阻碍了协同效应的量化评估，尤其在电子信息等新兴行业，排放因子和工艺参数的不确定性较大。未来，需通过技术升级、成本优化及完善数据体系与管理方法促进工业行业降碳减污协同增效目标的实现。

3 降碳减污协同增效管理方法

3.1 高维多目标优化

在降碳减污增效协同的宏观背景下，针对协同效应的科学认识对于我国的环境管理具有重要的现实意义。与此同时，还需完善降碳减污协同增效的管理方法以应对不断变化的环境管理挑战。当前，中国环境管理约束趋严，包括大气、水污染物与碳排放削减在内的环境管理目标数量日益增加（≥5 维），CO₂ 与污染物减排成本日益攀升，给政府部门及相关企业决策带来了挑战。以往采用的单一目标决策方法存在一定的局限性，即容易忽略不同环境目标间的协同效应，造成不同管理目标间的“隐性”转移，无法实现整体系统优化。高维多目标优化方法则能够有效地处理上述问题，其基于帕累托最优原理，可在高维目标空间中寻找兼顾降碳减污、成本效益及其他目标的最优解，但该方法在数学求解方面目前仍面临困难。传统算法通常采用人为主观设置降维（≤3 维），常用的降维方法包括线性加权法^[47]、 ϵ -约束^[48]等。其会导致搜寻效率及均匀性显著下降且优化结果易陷入局部最优，如图 4 所示。

为克服上述不足，许多学者开始逐渐使用智能算法处理高维多目标优化问题。此类算法通常基于帕累托最优原理，通过模仿自然中生物的不同行为（如繁衍、觅食、传递信息等）在解集空间中寻找同时满足多重目标约束的最优解。其中，Deb 等基于遗传算法的原理和非支配排序方法，设计了三代非支配排序算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm），即：NSGA^[49]、NSGA-II^[50] 和 NSGA-III^[51]。该算法可大幅提高优化结果质量和优化效率^[52-54]，但目前其在环境管理领域的应用较少。

本团队首次在工业降碳减污领域引入并改进了NSGA-III算法^[55]。该算法是一种用于解决多目标优化问题的高效算法，尤其适用于目标数量较多（通常超过三个）的复杂优化问题。NSGA-III算法的核心步骤包括种群初始化、锦标赛选择、后代生成、非支配排序和基于参考点的选择，算法流程如图5所示。与传统的NSGA-II算法相比，NSGA-III引入了基于参考点的选择机制，能够在高维目标空间中有效处理复杂约束，有效捕捉不同目标间的协同与冲突关系，同时通过将目标空间划分为多个区域，生成均匀分布的帕累托最优解集，进而实现低计算成本、高运行效率求解高维多目标优化问题。在此基础上，Dinga和Wen^[56]在国际上首次开发了10维的超高维多目标优化算法并在我国的水泥行业进行了实际应用，该算法性能优良且快速收敛，实现解集分布趋于均匀且迭代终止前趋于稳定（约150代）。研究表明，在最优路径下污染物和CO₂减排目标提升幅度较为显著。以NO_x为例，经过优化后，其减排潜力可提升约12%，同时减排成本降低8%，以较低成本解决高维目标约束下工业CO₂及污染物协同控制的实际管理需求。综上，NSGA-III算法能够有效处理

