

黄观, 刘伟, 刘志红, 等. 黑碳气溶胶研究概况[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 205–214. [Huang Guan, Liu Wei, Liu Zhi-hong, et al. A research overview of Black Carbon Aerosols[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 205–214.]

## 黑碳气溶胶研究概况<sup>\*</sup>

黄 观, 刘 伟, 刘志红, 张 洋

(成都信息工程学院 资源环境学院, 四川 成都 610225)

**摘 要:** 黑碳气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 由于其在全球气候变化和区域空气质量中的双重作用, 黑碳已经成为目前全球气候变化研究中备受关注的焦点之一。在查阅近年国内外相关文献资料基础上, 分析了黑碳气溶胶的来源和源强分布, 结果表明工业源和居民生活消费源是大气中黑碳气溶胶最主要的贡献者, 全球黑碳排放空间分布不均匀, 与区域经济发展和人口密度相一致; 总结了黑碳气溶胶的基本特性及其影响, 重点探讨了黑碳对气候的影响机理, 结果表明黑碳气溶胶既可以通过直接气候效应改变地-气系统的辐射平衡, 又可以通过云反射效应、地表下垫面改变效应以及作为云凝结核间接影响区域或全球气候; 随后对黑碳气溶胶的典型测量方法的优缺点进行了对比分析; 最后介绍了黑碳研究领域中存在的主要问题, 并对黑碳气溶胶研究的发展方向进行了展望。

**关键词:** 黑碳气溶胶; 排放源; 空间分布; 气候效应

**中图分类号:** X513; X4   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2015)02-0205-10

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.039

燃烧过程产生各种各样的气体和粒子成分, 其中含有碳的粒子颗粒物被称为碳质气溶胶。碳质气溶胶又可大致分为两类: ①元素碳(Element Carbon, EC), 有时也被称为黑碳(Black Carbon, BC)、石墨碳(Graphitic Carbon)、煤烟(Soot)等; ②有机碳(Organic Carbon, OC)。有机碳的产生与燃烧过程、大气中碳氢化合物的气-粒转换等有关, 而黑碳一般是在碳质燃料不完全燃烧过程中产生的<sup>[1-2]</sup>, 主要包括烧焦、木炭、煤烟等。黑碳是大气中太阳辐射的重要吸收体, 与CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CFCs等温室气体相比, 黑碳具有更宽的吸收波段, 与沙尘相比, 其质量吸收系数要大两个数量级<sup>[3]</sup>。黑碳是大气细颗粒物PM<sub>2.5</sub>的主要组分之一, 同时也被认为是烟炱的主要组分, 它在大气中的浓度一般较低, 在全球范围内分布也很不均匀, 但在大气物理、大气化学和大气光学过程中都具有重要的作用<sup>[4]</sup>。例如, 它可以作为云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN), 改变云滴尺度分布、云光学特性和云中液态水含量及云量<sup>[5]</sup>, 从而进一步改变云的反照率, 间接影响地球与大气之间的辐射平衡, 进而造成区域乃至全球气候变化<sup>[1,6]</sup>; 作为一种污染物, 在大气传输过程中, 黑

碳气溶胶的表面能够吸附其他污染物, 为许多污染物质(如二氧化硫、臭氧等)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<sup>[7-8]</sup>; 黑碳粒子的变化将改变大气浑浊度和能见度及地表的反照率<sup>[5]</sup>。同时, 黑碳会对人体健康产生危害, 这已经通过大量研究得以证明, 例如, 它可以进入人的呼吸系统, 减弱肺的清理功能, 危害人体健康, 引发哮喘、心血管疾病和某些癌症<sup>[9]</sup>。除此之外, 由于黑碳气溶胶对从可见光到红外波段范围内的太阳辐射都有强烈的吸收作用, 因此它能增加地-气系统的太阳辐射能量, 使大气温度升高, 黑碳气溶胶已经被部分研究认为是造成全球变暖的一个潜在因子<sup>[10-12]</sup>。目前, 对黑碳气溶胶的研究受到世界各国的普遍关注, 其源排放、时空分布和环境气候效应已成为当前全球和区域性大气环境与气候变化研究所关注的焦点之一<sup>[13]</sup>。本文在查阅近年国内外相关文献资料基础上, 主要评述了黑碳气溶胶的来源与空间分布, 总结了黑碳气溶胶的基本特性及其影响, 对比分析了黑碳气溶胶典型测量方法的优缺点, 概括介绍了黑碳研究领域需待解决的问题, 并指出了未来黑碳气溶胶研究的发展方向。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-11-06    修回日期: 2014-12-14

基金项目: 国家自然科学基金“基于区域复合系统能流分析的低碳城市综合评价与发展规划研究”(41101542); 四川省社会科学研究规划项目“四川盆地城市群大气污染联防联控对策研究”(SC14C007)

作者简介: 黄观(1991-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要研究方向为气溶胶遥感与大气环境。

E-mail: 416092456@qq.com

## 1 黑碳气溶胶的来源与空间分布

### 1.1 黑碳气溶胶的来源

黑碳气溶胶的来源可分为自然源和人为源(表1)。其中天然火灾、火山爆发等自然现象会排放部分黑碳气溶胶,但其对大气中黑碳气溶胶浓度的长期背景值变化贡献不大。相反,人为源排放具有广泛性和持续性,人类相关的燃料燃烧活动已成为当今大气环境中黑碳的主要来源。根据过去的相关研究<sup>[2,14-16]</sup>,大气环境中黑碳气溶胶的排放源主要包括:有机燃料的燃烧、工业炼焦、工业制砖、垃圾焚烧、天然火灾和野外农业废弃物燃烧以及火山爆发。

表1 黑碳气溶胶的来源

排放源	具体来源
人为源	有机燃料的燃烧 能源行业、工业部门、交通运输行业、居民生活中煤、石油、天然气和各种生物质燃料的使用
	工业炼焦 炼焦过程中的炼制过程、焦炉加热系统以及焦炉煤气的泄露等
	工业制砖 制砖过程中物料破碎输送、坯体人工干燥和烧成工段等过程
	垃圾焚烧 生活垃圾和工业废料的燃烧
自然源	天然火灾和野外 森林、草原火灾和秸秆的燃烧
	农业废弃物燃烧 燃烧
火山爆发	

