



环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

黑碳气溶胶对灰霾天气 和区域气候影响及控制研究

师华定 高庆先 张 强
徐祥德 张仁健 陈敏东 等 著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候 影响及控制研究

师华定 高庆先 张 强 徐祥德 张仁健 陈敏东 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕“黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候影响及控制”这一科学问题,通过讨论我国黑碳气溶胶的理化特性时空分布,揭示黑碳气溶胶排放与我国大范围灰霾天气形成的关系,明确减排黑碳气溶胶在抑制区域灰霾天气发生中的作用,研究减排黑碳气溶胶政策在应对气候变化方面所产生的效应;完成典型行业黑碳气溶胶的控制方案建议,为改善大气环境质量、减少区域大气灰霾发生提供科研技术支持和管理支撑,具有重要的学术价值和指导意义。

本书可作为大气污染防治、环境保护等专业和领域的管理者、科研工作者、研究生等的参考书,也可作为高等院校、科研院所的大气学、环境科学、环境工程等相关学科研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候影响及控制研究 / 师华定等著.
—北京: 科学出版社, 2018.11

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-059187-6

I. ①黑… II. ①师… III. ①碳-气溶胶-空气污染控制-研究
IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 241699 号

责任编辑: 李明楠 孙静惠 / 责任校对: 杜子昂
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 10

字数: 212 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编委会

顾 问：黄润秋

组 长：邹首民

副组长：王开宇

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

《黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候影响及控制研究》

编委会

师华定	高庆先	张 强	徐祥德	张仁健
陈敏东	付加锋	罗 宏	马占云	吕连宏
霍 红	丁国安	王寅钧	武云飞	马 嫣
郑 军	崔芬萍			

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

序 言

目前,全球性和区域性环境问题不断加剧,已经成为限制各国经济社会发展的主要因素,解决环境问题的需求十分迫切。环境问题也是我国经济社会发展面临的困难之一,特别是在我国快速工业化、城镇化进程中,这个问题变得更加突出。党中央、国务院高度重视环境保护工作,积极推动我国生态文明建设进程。党的十八大以来,按照“五位一体”总体布局、“四个全面”战略布局以及“五大发展”理念,党中央、国务院把生态文明建设和环境保护摆在更加重要的战略地位,先后出台了《环境保护法》《关于加快推进生态文明建设的意见》《生态文明体制改革总体方案》《大气污染防治行动计划》《水污染防治行动计划》《土壤污染防治行动计划》等一批法律法规和政策文件,我国环境治理力度前所未有,环境保护工作和生态文明建设的进程明显加快,环境质量有所改善。

在党中央、国务院的坚强领导下,环境问题全社会共治的局面正在逐步形成,环境管理正在走向系统化、科学化、法治化、精细化和信息化。科技是解决环境问题的利器,科技创新和科技进步是提升环境管理系统化、科学化、法治化、精细化和信息化的基础,必须加快建立持续改善环境质量的科技支撑体系,加快建立科学有效防控人群健康和环境风险的科技基础体系,建立开拓进取、充满活力的环保科技创新体系。

“十一五”以来,中央财政加大对环保科技的投入,先后启动实施水体污染控制与治理科技重大专项、清洁空气研究计划、蓝天科技工程专项等专项,同时设立了环保公益性行业科研专项。根据财政部、科技部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》《国家创新

驱动发展战略纲要》《国家科技创新规划》和《国家环境保护科技发展规划》，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部（现生态环境部）组织实施了公益性行业科研专项项目 479 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、化学品、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，已验收的项目中，共提交各类标准、技术规范 1232 项，各类政策建议与咨询报告 592 项，授权专利 626 项，出版专著 367 余部，专项研究成果在各级环保部门中得到较好的应用，为解决我国环境问题和提升环境管理水平提供了重要的科技支撑。

为广泛共享环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部（现生态环境部）科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，不断提高环境治理能力现代化水平，为持续改善我国环境质量提供强有力的科技支撑。

