



Views & Comments

京津冀及周边地区大气重污染成因与治理的攻关项目实践与经验

李海生^a, 侯霄霖^a, 薛婕^a, 郭天锋^a, 邹天森^a, 张鹤丰^a, 郭祥^a, 李鸣晓^a, 郝吉明^b^a Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China^b School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

1. 引言

自20世纪70年代初期,美国率先实施大气污染防治相关政策,经历数十年努力及经济衰退的代价,最终实现空气污染量显著降低。相比之下,中国在大气污染防治领域起步较晚,但发展迅速,仅用7年时间便达到了同等效果[1]。中国区域性空气质量的显著改善,得益于区域多元化治理主体迅速采取行动以及国家战略科技力量的精准引导和强力支撑。

1995年,美国颁布了第一部联邦污染控制法,即《空气污染控制法》(Air Pollution Control Act)。1963年,美国进一步强化其法律框架,通过了《联邦清洁空气法》(Federal Clean Air Act),并在1967年通过了《空气质量控制法》(Air Quality Control Act)。1970年,美国国会通过了《清洁空气法》(Clean Air Act),标志着美国污染治理法律体系的全面确立,并在此后历经多次修订和完善。在此过程中,美国将市场经济规律融入环境政策制修订中,实现行政手段与经济激励措施相结合,为环境治理效果最大化提供有力保障[2]。

中国的大气污染防治工作起步于20世纪70年代,经历了四个主要发展阶段:起步阶段(1972—1990年)、发展阶段(1991—2000年)、转型阶段(2001—2010年)和攻坚阶段(2011年至今)。2013年起,中国东部地区遭遇

了跨区域、大规模、持续性雾霾天气,这一复杂的污染现象主要由空气动力学直径不大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)引起。当前,中国大气污染防治的主要目标已聚焦为雾霾、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 等关键污染物。同时,挥发性有机化合物(VOC)和臭氧等新型污染物防控亦被纳入重点关注范畴。在此背景下,中国大气环境治理目标已逐步向提升环境质量、协调污染物减排、开展跨区域联合防治工作转变[3]。

2017年以来,京津冀及周边地区秋冬季区域性大气重污染成为社会各界广泛关注的焦点,成为我国全面建成小康社会的一个突出短板[4]。党中央、国务院高度重视,时任国务院总理李克强亲自部署,确定由生态环境部牵头,联合多部门开展集中科技攻关,设立大气重污染成因与治理攻关项目(以下简称大气攻关项目)。

大气攻关项目旨在解决严重影响居民健康的“心肺之患”问题。通过该项目的实施,有效地实现了多部门、多学科、跨区域的联合攻关,取得了重大突破——弄清了社会各界广泛关注的 $\text{PM}_{2.5}$ 大气重污染成因与来源,构建了区域重污染应对技术体系,形成了空气污染综合调控的科学决策技术方法,揭示了重污染对于人群的急性健康影响,科技支撑京津冀及周边地区大气环境质量快速改善,最终取得显著的社会、经济、环境效益。大气攻关项目实践了《中共中央关于党的百年奋斗重大成就和历史经验的决议》

[5], 提出“创新成为第一动力、协调成为内生特点、绿色成为普遍形态、开放成为必由之路、共享成为根本目的的高质量发展”, 提供了可复制、可推广、可借鉴的生态文明建设经验。

2. 大气攻关项目的实践成效

经过三年攻关, 项目在成因机理、影响评估、预测预报、决策支撑、精准治理等方面实现了一批关键技术突破, 弄清了区域秋冬季大气重污染的成因, 精准识别了区域污染排放特征和重点问题, 提出深化大气污染防治工作方案建议。截至2020年, 大气攻关项目实施区域“2+26”城市 $PM_{2.5}$ 浓度较2016年下降30%, 重污染天数减少60%。大气攻关研究精准支撑了重点行业和区域大气污染的深度治理, 模式在国内外得到复制推广。