#### 1.1.1 全球黑碳排放源

为了对黑碳的排放进行全面掌握与管理,一些学者制定了全球黑碳排放清单,目前在大气科学领域应用最广泛的有3个:AeroCom清单、SPEW清单和ACCMIP清单<sup>[17-19]</sup>。但是,根据最新大气模拟的运算结果,基于这些清单计算得到的地表大气黑碳浓度和光学厚度都有不同程度的低估<sup>[20]</sup>。然而,与以往的黑碳排放清单不同,王戎<sup>[15]</sup>建立的PKU-BC-2007清单是基于北京大学自主研发的全球燃烧源数据库,同时采用独立测定或模拟预测的黑碳排放因子数据库,覆盖了64个含碳燃料的大气燃烧过程,包括5类燃料(煤类、石油类、天然气、垃圾和生物质)和6个部门(电厂和能源行业、工业、交通运输、民用和商业、农业和自然火灾),其具有一定的实用价值。本文根据王戎建立的全球黑碳排放清单PKU-BC-2007,绘制出2007年全球黑碳排放总量的排放源贡献分布图(图1)。由图1可知,2007年全球黑碳的主要来源包括6个部分:①民用和商业(相关活动煤、油、天然气的使用以及无组织垃圾焚烧等),

其贡献率为31.7%,是全球黑碳排放的最重要源;②自然灾害(森林、灌木丛、草原火灾等),贡献率为26.3%,其在全球黑碳总量中有较大贡献;③工业(炼焦、制砖炼铝行业以及市政垃圾燃料燃烧等),其占据全球黑碳排放总量的17.6%;④交通运输(汽油、柴油机动车,航空汽油、煤油等),贡献率为17.3%;⑤农业(农用机械柴油、室外秸秆燃烧),贡献率为5.3%;⑥电厂和能源行业(相关活动煤、油、气的使用以及生物质燃料燃烧等),其占全球黑碳排放总量的1.8%。

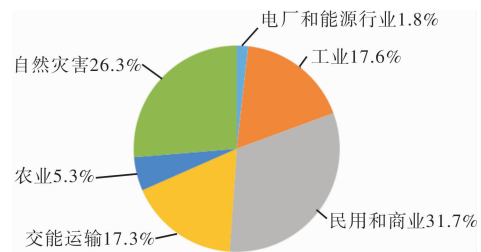


图1 2007年全球黑碳排放总量的排放源贡献分布图

#### 1.1.2 中国黑碳排放源

对于中国黑碳的排放源和排放总量,很多学者进行了研究。Bond<sup>[4]</sup>等人综合考虑了可燃物、燃烧类型、排放控制技术以及区域特点,建立了中国1996年的黑碳排放清单;曹国良等人<sup>[21]</sup>采用部分国内实测数据得到了2000和2007年中国大陆黑碳排放总量分别为 $149.94 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $139.9 \times 10^4 \text{ t}$ ;Zhang等人<sup>[23]</sup>在Streets等<sup>[22]</sup>的基础上更新了2006年我国人为源黑碳排放清单,考虑技术进步对排放因子的影响,并结合部分国内排放因子,估算中国黑碳排放总量达到 $181.1 \times 10^4 \text{ t}$ 。不同学者的估算结果之间之所以存在一定量差,主要是由于研究者所取的排放因子不同、数据获取范围不精确、部分排放系数的选取不符合中国实际情况以及忽略了季节变化和中国机动车排放标准更新所带来的变化等的影响<sup>[24-25]</sup>。而张楠<sup>[26]</sup>等人基于国家统计数据、国内最新实测排放因子数据和更符合中国实际情况的机动车排放因子模型计算了中国大陆(不包含港澳台地区)2008年黑碳气溶胶排放清单,清单显示2008年中国大陆黑碳排放总量为 $160.494 \times 10^4 \text{ t}$ 。本文根据张楠等人建立的中国大陆(不包含港澳台地区)黑碳气溶胶排放清单绘制出2008年中国黑碳排放总量的排放源贡献分布图(图2)。从图2可以得知,在中国,工业源和居民生活消费源是最主要的贡献者。工业源为 $69.503 \times 10^4 \text{ t}$ ,占排放总量的43.3%,排放黑碳的工业源包括城市工业企业和乡镇企业燃烧的煤、油和生物质燃料,其中多数来自乡镇企业中那些没有配备任何处理设施或只有较差除尘设施的燃煤锅炉的排放;居民生活消费源为 $63.602 \times 10^4 \text{ t}$ ,占排放总量的39.6%,这包括居民生活中使用的大量未经排放处理的原煤、蜂窝煤和生物质燃料

的燃烧, 其中大多数来自农村居民使用煤炉、灶等进行采暖或烹饪时的排放; 对于交通源, 在 2000 年, 源于交通运输的排放量不高, 仅占总量的 1.8%, 但是随着社会经济的发展, 汽车尾气的排放也越发严重, 其排放比例在不断增加<sup>[27]</sup>, 从图 2 可以看到, 到 2008 年, 源于交通运输的黑碳排放量为  $19.463 \times 10^4$  t, 已经提升至总量的 12.1%; 生物质燃烧排放量为  $6.768 \times 10^4$  t, 仅占总量的 4.2%, 这包括农作物的田间燃烧, 还有经常发生的森林或草原火灾; 发电行业排放量较小。

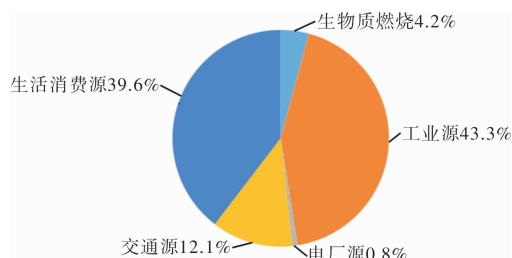


图2 2008年中国黑碳排放总量的排放源贡献分布图

## 1.2 黑碳气溶胶排放的空间分布

黑碳气溶胶的排放很难直接测量, 通常是通过排放因子, 将实验室的推算结果应用到实际大气中, 进而粗略估算黑碳气溶胶的排放量。

### 1.2.1 全球黑碳气溶胶排放的空间分布

王戎<sup>[15]</sup>根据其建立的  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的高分辨率 PKU-BC-2007 清单, 得到全球黑碳排放的空间分布, 结果如图 3 所示。图 3 中所呈现的结果与 IPCC 2001 报告<sup>[28]</sup> 以及张华<sup>[12]</sup> 等人的研究结果有很好的一致性。

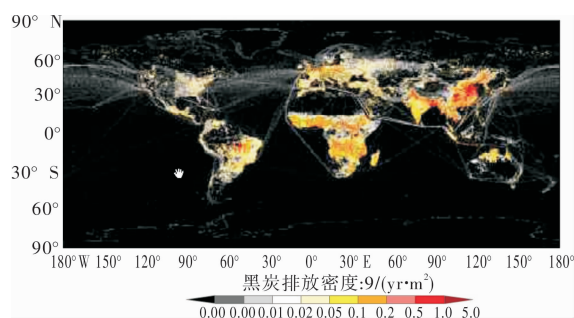


图3 2007年全球黑碳高分辨排放清单的空间分布( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ )<sup>[15]</sup>

