

“黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、 空气质量的影响及其气候—健康效益评估” 项目研究计划简介

丁德平¹ 孔少飞² 朱彬³ 张小玲^{4, 5} 赵德龙¹ 盛久江¹

(1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089; 2 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

3 南京信息工程大学, 南京 210044; 4 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 5 成都信息工程大学, 成都 620225)

摘要: 介绍了2016年国家重点研发计划“全球变化及应对”方向中“黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、空气质量的影响及其气候—健康效益评估”项目的科学背景、研究设想和实施方案等内容。

关键词: 黑碳, 飞机观测, 排放源, 气候—健康效益

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.003

The Impact of Black Carbon From Agricultural and Anthropogenic Sources on Climate and Air Quality over East Asia, and the Assessment of It's Effects on Health

Ding Deping¹, Kong Shaofei², Zhu Bin³, Zhang Xiaoling^{4,5}, Zhao Delong¹, Sheng Jiujiang¹

(1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089 2 China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 4 Environmental Meteorology Forecast

Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089 5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 620225)

Abstract: This article introduces the scientific background, research ideas and plans of “The impact of black carbon (BC) on climate and air quality over East Asia from agricultural and anthropogenic sources (AAS), and the assessment of its health effects”, the 2016 Key Program of Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, which belongs to the Specific Project of “Global change and response”.

Keywords: black carbon, aircraft observations, emission sources, environmental, climate impact, health effect

0 引言

黑碳(BC)气溶胶对全球气候变化、区域空气质量和人体健康的影响已经成为当前大气科学研究的一个热点领域。黑碳的辐射强迫仅次于二氧化碳; 其在中国重污染事件发生、发展过程中会抑制大气边界层的扩散, 从而加重污染; 在细颗粒物的化学成分中, BC对于心血管健康的影响最为显著。农业和生活源燃料燃烧是黑碳的最重要排放源, 尤其是在发展中国家, 是空气污染严重和人群暴露健康风险较高的地区。黑碳作为当前影响全球变暖的重要短寿命气候强迫因子, 对

其制定减排措施, 对缓解全球变暖意义重大。

首先, 黑碳排放清单是黑碳气候、环境和健康效应模拟的基础, 至今已有全球、区域、国家和城市尺度的多个黑碳排放清单, 关注的农业和生活源包括农作物残留燃烧、农业机械、民用燃煤、民用生物质燃料等类。在农业和生活源黑碳排放清单构建中, 更多的源类需要予以考虑, 排放因子也需要基于统一的方法(稀释通道采样)进行建立和更新。如餐饮油烟, 烟花爆竹燃放, 烧烤活动, 寺庙焚香、祭祀活动, 烤烟生产, 香烟烟雾, 熏烤腊肉, 天然气、煤气、沼气燃烧, 青藏高原和草原地区牛粪燃烧等特色农业和生活源黑碳排放因子实测缺乏, 在中国很多未见报道。高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温环境的燃烧黑碳排放也需要予以考虑。黑碳排放过程中粒径分布、吸收系数、混合状态等也日益引起重视, 测试方法也由滤膜采样向不同燃烧阶

收稿日期: 2016年10月11日

第一作者: 丁德平, Email: zytdp@vip.sina.com

资助信息: 国家重点研发计划(2016YFA0602001); 北京市青年自然科学基金(8164057)

段黑碳浓度的实时在线监测转变。

1 国内外研究进展

近年来随着监测手段的发展,国外已有研究基于飞机平台和单颗粒黑碳光度计(SP2)获得黑碳的垂直分布、混合状态、粒径分布和光学特征等^[1],但是我国对黑碳的大量观测研究基本上完全限于地面,高分辨率稳定的空中垂直观测研究尤其缺少。