大气攻关项目全面系统地阐明了研究地区秋冬季重污染生成、演变和消散全过程的特征及其内在机制。该项目深刻剖析了地形条件、大气和热动力结构对区域重污染过程的影响, 并精准量化了污染排放、化学转化、气象条件以及区域传输的贡献。此外, 构建了一套先进的技术体系, 旨在有效追踪、深入分析及科学评估重污染事件, 为环境管理提供坚实支撑。同时, 明确了频繁发生区域重污染的根本原因、重污染过程发生的必要条件, 并精准锁定了导致 $PM_{2.5}$ 浓度二次快速增长的关键因素。

大气攻关项目通过整合多元主体参与, 达成广泛的科

学共识, 为区域污染协同控制和精准污染控制提供了坚实的科技支持[4,6-10]。项目建立了具有高时空分辨率的区域动态排放清单, 为提高重污染过程预报的准确性、准确控制污染源和支持精准污染控制奠定基础。此外, 构建了一个集成化的大气环境科学决策支持平台, 用于多数数据收集, 并配套重度空气污染天气应急响应系统, 实现监测预警、预报分析、咨询评估、跟踪反馈的全链条管理, 显著增强了应对空气污染的时效性与科学性[11]。

大气攻关项目团队发布了《重污染天气成因与治理研究报告》[4], 该报告汇集了大气环境研究领域最新研究成果与前沿技术, 深入总结了具有中国特色的空气污染治理路径与成功经验, 为全球空气污染治理贡献中国智慧和方案。具体的实践成果在附录A中提供。

3. 大气攻关的主要做法

3.1. 建立组织结构, 明确主体关系

首先, 通过建立三级组织管理机构, 形成“管理-科技-治理”联动机制, 推动中央政府、攻关中心、地方政府三元协同。其核心是确保各层级和部门顺畅沟通、有效合作, 结构如图1所示。

3.1.1. 组建攻关领导小组

2017年党中央国务院设立总理基金项目“大气重污染成因与治理攻关”。在国务院领导下, 成立以生态环境部主要负责同志为组长, 生态环境部、科技部、农业农村

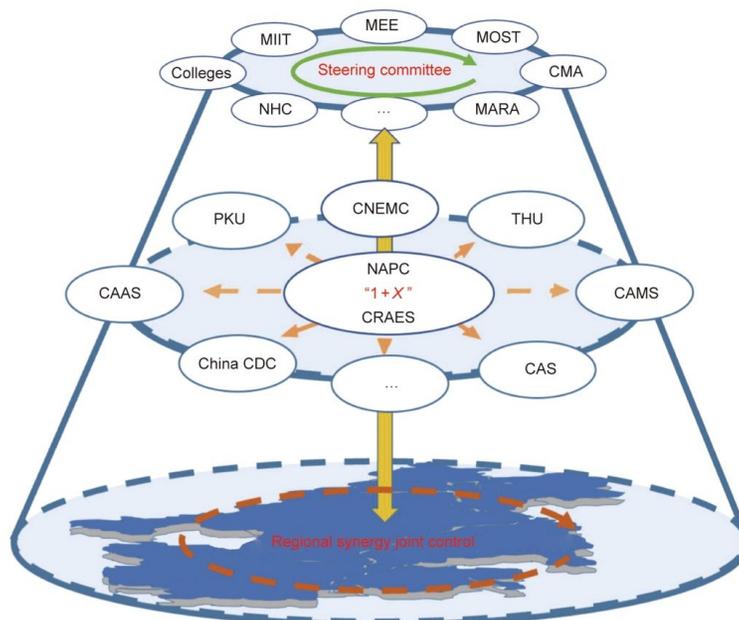


图1. 大气攻关组织管理框架图。

部、国家卫生健康委员会、中科院、中国气象局负责同志为副组长的攻关领导小组，负责攻关任务的组织领导、统筹协调、考核验收等工作。设立领导小组办公室，负责制定攻关工作规则、编制攻关方案、监督考核攻关过程等。形成了以中央政府为核心的高位推动、统筹部署、统一领导机制。

