



编者按

面对我国严峻的污染治理挑战,2015 年启动的国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”通过凝聚优势

力量联合攻关,取得了系列重要的原创性成果,出色完成了研究任务,是“蓝天保卫战”背后不可或缺的科学力量。

“蓝天保卫战”背后的科学力量

——记国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”

■本报记者 甘晓

从雾霾笼罩到蓝天白云,中国大气污染治理的成功离不开科学的力量。美国彭博社曾评价:“中国 7 年的空气污染治理相当于美国 30 年治理的成果。”

面对空气污染治理、气候变化应对等事关我国社会经济生活的重大环境挑战,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)组织专家进行了深入讨论,并于 2015 年启动国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”(以下简称重大研究计划)。2024 年底,重大研究计划已完成评估并获得了全优的评价。

近期,在接受《中国科学报》采访时,作为重大研究计划指导专家组组长,中国科学院院士、北京大学环境科学与工程学院教授朱彤感到欣慰:“重大研究计划显著提升了我国大气污染治理领域的科研实力,并将前沿探索与国家需求无缝对接,为我国打赢蓝天保卫战提供了坚实的科学支撑。”

从概念到框架

20 世纪末,我国大城市机动车数量激增,许多车辆缺乏有效排放控制,行驶时“看得见黑烟,闻得到气味”。同时,冬季取暖用煤也加剧了空气污染问题。

身在北京的中国工程院院士唐孝炎深感忧虑。基于对英国伦敦和美国洛杉矶大气污染案例的研究,她意识到北京可能同时遭受燃煤型烟雾和光化学烟雾的双重污染。

1997 年,唐孝炎在国际上率先提出“大气复合污染物”概念。在她的引领下,国内学者不断深化这一概念,丰富其内涵,让其在近 20 年后依然具有鲜活的生命力,成为重大研究计划在科学上的理论起点。

朱彤指出,大气复合污染中的细颗粒物不仅来自直接排放,更通过与其他气态污染物反应生成二次污染,涉及复杂的自由基化学过程。这类污染还随大气输送在区域尺度上扩散累积,多种物质相互作用、动态演变,呈现出复杂的物理化学特征。

基于这一认识,大气复合污染的研究初步形成了概念模型。

2012 年至 2013 年间,我国经历了大范围、长时间、高浓度的大气细颗粒物(PM_{2.5})灰霾污染事件,其所带来的健康和环境风险受到全社会的高度关注。我国迅速采取一系列措施,包括首次将 PM_{2.5} 纳入环境空气质量标准,启动“中国大气污染防治行动计划”(以下简称“大气十条”)等。

“学术界有一个很强烈的感受,大气污染治理绝非易事,其背后涉及诸多科学问题需要深入探讨和研究,迫切需要深入的科学研究提供支撑。”朱彤介绍。



朱彤(左五)与科研人员在超大型浮空器探测平台工作现场留影。研究团队供图

在这样的背景下,2014 年 1 月,自然科学基金委召开了由 8 个学部联合举办的双清论坛。朱彤受邀召集专家、组织会议。重大研究计划正是从那次论坛中酝酿而生。

随后,经过多轮科学凝练,重大研究计划于 2015 年正式启动。指导专家组认为,研究将围绕大气复合污染的前沿科学问题,目标是构建系统性的“大气复合污染理论框架”,提出控制我国大气复合污染的创新性思路。

值得称道的是,唐孝炎始终高度关注并参与重大研究计划,初期深入参与研讨与设计,后期虽年事已高,仍以不同方式持续关心和支持,并作为项目负责人承担了重大研究计划创新性设立的一个科普项目。今年 6 月,在重大研究计划完成评估半年后,93 岁的唐孝炎逝世。回忆恩师,朱彤难以忘怀:“她曾在不同场合为我们‘点赞’,给予我们极大鼓励。”

前沿探索的中国“主场”

重大研究计划的三大核心科学问题为:大气复合污染的来源识别技术原理与应对机制、大气复合污染生成的关键化学过程以及大气物理过程与大气复合污染的生成。为此,全国 30 多家单位、1000 余名科研人员开展了联合攻关。

