

# 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义<sup>①</sup>

秦世广 汤 洁 温玉璞

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

简单介绍了黑碳气溶胶的一般性质,着重叙述黑碳气溶胶在大气辐射强迫中的特殊作用以及对气候变化的影响,概括介绍了国内外相关领域的研究现状,指出黑碳气溶胶在气候变化以及大气环境等领域中具有重大的研究价值和意义。

**关键词:** 黑碳 气溶胶 辐射强迫 气候变化

## 引 言

黑碳气溶胶(Black Carbon)是大气气溶胶中一种重要组成部分,主要是含碳物质不完全燃烧产生的不定型碳质,它在可见到红外波段范围内对太阳辐射均有强烈的吸收,所以习惯上被称为黑碳气溶胶。黑碳气溶胶对太阳辐射的强烈吸收作用,以及潜在的气候强迫效应已成为气溶胶气候效应研究中的一个重要内容,并受到世界各国科学家的关注,1995年的IPCC报告<sup>[1]</sup>就曾指出:作为大气气溶胶中太阳辐射的吸收主体,黑碳气溶胶同其它气溶胶如硫酸盐气溶胶混合存在,可能会大大降低硫酸盐气溶胶单独存在时对气候的负辐射强迫作用。2000年的IPCC报告<sup>[2]</sup>则根据近年来黑碳气溶胶辐射强迫研究的模式模拟结果,指出黑碳气溶胶能够导致正的辐射强迫,同硫酸盐等气溶胶混合在一起,黑碳气溶胶会极大地减弱气溶胶的负辐射强迫,尤其是在地表反照率较大的北半球地区,这种作用会更明显。

### 1 黑碳气溶胶的一般性质以及研究历史

黑碳气溶胶的来源可分为自然源和人为源两种,自然源排放如火山爆发、森林大火等具有区域性和偶然性,而人为源排放却是长期和持续的。工业革命以来,人类出于自身发展的需要,大量使用煤、石油等化石燃料,其他如汽车尾气、生物燃烧等都成为大气中黑碳气溶胶的主要来源。黑碳气溶胶在大气气溶胶成分中所占比例较小,一般占百分之几或十几,在大气中浓度一般也较低,但黑碳气溶胶全球浓度分布却具有明显的差别。

黑碳气溶胶在光学性质上与气溶胶的其他组分有很大的差别,它是大气气溶胶中强光学吸收组分。黑碳气溶胶颗粒的粒径尺度范围一般在 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ ,其粒径中值为 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ ,尺度分布呈现积聚模态,因此黑碳气溶胶可以作为云凝结核,改变云滴尺度分布、云光学特性和云中液态水含量及云量。

黑碳气溶胶作为一种污染物,对大气环境有着独特的影响,并且可以参与非均相大气化学过程。黑碳气溶胶能够降低大气能见度;沉降附着在建筑物表面破坏建筑物外观;

<sup>①</sup> 本研究受到自然科学基金项目(49775274)资助

在大气传输过程中,黑碳气溶胶的表面能够吸附其它污染物,为许多污染物(如  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  等)的非均相转化以及气-粒转化过程提供活性载体并起到催化作用,但是黑碳气溶胶本身不可以由其它污染物反应生成或在大气中经化学过程清除,其唯一的汇是干湿沉降清除,因此在大气监测中,黑碳气溶胶可以作为污染示踪剂表征气团传输过程。积聚模态的黑碳气溶胶还可以通过呼吸作用,夹带所吸附的多环芳烃类等有毒物质进入人体,对公众健康造成危害。

最早将黑碳气溶胶作为环境问题的一个方面进行研究可追溯到二十世纪五十年代,其起因是著名的伦敦烟雾事件,在此以后的一段时间内,有关黑碳气溶胶的研究更多集中在城市地区浓度的实验观测。随着对黑碳气溶胶大尺度环境效应认识的深入,各国科学家在黑碳气溶胶的城市和背景地区浓度观测、光学性质、尺度分布、源汇、大气中停留时间等方面进行了广泛的研究,八十年代初“核冬天”问题的提出使气溶胶气候效应的研究成为人们关注的热点,黑碳气溶胶在气溶胶辐射强迫中所具有的特殊作用也逐渐被人们认识到,并作为气溶胶气候效应的一个重要方面展开了深入研究。

## 2 黑碳气溶胶对气候强迫的作用机制与有关研究进展

气溶胶可以通过直接和间接两种效应作用到大气辐射强迫过程中,黑碳气溶胶在两种过程中都占有重要地位。它可以通过直接效应改变地-气系统辐射平衡,通过云微物理等过程影响云凝结核、云反照率、云量等要素,从而间接对区域/全球气候变化造成影响。