工业降碳减污协同增效路径优化中可能涉及的多个目标之间的协同与冲突关系，为科学决策提供有力支撑。

3.2 自上而下模型与混合模型

在现有工业行业降碳减污路径优化的相关研究中，高维多目标优化算法通常与自底向上模型组合使用^[44,46,55,56]，后者一般从微观层面出发，基于具体

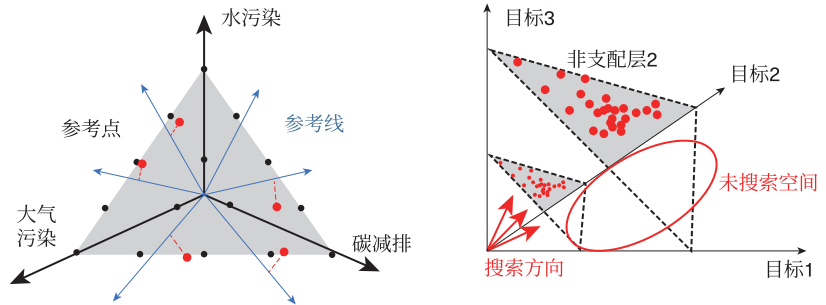


图4 传统算法求解高维多目标优化问题局限性示意

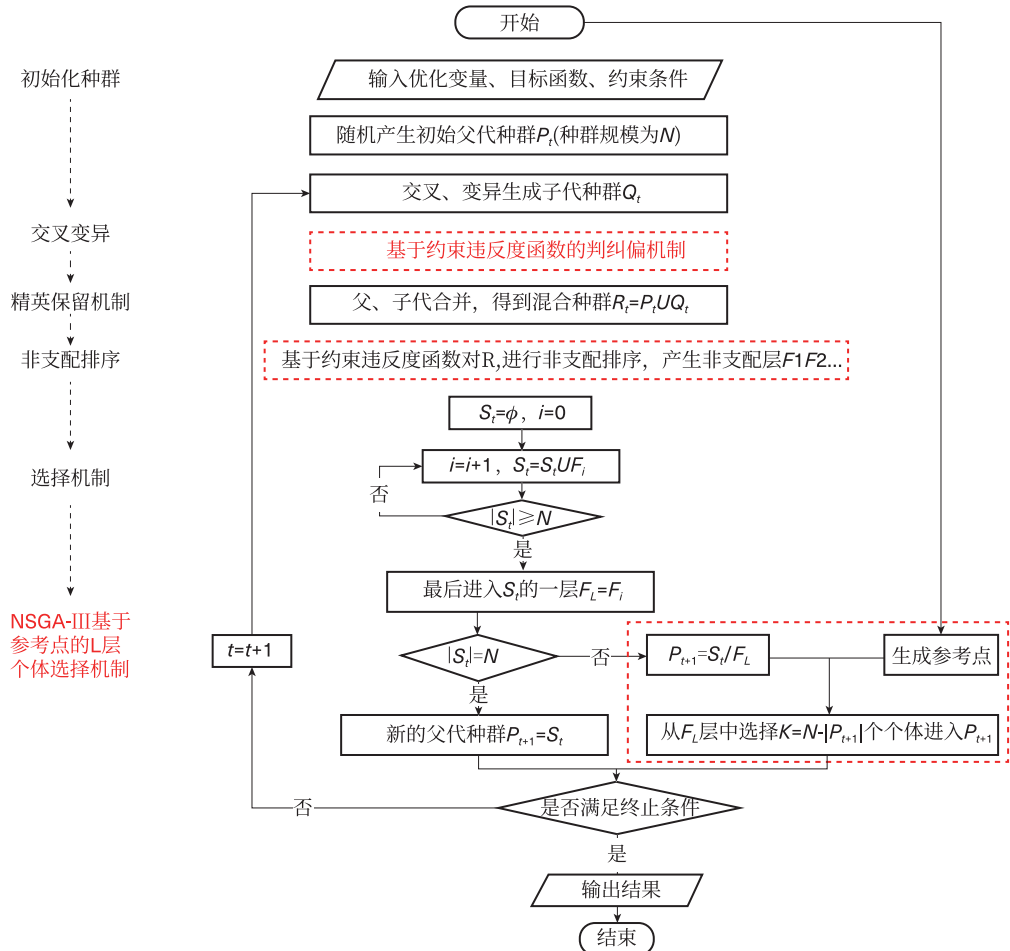


图5 NSGA-III算法流程

的技术、设备和工艺细节,模拟工业系统的能源消耗、污染物排放、CO₂排放和经济成本。二者结合后可根据决策者的不同偏好输出最优的降碳减污技术组合及路径。自底向上模型能够很好地从微观技术层面刻画协同效应,但难以评估宏观政策产生的冲击或影响。自上而下模型则可以很好地弥补这一不足,该类模型一般从宏观层面出发,基于经济系统的整体结构模拟分析政策、市场和技术变化对经济、能源和环境的影响,进而揭示宏观政策对行业减污降碳的系统性作用,为政策设计提供依据。例如, Li 等^[33]通过构建全球可计算一般均衡模型(C-REM)模拟了不同碳定价政策情景下中国的CO₂和空气污染物排放的变化,研究结果表明:碳定价政策在减少CO₂排放的同时显著减少了PM_{2.5}排放,有效改善了空气质量。但该类模型也存在其自身的局限性,主要体现在无法对微观层面的技术细节进行刻画表征。

如前文所述,自上而下模型和自底向上模型各有优劣,部分学者将自上而下模型和自底向上模型结合起来应用以取长补短,耦合后的模型系统称之为混合模型(hybrid models)。混合模型既包含了丰富的结构—技术细节,又能反映各类经济社会活动之间,经济社会活动同污染物/CO₂排放和治理之间的相互作用,一定程度上弥补了单一的自上而下模型或自底向上模型的不足。