在面向该领域的学术前沿方面,过去围绕概念模型的讨论主要关注由化学反应构成的复合污染体系,新构建的理论框架则首次将大气物理过程与化学过程的相互作用纳入其中、

有机融合,形成了完整、系统的理论框架。

“这在此前的研究中是从来没有的。”朱彤倍感自豪。这一理论框架重塑人们对大气复合污染的认识范式,深刻地体现了基础研究在推动科学思想变革中的关键作用。

在理论框架创新的基础上,重大研究计划在研究手段和方法上也进行了大胆突破——针对研究数据质量不高、难以获得等问题,建立了向全球开放的“中国大气复合污染综合数据共享平台”,其规模之大、种类之全前所未有,增强了科学研究的透明度;针对我国该领域长期存在的模型“孤岛”问题,构建了中国首个开源共享模式“排放与大气过程集成耦合通用模式 EPICC”,从源代码起全面开放,推动了该领域的科研范式从“小作坊式”向开放协同转变;针对大气垂直观测对先进且复杂的高精度仪器的迫切需求,研发了“系留型超大载荷浮空器探测平台”,可将数百公斤甚至一吨的大型、先进仪器送入高空,实现对不同高度大气成分的实时、连续、精准测量。

同时,边界层物理与化学过程相互作用、自由基化学等前沿领域的一系列新概念、新机制和新发现不断涌现,许多突破性进展源于中国的观测与研究,由中国科学家率先提出。

“一系列创新成果让我国在该领域的学术研究‘如虎添翼’,实现了从‘跟跑’到‘领跑’的跨越式发展。”朱彤指出。

从论文数量来看,过去 10 年间,中国科学家发表的大气污染相关研究论文呈指数级增

长。在此之前,中国学者为主或参与发表的论文占全球比例不足 10%,如今已超过 40%。

“你会发现,无论在哪个国家举办的国际大气环境领域的学术会议,几乎都是中国的‘主场’。”朱彤说,“中国科学家作报告的人数也常常接近一半。”

与国家需求无缝对接

在重大研究计划实施中,前沿探索与国家需求实现了无缝衔接。

多项关键政策建议被国家及时采纳并产生重大影响。其中,朱彤团队关于“分区域精确制定氮减排计划”的研究论文在美国《国家科学院院刊》发表后,提出的相关建议得到党中央高度重视,推动相关部门将氮减排纳入“十四五”规划。

另一项重要成果聚焦港口城市的船舶排放。在我国大气污染治理初期重点关注机动车、燃煤电厂及工业排放源时,清华大学环境学院教授刘欢团队前瞻性地意识到船舶排放对沿海城市空气质量可能带来的显著影响。他们通过先进方法构建的高精度船舶排放源清单,首次系统揭示了船舶污染的时空分布特征及其在区域污染中的贡献,其研究成果和政策建议被交通管理部门采纳。

在指导专家组看来,这在很大程度上得益于“边产出、边应用、边反馈、边完善”的科研工作模式,通过关键会议、媒体报道、信息报送等方式实现了科研与决策之间的良性互动,推动科研成果快速转化为治理实践。

专家们还看到,公众对雾霾的广泛关切甚至焦虑已经成为重要的社会议题,成为国家发展进程中必须回应的现实挑战。

“以‘科普’的方式能够让社会公众相信,科学研究可以解释他们关心的问题,更能为治理提供坚实支撑。这种双向沟通满足了公众强烈的学习意愿,会显著提升传播效果。”朱彤表示。

为此,重大研究计划一开始就设立“培育项目”支持科普项目,由唐孝炎牵头实施。在专家们看来,她对大气污染领域有着全面而深刻的理解,是一位极具魅力的演讲者和优秀的教师,擅长将复杂的科学问题深入浅出地讲清楚,她严谨、认真的态度也让人深信,她能高质量地完成这项工作。

唐孝炎为此付出大量心血,积极采用直播等新媒体形式,让科普内容更生动、更贴近大众。

据统计,“培育项目”共产出 8 个专访和 62 个科研成果视频解读,最终累计覆盖受众超千万人次,产生了广泛而深远的社会影响。

青年人才迅速成长

在重大研究计划的推进过程中,一大批青

年人才在科研实践中迅速成长,逐渐成为大气环境研究领域的中坚力量,成为蓝天保卫战的主力军。例如,共有 5 位指导专家组成员当选为中国科学院院士或中国工程院院士,超过 40 位青年骨干获得国家各类重要项目支持,并培养了 900 多名博士、硕士研究生。

重大研究计划构建了以重点项目为核心的“项目群”模式,布局 46 个重点项目。其中,30%的重点项目由 40 岁以下青年学者主持,他们在解决实际问题的过程中取得了突出成果,学术能力得到快速提升。

2016 年,39 岁的南京大学大气科学学院教授丁爱军获得重点项目资助。他对《中国科学报》说:“在承担这个项目的过程中,我逐渐形成了自己的特色研究方向,即聚焦空气污染与气象之间的双向相互作用。”

