

· 科学论坛 ·

降碳减污多维协同的基础科学问题

杨静^{1*} 刘会娟² 吉庆华² 李森² 徐明² 曹晓峰²

1. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085

2. 清华大学 环境学院, 北京 100084

[摘要] 基于第325期“双清论坛”, 本文总结了我国降碳减污领域所面临的国家重大需求, 回顾了降碳减污领域近年来所取得的主要研究进展, 分析了相关基础研究的问题与不足, 凝炼了该领域未来5~10年的重大关键科学问题, 探讨了前沿研究方向和科学基金资助策略。

[关键词] 降碳减污; 研究范式; 多学科交叉; 基础研究; 科学问题

气候变化是全人类面临的共同挑战。当前, 我国生态文明建设同时面临深入推进污染防治和积极稳妥推进“碳达峰”“碳中和”两大战略任务, 协同推进降碳减污已成为我国加快发展方式绿色转型的必然选择。党的二十大报告指出, 要推进美丽中国建设, 必须坚持协同推进降碳、减污、扩绿、增长。在此背景下, 由单一维度的污染控制和温室气体减排转向多维降碳减污协同控制已成为必由之路, 也是全球环境治理的总体方向。该领域的研究涉及环境、生态、地学、材料和管理学等多学科的系统交叉, 具有基础研究与技术应用紧密结合的创新特色。

大气污染物与温室气体排放具有同根、同源、同过程和排放时空一致性特征, 比如能源、工业、交通、建筑等行业是环境污染物排放的主要来源, 同时也是温室气体的主要排放源, 这就意味着减污和降碳应协同推进。研究表明, 温室气体减排能够减少污染物排放及其相应的污染损害^[1]。然而, 早期的污染物减排与温室气体减排各自独立, 温室气体减排更多依靠能源相关技术与政策等源头控制手段实现, 而污染物减排则是通过末端治理来削减污染物进入环境。此外, 污染物排入水体、土壤等介质和产污过程中温室气体排放的关联性也不明确。因此, 并非所有的“降碳”措施都同时“减污”, 也非所有的“减污”措施都同时“降碳”。例如, 碳捕集与封存技术会增加能源和物质消耗, 间接增加污染物的排放; 污水深度处理技术虽能降低污染物的排放, 但会增



杨静 博士, 研究员, 现任国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学三处处长。主要从事科学基金管理工作, 围绕科学基金资助项目管理、学科发展战略规划和政策研究有较好的积累。主要研究领域: 环境工程。

加处理成本和能耗, 增加碳排放。在降碳减污协同控制已成共识的背景下, 迫切需要认识碳污协同控制的基本原理、内在逻辑与科学内涵, 发展相应的方法论, 推动其研究范式变革, 发展碳污协同控制的科学理论与创新技术。

我国的生态环境技术呈现从末端治理向全过程协同控制的发展趋势, 随着“碳达峰”与“碳中和”进程的推进, 我国的生态环境技术进入多尺度降碳减污协同防控新阶段, 特别是流域—区域—城市尺度的协同, 将深刻影响双碳目标的实现和人类生产生活方式的变革。目前, 在多尺度碳排放与环境质量演变复杂规律的认识方面, 还缺乏整体上的系统思维和科学理论支撑, 同时, 以降碳减污协同为导向的产业结构、发展布局、生态格局等协同调控路径尚未打通^[2]。

降碳减污协同本质上是一个系统工程问题, 即从系统的角度同时考虑减少温室气体和环境污染物排放, 以实现系统层面的收益最大化。实现碳污协同管控涉及到多种过程、工艺、技术、产品、行业和地区, 具有复杂的多主体动态决策博弈, 需要应用环境

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-06-02

* 通信作者, Email: yangjing@nsfc.gov.cn

系统工程理论和方法对其进行全面的研究,以实现温室气体和污染物的全生命周期、全流程、全系统协同管控。当前这一领域仍处在研究的初期,亟待加强碳污协同基础数据库建设、效益评价和路径优化方法开发、动态决策模拟等方面的研究。

为此,2022年12月18—20日,国家自然科学基金委员会工程与材料学部和政策局联合举办主题为“降碳减污多维协同的基础科学问题”的第325期双清论坛,来自全国27家高等院校和科研院所的52位专家学者应邀出席。与会专家通过充分而深入的研讨,凝炼了该领域的重大关键科学问题,探讨了前沿研究方向和科学基金资助战略。