例如, Dong 等^[57]基于 Asia Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium(AIM/CGE)模型评估了中国CO₂减排政策下不同省份的能源消费数据,并将其输入到GAINS-China模型中用于计算空气污染物的排放和减排成本,进而量化CO₂减排政策对空气质量的协同效益,同时能够整合技术选择和政策约束优化降碳减污路径。

需要说明的是,混合模型中的自上而下模型与自底向上模型之间存在软链接和硬链接等不同交互方式^[58-60],前者指两个模型保持独立运行,通过外部数据传递(包括单向传递和多次迭代交互传递等方式)实现耦合,此类交互依赖于数据接口,模型结构较为灵活但计算效率较低;后者则指两个模型的输入、输出和内部逻辑均被整合入一个统一的数学模型框架,技术细节与宏观约束在模型内部保持一致,避免了软链接中因数据传递导致的偏差或假

设冲突,此类模型计算效率较高但模型开发复杂程度较高。

3.3 不确定性分析

高维多目标优化算法输出的结果为理想优化结果,其可能与实际情景存在差距。因此,在制定行业降碳减污管理目标时需要充分考虑不确定性因素的影响,避免降碳减污目标制定得过高或过低,二者均不利于行业实现可持续发展。具体而言,行业降碳减污潜力受行业活动水平波动、行业内部结构、工艺技术水平,以及同一技术在不同企业管理效率差异等多重敏感因素影响,排放总量和强度控制目标存在显著不确定性,使得行业降碳减污目标管理面临较大的决策风险。

为解决这一环境管理难题,部分学者使用拉丁超立方采样方法对不确定性参数进行同时采样,模拟行业降碳减污技术系统的不确定性。如曹馨^[42]利用拉丁超立方采样方法对以“钢铁—电力—水泥”行业为核心的产业共生系统的124项不确定性输入参数同时采样30万次,模拟该产业共生系统2020—2030年发展情景的不确定性。研究结果表明,未来发展情景的波动对产业共生系统的CO₂减排效果影响相对较小(减排效果较为稳定),而对NO_x减排效果的影响相对更大(减排不确定性较大)。