另外,目前对于源排放黑碳老化特性的研究主要集中在机动车尾气以及生物质燃烧方面,重点关注黑碳的粒径分布、混合状态及其气候效应研究;对于排放清单的构建所用排放因子大多为发达国家测试结果^[2-3],在广大发展中国家实测仍显不足。Peng等^[4]首次发现并定量了在不同城市环境条件下黑碳性质变化的时间尺度,如在较为污染的北京,黑碳只需要2~3小时性质即发生变化。本研究将针对现有清单,将关注的农业和生活源类扩大到13类,很多具有中国和区域特色;同时充分考虑不同大气环境条件下燃料燃烧特性及老化特性不同导致的黑碳排放特征不同,基于稀释通道采样系统,实测13类源黑碳排放因子;结合人口、土地利用类型、遥感影响解译等多种手段,建立排放清单,并对其进行空间分配。

现在针对黑碳的环境与气候效应在观测和数值模拟方面开展了大量的研究^[5-7],观测上主要关注黑碳的时空分布、混合状态、光学性质及其对辐射、温度的影响;数值模拟上,主要讨论BC的直接和间接效应对能见度、边界层、天气的影响以及与季风等气候尺度特征的相互作用。本研究基于黑碳立体观测及其辐射特性的深入认识,揭示不同地区和行业黑碳对空气质量和气候因子变化的定量贡献;阐明东亚季风背景下黑碳对季风进程从候、旬、月、季节到年际多尺度变化的影响。

对于黑碳健康效应评估,现今国内外研究主要采用时间序列方法和流行病学方法研究黑碳的暴露阈值与人体健康的关系,并且表明黑碳的毒性可能比细颗粒物的毒性更强,但结果仍存在很大的不确定性^[8];同时开展了黑碳的气候效应及其对经济、社会、环境的影响。本课题将比较系统地研究在东亚高浓度排放背景下黑碳与人群的暴露-反应关系,特别是黑碳、细颗粒物污染以及极端气象条件对健康影响的协同效应,建立定量评估方法,提出最优减排策略。

2 项目的研究目标和内容

本项目的研究目标为:1)获得典型农业及生活源主导环境中黑碳气溶胶粒径分布、混合状态、光学性质的时空分布和垂直廓线;2)通过实测建立农业和生活源黑碳排放因子数据库,建立2013年具有月变化特征的全球农业和生活源黑碳排放清单($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)和中国 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 黑碳排放清单;3)模拟全球各区

域黑碳浓度及其来源,阐明黑碳的直接、半直接、间接效应和冰雪反照效应对东亚季风的多尺度影响机制,揭示重点地区黑碳与气象要素的反馈关系以及黑碳对空气质量的作用机制;4)定量讨论黑碳减排的气候-健康等的费效关系,提出合理、可持续的减排策略。

主要研究内容:1)高时空分辨率的全球农业与生活源黑碳排放清单构建和评估。排放因子实测:将农业和生活源扩大到农业秸秆露天燃烧和烤烟生产,生活源扩大到室内民用燃料(蜂窝煤、块煤、生物质燃料、天然气和液化石油气、青藏高原地区牛粪)、烹调油烟、烟花爆竹燃放、路边烧烤、典型时段和区域特色生活源(如湖北、湖南、四川、广东、河南等地腊肉制作,寺庙焚香和祭祀)等。针对不同区域不同类型农业与生活源燃料,设计不同燃料类型和炉型的组合,采用室内模拟燃烧和稀释通道采样技术,对各种组合排放出的烟气进行稀释后采样,获得有代表性的排放因子;针对烹调油烟、烟花爆竹燃放、路边烧烤和特色生活源,搭建燃烧室,在实验室模拟不同类型食用油煎炸炒等过程,采用稀释通道,对其排放因子进行实测。同时选择高原和平原、北方和南方典型农村地区开展外场实测,基于碳平衡方法等获得不同海拔高度和不同温度条件下各类燃烧源黑碳排放因子。全球黑碳源排放清单构建和评估:搜集整理有季节变化特性的源活动水平数据,结合实测排放因子,基于“自下而上”方法,建立2013年分季节的高空间分辨率的全球农业及生活源黑碳气溶胶排放清单,采用蒙特卡罗模拟,对排放清单的不确定性进行分析。结合典型农村点位黑碳在线、离线观测数据和数值模拟,对排放清单的准确性进行评估。2)不同大气环境条件下典型源排放黑碳老化识别。基于室内模拟燃烧和稀释通道,结合烟雾箱模拟实验,设置不同气象条件(温度、湿度、光强)和气态污染物浓度(SO_2 、 NH_3),对不同源排放黑碳进入到不同大气环境后的粒径、混合状态、包裹层厚度、吸收系数等进行观测,识别其参与的非均相反应机制,及其对光学性质的影响。3)农业及生活源主导环境中黑碳气溶胶综合立体观测及老化机制。采用空中国王350ER型飞机观测平台等飞机航测手段(飞行高度高度为10000m以下),搭载SP2、气溶胶质谱、气体、辐射仪等设备,对典型城市和乡村区域(以华北区域为重点)黑碳理化、光学及混合状态等参数的尺度分布和垂直分布进行综合观测。地面观测采用SP2、气体和气溶胶质谱等化学成分在线监测仪器,对华北某农村点位黑碳进行连续1年的观测,分析黑碳浓度的日、月、季节变化特征,及混合状态、包裹状态等参数,探讨及老化机制。采用滤膜采样,在华北、华东、华