1 降碳减污多维协同的研究现状与发展趋势

1.1 降碳减污多维协同的研究进展

2019年3月,第四届联合国环境大会上联合国环境署发布的《全球环境展望6》(The Global Environment Outlook 6, GEO-6)指出,全球面临着空气、生物多样性、土壤、淡水等严峻的生态环境态势,需改变目前的发展模式,实现“健康地球、健康人类”的愿景。2019年12月,欧盟委员会公布“欧洲绿色协议”(European Green Deal),旨在到2050年使欧洲成为第一个“气候中和”(Climate-Neutral)的大陆。2021年5月,欧盟委员会通过了《空气、水和土壤的零污染行动计划》,致力于到2050年将空气、水和土壤污染降低至对生态系统和人类健康无害的水平。研究表明,温室气体减排政策与措施能促进区域生态环境质量改善^[3]。美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, U. S., USEPA)推出的综合环境战略(The Integrated Environment System, IES)项目通过案例研究显示,温室气体与污染物具有共同的来源,因此存在协同控制的可行性^[4]。模型预测表明,在全球实施大气污染物与温室气体综合减排策略的成本效益分析结果,要优于独立实施大气污染物减排策略和应对气候变化策略^[5]。

从“十一五”到“十四五”期间,我国的污染治理技术由单项走向集成、介质由单一变为复合、空间由局地趋向区域。国家陆续设立了针对多尺度、多介质、跨区域污染控制的科技项目,如国家重点基础研究发展规划(973计划)项目“京津渤区域复合污染过程、生态毒理效应及控制修复原理”“首都北京及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控机理”等

基础性科学研究,提出了环境治理的理论框架;国家高技术研究发展计划(863计划)项目“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”“污染土壤修复技术与示范”等高新技术研究,开发了多项污染协同治理的关键技术;科技支撑、大气专项、水专项、行业公益专项、重点研发计划的研究,探索了共性技术、工程示范和管理支撑等应用模式。但碳污协同控制的相关基础理论研究明显不足,对降碳减污协同控制的措施、政策与管理等各方面均缺乏科学理论支撑,亟需凝练并突破降碳减污协同控制的科学问题,建立相应的研究范式。

1.2 流域—区域—城市多尺度碳污协同控制技术

到2035年,低碳化将成为全球人类活动方式、能源结构、产业结构的重要特征,流域—区域—城市多尺度碳污协同控制至关重要,而不同区域与城市的发展受低碳化的影响,发展模式和格局将发生重要转变。我国当前面临最主要的问题是,产业布局 and 自然禀赋的差异导致碳排放和碳汇在不同城市的割裂,如北京、上海、海南等以服务业为主的省份碳排放相对较少,而内蒙古、新疆等能源输出省份以及山东、江苏等工业省份碳排放量较大^[6,7]。近年来,针对降碳减污协同的问题,国际上更加注重从时空多尺度特征、整体观和系统观出发,在流域与区域层次全面监测和科学评价,深入研究传输、转移和转化规律,大尺度预测环境变化趋势;通过对关键技术的集成创新和综合示范研究,形成区域尺度系统应对碳中和与解决环境污染问题的科学方案;通过对基础科学、工程技术和政策管理综合研究,建立流域—区域—城市降碳减污与经济发展相互协调的模式^[8]。

当前国内外在流域—区域—城市多尺度降碳减污协同控制方面尚处于起步阶段,很多关键科学问题和技术难题急需解决,如:干旱地区水域排放未纳入温室气体核算、流域沼泽碳储存和碳通量数据缺乏、青藏高原多年冻土碳库大小及其分布特征不明、极端事件对北半球冬季气候下生态系统碳响应和预测模型改进等问题,都需要进一步研究。从发电端看,我国西部区域清洁能源发电占比高,清洁能源发展潜力大,但供给稳定性弱,清洁能源外送通道建设需求紧迫,需要探索流域—区域/省域—城市间清洁能源互济新模式^[9];从排放端看,区域发展不充分与减排压力并存,基础数据不完备,碳排放核算结果准确度低,能源利用效率亟待提升。因此,迫切需要厘清多尺度协同降碳减污的现实问题,分析流域、区域和城市不同尺度及其交互影响下的碳减排、污染控