在不确定性条件下,为实现各环境管理目标要重点应用有显著正向影响的技术、有效规避负向敏感型技术,按照灵敏度和技术普及率变化建立技术应用路线图,提高协同减排路径的针对性和支撑环境管理目标的有效性,降低行业降碳减污达标管理的决策风险。因此,不确定性分析在决策制定和管理实践中发挥着至关重要的作用。通过对多重敏感因素的不确定性开展分析,能够更好地识别潜在的决策结果范围及其可能性,并定量评估环境管理的潜在风险,从而最大限度地提高决策的鲁棒性。此外,在开展不确定性分析时,应当充分考虑空间异质性对行业降碳减污潜力的影响^[5,46],进而制定更加精准的区域(如城市级)降碳减污协同策略。

事实上,工业降碳减污协同增效管理中的不确定性问题根植于多源异质性(如排放源、技术选择及区域特征的非均质分布)与系统动态复杂性(如

政策—技术的反馈循环及时间依赖性),对决策的科学性、有效性构成潜在挑战。不确定性主要源于行业活动水平的随机扰动、工艺技术参数的时空变异性及政策约束的动态演化。统计采样与情景模拟方法(如拉丁超立方方法)可通过量化不确定性及其概率分布,提升工业降碳减污管理决策的稳健性,但其效果受数据分辨率与模型限制。未来,仍需构建多层次不确定性分析框架,集成高分辨率排放因子数据库、自适应参数优化算法及跨尺度情景推演,以系统识别关键不确定性驱动因子并增强预测结果的稳健性,为优化工业行业降碳减污协同增效路径奠定理论基础。

4 结论与展望

4.1 主要结论

本文基于降碳减污的共生效益与冲突关系共存的科学事实,完善了行业降碳减污“协同效应”理论,为行业降碳减污协同增效管理提供了理论基础,且相关理论在钢铁、水泥等多个行业中得到了验证。本文的主要结论如下:

多介质污染物(如大气污染物、水污染物)与CO₂排放具有高度关联性,其减排的共生效益和冲突关系普遍存在,且受到行业类别、污染物种类和排放削减率阈值等多重因素的影响。未来中国应建立符合自身国情的行业降碳减污数据库,确保降碳减污协同效应相关研究结果的科学性、合理性。

当前工业降碳减污管理需同时关注节能、温室气体及多种污染物排放的削减,环境管理目标数量日益增加、减排成本攀升,导致超高维空间下易陷入局部最优,显著增加了最优路径的制定难度。以NSGA-III算法为代表的高维多目标优化算法可解决上述难题,并拓宽经济效率较优的行业降碳减污潜力,可有效避免不同环境管理目标间的隐形转移风险,为政策制定者提供更加科学合理的决策支撑。

降碳减污潜力受行业活动水平波动、行业内部结构、工艺技术水平,以及同一技术在不同企业管理效率差异等多重敏感因素影响,排放总量和强度控制目标存在显著的不确定性。未来需识别降碳减污关键路径的减排效果及成本的概率分布,并据此制定合理可行的减排目标,降低行业降碳减污控制

达标管理的决策风险。

4.2 展望

从行业尺度来看,现阶段针对行业协同效应的研究主要聚焦于单一行业,如钢铁、水泥、电力、造纸等。未来,应加强不同行业间的耦合关联(如生产上下游关系、工艺技术耦合),从而更加全面地揭示行业降碳减污协同增效的整体共生效益及结构、技术等不确定性因素对效益的影响,为协同控制管理提供理论基础和数据支撑。

从环境管理目标来看,控制CO₂、NO_x、SO₂、PM、COD、NH₃-N等的排放量及经济成本等属于较为常规的环境管理目标,在具体行业中仍有更多特征污染物(如VOCs)的环境管理目标及协同控制路径,亟须进一步模拟表征和科学评估。除大气、水等环境介质外,固体废物处置领域迫切需要推进降碳减污协同,重点关注废弃光伏组件、风机叶片和动力电池等新兴固废的治理,为能源和交通的低碳转型提供资源供应能力,加强固废处置全流程的CO₂和污染物排放关键节点管控,打通管理瓶颈与技术瓶颈,协同减排CO₂与污染物。