中、东北、西北、西南等典型城市和乡村同步进行一年分季节观测，获得我国典型城市和乡村地区碳气溶胶时空分布数据。采用探空气球和无人机，搭载AE-51便携式黑碳监测仪，对华北、华东、华中等地大气边界层内黑碳气溶胶浓度进行垂直探空观测，获得边界层内黑碳气溶胶浓度的垂直分布特征。结合综合立体观测数据，分析黑碳气溶胶与气态污染物、气象因子等的相互关系，探讨可能的老化非均相和光化学反应机制。4) 黑碳对气候、环境影响的模拟及机制研究。结合典型区域黑碳气溶胶理化特性(含光学)、混合状态等数据，建立更加真实的非球形黑碳模型，利用数值模拟得到更加精确的黑碳及其老化后的光学特性。基于综合立体观测结果，结合气象资料，综合分析灰霾天气形成过程中黑碳气溶胶三维空间分布与天气条件关系。基于WRF-Chem污染物与气象要素反馈机制，模拟研究黑碳与气象要素的反馈影响，探讨黑碳对空气污染加剧的影响机制。利用WRF-Chem数值模型，构建多个黑碳气溶胶排放情景，研究不同区域、不同污染源排放黑碳颗粒物对大气环境、能见度的影响；同时探索不同情景下黑碳气溶胶对灰霾形成过程和机理的影响。利用地球系统模式CESM，对比分析全球黑碳高值区(东亚和南亚)农业及生活源黑碳的直接、半直接和间接效应，以及冰雪反照效应。研究亚洲季风背景下，黑碳对东亚季风从次季节(候、旬、月)、季节、年际至年代际的多尺度影响机制。5) 黑碳减排策略及气候-健康效益评估。针对农业与生活源，设定其减排措施包括清洁燃料取代居民做饭用煤、型煤取代原煤、清洁燃料取代秸秆和居民做饭薪柴、高效节能炉具推广、农业机械安装柴油微粒滤清器等5种措施，考虑不同的实施强度，设定低力度减排、中力度减排和高力度减排三种减排情景，更新不同减排情景下的黑碳排放清单，估算减排的成本。以典型城市为例，建立定量评估黑碳对居民健康影响的方法；获得黑碳与居民健康效应之间的一些定量关系；利用经济学方法结合获得的暴露-响应关系，估算黑碳的健康和经济损失；建立黑碳等污染物健康效应预测和评估平台。基于此，估算黑碳减排的收益。基于上述成本收益分析，提出农业与生活源黑碳减排的最佳策略。

3 预期成果和社会效益

通过本项目的实施，预期可以解决黑碳排放及其气候环境健康效益模拟相关的几个关键问题，包括农业和生活源黑碳排放因子缺乏，尤其是发展中国家，且排放因子没有基于统一的测试方法，不同燃烧环境下如高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温环境的燃烧黑碳排放与平原地区和热带、亚热带地区的差异未见分析，以及跟黑碳气候环境效应相关的粒径分布、