3.1.2. 以“1+X”创新模式组建攻关中心

通过国家级科研团队抓总、多学科交叉、多部门融合的“1+X”组织模式，以中国环境科学研究院为主体，联合生态环境部直属单位、相关高校和科研院所，组建攻关中心。攻关中心设立领导机构、学术委员会与顾问委员会，围绕“大气重污染成因与治理”的总体目标，汇集了覆盖环境科学、地学、气象学、化学、卫生学、经济学等多个学科的295家单位、2903名科学家，采用“中心-研究部-研究室”三级结构，组建统一的运行管理部和5个攻关研究部，下设28个城市驻点跟踪研究室。按照“虚拟机构、实体操作”与“大兵团联合作战”的协同攻关模式运行实施，促进了“基础研究-技术研发-应用落地”闭环。

3.1.3. 签订“四方协议”，以行政签约明确主体关系和权责

构建了基于“四方协议”的管理决策、科学研究与污染治理协同多元共治管理体系，如图2所示。“四方协议”中的“四方”分别为中央政府代表（攻关项目管理办公室）、“2+26”城市人民政府、攻关中心、城市驻点跟踪研究工作组。其中攻关中心是“珍珠线”，将中央、地方、科技团队上下联通，城市驻点跟踪研究工作组是“风筝线”，进驻各个城市，促进各地方行政单元左右有序协同。

通过行政签约，固化了中央政府、攻关中心、地方政府的权责关系，建立了以国家、地方投入基础研究带动行

业、企业投入治理研究的多元资金投入方式，强化了以科技驱动为中枢的多元主体协同治理机制，明确了治理区域、任务目标、执行计划以及考核方式等，为行政决策、科技决策双向互动的多元协同共治奠定了基础。

3.2. 以攻关研究，打通区域大气污染治理关键科技堵点

以科技为驱动，以管理和治理需求为导向，以地方治理和行业管控为对象，构建了多学科交叉的科学、系统、完整的攻关项目研究体系，打通资源、数据共享渠道，形成统一技术方法体系，构建科技协同发展战略，解答大气污染关键成因，绘制区域大气污染防治作战图。

3.2.1. 设定科技攻关任务，构建攻关研究体系

围绕区域大气污染治理最急需解决的关键科技难题，设定攻关项目总目标，明确以京津冀及周边地区“2+26”城市为研究和治理对象，在国家重点研发计划“大气污染成因与控制技术研究”及相关研究的基础上，建设多学科交叉融合的科技研究基础平台，构建系统、完整的大气攻关研究体系，设立大气重污染成因和来源、重点行业和污染物排放管控技术、大气污染综合决策支撑、大气污染对人群的健康影响四大专题28个课题。各个研究团队签订项目任务书，明确任务内容、时间节点与考核机制。

3.2.2. 建立基础研究平台，推进数据共享与多学科交叉融合

抓住大气治理信息资源融通这个“牛鼻子”，建设我国规模最大的多要素、空天地大气环境综合立体观测网，包括观测卫星（空）、28台地基激光雷达站（天）以及252个空气质量常规监测站、38个颗粒物组分站、4个超级观测站、5台走航观测车（地）等。在此基础上，建立集外场联合观测、实验室分析、数据管理为一体的综合观测归一质控体系，率先在国内大气领域完成跨机构、跨行



图2. “四方协议”签署关系图。

业、跨部门的科研数据采集与整合，数据共享总量达21亿条，有效破解科研数据壁垒，突破了多学科交叉融合的关键难题，形成了区域重污染预测预报、全过程监测和成因快速分析的基础科研能力。

3.2.3. 绘制京津冀及周边地区大气污染防治作战图

构建“问题识别-目标提出-减排分析-方案提出-评估优化”的大气污染防治方案编制技术体系，涵盖区域-城市耦合动态清单编制和校验技术、多技术融合的综合来源解析技术、重点行业和领域全过程管控技术、区域空气质量双向调控与综合科学决策技术支持平台和重污染天气应对技术，并将科技创新成果快速融入具体治理行动，制定形成了区域大气污染防治作战图，科技支撑“2+26”城市打赢“蓝天保卫战三年行动计划”及“秋冬季攻坚行动方案”的制定与落地。