从模型方法来看,在降碳减污协同效应模拟或评估方面,现有研究采用的模型主要包括自底向上模型^[61]、自上而下模型^[57]、混合模型^[62-64]等。上述模型在模拟或评估降碳减污协同效应时各有利弊,取决于其评估对象与评估尺度。未来,降碳减污协同效应模拟或评估模型应朝着精细化、智能化的方向发展。一方面,在聚焦降碳减污技术措施细节特征的同时充分考虑空间异质性,强化行业降碳减污的路径协同与空间协同。另一方面,未来应将人工智能、大数据等信息技术与行业数据深度融合^[65],增强模型的准确性和适应性,提高行业降碳减污管理决策的科学性和可靠性。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] TONG D, GENG G N, ZHANG Q, et al. Health co-benefits of climate change mitigation depend on strategic power

- plant retirements and pollution controls[J]. *Nature climate change*, 2021, 11 (12) : 1077-1083.
- [3] 何建坤. 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J]. *环境经济研究*, 2021, 6 (1) : 1-9.
- [4] WEST J J, SMITH S J, SILVA R A, et al. Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health[J]. *Nature climate change*, 2013, 3 (10) : 885-889.
- [5] 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.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2001: Mitigation: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). Co-benefits definition [EB/OL]. [2024-12-25]. https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Ministry of the Environment of Japan. Manual for quantitative evaluation of the co-Benefits approach to climate change projects[EB/OL]. [2024-12-25]. https://www.env.go.jp/en/earth/cc/manual_qecba.pdf.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Global Warming of 1.5°C* [R]. Incheon: IPCC, 2018.
- [11] 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.
- [12] LIU Z Y, ZHANG Y, WANG Y H, et al. Cost-effectiveness of NO_x and VOC co-operative controls for PM_{2.5} and O₃ mitigation in the context of China's carbon neutrality[J]. *Environmental science & technology letters*, 2023, 10 (11) : 1109-1116.
- [13] SHI Q R, ZHENG B, ZHENG Y X, et al. Co-benefits of CO₂ emission reduction from China's clean air actions between 2013-2020[J]. *Nature communication*, 2022, 13 (1) : 5061.
- [14] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17 (3) : 268-278.
- [15] 邢有凯, 毛显强, 冯相昭, 等. 城市蓝天保卫战行动协同控制局地大气污染物和温室气体效果评估——以唐山市为例[J]. *中国环境管理*, 2020, 12 (4) : 20-28.
- [16] LIU Z Y, DONG M T, XUE W B, et al. Interaction patterns between climate action and air cleaning in China: a two-way evaluation based on an ensemble learning approach[J]. *Environmental science & technology*, 2022, 56 (13) : 9291-9301.
- [17] WU K, LIU X R, DAI H C, et al. Mutual effects of CO₂ emission reduction and air pollution control policies in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Frontiers in environmental science*, 2022, 10: 1006142.
- [18] 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.
- [19] LIU S C, XING J, WANG S X, et al. Health benefits of emission reduction under 1.5 degrees C pathways far outweigh climate-related variations in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(16): 10957-10966.
- [20] TANG R, ZHAO J, LIU Y F, et al. Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030[J]. *Nature communications*, 2022, 13 (1) : 1008.
- [21] 周丽, 夏玉辉, 陈文颖. 中国低碳发展目标及协同效益研究综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30 (7) : 10-17.
- [22] WU W L, TANG Q, XUE W B, et al. Quantifying China's iron and steel industry's CO₂ emissions and environmental health burdens: a pathway to sustainable transformation[J]. *Environmental science and ecotechnology*, 2024, 20: 100367.
- [23] SHARIFI A. Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: a literature review[J]. *Science of the total environment*, 2021, 750: 141642.
- [24] TAN Q L, WEN Z G, CHEN J N. Goal and technology path of CO₂ mitigation in China's cement industry: from the perspective of co-benefit[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 114: 299-313.
- [25] WEN Z G, XU C, ZHANG X Y. Integrated control of emission reductions, energy-saving, and cost-benefit using a multi-objective optimization technique in the pulp and paper industry[J]. *Environmental science & technology*, 2015, 49 (6) : 3636-3643.
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [27] European Environment Agency. Cross-cutting story 5: co-benefits of addressing climate change and pollution[EB/