制及其协同过程,明确实现协同过程的技术瓶颈,研究突破瓶颈问题的科学路径^[10]。

1.3 碳污协同管控的环境系统工程原理与方法

降碳减污协同经历了协同效益—协同控制—协同增效的转变,系统观念的重要性得到了逐步加强。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第三次评估报告^[11]首次提出了协同效益的概念,并在第四次评估报告^[12]中将其确定为应对气候变化决策的重要推动力。2015年,联合国可持续发展目标将环境成本与气候变化控制目标融合在一起,协同控制是实现可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)的重要途径。2022年,我国基于《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》设定的总方针,发表了《降碳减污协同增效实施方案》,该方案首次提出了降碳减污协同度的概念和目标,以降碳减污协同增效引领经济社会发展全面绿色转型。

基于政策指导,降碳减污协同管控从宏观、中观和微观三个尺度进行了方法和原理的研究。宏观尺度的研究以综合指标体系的构建为核心,已有研究开发了以降碳减污协同增效水平和效果为核心的减污降碳协同指数(Index for Synergies in Environmental protection and Carbon reduction, ISEC),Xue 等人^[13]将其与经济发展、二氧化碳排放、空气质量及其环境健康影响等因素综合,形成了大气环境减污降碳协同评价指数(ISEC-AC, ISEC-Air Pollution and CO₂ Emission per GDP)。在中观尺度,基于以环境系统工程思维,建立单元过程的工业基因组数据库,从生命周期视角协同管控过程尺度碳污排放,进而结合数据科学方法^[14],将宏观指标体系与微观技术体系耦合并形成可解释的中观尺度模型。在微观尺度,针对大气、水、固废、生态等具体领域探究降碳减污机理和方法^[15],如基于大气领域中温室气体和大气污染物同根同源的机理研究,Xue 等人^[13]针对广东省大气污染水平与二氧化碳排放水平研究发现,两者呈空间一致性;水环境的碳污协同管控研究从具体工艺拓展至全系统、全流程研究,研究重点聚焦耦合降碳和区域水质改善差异化需求的多目标协同技术方法^[16];固废领域中,生活垃圾焚烧发电具有“控制甲烷排放+代替发电”的双重碳减排效果;针对建筑领域则提出了构建智慧绿色建筑全生命周期的碳足迹模型和优化协同管控策略,形成建筑绿色转型路径;生态领域提出了基于

自然的解决方案(Nature-based Solution, NbS),指通过保护、修复和可持续管理,提升生态系统服务功能、增加碳汇、提高气候韧性,从而有效减缓和适应气候变化,同时提高生物多样性和改进人类福祉。

降碳和减污任务本身涉及到多个行业多个维度的问题,需要应用环境系统工程原理和方法进行研究。降碳减污协同则是将这二者进行进一步的集成融合,从更高的层面进行系统的优化调控,更是需要依赖环境系统工程的原理和方法,分析研判温室气体和环境污染排放的复杂关联关系,形成全生命周期、全流程、全系统的管控与优化策略,协同推进降碳减污。

2 降碳减污多维协同研究存在的问题与面临的挑战

2.1 碳污协同控制的科学问题与研究范式变革

党的十八大以来,我国生态环境质量得到一定改善,碳排放强度显著降低,但当前仍处于环境治理的攻坚期,突出问题主要表现在:地表、地下割裂,水环境、水资源、水生态割裂,大气污染物与碳排放未实现协同控制,土壤污染修复与生态系统固碳未实现协同。与此同时,水、大气、土壤等环境污染相互复合,产业结构、生态格局与环境安全交互影响,呈现出了多尺度、多介质、多过程的高碳、高排放环境污染特征,与2035年美丽中国建设和“碳达峰、碳中和”目标的要求相比任务依然艰巨。按照现有的局地式、分割型、单要素的环境治理模式,难以解决区域一流域降碳减污协同问题,同时缺少相关重大理论、关键技术和系统解决方案。为实现降碳减污协同增效的目标,亟需在水、气、土壤和生态系统治理上补短板,研究多介质降碳减污、多尺度复合污染协同治理的模式;通过多学科交叉融合,推动跨行业+跨介质+多过程的碳污协同控制,研究尺度向更广更深入延展。

2.2 碳污协同控制的技术瓶颈与突破路径

降碳减污协同控制难度较大的重要原因之一是缺乏针对流域—区域—城市降碳和复合污染综合治理新技术、新方法、新模式。尤其在以下方面还存在瓶颈:一是流域—区域—城市碳排放与环境质量演变的复杂规律认识还缺乏整体上的系统思维和科学理论支撑;二是区域—城市在电力、钢铁等重点行业侧重于多污染物协同治理或碳捕集技术研究,尚未形成污染物排放有效控制与全流程碳排放控制协同的技术体系;三是以降碳减污协同为导向的流域—