结合图 3 以及相关研究结果可以得出<sup>[7,28-31]</sup>, 黑碳的排放具有明显的地理差异, 黑碳排放量陆地大于海洋, 北半球大于南半球, 北半球中高纬度地区大于低纬度地区。全球黑碳排放的高值区主要分布在东亚、南亚、非洲中部和南部以及中东地区, 这些高排放地区, 往往是人口相对集中、且以传统的煤和生物质为主要燃料的发展中地区, 如中国北方的华北平原, 中国东南沿海的珠江三角洲地区, 中国东部的长江三角洲地区, 中国西南的四川盆地和云贵高原, 以及印度的恒河三角洲和新德里地区, 还有缅甸、泰国、孟加拉为中

心的中南半岛, 这些地区农村人口分布广泛, 生活燃料以煤、薪柴、秸秆为主, 说明人类对黑碳气溶胶的空间分布会产生较大的影响, 是使黑碳气溶胶排放量增加的主要因素。而非洲中部和南部, 以及中东地区则是由于这些地区发生的草原和森林火灾, 导致黑碳排放也较高, 如巴西的 Cerrado 草原、非洲中部的 Guinean 和刚果北部的森林草原结合带; 除了这些自然火灾区外, 在这些地区的人口相对集中的城市里, 当地的民用燃料燃烧也会导致一些高排放地带出现。此外, 在欧洲的中部, 主要是法国、德国等国家, 由于民用生物质燃烧也较为普遍, 同时交通运输消耗大量石油产品, 部分地区的黑碳排放也相对较高。在北美, 除一些自然火灾频发的自然区外, 大部分人为活动的地区, 黑碳排放强度普遍不高, 原因是当地主要以气和油等清洁燃料作为民用燃料<sup>[15]</sup>。

### 1.2.2 中国黑碳气溶胶排放的空间分布

作为世界上最大的发展中国家, 中国的黑碳排放问题引起了很多学者的关注。张楠等人<sup>[26]</sup> 计算了中国大陆 2008 年黑碳气溶胶排放清单, 并在此基础上生成了  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的中国黑碳排放空间分布图 (图 4), 图 4 呈现的分布特征与国内学者<sup>[27,32]</sup> 对于中国黑碳排放的研究结果基本一致。

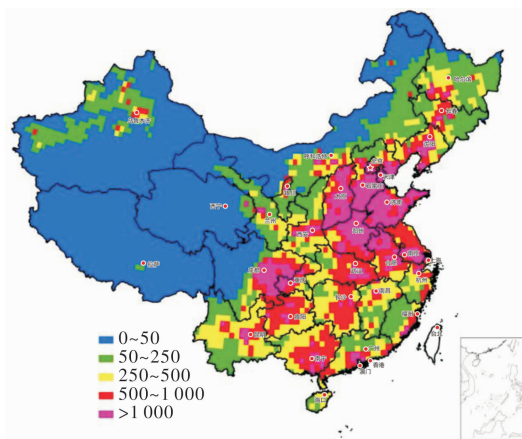


图4 2008年中国大陆黑碳排放空间分布图 ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ; 单位:  $\text{t a}^{-1}$ )

根据图 4, 对空间整体而言, 中国东部的排放密度显著高于西部, 在东部, 辽宁、山东、河北、河南、山西、江苏、安徽及湖北排放量较高。其中, 山西省黑碳排放主要来自于工业源; 辽宁省作为老工业基地, 也具有较高的工业源排放; 山东、河北、河南、江苏、安徽及湖北等地的工业源和居民生活源均具有较高的排放量。西部地区排放量虽整体较低, 但四川东部、重庆、贵州及广西南部仍具有较高的排放强度, 主要来自居民生活源, 如四川省居民生活消费黑碳排放量居全国首位<sup>[26]</sup>。中国大气中的黑碳气溶胶主要分布在华北、华南和长江中下游地区<sup>[27]</sup>, 排放密度最高的地区包括华北平原、渭河平原、四川盆地、贵

州高原、山西高地和东北平原, 这些地区人口相对集中, 尽管其面积仅占全国面积的 12%, 但其民用煤和生物质能源消耗量及炼焦用煤一共贡献了中国黑碳排放总量的 40%<sup>[15]</sup>。而西藏、新疆、青海等地的排放量极低, 以占全国 37.9% 的面积仅贡献了全国总排放量的 2.9%, 主要由于当地工业欠发达而且人口密度较低, 各类源的排放量均较低。总的来看, 由于工业源和居民生活源贡献了大部分的黑碳排放量, 因此其空间分布主要与当地工业发展状况及人口密度有关。

## 2 黑碳气溶胶的基本特性及其影响

### 2.1 黑碳气溶胶的基本特性

(1) 黑碳气溶胶形态多为圆形, 具有粒径小、多孔性等特点。它的形态具有链式球形小粒子, 其粒子尺度很小, 粒径范围一般在  $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$  之间, 其粒径中值为  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ , 尺度分布呈现积聚模态<sup>[3]</sup>, 形态多为圆形; 它具有多孔性, 能够吸附其他污染物, 为许多物质的非均相转化提供活性载体并起催化作用, 因此黑碳气溶胶可以作为云凝结核, 改变云滴尺度分布、云光学特性及云量。

(2) 黑碳气溶胶理化性质特殊, 对大气环境有着独特的影响。其具有较为特殊的物理化学性质, 在化学成分上非常接近于石墨, 在温度高于  $400^\circ\text{C}$  时才可以发生氧化。作为一种污染物, 黑碳气溶胶可以参与非均相大气化学过程, 进而影响气候。黑碳气溶胶在大气中的寿命一般为几天, 且空间分布极不均匀, 它不会由其他污染物反应生成或在大气中经化学过程清除, 其清除过程主要有干沉降、湿沉降和重力沉降 3 种途径, 其中以雨水的冲刷清除为主, 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<sup>[1,3]</sup>。

(3) 黑碳气溶胶光吸收能力较强。它对可见光和部分红外光谱有很强的吸收能力, 因此它在大气中的各种化学和光化学反应、非均相反应以及气-粒转化过程中起着重要作用<sup>[33]</sup>。

鉴于大气中黑碳气溶胶的这些基本特性, 它不仅会导致气候系统能量的变化, 而且能影响大气环境质量和人类健康。

### 2.2 黑碳气溶胶的气候效应

黑碳是全球气候变化的重要影响因子之一, 主要通过辐射强迫来影响气候。辐射强迫是对某个因子改变地球-大气系统射入和逸出能量平衡影响程度的一种度量, 其中正强迫使地球表面增暖, 负强迫则使地球表面变冷, 而黑碳的辐射强迫又可分为直接辐射强迫和间接辐射强迫。