- OL]. [2024-12-26]. <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/cross-cutting-stories/cross-cutting-story-5-co>.
- [28] KOSAJAN V, WEN Z G, FEI F, et al. Comprehensive assessment of cement kiln co-processing under MSW sustainable management requirements[J]. Resources, conservation and recycling, 2021, 174: 105816.
- [29] 毛显强, 曾桢, 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.
- [30] 刘高军. 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J]. 洁净煤技术, 2023, 29 (6): 189-195.
- [31] 谭琦璐. 中国主要行业温室气体减排的共生效益分析[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [32] 李丽平, 周国梅, 季浩宇. 污染减排的协同效应评价研究——以攀枝花市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20 (S2): 91-95.
- [33] LI M W, ZHANG D, LI C T, et al. Air quality co-benefits of carbon pricing in China[J]. Nature climate change, 2018, 8 (5): 398-403.
- [34] ZHU J P, WU S H, XU J B. Synergy between pollution control and carbon reduction: China's evidence[J]. Energy economics, 2023, 119: 106541.
- [35] 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.
- [36] 王慧, 孙慧, 肖涵月, 等. 碳达峰约束下减污降碳的协同增效及其路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32 (11): 96-108.
- [37] 汪峰, 孙千惠, 李佳硕, 等. 我国城市二氧化碳和大气汞排放特征及协同控制潜力研究——基于生产和消费的视角[J]. 环境科学学报, 2023, 43 (4): 179-189.
- [38] ERCAN T, ONAT N C, KEYA N, et al. Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2022, 112: 103472.
- [39] LU Z Y, HUANG L, LIU J, 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, 1: 100006.
- [40] SHI X R, LEI Y, XUE W B, et al. Drivers in carbon dioxide, air pollutants emissions and health benefits of China's clean vehicle fleet 2019-2035[J]. Journal of cleaner production, 2023, 391: 136167.
- [41] SHI X R, ZHENG Y X, LEI Y, et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China[J]. Science of the total environment, 2021, 795: 148784.
- [42] 曹馨. 产业共生系统的节能减排机制模拟及高维多目标优化分析[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [43] DINGA C D, WEN Z G. China's green deal: can China's cement industry achieve carbon neutral emissions by 2060?[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2022, 155: 111931.
- [44] CAO X, ZHANG H R, WANG Y H. Energy conservation and CO₂ emission reduction roadmap in China's energy-intensive industries based on a bottom-up approach[J]. Sustainable production and consumption, 2021, 27: 1424-1436.
- [45] 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.
- [46] WANG Y H, WEN Z G, LÜ X J, et al. The spatial heterogeneity of synergy and trade-off linkages between carbon and air pollutant mitigations in China's steel industry[J]. Journal of cleaner production, 2023, 418: 138166.
- [47] KHAN A M, LIANG L, MIA M, et al. Development of process performance simulator (PPS) and parametric optimization for sustainable machining considering carbon emission, cost and energy aspects[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2021, 139: 110738.
- [48] HAIMES Y Y, LASDON L S, WISMER D A. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1971, SMC-1 (3): 296-297.
- [49] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary computation, 1994, 2 (3): 221-248.
- [50] DEB K, AGRAWAL S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. Paris: Springer, 2000: 849-858.
- [51] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2014, 18 (4): 577-601.
- [52] SHABANI-NAEENI F, YAGHIN R G. Integrating data visibility decision in a multi-objective procurement transport planning under risk: a modified NSGA-II[J]. Applied soft computing, 2021, 107: 107406.
- [53] WU X, CHENG A D, LI S, et al. A multi-objective optimization strategy of steam power system to achieve standard emission and optimal economic by NSGA-II[J]. Energy, 2021, 232: 120953.
- [54] GU Z M, WANG G G. Improving NSGA-III algorithms with information feedback models for large-scale many-