3.3. 驻点跟踪,推动科技创新快速转化落地

创新“一市一策”驻点跟踪研究机制，推进科技决策与地方行政决策紧密联通，“有分有合，有放有收”，形成区域大气污染治理新格局。

3.3.1. 提出驻点跟踪研究机制,实施“一市一策”差异化治理

基于“四方协议”，攻关中心发挥技术抓总的的作用，向京津冀及周边地区、汾渭平原派出39个专家工作组进行跟踪研究和技术帮扶。地方政府发挥行政决策作用，由市委书记或市长亲自挂帅，组织相关职能部门建立组织协调和信息反馈绿色通道，形成与驻点跟踪研究工作组紧密配合的联动机制。

驻点跟踪研究工作组在“2+26”城市109个采样点采集获得5.8万个膜样品数据，精细化解析了各城市大气污染成因来源，协助地方政府快速建立大气污染源排放清单；针对亟待解决的重污染行业，开展一线调研、全面摸排，建立环保绩效指标体系，提出差异化的行业应急管控方案，推动地方企业绿色发展；指导地方政府建立重污染天气应急预案，分类提出“一市一策”大气污染防治综合解决方案，形成长效决策支撑能力。同时协助地方培养人才，促进地方技术力量的“自我造血”。

攻关期间，驻点团队在能源结构调整、产业与交通结构优化、行业污染治理减排、重污染过程应对等方面，向地方政府、行业企业提供各类咨询报告和对策建议2000多份，为驻点城市建立了规范的信息资料库，“送科技、解难题，把脉问诊开药方”，显著提升了地方精准治污的科技决策能力。“2+26”城市污染物减排效果显著，与

2015年相比，2019年各城市重污染天数均大幅减少，如北京市、德州市、保定市，重污染天数降幅分别达到91%、75%、71%。

3.3.2. 建立标准体系,从无序到有序推动污染协同治理

建立统一的驻点跟踪研究标准体系。基于大气攻关项目系统研究成果，制定了标准、方法、质控统一的城市大气污染防治综合解决方案研究体系，形成了《“2+26”城市大气污染防治跟踪研究工作手册》《大气污染防治综合解决方案制订技术指南》。各驻点跟踪研究工作组执行统一的技术标准、技术指南、技术方法、行动规范和质量管理体系，实现差异化治理技术方法的协同。

建立国家、地方、行业大气污染治理标准体系。在火力发电、建材、钢铁等重点行业领域大气污染管控与治理方面，制定发布相关标准、规范、导则、指南等304项，促进区域污染治理全过程标准化衔接，规范各个行业大气污染协同治理。

3.3.3. 搭建统一的会商平台,有效提升区域大气污染协同应对

在区域层面，会商平台汇聚环境、化学、气象、行业、交通等学科的专家，融合各驻点城市重要环境问题、信息与具体实践成果，集中开展“2+26”城市重污染过程及协同应对机制专家分析会商，形成了“事前预报-事中分析-事后解读”的会商模式。促进区域内驻点城市信息共享、协同治理，“步调一致”实现区域重污染“削峰降频”。

在地方层面，组织开展各驻点城市现场会商，统筹城市治理主线，为差异化精准治污提供系统解决方案；支撑“2+26”城市开展重污染期间每日会商，快速提升区域内各城市重污染应急能力。

攻关期间组织开展区域性重污染会商38次，组织专家深入城市开展区域大气重污染“专家会诊”。“对上”提供区域污染防治的政策建议，“对下”提出污染协同治理的具体举措，“对上对下”报送信息专报、成因分析专报和专家解读1540期。