黑碳气溶胶是大气气溶胶中最主要的光学吸收成分,在整个大气成分中其光学吸收

作用也不可忽视,同大气温室气体如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CFCs}$  等相比,黑碳气溶胶具有更宽的吸收波段;同具有同样性质的其它颗粒物如沙尘等相比,其质量吸收系数要大两个数量级。近地层大气中黑碳气溶胶可以将吸收到的太阳辐射能量转化为周围大气分子的内能,增加地-气系统所吸收的太阳辐射能量,进而对大气起到增温作用,黑碳气溶胶产生的净增温效果甚至可以同  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CFCs}$  等温室气体的升温作用相比拟。

一般来讲,任何能够影响到云凝结核浓度的过程都会对云的辐射强迫造成影响,而黑碳气溶胶颗粒可以作为云凝结核改变云滴尺度分布和云的光学特性。尽管新生黑碳气溶胶由于其疏水性并不是有效的云凝结核,但是在大气传输过程中,其表面可能发生微物理化学形态的改变,变成亲水性的云凝结核并降低云凝结核所需要的过饱和度,同时黑碳气溶胶还可以促进一些气体污染物的气-粒转化过程。云凝结核浓度的改变会对云滴数目和尺度分布造成影响,从而进一步改变云的反照率,间接地扰乱地球与大气之间的辐射平衡,造成区域/全球气候变化。

由于黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶的排放源具有一致性,在全球气候模式中研究气溶胶的辐射强迫作用通常是同时考虑这两种气溶胶。八十年代的实验观测研究就已表明大气中的黑碳气溶胶通常是同其它气溶胶如硫酸盐气溶胶混合存在,并且其混合方式有外部混合(不同成分气溶胶颗粒以分离的个体存在)和内部混合(如以黑碳为内核外层覆盖有硫酸盐等其它气溶胶)两种。硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶的光学性质完全不同,以外部混合方式存在时,两者的辐射强迫作用相反并相互抵消,如果以内部混合方式存在,两

者物理化学形态相互影响,使得混合后的光学性质变得更加复杂。但是,不论以何种方式混合,黑碳气溶胶的存在可以大大削弱硫酸盐气溶胶负辐射强迫作用。1997年 Schult I. 等<sup>[3]</sup>利用模式计算黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶在以外部混合方式存在条件下,气溶胶全球综合辐射强迫平均值约为 $-0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,但相对于某些区域,黑碳气溶胶的存在可以造成气溶胶负辐射强迫到正强迫的改变,导致一个净的增温效应。Kirkevåg A. 等<sup>[4]</sup>利用模式研究1988年4月气溶胶直接辐射强迫时发现:由于黑碳气溶胶的存在,南非地区气溶胶总直接辐射强迫可达到 $+2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,对全球气候变化具有重要影响的北极地区也存在 $+0.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的气溶胶总直接辐射强迫。还有一些学者利用气候模式研究了黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶以内部混合方式的情况,认为如果黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶以内部混合方式存在,黑碳气溶胶的光学吸收作用会得到更大的增强,进而可能在全球范围内更大程度地削弱硫酸盐等气溶胶的负强迫作用<sup>[5,6]</sup>。

对于存在于云滴或冰晶中的黑碳气溶胶间接辐射强迫,已有研究揭示:存在于云中或云顶,黑碳气溶胶正辐射强迫作用将会得到增强,如果存在于云下,其辐射强迫作用将受到减弱。运用简单模式和近似条件,有研究<sup>[2]</sup>估算出云中的黑碳气溶胶的辐射强迫为 $0.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。但是,由于气候效应模式模拟及云中黑碳气溶胶观测难度较大,目前黑碳气溶胶间接效应的量化还仅限于初步研究阶段,模拟结果仍需要进一步验证。