#### 2.2.1 黑碳的直接辐射强迫

黑碳颗粒能够吸收和散射太阳短波辐射和地面长波辐射, 改变地-气辐射平衡, 从而影响气候, 称之为直接辐射强迫<sup>[34]</sup>。

近年来, 通过一些外场试验如对流层气溶胶辐射强迫观测试验 (TARFOX)<sup>[35]</sup>、气溶胶特征试验-II (ACE-II)<sup>[36]</sup> 和印度洋试验 (INDOEX)<sup>[37]</sup> 等, 许多科学家对吸收性黑碳气溶胶的辐射强迫进行了系统的研究。张靖等<sup>[38]</sup> 利用区域气候模式 RegCM3 模拟研究了黑碳气溶胶对我国区域气候的影响, 模拟结果显示: 黑碳气溶胶在大气层顶产生正的辐射强迫, 在地表产生负的辐射强迫; 吴润等<sup>[39]</sup> 的区域气候模拟结果也指出: 黑碳气溶胶对太阳辐射存在较强的吸收, 有明显的直接辐射效应; 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告综合不同的研究得出黑碳气溶胶在大气层顶的直接辐射强迫为  $(+0.24 \pm 0.14) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[40]</sup>。Ramanathan 等<sup>[13]</sup> 对温室气体辐射强迫、黑碳气溶胶直接辐射强迫与非黑碳气溶胶直接和间接辐射强迫进行了比较, 结果表明: 气溶胶在大气层顶总的辐射强迫为  $-1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 它可以抵消 50% 温室气体造成的正辐射强迫, 但其中黑碳气溶胶在大气层顶的直接辐射强迫为  $+0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比除了  $\text{CO}_2$  以外的其他温室气体的辐射强迫都要大。黑碳气溶胶对整个大气层的辐射加热效应为  $+2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 几乎为所有温室气体对大气加热值的两倍, 在这里, 将 Ramanathan 等的比较结果呈现在图 5 中。对此, 有学者提出减少黑碳气溶胶的排放量可能是减缓全球变暖的最有效手段<sup>[41]</sup>。

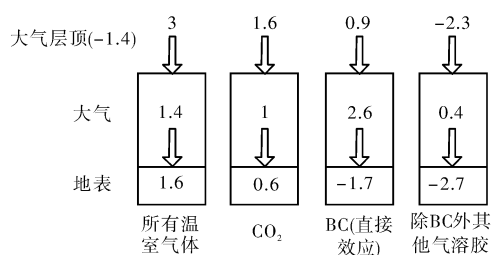


图5 温室气体辐射强迫、黑碳气溶胶直接辐射强迫与非黑碳气溶胶总辐射强迫之间的比较(单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

#### 2.2.2 黑碳的间接辐射强迫

黑碳的间接辐射强迫表现为: 云反射效应、云凝结核、地表下垫面改变效应。

##### (1) 云反射效应

由 IPCC 报告可以得知, 无论是气溶胶改变了云的反射率, 还是改变了被云覆盖的地球表面的反射率, 都被统一称为云反射效应<sup>[40]</sup>, 云的存在对黑碳的辐射强迫产生了很大的影响。王志立<sup>[42]</sup> 等通过计算有云大气和晴空大气下黑碳气溶胶的辐射强迫, 讨论了云对黑碳气溶胶直接辐射强迫的影响。研究表明, 云的存在明显加大了大气顶的正辐射强迫, 而减小了地表的负辐射强迫, 其中大气顶年平均直接辐射强迫增加了  $0.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地表年平均辐射强迫增加了  $0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。吴润等<sup>[43]</sup> 利用我国新一代区域气候模式

也得出了相似的结论。

与此同时, 云层与黑碳层的相对位置也会影响辐射强迫。当云层位于黑碳层以上时, 能够反射部分直接到达黑碳层的太阳辐射, 极大地减少黑碳气溶胶对太阳辐射的吸收; 当云层位于黑碳层以下时, 由于云对太阳辐射的反射, 造成黑碳气溶胶对太阳辐射的二次吸收, 从而大大增加了黑碳气溶胶对太阳辐射的吸收。

### (2) 云凝结核

黑碳颗粒进入大气云层后, 可以形成云凝结核 (CCN) 或者冰核 (ice nuclei, IN), 从而促成了云水蒸汽凝结成小水滴的物理转化, 进而改变云滴密度和云滴半径, 导致云量和云光学厚度的改变, 从而影响成云致雨而引起气候变化。作为云凝结核 (CCN), 它可以通过改变云的微物理和辐射特性来间接影响气候<sup>[44]</sup>。其一为 Twomey 效应, 气溶胶粒子的增加导致云滴浓度增加, 从而增加了云的光学厚度, 最终导致云的反射率的增加; 其二为 Albrecht 效应, 云凝结核使得云滴半径减小, 而较小的云滴长大成雨滴需要更长的时间, 这样就延长了云的维持时间, 也延长了降雨时间, 进而影响全球的气候<sup>[45-46]</sup>。

黑碳与我国的南涝北旱有无相关性也成为近几年学者研究的重点。有学者认为, 黑碳气溶胶是造成我国南涝北旱的根源<sup>[40]</sup>, 认为黑碳气溶胶的排放使我国长江中下游等南方地区夏季降水增加, 而北方部分地区降水减少。Menon 等进行了相关模拟, 模拟结果表明: 在过去的 20 年, 中国北方的干旱和南方的洪涝灾害可能与来自中国和印度排放的黑碳气溶胶有关<sup>[47]</sup>。也有学者认为南涝北旱与黑碳气溶胶不存在任何关联。尽管观点纷呈, 但是黑碳气溶胶作为云凝结核, 对成云致雨具有不可忽视的作用, 这是科学界一致认同的观点。

### (3) 地表下垫面改变效应

沉降在冰雪表面的黑碳气溶胶通过降低冰雪反照率影响地表系统的辐射平衡, 可引起正的间接辐射强迫。

当黑碳气溶胶离开排放源后, 部分黑碳气溶胶颗粒可以通过远距离输送, 到达地球的南北极或中纬度的雪山, 在这些冰雪表面沉降下来, 使这些冰雪表面对太阳光的吸收能力增加, 导致增温和冰雪融化, 这种效应一般称为黑碳气溶胶的地表下垫面改变效应<sup>[47-48]</sup>。地表下垫面改变效应表现在常年积雪和结冰的地方, 如喜马拉雅山和北极, 主要是由于冰和雪很明亮, 造成了暗色的黑碳和明亮的地表之间有很高的反射率, 因此在冰山上产生净变暖效应, 而且此效应十分显著<sup>[49]</sup>。悬浮于印度-恒河平原上空的大量黑碳颗粒物随着盛行的西风急流南支沿喜马拉雅山麓自西向东移动, 在喜马拉雅山脉大面积的冰川上沉降, 降