区域—城市产业结构、发展布局、生态格局一体化调控不足；四是以“流域—区域—城市最优”为目标的降碳减污协同调控政策标准体系仍然缺乏；五是降碳减污科技支撑能力严重滞后，缺乏整体协同治理平台和多方参与机制。因此，需要从流域—区域—城市协同角度，系统研究碳排放与环境质量演变的复杂规律，研发多尺度降碳减污协同控制技术与方法；研发多尺度、跨行业、跨介质的降碳减污协同关键技术，构建流域—区域—城市综合管理平台，科技支撑产业结构调整、流域—区域—城市一体化监测、智慧管理等。以流域—区域—城市绿色循环健康智慧为基本理念，以多尺度协同—介质耦合—过程同步—措施综合为技术路径，联合开展工程技术研发示范和绿色产业培育，提高降碳减污整体效率，深化流域—区域—城市等碳排放和环境污染问题的综合治理，提高重要生态功能区域的碳汇和修复能力，建立低碳集约、环保高效的降碳减污协同的现代经济发展体系。最终通过科学决策、全过程减排和多措施系统集成，实现流域—区域—城市降碳减污的多尺度精准协同，全面提升我国的降碳减污总体成效，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，加快推动国家绿色高质量发展。

2.3 碳污协同管控的环境系统工程原理与方法

党的二十大报告中指出，“必须坚持系统观念”“只有用普遍联系的、全面系统的、发展变化的观点观察事物，才能把握事物发展规律”。降碳减污多维协同是一项艰巨的复杂系统工程，涉及不同类型的温室气体和固、液、气多类型污染物，涵盖建筑、交通、能源、电力、材料等多个行业。从环境系统工程的角度出发，实现降碳减污多维协同管控需要全面了解降碳减污的实现路径、工程技术、政策决策之间的复杂联系，需要全生命周期、全流程、全系统的管控与优化，涉及气候、环境、能源与管理等多个领域不同层级的基础科学问题，存在着大量的问题与挑战。

首先，需要解决如何量化表征降碳减污协同度的问题。支撑降碳减污协同度评价，需要建立适用于多种尺度的降碳减污协同增效评价指标体系，构建降碳减污协同指数，实现对降碳减污协同效果和措施进展情况的量化跟踪、评估与反馈。横向反映不同地区和领域降碳减污工作的相对优劣，纵向体现降碳减污工作的持续性进展。及时发现薄弱领域和突出问题，为相关部门提供决策指引，及时优化调整推进策略。

其次，需要解决如何识别温室气体与污染物的

同源性和异质性的问题。二氧化碳和污染物高度同源，但气候环境影响及作用机理差异显著，二氧化碳的影响与何时、何处、何源排放无关，而环境污染物影响与排放时间、地区、来源高度相关。以环境质量改善作为设计低碳行动方案的关键约束，识别重点对象，分析温室气体与污染物的同源性和异质性，可有效实现温室气体与污染物的协同管控增效。

再次，需要解决如何开展过程尺度的降碳减污协同问题。单元过程是组成工业系统的最基本工艺单元，是实现降碳减污协同的基础。需要分析不同单元过程在产生温室气体排放的同时会产生何种污染物，针对这些单元过程降低温室气体排放能够影响多少污染物的排放，从而评价不同单元过程的降碳减污协同潜力，为后续系统化开展降碳减污协同打好基础。

最后，需要解决降碳减污协同路径优化的问题。需要进行多要素、跨领域降碳减污协同管理技术研究，在保证系统稳定、效用最大、责任公平的基础上，统筹水、气、土、固废等领域，优化降碳减污协同的实现路径。

综上，要实现降碳减污多维协同管控，需要构建涵盖“摸家底—辩区域—识行业—定目标—优措施—评效果—配制度”的全系统碳污协同调控技术与优化体系。

3 降碳减污多维协同科学问题和优先发展领域

如前所述，针对降碳减污协同控制需求，其多维协同的关键科学问题将从污染控制向碳污协同控制转变，从单介质向多介质环境问题研究转变，而研究范式将从线性研究模式向非线性、多学科交叉的研究范式转变，主战场将从环境治理走向降碳减污。