### 3 国内外的研究现状

目前,黑碳气溶胶的直接和间接气候效应是黑碳气溶胶研究的一个重要方向。在模式计算黑碳气溶胶直接辐射强迫研究方面,

从90年代初期出现的利用一维简单辐射模式已发展到现在的三维全球模式,并且也已出现通过模式研究黑碳气溶胶在云中的间接辐射强迫效应。在观测研究方面,从气候变化研究角度出发,国际上从80年代开展了大量观测实验,如平流层及对流层上部的黑碳气溶胶观测、极地地区和海洋上空大气的观测研究,90年代以后多次连续进行的大规模国际性气溶胶观测实验,如在北美地区进行的 RACE(Radiative Aerosol Characterization Experiment)、大洋洲地区的 ACE-I(Aerosol Characterization Experiment)、欧洲和非洲地区的 ACE-II(同 ACE-I)实验均将黑碳气溶胶作为重要的观测研究内容。在世界气象组织(WMO)全球大气监测网(GAW)的各监测站也普遍开展本底大气黑碳气溶胶连续观测。表1给出了国际上部分监测站的观测结果。由于黑碳气溶胶辐射强迫作用的机制比较复杂,辐射模式本身也还不很完善,因此对黑碳气溶胶直接辐射强迫效应进行估算还不够精确。另外由于黑碳气溶胶在大气中停留时间相对温室气体较短,其空间和时间分布也具有很大的差别,全球仍缺少广泛、长期的黑碳气溶胶浓度观测,有关黑碳气溶胶光学性质的参数、尺度分布、垂直分布以及与硫酸盐等其他气溶胶混合方式的实验结果更是缺乏,不能为模式提供大量准确的实验数据基础,这也是造成全球辐射模式模拟结果还有很大不确定性的重要原因。至于黑碳气溶胶间接气候效应,其物理过程和作用机制则更为复杂,云辐射强迫模式模拟具有相当的难度,黑碳气溶胶垂直分布、尺度分布等观测资料更加匮乏,因此黑碳气溶胶对气候变化造成的间接影响具有更多的不确定因素。加强观测和模式研究,逐步地消除这些不确定因素,仍是今后黑碳气溶胶直接和间接气候效

应研究中的一个亟待解决的核心问题。

我国能源结构依然是以煤和生物燃料为主,且燃料燃烧方式比较落后,各地尤其是城市地区机动车辆(汽车)使用量持续增加,都决定了黑碳气溶胶是我国大气气溶胶的重要组成部分,并且可能对我国的区域气候变化产生重要的影响。与国外已有工作相比,我国黑碳气溶胶的研究相对还比较薄弱,在模式研究方面还仅限于个别报道<sup>[6]</sup>。在观测研究方面,我国于80年代中期开展了黑碳气溶胶的观测研究工作,但观测时间一般较短,仅限于北京、上海等少数城市或地区。自90年代起,观测实验在我国更广泛地开展,如汤洁

等1991年在我国临安大气本底污染监测站<sup>[7]</sup>、1998年在拉萨地区进行了黑碳气溶胶的观测;王庚辰,孔琴心等人于1992年、1996年和1997年在北京市北郊,1992年在河北香河,测量了黑碳气溶胶浓度<sup>[8]</sup>,1992~1994年,我国在青海省西宁市西南方向约90km、海拔3810m的瓦里关山上建立了我国第一个全球大气本底基准观象台,这也是世界上第一个位于欧亚大陆内陆地区的WMO/GAW监测站,黑碳气溶胶监测作为其中一项业务工作自1994年连续观测运行至今,并已得到部分具有一定研究价值的结果<sup>[7]</sup>。这些观测结果也汇总在表1中。

表1 国内外部分黑碳气溶胶浓度观测结果

观测地点	观测时间	黑碳浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	来源
美国 城市	1979	3.1~13.3	文献[9]
美国,南极极点站(全球本底)	1986~1987	$5\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-3}$	
美国,Barrow(全球本底)	1986	0.1~0.5	文献[10]
加拿大,Halifax(城市)	1995~1996	0.54~1.74	文献[11]
加拿大,北极 Alert(全球本底)	1989~1990	0~0.3	文献[12]
斯洛维尼亚,Ljubljana(城市)	1990~1991	0.1~40	文献[13]
斯洛维尼亚,Krvavec(区域本底)	1996~1997	0.15~0.45	文献[14]
爱尔兰,Mace Head(全球本底)	1992	0.007~0.021	文献[15]
北京 城市	1993	1.94~3.32	文献[16]
北京 西山(郊区)	1993	1.33~2.09	
北京 北郊(郊区)	1992.9~10	1.1~10.5	文献[17]
	1996.10~11	4.7~47.1	
浙江,临安(区域本底)	1991.9~10	2.3(平均)	文献[8]
青海,瓦里关(全球本底)	1994~1995	0.05~0.6	
北京,上甸子(区域本底)	1999~2000	0.2~3.3	文献(7)
四川,温江(郊区)	1999~2000	1.8~12.1	
西藏,拉萨(郊区)	1998.6~10	0.3~4.8	汤洁、秦世广 (待发表)
			汤洁等(待发表)