低了冰雪表面的反照率, 导致喜马拉雅山冰川的加速融化和退缩, 不但会造成冰川融化季节和融水补给河流春汛的提前、延长其持续时间, 而且会使冰川储备降低<sup>[50-51]</sup>。有研究表明, 由于黑碳气溶胶对大气的加热作用, 自 1950 年代以来喜马拉雅地区温度升高接近 1℃, 使得该地区冰川覆盖明显减少<sup>[52]</sup>。由于黑碳的物理特性效率较高, 通常而言, 其吸收效率是其他气体颗粒物的倍增, 而根据有关科学家对于北极探测推算, 冰雪上黑碳升温效果比等量二氧化碳高三倍, 据估算<sup>[53]</sup>, 黑碳的这种效应产生的辐射强迫可以达到  $+0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在过去几年里, 中国科学院青藏高原研究所的科研人员分析了大量青藏高原冰川雪坑及表面的雪样品, 结果表明: 黑碳气溶胶在冬季大量附在冰雪上, 加快其吸热, 使冰雪在三四月份就开始消融, 而这并不是农牧业需水时期, 造成原本紧张的冰雪水资源大量浪费<sup>[14]</sup>。

由此看来, 无论是北极还是我国青藏高原的有关黑碳气溶胶的研究, 都得出了惊人的相似结论: 黑碳气溶胶的存在加速了两地冰川的融化。除此之外, 黑碳可使区域地表径流在晚冬早春期间增加, 改变区域地表径流特征, 进而影响区域水循环并且导致区域干旱洪涝的发生<sup>[54]</sup>。冰雪中的黑碳产生的地表下垫面改变效应, 对全球和区域的气候变化以及冰雪水资源的影响不容忽视。

## 2.3 黑碳气溶胶对环境的影响

尽管黑碳本身化学性质十分稳定, 但由于具有很大的表面积和较强的吸附性, 它在大气中所形成的红棕色云团已经成为典型的亚洲雾霾, 因此黑碳在大气化学转化尤其是非均相转化过程和气-粒转化过程中均具有重要作用<sup>[55]</sup>。

(1) 黑碳在大气输送过程中能够捕获各种一次和二次污染物, 为部分污染物均相及非均相化学反应提供场所, 同时还能对部分化学反应起催化作用, 例如, 在空气污染较为严重的城市地区, 黑碳在二氧化硫氧化和硫酸气溶胶非均相催化转化中均占主导地位<sup>[56]</sup>; 此外, 对于对流层及低层平流层的臭氧非均相转化消耗, 黑碳同样有重要的贡献<sup>[57]</sup>。

(2) 在黑碳浓度很高的城市和污染源集中地区, 黑碳的光学吸收特性会使大气能见度有很大程度上降低。

(3) 黑碳作为大气悬浮颗粒物的一部分, 它可以沉积或吸附在历史古迹和公共建筑物表面, 侵蚀建筑物的表观与牢固程度, 造成建筑物污染, 影响建筑物外观。

(4) 黑碳对空气的清新健康程度有一定影响, 它会使空气质量明显下降, 并且其粒子会黏着于植物表面, 影响植物光合作用从而阻碍植物生长。

表 2 黑碳气溶胶典型测量方法的优缺点

方法	原理	优点	缺点
光 学 法	由于具有很强的光吸收性 <sup>[63]</sup> ，可假设黑碳是颗粒物中唯一的光吸收体，光吸收量同其质量之间存在一定比例关系，可通过测量单位质量黑碳的光吸收量计算出黑碳质量和相应的浓度值 <sup>[64]</sup> 。	实验操作迅速，不破坏样品；主要用于城市大气气溶胶中黑碳的测量。	①黑碳粒子的吸收特性是多种因素的函数；②膜采样时易受具有光吸收性质的其他颗粒物的影响；③气溶胶表面的其它物质及颗粒散射作用也会对测量结果造成一定影响。
热 学 法	基于热分离技术，不同碳质会在不同条件下发生反应。有机碳质可在温度为 350~850℃ 时挥发，它可以被催化氧化成 CO <sub>2</sub> ，或分解成 CH <sub>4</sub> ，而元素碳质只能在温度 400~850℃ 范围内和有氧条件下氧化成 CO <sub>2</sub> ，可通过检测 CO <sub>2</sub> 的量，进而换算得到黑碳的环境浓度 <sup>[63-64]</sup> 。	可以同时测量样品中元素碳和有机碳成分以及它们在大气气溶胶中所占比例，设备简单，容易操作；主要应用在土壤和沉积物中。	①不能保证有机碳和元素碳能够彻底分离；②在分离过程中会发生部分有机碳化合物碳化，造成测量结果的不准确；③加热过程中如果气体的输送量不能恰当控制，部分有机质会焦化黑碳而使黑碳浓度偏高 <sup>[65]</sup> 。
光热分析法	结合光吸收和热分离方法，根据黑碳的热稳定性高于有机碳的特点，分步氧化有机碳(无氧条件)和黑碳(有氧条件)。	可对热分离过程中碳化现象造成的误差进行适当调整；应用于沉积物黑碳的测量 <sup>[65-66]</sup> 。	光热分析法是一种实验室测量方法，其原理复杂，且实验过程繁琐。
化学氧化法	用酸和氧化剂处理而获得黑碳 <sup>[67]</sup> ，前提是土壤或者沉积物中黑碳组分比非黑碳组分有更强的化学稳定性 <sup>[68]</sup> 。反应条件温和且容易控制，操作方便；具有很高的选择性。	①在溶液中获取黑碳时，其疏水性会使黑碳颗粒吸附在容器内壁及液-气界面而带来误差；②反应过程中有机碳的氧化程度很难控制 <sup>[68]</sup> 。	
显 微 镜 法	以黑碳的光学特性为基础 <sup>[69]</sup> ，在观测样品前，要用盐酸、氢氟酸对样品进行预处理。根据样品的颗粒粒径尺寸，测量黑碳的方法包括光学显微镜法、扫描/透射电子显微镜法等。	在显微镜下可直接观测黑碳的形态、大小 <sup>[69]</sup> ，进而描述黑碳特征 <sup>[70]</sup> ，判断黑碳的来源和搬运距离；常用于沉积物中颗粒较大的黑碳的测量。	①相当耗时；②测定范围非常有限，只能挑出粒径较大的木炭颗粒；③预处理过程可能造成细颗粒黑碳的丢失 <sup>[68]</sup> 。
分子标志法	通过测量同黑碳有关的某一种或某一类特殊化合物，如苯多环羧酸的浓度，根据这些物质信息来推算黑碳的含量 <sup>[68]</sup> 。适合在液相条件下识别黑碳的含量，不仅可定量估计土壤黑碳，也可分析黑碳的来源和形成条件。	①处理过程中反复的清洗造成了细颗粒黑碳的流失 <sup>[68]</sup> ；②所得结果和其他方法相比，可信度不高 <sup>[71]</sup> 。	

2.4 黑碳气溶胶对人体健康的影响

黑碳是大气细颗粒物的主要组分，而大气颗粒物对人体健康的危害已经通过大量研究得到了各个方面的证据，例如，在北美和欧洲，流行病学调查发现细颗粒物浓度的增加与心血管病和肺癌的死亡率有直接的关系<sup>[10,58]</sup>。