本次双清论坛与会专家经过深入研讨，凝练了以上降碳减污领域重大关键科学问题，并建议未来5~10年应着重围绕以下10个领域开展原创性研究。

3.1 碳污产排关联特性、尺度效应与协同调控原理

温室气体和大气污染物具有同根同源性，而水、固、土壤等污染与温室气体排放的关联性尚不明确，实践中仍存在“减污不减碳”和“减碳不减污”的问题。实现降碳减污协同控制，首先要厘清降碳与减污的逻辑内涵与关联特性，明确不同单元、不同系统、不同介质、不同尺度、不同时间等多维度下碳污协同控制的本质，形成典型行业、区域碳污协同控制的理论、技术路线和系统解决方案。

3.2 城市水系统降碳减污的基础与应用研究

全面评估水系统全过程碳排放,甄别高碳排放关键环节,研究基于碳流的水处理系统物质—能量协同调控和水能碳有序转化新技术原理,开展城市污水生物处理低碳、零碳乃至负碳的污水处理技术基础研究,实现降碳与减污“正相关协同”。发展以污水排水系统为纽带的模块化低碳绿色生态综合体,实现水、物质、能源综合利用与高效协同。构建面向人体健康和生态安全的“取供用排”水系统碳中和原理与技术路线。

3.3 降碳减污协同的绿色可持续土壤生态修复

土壤碳库是陆地生态系统碳库中最重要组成部分,应开展跨时间、跨空间尺度的土壤污染生态风险和生态系统服务评估,基于全生命周期思维,研究碳污协同控制下森林、草原、湿地、农田等恢复与可持续修复原理与机制,研发土壤污染控制/修复的环境功能材料,阐明修复全过程的固碳增汇机制及其优化途径,构建生态修复减污—生态碳汇—生物质资源化的多功能生态系统。

3.4 大气污染与温室气体协同减排

研究不同流域、区域、城市大气污染物与温室气体的融合排放清单及来源识别,分析流域—区域—城市多尺度降碳减污目标,构建大气污染与温室气体深度融合的来源解析与协同减排路径识别技术体系,科学评估不同碳中和路径的生态环境综合效应,开展全国、重点区域或行业协同减排方案制定与减排路径研究,如在移动源碳污协同管控方面,重点发展碳中和内燃机及其后处理技术,推动燃料电池和电动技术对内燃机的演替研究。

3.5 基于生态环境大数据的降碳减污协同研究

实现降碳减污的高时效、高精度、高协同,研究基于生态环境大数据的气、水、土、固废等多介质协同控制优化路径,构建降碳减污效益评估与协同监管体系,探索基于多学科交叉的机理—数据混合驱动降碳减污原理与方法。

3.6 流域—区域—城市碳排放与环境质量演变复杂规律与调控

从复杂系统科学整体论和还原论的不同角度,基于生态环境大数据系统分析流域—区域—城市中水、土、气、固废等多介质碳排放与环境质量演变的复杂规律,建立基于人与自然和谐共生的多尺度降碳减污评估与优化模型,提出基于空间社会经济发展与自然禀赋等多目标优化的流域—区域—城市降碳减污协同方案与路径,构建流域—区域—城市产业

结构、发展布局、生态格局一体化调控技术与方法。

3.7 城市复杂环境过程及复合风险的系统降碳减污

结合降碳减污,研究机理—数据混合驱动工业过程降碳减污,突破城市多介质、多界面、微污染毒性物质诊断与治理,研究水—能—碳协同工厂、厂网降碳与生态效应协同、节能降耗—再生水回用—资源能源回收,发展城市复杂环境过程的降碳减污系统管控方法。

3.8 跨尺度降碳减污协同效益评价及路径优化

针对过程、技术、产品、行业、地区等多个尺度的降碳减污协同问题,开展跨尺度碳污协同场景识别、协同效益评价、协同路径优化协同监管政策等研究,建立多尺度碳污协同基础数据库和协同效益评价及路径优化方法,支撑多尺度和跨尺度的降碳减污协同增效。

3.9 重点行业降碳减污协同管控与优化

针对能源、冶金、建材、化工、交通、污水、固废等重点行业,在深入了解行业特征的基础上,开展重点行业降碳减污过程模拟、协同效益评估、技术路径优化等研究,形成针对具体行业的碳污协同管控理论、方法和工具体系,全面支撑重点行业降碳减污工作的开展。