中华人民共和国生态环境部副部长

黄润秋

前 言

黑碳气溶胶是由生物质和化石燃料不完全燃烧所产生的、具有高度热稳定性的含碳物质,其具有较强的稳定性,在常温下不易被氧化和降解。它是大气气溶胶中的一个重要成分,对从可见光到红外波长范围内的太阳辐射有强烈的吸收能力,可影响太阳辐射传输、加热大气、降低地表温度,不仅能改变区域大气的稳定性和垂直作用,还会影响大尺度环流和水循环。

面对日益严重的灰霾天气,亟须开展因黑碳过量排放引发的灰霾天气及其对区域气候的影响研究,为优化减排黑碳气溶胶方案提供科学依据。本书围绕“黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候影响及控制”这一科学问题,通过对典型区域黑碳气溶胶理化特性的监测分析,揭示了黑碳气溶胶排放对我国大范围灰霾天气暴发与区域气候变化的影响,明确了减排黑碳气溶胶情景方案及措施对抑制区域大范围灰霾天气发生、减缓气候变化的影响和作用,结合现场监测分析和数值模式模拟,从减少黑碳气溶胶排放、抑制区域灰霾天气发生、减缓气候变化等目标出发,建立了黑碳气溶胶及区域灰霾天气的协同控制和改善方案,开展了典型行业重点黑碳气溶胶排放源相关减排技术的筛选与优化集成,提出了黑碳气溶胶多目标控制方案和监督管理建议,为改善大气环境质量、应对气候变化提供了必要的科研基础和技术支持。

全书共7章。第1章,引言,结合我国大气污染现状,由大范围灰霾天气及区域气候变化引出黑碳气溶胶排放的研究必要性。第2章,黑碳气溶胶理化特性和辐射特性,主要通过对比分析北京及其周边地区、南京北郊特定时期的黑碳气溶胶观测数据资料,总结了黑碳浓度的时间变化和空间分布特征,以及黑碳气溶胶理化特性、光学特性的时间变化特征,并探讨了气溶胶粒径分布、混合状态对其吸收特性的可能影响。第3章,黑碳气溶胶对灰霾天气的影响模拟研究,主要包括采用经验正交函数分解(EOF)方法,分析了北京及周边地区中度以上污染

PM_{2.5}浓度的典型空间分布及其风场分布特征;通过分析气象条件对北京城区黑碳浓度的影响,探究了主风向黑碳浓度随风速、边界层高度的变化特征;以2015年为例,进一步探究了不同高度大气外来输送对北京地区黑碳浓度的影响;构建适用于华北地区的黑碳与灰霾天气形成关系的 WRF-Chem 模式,并基于此模型,分析京津冀地区黑碳气溶胶对 PM_{2.5}浓度的贡献。第4章,黑碳气溶胶对区域气候变化的影响,主要包括采用 RegCM3 与 MEIC 模式嵌套模拟中国地区黑碳气溶胶的气候效应,建立区域气候模型,分析典型行业黑碳气溶胶对区域气候变化的影响,并预测未来不同情景下黑碳气溶胶排放在区域气候变化中的作用。第5章,黑碳气溶胶排放特征,主要包括通过数据分析2013年我国的黑碳气溶胶空间分布特征,以及黑碳排放典型行业时空分布特征,并分析了2013年中国黑碳气溶胶地面模拟结果,通过排放计算模型和情景构建分析,对2020年和2030年中国人为源排放减排情景进行了预测评价。第6章,典型行业黑碳气溶胶减排技术的优化集成研究,主要包括构建固定源黑碳排放控制技术库和移动源黑碳排放控制技术库,提出可通过改善能源结构、提高能源利用效率、发展并普及绿色可再生能源、采用末端颗粒物治理技术等途径实现黑碳减排。第7章,典型行业黑碳气溶胶控制方案研究,主要包括提出黑碳气溶胶及相关污染物协同控制的可选方案,黑碳减排替代 CO₂减排的技术可行性和成本效益分析,最终提出黑碳排放协同控制的环境管理政策建议。