Laden<sup>[58]</sup>等在不同地区、不同年龄段进行了一个流行病调查的长时间系列研究，表明细颗粒物的暴露与一系列的健康危害有最显著的相关关系，包括死亡率的提高、医院急诊量的增加、慢性呼吸疾病以及肺癌等的发病率升高，一些研究认为呼吸道和心血管疾病的发生与环境中高浓度的颗粒物暴露有着一定的相关关系<sup>[59]</sup>，如 PM<sub>2.5</sub> (Dp < 2.5 μm) 和 PM<sub>1.0</sub> (Dp < 1.0 μm)，能够通过呼吸系统直接进入人体肺泡和支气管末端，从而引起健康危害<sup>[60]</sup>。

Janssen<sup>[61]</sup>等通过流行病调查指出黑碳气溶胶与死亡率的剂量响应关系，要远高于细颗粒物，即黑碳是细颗粒物中有效的毒性物质。因为无论与何种物质相混合，由于黑碳的强稳定性使其并不产生化学反应，混合物仍然保持着原有特性。就直接效应而言，粒径在亚微米级的黑碳颗粒很容易通过呼吸作用进入人体呼吸系统，进入人体肺部，并沉积在肺泡上。同时由于黑碳气溶胶具有吸附性，黑碳气溶胶的表面能够吸附其它污染物(如多环芳烃类、重金属等)，可以通过呼吸作用，夹带所吸附的有毒物质进入人体，从而引起呼吸系统哮喘以及心血管病、癌症等疾病的发生，其与重金属颗粒物的混合进入人体后则可能使得人体血液黏稠度升高导致各类的血液疾病<sup>[62]</sup>。从间接效应方面分析，黑碳气溶胶所形成的浑浊空气对人类呼吸道、食物链的影响进而形成的对身

体的危害同样存在。

### 3 黑碳气溶胶测量方法的对比研究

国内外研究学者已对黑碳的定量分析发展了多种方法, 目前最常用的方法有基于黑碳光吸收特性的光学法、利用热分离技术的热学法, 以及后来发展起来的热光法。此外, 还有化学氧化法、显微镜观测法、分子标志物法等。尽管有很多测量黑碳的方法, 但其测量结果却存在很大的不确定性, 有时用同一方法测得的黑碳浓度相差两倍甚至更多。本文对黑碳气溶胶典型测量方法的优缺点进行了比较, 见表 2。

### 4 黑碳气溶胶研究存在的主要问题与展望

#### 4.1 黑碳气溶胶研究存在的主要问题

目前, 在黑碳气溶胶的研究方面已经取得了一定的成果, 但由于黑碳的复杂性和一些客观条件的限制, 以及人类主观认识的局限性, 还存在很多亟待解决的问题, 有许多工作需要进一步深入研究。

##### (1) 黑碳的定义及测量方法

在目前关于黑碳气溶胶的研究中, 对黑碳的定义不统一, 也不精确。一些研究中只针对某一类或某几类组分, 将其定义为黑碳; 而另一些研究中则倾向于将更为广泛的物质种类纳入到黑碳的定义中。一般认为黑碳是有机物不完全燃烧产生的具有较高热稳定性的烧焦、木炭、煤烟和高度聚集的多环芳烃类物质, 此外也包括生物体自然降解的残余物质以及微小的有机碎屑, 自然界的森林大火或者化石燃料的燃烧都产生了大量的黑碳<sup>[72-74]</sup>。由此看来, 黑碳是一个复杂的混合物, 由于对其定义不同, 在测量方法上就有所侧重, 在对黑碳进行分析时都或多或少地“强调”或者“忽视”其中的某些组分, 从而得出的结果差异显著, 不同测量方法之间的可比性也相对较差<sup>[75]</sup>。此外, 由于对黑碳的定义模糊, 目前关于黑碳的定量标准较难统一<sup>[76]</sup>, 做定量分析时采用的标准物质不同, 进而给黑碳的测量带来误差, 使得测量结果受到质疑。

##### (2) 中国黑碳排放清单

黑碳排放清单是进行黑碳模式模拟的基础, 国内外相关学者对中国的黑碳排放清单研究做了大量工作, 在黑碳排放清单的估算中, 虽然收集了大量的排放因子数据, 但是估算结果仍存在一定量差及较大的不确定性, 具体原因有以下几点: ①作为计算黑碳排放量的排放因子, 很多仅来自国外的部分试验结果, 并附加了各种假设条件,

有关中国的试验数据较少<sup>[21]</sup>; ②数据获取范围不精确, 忽略了中国部分偏远的农村地区, 并且缺乏对中国农村地区及乡镇企业的了解; ③中国各地区各行业燃烧源的燃烧条件相差极大, 对它们采用相同排放系数来计算排放量, 不符合实际情况; ④一些排放清单没有考虑季节的变化, 尤其是中国农村的生物质燃烧, 存在着一定的季节变化; ⑤对机动车排放因子, 大部分学者未考虑中国机动车排放标准更新所带来的变化, 仅对不同车型分类讨论<sup>[24-25]</sup>。

##### (3) 黑碳的降解过程

黑碳是全球碳循环中重要的一环, 被认为是一个稳定的碳库, 在全球慢速碳循环过程中扮演着重要角色。进入到环境中的黑碳并不是永久性存在的, 随着时间的推移, 黑碳也会逐步降解。但是目前关于黑碳降解的研究甚少, 并且其结果一般仅限于降解周期的讨论, 而从分子水平揭示整个过程的研究则开展的比较少<sup>[77]</sup>, 我们目前还不清楚究竟哪些物理的、化学的、生物的过程引起了黑碳的降解损失<sup>[78]</sup>。

##### (4) 黑碳气溶胶的模式模拟

由于黑碳气溶胶在大气中的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, 加之全球范围内缺少广泛、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、尺度分布和垂直分布等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<sup>[79]</sup>; 并且, 大气气溶胶是以混合状态存在的, 但是其混合方式、不同状态的混合比例却不得而知, 例如, 黑碳气溶胶与吸湿性气溶胶混合过程会影响到黑碳气溶胶的大气寿命, 然而, 这一过程是很难量化的; 另外, 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够完善, 故对黑碳气溶胶直接辐射强迫效应的估算还不够精确, 从而造成黑碳气溶胶的全球辐射模式模拟结果存在很大不确定性<sup>[16]</sup>。

##### (5) 黑碳气溶胶间接气候效应

黑碳气溶胶间接气候效应是一个非常复杂的过程, 由于其物理过程和作用机制较复杂, 目前云辐射强迫模式模拟具有相当的难度, 再加上黑碳气溶胶的垂直分布、尺度分布等观测资料匮乏, 因此黑碳气溶胶对气候变化造成的间接影响有很多的不确定因素。此外, 对于研究者们提出的一种吸收型气溶胶的半直接气候效应, 它是指吸收型气溶胶改变大气的温度廓线, 促进对流层云的蒸发, 使云量和反照率减小, 进而影响气候的一种过程<sup>[80]</sup>, 有关这方面的研究还很少。如何描述它在大气中完整的过程, 其不确定性不言而喻。