3.10 降碳减污协同决策模拟与优化

基于对降碳减污协同决策的复杂性及不确定性的深入认识,开展针对具体降碳减污场景的多元主体行为模拟、动态决策反馈机制分析、决策成本效益优化等方面的研究,建立降碳减污决策理论与方法体系,实现多行业、多尺度降碳减污协同的稳健动态决策支撑。

4 结 语

我国生态文明建设进入了以推动降碳减污协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型的关键时期。在基础研究领域,亟需厘清碳污协同控制的基本原理与科学内涵,构建相应的方法论,推动科学研究范式变革;亟需从流域—区域—城市协同角度,系统研究碳排放与环境质量演变的复杂规律,研发多尺度、跨行业、跨介质的降碳减污协同关键技术与原理;亟需解决降碳减污的协同度量表征,识别碳污的同源性和异质性,构建全过程减排和全系统碳污协同调控技术与优化体系。当下,我国降碳减污协同控制基础研究尚处于起步阶段,需要在科研项目立项中强化顶层设计,通过“自上而下”的引导,强化基础

研究对国家生态文明建设战略的响应和支撑,为经济社会发展全面绿色转型提供决策与技术支持。

参 考 文 献

- [1] Ayres RU, Walter J. The greenhouse effect: damages, costs and abatement. *Environmental and Resource Economics*, 1991, 1(3): 237—270.
- [2] 王涵, 马军, 陈民, 等. 减污降碳协同多元共治体系需求及构建探析. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 936—944.
- [3] 毛显强, 曾桢, 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. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 255—267.
- [4] West JJ, Osnaya P, Laguna I, et al. Co-control of urban air pollutants and greenhouse gases in *Mexico* city. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(13): 3474—3481.
- [5] Bollen J, van der Zwaan B, Brink C, et al. Local air pollution and global climate change: a combined cost-benefit analysis. *Resource and Energy Economics*, 2009, 31(3): 161—181.
- [6] 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. *资源科学*, 2022, 44(6): 1155—1167.
- [7] 张亚捷, 霍守亮, 吴丰昌. 我国流域减污降碳协同增效: 路径、技术与对策. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 41—48.
- [8] 易兰, 杨田恬, 杜兴, 等. 减污降碳协同路径研究: 典型国家驱动机制及对中国的启示. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(9): 53—65.
- [9] 朱法华, 徐静馨, 潘超. 电力行业减污降碳发展状况及目标展望. *环境保护*, 2022, 50(10): 15—20.
- [10] 刘鹏振, 张力元, 董会忠. 京津冀及周边“2+26”城市碳排放强度时空演变规律及影响因素分析. *环境污染与防治*, 2022, 44(6): 772—776, 810.
- [11] Watson RT, Albritton DL, Barker T, et al. A contribution of working groups I, II and III to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change// Watson RT. *Climate change 2001: Synthesis report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 398.
- [12] IPCC. *Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007: 104.
- [13] Xue WB, Lei Y, Liu X, et al. Synergistic assessment of air pollution and carbon emissions from the economic perspective in China. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159736.
- [14] Zhao B, Shuai CY, Qu S, et al. Using deep learning to fill data gaps in environmental footprint accounting. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11897—11906.
- [15] Liu ZY, Dong MT, Xue WB, et al. Interaction patterns between climate action and air cleaning in China: a two-way evaluation based on an ensemble learning approach. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(13): 9291—9301.
- [16] 沈耀良. 城市污水处理技术: 走向低碳绿色. *苏州科技大学学报(工程技术版)*, 2021, 34(3): 1—16.

Fundamental Scientific Issues of Synergizing the Reduction of Pollution and Carbon Emissions

Jing Yang^{1*} Huijuan Liu² Qinghua Ji² Miao Li² Ming Xu² Xiaofeng Cao²

1. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract On the basis of the 325th Shuangqing Forum of the National Natural Science Foundation of China (NSFC), we summarized the national strategic demand for the reduction of pollution and carbon emissions in China, reviewed the main research progress in related fields in recent years, and analyzed the existing problems in the research area. Meanwhile, the critical scientific issues in the next 5-10 years were refined, and the cutting-edge research directions as well as the funding strategies of NSFC were proposed.

Keywords reduction of pollution and carbon emissions; research paradigm; multidisciplinary intersection; fundamental research; scientific problems

(责任编辑 刘敏 张强)

* Corresponding Author, Email: yangjing@nsfc.gov.cn