#### 4 结语

黑碳气溶胶是大气气溶胶中重要组分,也是大气中对太阳辐射具有强烈吸收作用的重要成分。黑碳气溶胶在大气气溶胶的辐射强迫作用中扮演着复杂而重要的角色,研究黑碳气溶胶在大气中分布、输送、沉降的规律以及对气候系统的辐射强迫作用,对区域/全

球气候变化等研究具有重要意义;同时对保护大气环境、维护公众健康和推动大气物理化学等学科领域的发展也具有十分现实的积极作用。在我国,从可持续发展和气候变化研究的角度出发,有必要加强不同背景地区黑碳气溶胶的长期实验观测,并利用大气气溶胶辐射模式对其辐射强迫作用进行深入的

研究,以提高区域/全球气候变化研究、预测的能力与水平。

### 参考文献

- 1 IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change 2.4.2.2, 113—114.
- 2 IPCC. Climate Change 2000: Chapter 6. Radiative Forcing of Climate Change: 25—26.
- 3 Schult I. et al. Effect of black carbon and sulfate aerosols on the Global Radiation Budget. *J. Geophys. Res.* 1997, 102 (D25): 30107—30117.
- 4 Kirkevag A. Iversen T. and Dahlback A. On radiative effects of black carbon and sulphate aerosols. *Atmos. Environ.*, 1999, 33: 2621—2635.
- 5 Haywood J. M. et al. General circulation model calculations of the direct radiative force by anthropogenic sulfate and fossil-fuel soot aerosol. *J. Climate.*, 1997, 10: 1562—1577.
- 6 张 瑛, 高庆先. 硫酸盐和黑碳气溶胶辐射效应的研究. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 87—91.
- 7 汤 洁, 温玉璞, 周凌晔等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 160—169.
- 8 王庚辰, 孔琴心, 刘广仁等. 秋末冬初北京大气中颗粒物的变化. 第七届全国大气环境学术论文集. 北京, 1998: 210—215.
- 9 Wolff G. T. Particulate element carbon in the atmosphere. *Journal of the Air Pollution Control Associati.*, 1981, 31 (9): 935—938.
- 10 Hansen A. D. A., Bodhaine B. A. Dutton E. G. and Schnell R. C. Aerosol black carbon measurements at the South Pole: Initial Results, 1986—1987. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, 15(11): 1193—1196.
- 11 Hansen A. D. A., Conway T. J. Steele L. P. et al. Correlations among combustion effluent species at Barrow, Alaska: aerosol black carbon, carbon dioxide, and Methane. *J. Atmos Chem.*, 1989, 9: 283—299.
- 12 Chylek P., Kou L., Johnson B. et al. Black carbon concentrations in precipitation and near surface air in and near Halifax, Nova Scotia. *Atmos. Environ.*, 1999, 33: 2269—2277.
- 13 Hopper J. F. et al. Atmospheric observations of aerosol black carbon, carbon dioxide, and methane in the high arctic. *Atmos. Environ.*, 1994, 28(18): 3047—3054.
- 14 Bizjak M., Cigler B., Hansen A. D. A. and Hudnik V. Diurnal concentrations of black carbon and some other air pollutants in Ljubljana, Slovenia. *Atmos. Environ.*, 1993, 27A(8): 1347—1350.
- 15 Bizjak M., Tursic J., Lesnjak T. et al. Aerosol black carbon and ozone measurements at Mt. Lrvavec EMEP/GAW station, Slovenia. *Atmos. Environ.*, 1999, 33: 2783—2787.
- 16 Jennings S. G., Spain T. G., Doddridge B. G. et al. Concurrent measurements of black carbon aerosol and carbon monoxide at Mace Head. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (D14): 19447—19454.
- 17 Nagamoto F. P. C., Zhou M-Y., et al. Aeolian transport of aerosol black carbon from China to the ocean. *Atmos. Environ.*, 1994, 28(20): 3251—3260.

## Black Carbon and Its Importance in Climate Change Studies

Qin Shiguang Tang Jie Wen Yupu

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

The general properties of aerosol black carbon are presented with an emphasis on the discussion of radiative effect of black carbon on the global and regional climate change. The recent progress in this field, both in the modeling and measurement studies are also reviewed briefly. It is concluded that aerosol black carbon is a very important aspect in the studies of the climate change and environmental issues.

**Key Words:** black carbon aerosol radiative forcing climate change