#### 4.2 黑碳气溶胶研究展望

(1) 想要更好地开展黑碳研究, 更精确地对其进行测量、比较, 需要对黑碳进行准确的定义,

并发展广受接纳的统一分析方法,以获取确切的黑碳浓度数额;与此同时,还应统一规范定量分析时采用的标准物质,以便进行数据的对比,从而建立一整套的黑碳分析的方法体系<sup>[81]</sup>;此外,为了提高数据的解释性和针对性,还需要以具体的环境意义为导向选择合适的分析测定方法<sup>[82]</sup>。

(2)对于中国黑碳排放清单的估算与建立,在后继的黑碳排放研究中,应做到以下几点:①系统调查现状,针对中国各地区各行业燃烧源的燃烧条件,建立分地区、分技术类型的排放因子数据库;②相关部门要增强统计体系的公开性、系统性,要有完善的源排放数据,并且要公布具体算法和取值过程,提高数据的可信度;③结合中国发展现状,全面了解中国农村地区及乡镇企业的实际情况,精确数据的获取范围;④要考虑到季节、各类排放标准等变化带来的影响。

(3)了解黑碳降解过程对全球碳循环的贡献,将是今后的研究方向和重点之一。为了了解自然环境中黑碳逐渐消失的过程,就必须加强对黑碳降解(生物降解、真菌降解和非生物降解)机理方面的研究。认识黑碳降解的地球化学过程以及环境中的迁移转化过程,将有助于帮助我们理解黑碳减缓碳循环的作用,有助于确定黑碳在全球碳循环中及在全球气候变化过程中的作用与地位<sup>[33]</sup>。除此之外,由于黑碳在地质历史时期古火事件以及古环境的重建中发挥着重要作用,因此需要进一步扩展各类沉积物的黑碳历史研究。

(4)在黑碳气溶胶的研究过程中,应提高黑碳气溶胶模式模拟的准确性。对此,应开展广泛、长期的黑碳气溶胶浓度观测,从多角度进行有关黑碳气溶胶光学性质的参数、尺度分布和垂直分布等的实验研究,为模式模拟积累大量准确的实验数据;应进一步改进模式模拟研究,结合更多的研究模型对黑碳气溶胶与其他气溶胶之间的混合过程进行有效量化,并且准确估算黑碳气溶胶的直接辐射强迫效应,从而逐步消除对黑碳气溶胶的全球辐射模式模拟结果造成影响的不确定因素;此外,对于我国的相关研究,应结合中国地区气溶胶排放的实际情况和中国地区气溶胶特有的光学性质来进行研究<sup>[83]</sup>。

(5)对于黑碳气溶胶复杂的间接气候效应,应通过观测数据分析和数值模拟相结合的方法尽可能减小黑碳气溶胶间接气候效应的不确定性;应加强云辐射强迫模式模拟的研究,积累有关黑碳气溶胶垂直分布、尺度分布等的观测资料,加强气溶胶表面的多相化学反应研究;此外,应开展吸收性气溶胶的半直接气候效应研究。

(6)在中国,随着城市的发展,人口的增多,人为排放的各种污染物,如  $PM_{2.5}$  等也相应增加,这些粒子对人类的身体健康有着极大的危害。因此,在今后的研究中,应深入开展黑碳气溶胶与

大气环境相互关系的研究,结合地面环境监测站的数据(如 TSP 和 API 等),把黑碳气溶胶研究上升到区域大气环境的层面上<sup>[8]</sup>。通过这种将黑碳气溶胶和人居环境结合起来的研究,可为大气环境的预报和评估提供更多更科学的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, 27(11): 3-7.
- [2] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, 1(8): 1-8.
- [3] 白建辉, 王庚辰. 黑碳气溶胶的研究新进展[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(9): 585-592.
- [4] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. J Geophys Res, 2004, 109: D14203.
- [5] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. 气象科学, 2006, 26(1): 110-117.
- [6] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望[J]. 热带气象学报, 2003, 19(5): 145-151.
- [7] Koch D. Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM [J]. J Geophys Res, 2001, 106(17): 20311-20332.
- [8] 郑安桥, 苏亚欣, 赵敬德. 黑碳气溶胶研究现状[J]. 能源环境保护, 2007, 21(5): 4-9.
- [9] 刘菲, 牛生杰. 北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演[J]. 南京气象学院报, 2006, 29(6): 775-781.
- [10] Goss CH, Newsom SA, Schildcrout JS, et al. Effect of ambient air pollution on pulmonary exacerbations and lung function in cystic fibrosis[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2004, 169(7): 816-821.
- [11] Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario [J]. PNAS, 1998(97): 9875-9880.
- [12] 张华, 马井会, 郑有飞. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模式研究[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1147-1158.
- [13] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. Nature, 2008(1): 221-227.
- [14] 张华, 王志立. 黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 311-317.
- [15] 王戎. 黑炭的全球排放和大气迁移及其暴露风险和辐射强迫评估[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [16] 穆燕, 秦小光, 刘嘉麒, 等. 黑碳的研究历史与现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 143-155.
- [17] 杨国福, 江洪, 余树全, 等. 浙江省 1991-2006 年森林火灾释放黑碳量的估算[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2612-2621.
- [18] Simpson J M, Hatcher G P. Overestimates of black carbon in soils and sediment [J]. Naturwissenschaften, 2004, 91(9): 436-440.
- [19] Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000 [J]. Global Biogeochem Cycles, 2007, 21(2): B2018(1-16).
- [20] Sato M, Hansen J, Koch D, et al. Global atmospheric black carbon inferred from AERONET [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2003, 100(11): 6319-6324.
- [21] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单[J]. 气候变化研究进展, 2006(6): 259-264.