本书吸纳了国家环境保护公益性行业科研专项“黑碳气溶胶对灰霾天气和区域气候的影响及控制研究”(201409027)的项目研究成果,是在高庆先老师的指导和直接参与下,几经补充修改,共同完成的。本书的主要执笔人为:师华定、高庆先、张强、徐祥德、张仁健、陈敏东;参加相应研究和本书撰写工作的还有:付加锋、罗宏、马占云、吕连宏、霍红、丁国安、王寅钧、武云飞、马嫣、郑军、崔芬萍等。全书由师华定统稿、定稿。在撰写过程中,中国环境科学研究院、清华大学、中国科学院大气物理研究所、中国气象科学研究院、南京信息工程大学等参与该科研项目的工作人员提供了部分宝贵的数据及资料,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请各位同仁积极给予批评指正。

师华定

2018年9月于北京

目 录

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书序言

前言

第 1 章 引言	1
第 2 章 黑碳气溶胶理化特性和辐射特性	3
2.1 研究背景	3
2.2 研究目标	4
2.3 数据与方法	4
2.4 研究进展	5
2.4.1 北京及其周边站点理化特性研究	5
2.4.2 南京及其周边站点理化特性研究	14
2.4.3 北京和南京两大地区观测对比分析	23
2.4.4 黑碳气溶胶吸收系数的多仪器对比观测	24
2.5 结果与讨论	28
第 3 章 黑碳气溶胶对灰霾天气的影响模拟研究	30
3.1 研究背景	30
3.2 研究目标	30
3.3 研究进展	30
3.3.1 灰霾天气气象成因分析研究	30
3.3.2 北京地区黑碳气溶胶特性研究	33
3.3.3 气象条件对北京城区黑碳高浓度的影响	37
3.3.4 构建适用于华北地区黑碳气溶胶与灰霾天气形成关系的 WRF-Chem 模式	44
3.3.5 不同黑碳减排情景对北京及周边地区霾污染过程的影响评估	46

3.4 结果与讨论	58
第4章 黑碳气溶胶对区域气候变化的影响	60
4.1 研究背景	60
4.2 研究目标	61
4.3 数据与方法	61
4.3.1 排放清单	61
4.3.2 区域气候模式 RegCM3	61
4.4 研究进展	62
4.4.1 RegCM3 模式精度检验	62
4.4.2 中国地区黑碳气溶胶的气候效应模拟	65
4.4.3 典型行业黑碳气溶胶对区域气候变化的影响	66
4.4.4 未来黑碳气溶胶排放在区域气候变化中的作用	68
4.5 结果与讨论	74
第5章 黑碳气溶胶排放特征	75
5.1 研究背景	75
5.2 研究目标	76
5.3 清单编制方法	76
5.4 研究进展	77
5.4.1 黑碳气溶胶排放总量及典型行业的空间分布特征	77
5.4.2 基于未来情景的黑碳气溶胶排放清单	80
5.5 结果与讨论	84
第6章 典型行业黑碳气溶胶减排技术的优化集成研究	85
6.1 研究背景	85
6.2 研究目标	85
6.3 研究进展	86
6.3.1 黑碳排放典型污染源	86

6.3.2 固定源黑碳排放控制技术库	88
6.3.3 移动源黑碳排放控制技术库	97
6.4 结果与讨论	107
第 7 章 典型行业黑碳气溶胶控制方案研究	109
7.1 研究背景	109
7.2 研究目标	109
7.3 研究进展	109
7.3.1 黑碳气溶胶及相关污染物协同控制的可选方案	109
7.3.2 黑碳减排替代 CO ₂ 减排的技术可行性和成本效益分析	119
7.3.3 2020 年和 2030 年中国人为源黑碳排放情景	126
7.3.4 黑碳排放协同控制的环境管理政策建议	131
7.4 结果与讨论	136
参考文献	138

第1章 引言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》在环境重点领域研究中明确提出了实施区域环境综合治理，开展流域水环境和区域大气环境污染的综合治理，大幅度提高改善环境质量的科技支撑能力等的发展思路，并且将突破城市群大气污染控制等关键技术明确列为优先主题。同时指出“加强全球环境公约履约对策与气候变化科学不确定性及其影响研究，开发全球环境变化监测和温室气体减排技术，提升应对环境变化及履约能力”。