4. 大气攻关的经验启示

大气攻关项目是我国新型举国体制在雾霾治理上的重大实践探索，是在我国社会主义市场经济体制下，科学研究与管理决策紧密结合、科学研究与治理方案相互促进、组织管理和体制机制协同创新的一次重要尝试，对于我国

深入打好污染防治攻坚战，全面推进生态文明建设有重要的借鉴价值。

第一，设立国家攻关中心，将科技作为主体力量，实现政府主体从“二元博弈”到“三元协同”，多元社会主体联合治污。攻关中心兼具点火器（启动攻关项目）、中枢系统（大数据平台）和智库（专家智慧）的关键作用，推动原来“各自为战”的“2+26”城市地方政府同向发力，形成“飞轮”效应。

依据协同治理理论与府际关系理论[12-13]，构建“一点两圈三协同”的治理体系，如图3所示，其中“一点”指大气攻关中心；“两圈”指协同主体分为两个“圈层”，“内圈”为通过攻关中心“连通”的中央政府和各地方政府一起构成的三元关系，“外圈”为包括企业、社会组织 and 公民在内的多元社会主体；“三协同”指的是以政府为主体的“三元协同”关系作为体系的核心。

通过攻关中心的设立，将原有政府主体间的“二元博弈”关系，变为了“三元协同”关系，即原有的“中央-地方政府二元博弈”变为“中央-攻关中心-地方政府三元协同”，原有的“地方-地方二元博弈”变为“地方-攻关中心-地方三元协同”，以此突破区域雾霾治理的组织壁

垒、地域壁垒、学科壁垒、技术壁垒和信息壁垒，形成治污合力[14]。以政府“三元协同”关系为核心，推动政府-企业-社会组织-公众多元主体的联合，共同参与区域性大气污染防治实践，最终实现府际协同与府外联合的“内通外联”。

第二，“一市一策”驻点跟踪研究机制与专家会商机制的综合运用是科学决策和精准施策的法宝，“一放一收”实现了科技创新与应用从孤岛到融合的转变。

我国科技转化和衔接存在难以忽略的断裂性体制障碍，导致政产学研体系一直没有得到有效构建和贯通[15]。这种断裂性的体制障碍亟需要通过一道桥梁，连通科技创新与污染治理的“孤岛”。攻关项目创新性地运用驻点跟踪研究模式，将科研下沉到地方与行业，为每个城市定点派驻科研力量，深度参与地方决策和行业减排。同时，综合运用会商机制，汇集多领域专家智慧，融合各个驻点团队信息，大数据平台综合集成，在“一放一收”中实现了“基础研究-技术研发-应用落地”的贯通，解决了因“肠梗阻”导致的“头部失灵”和“尾部失效”问题。关于驻地效应已有学者开展了相应的研究，认为中央派驻机构存在显著的驻地效应[16]。以大气攻关驻点跟踪研究