2021 年至 2023 年,丁爱军进一步获得集成项目支持,旨在对中国东部的超大城市群开展大气的立体探测。“这一大型科学实验提升了我的组织协调能力,对我个人以及整个团队来说,都是非常宝贵的经验。”他强调。

2024 年,丁爱军获得由世界气象组织、欧洲气象学会等七家单位联合颁发的“Zilinski-vich 奖”。这一奖项是大气科学和海洋科学中边界层研究领域的权威奖项,此前的获奖者均为该领域内资深且年龄较大的学者。

清华大学地球系统科学系教授张强也是其中之一。2017 年,刚刚 40 岁的张强获得关于中国大气污染源排放清单的集成项目资助。“我深感幸运,能将个人的科研兴趣与专业所长融入中国大气污染防治这一波澜壮阔的实践之中。”张强告诉《中国科学报》。

与全国优秀科研骨干开展“大兵团作战”的协同攻关让张强深有感触。“不同领域的专家之间围绕同一个科学问题深度交流与相互学习,是‘单打独斗’式的科研难以企及的。”他说。

张强带领团队以技术创新绘制出迄今国际上最完整、最详细的中国大气污染源排放清单,开发了全国公里级分辨率排放清单数据产品,成果直接应用于国家清洁空气行动计划顶层设计、实施跟踪与效果评估。

目前,张强活跃在国际学术舞台上,担任全球排放研究计划科学指导委员会委员和中国工作组联合主席。“我们计划向‘全球南方’国家分享基础研究支撑决策的‘中国方案’,积极帮助其提升大气污染治理能力。”他表示。

虽然重大研究计划已经结束,但指导专家组仍强调,研究成果要“留得住、用得着、传得开”。面向未来,在持续改善空气质量的国家重大需求下,仍有诸多深层次科学问题尚待解决。对此,朱彤相信:“我们在方法、平台和数据方面的积累,将成为应对这些挑战的重要基础。”

大气污染驱动因子的理化过程相互作用探究

全面认识大气污染物的驱动因子是对其进行准确预报、精准控制的重要科学基础。这需要深入探究大气污染物水平传输和垂直扩散的特征,同时亟须评估水平传输与垂直扩散的相对贡献及其相互作用,并进一步思考在跨区域背景下如何协同治理、优化防控策略。

在国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”的支持下,我国多个科研团队对大气污染的动力驱动因子与理化过程相互作用进行了探索。

为揭示大气复合污染的气候背景和相关键物理驱动因子,科研人员厘清了重污染静稳天气发生的大尺度环流特征,构建重霾天气指数——HWI,发现全球变暖增加了华北重霾频率和持续时间。这项研究明确了导致华北重霾污染的关键天气型,阐明年际尺度上华北重霾污染的重要气候因子以及环流配置关系,为重霾天气的中长期预测提供科学支撑。

在此基础上,他们阐明了理化过程相互作用对边

界层及静稳天气的影响。科研团队发现,黑碳气溶胶影响大气边界层的“穹顶效应”可加剧超大城市霾污染,揭示了气溶胶-边界层相互作用的独特机制并量化其非线性贡献。

同时,通过发展先进垂直探测技术,科研团队深化了对理化过程作用机制的认识。科研团队研发了国际领先的“系留型超大载荷浮空器探测平台”,探空高度从 1 公里提升到 3 公里,从载重 5 公斤提升至载重 1.5 吨,搭载的仪器也从便携式传感器变成多套质谱同步的先进设备。这一平台的研发实现了全大气边界层理化参数高分辨率原位“靶向”测量。

利用这一先进平台,科研人员组织实施了多期外场协同观测试验,获得我国东部城市群区域大气复合污染理化过程相互作用机制的若干新认知。

结合前述理论认识和测量结果,研究发现,水平跨区域长距离传输实际受垂直气溶胶-边界层相互作用反馈增强影响。科研人员据此提出跨区域精准协同减排的重污染天气应对新思路。

大气化学新机制与自主模型开源研发

在国家大气污染治理实践中,明确何时启动红色、橙色或黄色预警是一项重要需求。数值模式作为综合表征排放源、物理传输及化学转化过程的核心工具,能够提供精准的重污染预报。

然而,以往的模式预报大气复合污染组分偏差大,难以满足精准治污需求。在科学家看来,这主要是由于预报模式没有充分考虑我国大气复合污染形成的特殊化学机制。

在国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”的支持下,我国多个科研团队对大气化学新机制与自主模型开源进行了探索。