2010 年国务院发布的《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》指出，近年来，我国一些地区酸雨、灰霾和光化学烟雾等区域性大气污染问题日益突出，严重威胁人民群众健康，影响环境安全。《大气污染防治行动计划》中确定了治理大气污染的十条具体措施，由此可见，我国政府对大气污染物减排、温室气体控制和应对全球气候变化高度重视。面对日益严重的灰霾天气，亟须开展因黑碳过量排放所引发的灰霾天气和区域气候的影响的研究，为优化减排黑碳气溶胶方案提供科学依据。

1. 黑碳气溶胶的排放与我国大范围灰霾天气发展关系密切

对于黑碳气溶胶和大气污染的认识与控制，发达国家大致经历了对大气中尘、硫、氮、碳的依次关注过程。过去三十年，随着污染物排放标准的加严以及除尘装置的普及和脱硫装置的增加，在煤耗持续增长的情况下，我国颗粒物排放量基本得到控制， SO_2 的增长趋势有所减缓；《国家环境保护“十二五”科技发展规划》已将区域氮氧化物控制技术及对策列为“十二五”期间要重点解决的环境科技问题之一。减少黑碳的排放可同时减轻区域大气污染对人体健康和能见度等的不利影响。中国区域排放的黑碳气溶胶在近年来已引起国内外学者的极大关注，同时也是环境

外交谈判中的热点话题之一,虽然目前有关黑碳气溶胶的减排还没有纳入相关的国际公约中,但是在气候变化谈判中,有很多国家强烈要求将减排黑碳气溶胶纳入温室气体减排条约中。如果未来将黑碳减排囊括进入《联合国气候变化框架公约》控制温室气体名单中,我国的碳排放($\text{CO}_2 + \text{BC}^{\text{①}}$)减排工作将更加艰巨,并将对我国的社会经济发展和环境安全构成威胁。鉴于黑碳气溶胶在区域大范围灰霾污染现象中的重要作用,并根据国际上空气污染与控制的经验和历程,我国迫切需要开展黑碳气溶胶对灰霾天气现有影响和作用的研究,并开展大规模减排黑碳气溶胶对空气质量改善的效益分析工作。

2. 黑碳气溶胶的排放对区域气候变化的影响存在较大的不确定性

随着我国经济的快速发展、工农业活动的加剧以及城市化进程的加快,大量的煤炭、石油等化石燃料的使用和生物质的燃烧导致我国在二氧化碳、黑碳气溶胶等的排放量方面居世界排放大国前列,对全球和区域气候变化以及大气环境质量有着重大的影响,我国成为世界环境外交谈判中的焦点。黑碳气溶胶在可见光到红外范围内对太阳辐射有着强烈的吸收,黑碳表面具有良好的吸附性,其吸附不同的物质导致其理化特性和辐射特性差异大,致使其在大气中容易捕获其他物质,进而改变黑碳气溶胶的理化特性。黑碳气溶胶形成的云凝结核,影响云生成量及其辐射特性,进而间接影响全球和区域气候,是影响全球气候变化的重要驱动因子之一。有研究表明,黑碳气溶胶的直接辐射强迫超过温室气体中甲烷的辐射强迫,对全球气候变化的贡献仅次于二氧化碳。此外,黑碳气溶胶也能引起大气加热层的空间变化,影响云的消散和水汽通道,进而影响区域及全球大气的辐射收支和降水,这一作用也成为黑碳气溶胶对气候变化的半直接效应。已有的研究表明,我国东部地区夏季不断加剧的南涝北旱趋势与大量黑碳的排放有关。迫切需要开展黑碳气溶胶排放对区域气候变化影响以及减排黑碳气溶胶对减缓气候变化作用的研究。

① BC 指黑碳。

第2章 黑碳气溶胶理化特性和辐射特性

2.1 研究背景

黑碳气溶胶作为大气气溶胶中的重要成分之一,可强烈吸收从可见光到红外波长范围内的太阳辐射^[1],从而改变区域大气的稳定性和垂直作用,甚至影响大尺度环流和水循环^[2]。在污染地区,大量的黑碳气溶胶可明显减小大气能见度(VIS)^[3]。黑碳气溶胶中的亚微米颗粒具有多孔结构,这些气溶胶颗粒更容易吸收多环芳烃、重金属等致癌有毒污染物质,可以深入人体的呼吸系统,对人体健康产生威胁^[4-7]。