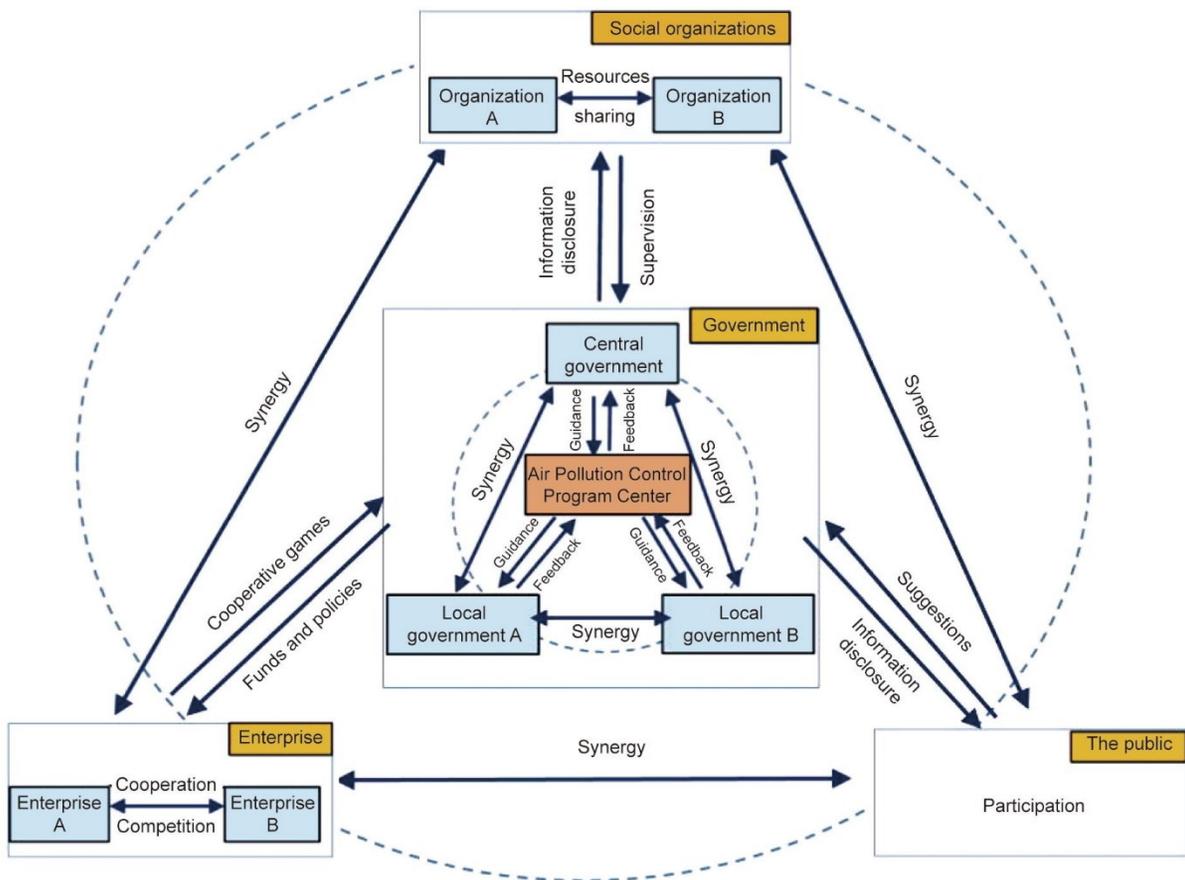


图3. “一点两圈三协同”的治理体系。

模式开展的实践也显示，驻点城市的环境治理改善成效更为明显。

第三，坚持“边研究、边产出、边应用、边反馈、边完善”机制，完成从“基础研究-应用研究-区域实践-决策支撑”的接力闭环。“边研究、边产出”，大气攻关汇集科技战略力量，从“0到1”，快速弄清大气重污染成因，开展源清单、源解析，奠定科技精准治污基础。这是第一棒。

因地制宜迅速构建大气污染治理技术体系，支撑制定“2+26”城市打赢“蓝天保卫战三年行动计划”等，实现从基础研究到应用研究的第二棒接力。“边应用、边反馈”，通过“一市一策”驻点跟踪研究，实现技术快速应用到各驻点城市大气污染治理实践，并“以治理效果论英雄”，就地评估技术适用性，反馈技术缺陷，促进优化升级，这是区域实践的第三棒。最后，通过区域会商与内部调度、考核，促进科技攻关整体“完善”，并向中央、地方政府等提供咨询报告、对策建议等支撑管理决策，形成第四棒接力的闭环。

5. 结论

综上所述，大气攻关项目是我国新型举国体制在雾霾治理上的重大实践探索，实践验证了“1+X”大气攻关模式，有效贯通“基础研究-技术研发-应用落地”，解决了因“肠梗阻”导致的“头部失灵”和“尾部失效”问题。但是同时，大气攻关项目也存在市场主体参与不足，利益协调机制尚不完善等局限。

当前，面向深入打好污染防治攻坚战，积极参与全球气候治理和生态文明建设的总体需求，需要新型举国体制在国家治理实践中不断总结经验，不断自我完善。一是不断探索各个重大领域国家战略科技力量体系的顶层架构设计，培养具有宏观视野和复杂系统决策能力的战略科学家，进一步夯实举国体制核心驱动力；二是在政府主导“从0到1”基础研究的引领下，不断深化市场主体作用与利益协调机制，带动应用技术突破与快速转化落地，构建完善科学研究、技术创新、技术集成与实践一体化新型举国体制；三是进一步强化战略科技力量在中央、地方政府、市场、社会组织等治理主体中的关键驱动作用，形成

多元主体协同共治的现代化治理格局。

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.08.021>.