吸收系数、混合状态等参数在源排放测试中较少被提及；黑碳排放后对气候和环境效应评估中亟须黑碳在大气环境中老化后的混合状态、光学性质等参数；同时缺少中国等高浓度排放地区长时间序列监测和垂直廓线数据，以及黑碳气溶胶的区域和行业来源及其在次季节尺度上的气候效应；缺乏黑碳的长时间序列和高浓度环境下黑碳的人体暴露实验及健康效应以及大气环境浓度与人体暴露浓度的误差校正系数和不同地区和人群的黑碳剂量响应关系，气象条件(低温、高湿、剧烈温差变化)和黑碳对心肺疾病人群的影响的交互作用和协同效应尚不清楚。

上述科学问题的解决，可为我国科学家识别黑碳的高浓度排放特征，及其在高浓度排放条件下的老化机制、气候、健康效应，提升我国科学家在黑碳领域的话语权。同时本项目所获得的第一手中国地区黑碳气溶胶源排放因子、时空分布、垂直分布，将为更新黑碳排放清单，识别黑碳老化机制，评估其气候和环境健康效应提供可靠的数据支撑和方法支持，相关研究结果也可直接为国家气候和环境外交谈判提供科学依据。同时黑碳的减排对于缓解当前我国严峻的大气污染形势和降低人群健康暴露风险也将起到重要的作用。

同时农业与生活源黑碳的减排意味着大量一次污染物如 SO_2 、 NO_x 、VOCs、有毒有害组分(重金属、多环芳烃)等多种污染物的同时减排，可有效降低农业与农村环境中各种污染物的排放，进而减少各种有毒有害组分在生态系统中各部分的沉降，对于农业生态系统中土壤环境、水体环境等的改善也将起到积极的推动作用。

4 创新性

1) 中国农业和生活源主导环境中黑碳气溶胶的时空分布和垂直分布特征

首次在我国开展黑碳综合立体监测平台，获得我国黑碳的时空分布和垂直。采用最新型黑碳观测仪器SP2、光学性质观测仪器(光声黑碳仪PSAP、浊度计)、气溶胶质谱(AMS)、气态污染物观测仪器(SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 O_3 、CO)、沉降缸等，基于飞机航测、系留飞艇探空观测和典型区域地面观测，首次系统研究中国典型区域黑碳气溶胶的空间分布、垂直分布、长时间序列时间变化，获得不同区域不同时间和不同空间的黑碳气溶胶质量浓度、粒径分布、混合状态、吸收系数、单次反照率等，获得典型区域黑碳的干湿沉降速率，为黑碳健康和气候效应评估和验证提供直接的监测数据。

2) 黑碳农业与生活源类完善和不同源黑碳排放因子、物理、光学性质实测

现有黑碳排放清单涵盖的源类只包括农作物残留燃烧、农业机械、民用燃煤、民用生物质燃料等几

类,很多生活源如天然气、煤气和沼气燃烧,餐饮油烟,烟花爆竹燃放,烧烤过程,寺庙焚香、祭祀活动,烤烟生产、香烟烟雾、熏烤腊肉,青藏高原和草原地区牛粪燃烧等特色生活源黑碳排放因子缺乏,相应的清单在中国未见报道,在全球范围内的排放因子实测也很少见。现有黑碳排放因子实测很多未考虑稀释采样和区域燃烧环境的差异,如高原地区低压低氧和高寒地区冬季低温的环境下的测试。源排放黑碳的物理和光学性质较少被关注,如吸收系数、粒径分布、混合状态等。

3) 黑碳农业与生活源类排放清单插值方法改进

现有黑碳排放清单在空间插值过程中均采用人口数据,其前提是人均能耗一致,这与实际情况不一致,尤其是面积较大的国家(如美国、中国)等。为此本项目课题2基于5m空间分辨率遥感影像获得中国平房的空间分布,提取出平房面积,并通过典型区域实地调研,获取平房面积、户数和能源消耗量的信息,建立平房面积、农村人口数量和能源消耗的相关关系。以纠正后的农村人口—能源消耗和平房面积—能源消耗为插值依据,对排放清单进行网格化处理,比较两种插值方法的差异。