在大气化学新机制方面,面对大气复合污染形成化学机制复杂、爆发性增长成因成谜的科学难题,科研团队聚焦大气复合污染的化学机制和粒子全生命周期演变规律,厘清了驱动新粒子生成、增长的化学机制。研究发现,有机酸在城市新粒子生成至关重要,而郊区环境则是关键,据此提出二元羧酸等多元成核新方案及气态硫酸等传统成核方案。这项研究为从源头控制二次粒子生成提供了理论基础和方向。

面对重污染过程中大气氧化能力关键来源缺失的问题,科研

人员发现了重污染过程中大气自由基的非再生机制,提出昼夜协同大气氧化性调控的重要性,从理论上揭示了重污染爆发性增长的关键化学驱动力。

基于以上科学发现,科研人员提出二次颗粒物生成的“三阶段”机制,为合理模拟预测重污染过程奠定了基础。“三阶段”具体包括多元成核新机制、光化学驱动的有机物快速初始增长、颗粒物液相反应推动的粒径与质量持续增长等。

在自主模式研发方面,科研团队认为,当前我国大气污染研究模式面临发展困局,主要原因是国产模式带有团队或个人标签,缺乏开放共享机制,严重阻碍跨团队合作。而国内研究又普遍依赖国外主流模式,导致国产模式科学性滞后。

鉴于此,科研团队研制和构建了中国首个开源共享模式——排放与大气过程集成耦合通用模式,实现了多单位多团队集成耦合、协同开发。模式代码完全开源共享,发布的作者是非署名的工作组,形成了协同开发的研发新范式。该成果入选 2024 年度中国生态环境十大科技进展。

上述相关研究显著提升我国空气质量模拟预报技术在国际上的影响力。

大气复合污染溯源与调控机制研究

向大气污染宣战,实施精准调控策略是污染控制的关键。精准溯源与调控成为国家重大战略需求背后的基础科学问题。

为此,来自不同行业、地域、时段的排放对大气复合污染的相对贡献如何、如何科学制定有效的大气污染控制策略等科学问题亟待解决。在国家自然科学基金重大研究计划“中国大气复合污染的成因与应对机制的基础研究”的支持下,我国科研团队围绕这些科学问题开展深入研究。

科研团队构建了 PM_{2.5} 污染复杂来源多维多尺度解析方法。研究建立了以精细化排放表征方法、高维非线性解耦方法、受体动态源解析方法为核心的 PM_{2.5} 污染多维多尺度解析方法,厘清了不同行业、地域、时段排放对 PM_{2.5} 污染的贡献。

在此基础上,科研人员绘制出最完整、最详细的中国大气污染源排放分布图。分布图包括 9 种主要大气污染物、700 多种排放源,超过 10 万家企业详细信息,空间分辨率达到 1 公里并进行逐年动态更新,实现对大气污染排放来源的精准识别。

研究识别出对不同季节及重污染过程 PM_{2.5} 污染贡献显著的部门和地域,发现了北方地区民用散煤采暖对秋冬季节 PM_{2.5} 区域污染过程的巨大贡献。

研究发现,二氧化硫的减排使

大气中游离氨增加,促进了氮氧化物转化为硝酸盐的过程。因此,通过削减氨排放减少游离氨,可有效降低大气硝酸盐浓度,达到“事半功倍”的效果。

同时,科研团队提出,有机物协同减排对降低二次污染具有关键作用。具体而言,相关研究发现,秋冬季减排挥发性有机物对降低大气氧化性和减少二次污染生成起到关键作用,而减排中等挥发性/半挥发性有机物是降低二次有机气溶胶浓度的核心途径。

项目发现大气二次污染非线性化学机制,提出高污染条件下降低大气氧化性和削减二次污染的硫-氮-尘-氨-有机物全链条协同控制新思路,丰富了大气多污染物协同控制理论。

多项研究成果直接推动国家大气污染治理新举措落地实施,包括推动北方地区清洁采暖政策出台,累计 2600 万户农村居民完成清洁取暖改造,氮减排政策建议推动第二阶段“大气十条”实施氨减排措施。

项目通过量化不同阶段减排措施对 PM_{2.5} 浓度下降的贡献,识别出减排方案中存在的短板,持续支撑国家三个“大气十条”实施效果评估及完善优化,实现了大气污染防治目标设计、过程评估与完善优化的闭环,打造了基础科学研究支撑国家重大战略需求的新范例。