References

- [1] Greenstone M, He G, Lee K. China's fight to win its war against pollution. Chicago: the Energy Policy Institute at the University of Chicago (EPIC); 2022.
- [2] Kuklinska K, Wolska L, Namiesnik J. Air quality policy in the US and the EU—a review. *Atmos Pollut Res* 2015;6(1):129–37.
- [3] Wang W, Chai F, Ren Z, Wang X, Wang S, Li H, et al. The process, achievements and experience of China's air pollution prevention and control since the founding of the People's Republic of China 70 years ago. *Res Environ Sci* 2019;32(10):1621–35. Chinese.
- [4] National Joint Research Center for Tackling Key Problems in Air Pollution Control. Research report on the causes and treatment of heavy air pollution. Beijing: Science Press; 2021. Chinese.
- [5] Central Committee of the Communist Party of China. Resolution of the Central Committee of the Communist Party of China on major achievements and historical experience of the Party's centennial struggle. *People's Daily*; 2021 Nov 6. Chinese.
- [6] Liu Y, Tang G, Zhou L, Hu B, Liu B, Li Y, et al. Mixing layer transport flux of particulate matter in Beijing. *China Atmos Chem Phys* 2019;19:9531–40.
- [7] Lu K, Guo S, Tan Z, Wang H, Shang D, Liu Y, et al. Exploring atmospheric free-radical chemistry in China: the self-cleansing capacity and the formation of secondary air pollution. *Natl Sci Rev* 2019;6(3):579–94.
- [8] Shang D, Peng J, Guo S, Wu Z, Hu M. Secondary aerosol formation in winter haze over the Beijing–Tianjin–Hebei Region, China. *Front Environ Sci Eng* 2021;15(2):34.
- [9] Cai W, Xu X, Cheng X, Wei F, Qiu X, Zhu W. Impact of “blocking” structure in the troposphere on the wintertime persistent heavy air pollution in northern China. *Sci Total Environ* 2020;741:140325.
- [10] Xiang Y, Zhang T, Ma C, Lv L, Liu J, Liu W, et al. Lidar vertical observation network and data assimilation reveal key processes driving the 3-D dynamic evolution of PM_{2.5} concentrations over the North China Plain. *Atmos Chem Phys* 2021;9:7023–37.
- [11] Hu J, Chai F, Duan J, Yi P, Chu Y, Xie D. Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing–Jin–Ji and surrounding area and its control measures with emergency response. *Res Environ Sci* 2019;32(10):1704–12. Chinese.
- [12] Hao J, Walsh MP, Yang J, He K, Bao X, Larssen S, et al. Research on the performance evaluation and regional coordination mechanism of the air pollution prevention and control action plan. Beijing: China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED); 2014. Chinese.
- [13] Wang M, Cai Z, Wang C. Social co-governance: the exploring praxis and institutional innovation of multi-subject governance. *Chinese Public Adm* 2014; 12:16–9. Chinese.
- [14] Li H, Li M, Zou T, Guo X. Continuing innovation, creating a 2.0 era of the eco-environmental technology in China. *Environ Sci Res* 2021; 9(34): 2035–43. Chinese.
- [15] Zhang J. Ways and countermeasures to build China's national strategic science and technology power. *Hebei Academic J* 2021;41(05):171–81. Chinese.
- [16] Chen X, Zhu L, Wang Y. Government station effect—empirical evidence from the state land supervision in China. *China Econ Q* 2019;18(1):99–122. Chinese.