4) 区分地域和行业来源的黑碳大气环境效应和气候效应

由于污染物从其源到受体在大气中要经历复杂的物理化学变化,其产生的环境和气候效应与其浓度之间的关系具有高度的非线性,因而以往空气质量模式和气候模式研究中采用的特定源关闭法或扰动法并不能很好地区分某地污染的区域来源和行业来源,也不能区分特定源的复杂气候效应。本研究拟将自主开发的黑碳区域来源和行业来源的在线源追踪功能引入区域空气质量模式WRF-Chem和CESM 大气模块CAM-Chem中,揭示不同地区和行业黑碳对空气质量和气候因子变化的定量贡献和比例;以黑碳减排的环境—气候—健康综合效益为目标,为黑碳从全球到区域、从农业到生活源减排策略提供科学支持。以往气溶胶气候效应的研究多关注其对季风季节变化和年际变化的影响,对黑碳等气溶胶的候、旬、月的次季节尺度的变化研究较少。由于黑碳寿命较短(1周左右)且吸收效应很强,本研究拟阐明东亚季风背景下黑碳对季风精细进程从候、旬、月、季节到年际多尺度变化的影响,以及黑碳与东亚季风的相互作用机制。

5) 基于长时间序列监测数据, 量化评估黑碳和气象因子对人体健康影响的协同效应

当前黑碳健康效应的研究处于起步阶段,很多研究基于大气环境中黑碳气溶胶浓度分析其与总死亡率和心血管疾病死亡率的关系。即便如此,大气中

黑碳长时间序列监测数据缺乏,暴露数据监测更鲜见报道,且黑碳与人体健康的剂量响应关系缺乏。目前国内黑碳与居民健康效应关系的工作开展得较少,缺少量化评估黑碳对居民健康影响的研究。本项目选择中国黑碳排放高浓度区域,选择典型社区环境,采用个体采样器,实时跟踪人群的日常行为模式,获得其黑碳真实暴露浓度,建立黑碳大气环境浓度和真实暴露浓度的关系曲线;借助于数值模式技术,能够试验不同减排方案和气候情景下的黑碳造成的人体健康损失程度,为人体健康经济损失评估提供可靠的暴露数据;开展不同减排方案和气候情景下研究气象条件(热浪、寒潮)的改变对人体健康的影响,研究黑碳与气象要素的协同效应。

5 总结

当前对黑碳排放—老化—传输—暴露及其对应的气候、环境和健康效应研究仍存在很多不足,缺乏黑碳长时间序列监测数据和垂直分布廓线、燃烧源黑碳排放因子的实测、各种源排放黑碳粒径分布、混合状态、光学性质等的直接观测;清单构建过程中空间插值方法单一;各种大气环境中黑碳的真实混合状态,黑碳健康风险评价中的剂量—响应关系等缺失,限制了高分辨率和低不确定性排放清单构建、黑碳浓度空间分布、黑碳气候环境和健康风险的模拟和评价,进而制约黑碳减排策略制定。这些观测、模拟和验证工作在发展中国家尤其缺少。

参考文献

- [1] Schwarz J P, Gao R S, Fahey D W, et al. Single particle measurements of mid-latitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere. *J Geophys Res Atmos*, 2006, 111: D16207.
- [2] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J Geophys Res: Atmos*, 2013, 118(11), 5380-5552, doi: 10.1002/jgrd.50171.
- [3] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geosci*, 2008, 1: 221-227.
- [4] Peng J, Hu M, Guo S, et al. Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(16).
- [5] Wang R, Tao S, Balkanski Y, et al. Exposure to ambient black carbon derived from a unique inventory and high-resolution model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(7):2459-2463.
- [6] Liu S, Aiken A C, Gorkowski K, et al. Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter. *Nature Communications*, 2015, 6, doi:10.1038/ncomms9435.
- [7] Ding A J, Huang X, Nie W, et al. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China. *Geophys Res Lett*, 2016, 43(6):2873-2879.
- [8] Huang W, Zhu T, Pan X, et al. Air pollution and autonomic and vascular dysfunction in patients with cardiovascular disease: interactions of systemic inflammation, overweight, and gender. *Amer J Epidemiology*, 2012, 176(2):117-126.