已有研究表明,京津冀地区霾天气具有明显的区域性特征^[8];环北京地区污染物存在明显的输送通道^[9,10];西南—东北走向的输送可导致区域内大部分城市大气污染加重^[11]。因此需要对北京及其周边地区黑碳气溶胶的长期变化特征进行分析研究,提高对这一霾高发地区黑碳气溶胶的区域分布和时间变化特征的认识。南京是长三角地区的重要城市,随着人类活动的影响,南京地区的污染也很严重,年霾日数总体呈现逐年上升趋势,灰霾线也在不断“长高”。因此,开展南京地区代表性站点黑碳气溶胶的理化特性及其对大气辐射特性的影响研究,对区域灰霾天气形成和区域气候变化的进一步探索具有重要的现实意义。

黑碳气溶胶的辐射效应很大程度上受到其光学特性的影响,尤其是黑碳气溶胶作为大气气溶胶中最主要的吸收性成分,其吸收特性对气溶胶的辐射效应有较强的影响。然而黑碳气溶胶的光学特性在很大程度上取决于其物理特性,如粒径分布、混合状态等,因此需要结合黑碳气溶胶物理特性及其光学特性的观测研究,从机理上提高对黑碳辐射效应的认识。此外,现有的测量仪器由于固有的系统误差的存在,并不能准确反映实际大气中的黑碳浓度及其吸收系数,因此需要通过多种测量仪器

的比对观测, 来提高黑碳浓度和吸收系数测量的准确程度。本研究围绕项目设定的目标, 针对上面提到的科学问题进行了相关的研究。

2.2 研究目标

通过现场监测分析和资料收集等手段, 摸清灰霾天气发生频次较高、影响较重的我国东部地区黑碳气溶胶理化特性、辐射特性及其时空分布特征, 评估黑碳气溶胶对灰霾天气的影响与贡献, 为模拟黑碳气溶胶对灰霾形成及区域气候的影响提供基础的观测数据。

2.3 数据与方法

在中国东部灰霾天气频发的京津冀、长三角地区开展黑碳气溶胶的相关观测, 主要基于两个代表性城市(北京、南京)进行观测实验。测量时段、地点、仪器和测量参数如表 2-1 所示。

表 2-1 北京、南京站点测量地点、时段、仪器及测量参数

测量地点	测量时段	测量仪器	测量参数
北京北部城区(中国科学院大气物理研究所)	2014/11~2015/10	黑碳仪(AE-31)、连续 PM _{2.5} 监测仪(SHARP5030)	在线黑碳、PM _{2.5} 质量浓度
北京北部城区(中国科学院大气物理研究所)	2013/1/9~2013/1/27 2014/2/24~2014/3/12	单颗粒黑碳气溶胶质谱(SP2); 光声气溶胶消光仪(PAX); 小流量颗粒物采样器(MiniVol)及离子色谱、碳分析仪等离线分析仪器	高分辨率黑碳浓度、粒径、混合状态; 870nm 气溶胶散射吸收系数; PM _{2.5} 质量浓度及水溶性离子、有机碳、元素碳(黑碳)的含量
南京北郊(南京信息工程大学)	2012~2013 年四季 (2012 年 8 月、11 月, 2013 年 1 月、5 月)	三波长光声光谱仪(PASS-3); 在线连续颗粒物采样器(PILS)及离子色谱、碳分析仪等离线分析仪器	405nm、532nm、781nm 三个波段的气溶胶散射和吸收系数; PM _{2.5} 质量浓度及水溶性离子、有机碳、元素碳(黑碳)的含量
南京江心洲	2013 年、2014 年夏季	同上	同上
南京北郊(南京信息工程大学)	2015/2/21~2015/3/23	单颗粒气溶胶质谱仪(SP-AMS)	在线 PM ₁ 及其中黑碳、有机碳、无机离子的浓度
南京奥林匹克体育中心	2015/4/13~2015/4/29	同上	同上

基于长期连续的观测资料, 分析研究两个代表性区域黑碳气溶胶的理化特性及