- objective optimization[J]. Future generation computer systems, 2020, 107: 49-69.
- [55] WANG Y H, CHEN C, TAO Y, et al. A many-objective optimization of industrial environmental management using NSGA-III: a case of China's iron and steel industry[J]. Applied energy, 2019, 242: 46-56.
- [56] DOH DINGA C, WEN Z G. Many-objective optimization of energy conservation and emission reduction under uncertainty: a case study in China's cement industry[J]. Energy, 2022, 253: 124168.
- [57] DONG H J, DAI H C, DONG L, et al. Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: a provincial leveled analysis[J]. Applied energy, 2015, 144: 165-174.
- [58] BÖHRINGER C, RUTHERFORD T F. Combining bottom-up and top-down[J]. Energy economics, 2008, 30 (2) : 574-596.
- [59] SCHÄFER A, JACOBY H D. Technology detail in a multisector CGE model: transport under climate policy[J]. Energy economics, 2005, 27 (1) : 1-24.
- [60] 张树伟. 能源经济环境模型研究现状与趋势评述 [J]. 能源技术经济, 2010, 22 (2) : 43-49.
- [61] JIANG J J, YE B, SHAO S, et al. Two-tier synergic governance of greenhouse gas emissions and air pollution in China's megacity, Shenzhen: impact evaluation and policy implication[J]. Environmental science & technology, 2021, 55 (11) : 7225-7236.
- [62] BRASPENNING RADU O, VAN DEN BERG M, KLIMONT Z, et al. Exploring synergies between climate and air quality policies using long-term global and regional emission scenarios[J]. Atmospheric environment, 2016, 140: 577-591.
- [63] 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.
- [64] LIU J Y, WOODWARD R T, ZHANG Y J. Has carbon emissions trading reduced PM_{2.5} in China?[J]. Environmental science & technology, 2021, 55 (10) : 6631-6643.
- [65] 曹宏斌, 赵赫, 赵月红, 等. 工业生产全过程减污降碳: 方法策略与科学基础 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38 (2) : 342-350.

The Synergistic Effect and Governance Methods for Carbon and Pollution Reduction in the Industrial Sector

WEN Zongguo*, XU Mao, ZHANG Lanxin

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The synergistic effects between carbon dioxide (CO₂) and multi-pollutant emission reduction, along with strategic pathway management approaches, are the key scientific issues in addressing global climate change mitigation and enhancing ecological-environmental quality. Key sectors, such as industrial and power sectors, are the main sources of CO₂ and pollutants, and their synergistic effects of carbon and pollution reduction have received widespread attention. However, the scientific understanding of "synergistic effects" is insufficient due to complex technological processes for industry carbon and pollution reduction, unclear emission synergy mechanisms, large parameter uncertainty, and multi environmental management targets. This paper begins by synthesizing the scientific connotation of "synergistic effects" in industrial pollution and carbon reduction, which encompass both positive co-benefits and negative trade-off relationships, providing a theoretical basis for the synergistic management of CO₂ and pollution reduction. Secondly, the inherent mechanism and numerical characterization methods of the synergistic effect of CO₂ and pollution reduction are systematically analyzed. The applicability and scientificity of high-dimensional multi-objective optimization methods in supporting carbon and pollution reduction management decisions are explored. Finally, key scientific issues that need to be paid attention to in future industry CO₂ and pollution reduction research are proposed, in order to provide reference basis for the formulation of CO₂ and pollution reduction related policies in China.

Keywords: synergistic effect; carbon and pollution reduction; co-benefits; trade-off; environmental governance