- [22] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. *Atmos Environ*, 2001(35): 4281–4296.
- [23] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emission in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(14): 5131–5153.
- [24] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8809.
- [25] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for period 1980–2020[J]. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7(16): 4419–4444.
- [26] 张楠, 覃栋, 谢绍东. 中国黑碳气溶胶排放量及其空间分布[J]. *科学通报*, 2013, 58(19): 1855–1864.
- [27] 许黎, 王亚强, 陈振林, 等. 黑碳气溶胶研究进展 I: 排放、清除和浓度[J]. *地球科学进展*, 2006(4): 352–356.
- [28] IPCC. Third Assessment Report Climate Change 2001: The Scientific Basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [29] Chung S H, Seinfeld J H. Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(19): 4407.
- [30] Roberts D L, Jones A. Climate sensitivity to black carbon aerosol from fossil fuel combustion [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: D16202.
- [31] Kristjansson J E, Iversen T, Kirkevåg A, et al. Response of the climate system to aerosol direct and indirect forcing: Role of cloud feedbacks[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: D24206.
- [32] 宿兴涛, 王汉杰. 中国黑碳气溶胶分布特征与辐射强迫的模拟研究[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(6): 798–806.
- [33] 曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2011(2): 177–184.
- [34] 马井会. 黑碳和沙尘气溶胶光学特性和全球辐射强迫的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [35] Russell P B, Livingston J M, Hignett P, et al. Aerosol-induced radiative flux changes off the United States mid-Atlantic coast: comparison of values calculated from sunphotometer and in situ data with those measured by airborne pyranometer [J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 2289–2307.
- [36] Raes F, Bates T F, McGovern F M, et al. The second aerosol characterization experiment: general overview and main results [J]. *Tellus*, 2000, 52: 111–125.
- [37] Ramanathan V, Cmtzen P J, Lelieveld J, et al. The Indian Ocean experiment: an integrated assessment of the climate forcing and effects of great IndoAsian haze [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 28371–28398.
- [38] 张靖, 银燕. 黑碳气溶胶对我国区域气候影响的数值模拟[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(6): 852–859.
- [39] 吴润, 符淙斌. 近 5 年来东亚春季黑碳气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 111–119.
- [40] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [41] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D19): 4410.
- [42] 王志立, 郭品文, 张华. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(2): 161–171.
- [43] Wu J, Jiang W M, Fu C B, et al. Simulation of the radiative effect of black carbon aerosols and the regional climate responses over China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(4): 637–649.
- [44] 支国瑞, 张小曳. 可持续发展背景下的黑碳减排[J]. *气候变化研究进展*, 2009(6): 318–321.
- [45] 石立新, 段英. 华北地区云凝结核的观测研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(4): 644–652.
- [46] 段婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 252–261.
- [47] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250–2253.
- [48] Chylek P, Ramaswamy V, Srivastava V. Albedo of soot-contaminated snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983(88): 10837–10843.
- [49] Karen B, Pamela H, Frank N. Black carbon—a review and policy recommendations [D]. Pennsylvania: Woodrow Wilson School, 2009.
- [50] 吕爱锋, 贾绍凤, 王素慧, 等. PDO 和 ENSO 指数与三江源地区径流变化的相关关系研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(2): 49–52.
- [51] 毛翠翠, 左其亭. 人水关系研究进展与关键问题讨论[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(5): 74–79.
- [52] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303–309.
- [53] Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, et al. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(11): 1–17.
- [54] Qian Y, W I Uustalson, LY R Leung, et al. Effects of soot induced snow albedo change on snowpack and hydrological cycle in western United States based on weather research and forecasting chemistry and regional climate simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(3): 108–126.
- [55] 张秋彭, 苏维翰. 大气气溶胶粒子中有机物含碳量及元素碳量的测定[J]. *环境化学*, 1987, 6(1): 24–28.
- [56] Hopper J F, Worthy D, Elj, et al. Atmospheric observations of aerosol carbon, carbon dioxide, and methane in the high arctic [J]. *Atmos. Environ*, 1994, 28(18): 3047–3054.
- [57] Lary D J, Lee A M, et al. Carbon aerosols and atmospheric photochemistry [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D3): 3671–3682.
- [58] Laden F, Schwartz J, Speizer F E, et al. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard six cities study [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2006, 173(8): 667–672.
- [59] Englert, N. Fine particles and human health—a review of epidemiological studies [J]. *Toxicology letters*, 2004, 149(1): 235–242.
- [60] Russell A G, Brunekreef B. A focus on particulate matter and health [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(13): 4620–4625.
- [61] Janssen N A H, Hoek G, Simic-Lawson M, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109(12): 1691–1699.
- [62] 余锡刚, 吴建, 郗颖, 等. 灰霾天气与大气颗粒物的相关性研究综述[J]. *环境污染与防治*, 2010(2): 86–88, 94.
- [63] Japar S M, Brachaczek W W, Gorse R A, et al. The contribution of elemental carbon to the optical properties of rural atmospheric aerosols [J]. *Atmos. Environ*, 1986, 20(6): 1281–1289.

- [64] Wolff G T. Particulate element carbon carbon in the atmosphere [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1981, 131 (9): 935–938.
- [65] Elmquist M, Uustalsson, Andersson P. Quantification of sedimentary black carbon using the chemothermal oxidation method: An evaluation of ex-situ pretreatments and standard additions approaches [J]. Limnology and Oceanography. Methods, 2004 (2): 417–427.
- [66] Han Y M, Cao J J, An Z S, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for quantification of elemental carbon in sediments [J]. Chemosphere, 2007, 69(4): 526–533.
- [67] Hsieh Y P, Bugna G C. Analysis of black carbon in sediments and soils using multi-element scanning thermal analysis (MESTA) [J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(11): 1562–1571.
- [68] 邱敬, 高人, 杨玉盛, 等. 土壤黑碳的研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(1): 88–94.
- [69] Poot A, Quik J T K, Veld H, et al. Quantification methods of black carbon: comparison of Rock-Eval analysis with traditional methods [J]. Journal of Chromatography, 2009, 12 (16): 613–622.
- [70] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥. 大气气溶胶中有机碳和元素碳监测方法的进展 [J]. 分析科学学报, 2006, 22 (2): 225–229.
- [71] Brodowski S, Rodionov A, Haumaier I, et al. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(9): 1299–1310.
- [72] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14 (3): 777–793.
- [73] Koelmans A A, Jonker M T O, Cornelissen G, et al. Black carbon: The reverse of its dark side [J]. Chemosphere, 2006, 63 (3): 365–377.
- [74] Mannino A, Harvey H R. Black carbon in estuarine and coastal ocean dissolved organic matter [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(3): 735–740.
- [75] 唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 黑碳研究进展 [J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 98–103.
- [76] 凌荣祥, 罗泰义, 周明忠. 黑色岩系岩石样品中黑碳含量测定和误差分析 [J]. 地球与环境, 2006, 34(2): 82–88.
- [77] Nguyen B T, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil [J]. Biogeochemistry, 2008, 89 (3): 295–308.
- [78] 胡学玉, 易卿, 禹红红. 土壤生态系统中黑碳研究的几个关键问题 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 153–158.
- [79] 李建云, 张杰, 田密. 中国地区黑碳气溶胶直接辐射效应的数值模拟研究 [J]. 2009, 32(1): 17–23.
- [80] 许黎, 王亚强, 罗勇, 等. 黑碳气溶胶的气候效应和拓展的研究领域 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 328–333.
- [81] 占长林, 曹军骥, 韩永明, 等. 古火灾历史重建的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1248–1259.
- [82] 汪青, 土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(1): 293–310.
- [83] Zhang H, Wang Z L, Guo P W, et al. A modeling study of the effects of direct radiative forcing due to carbonaceous aerosol on the climate in East Asia [J]. Adv Atmos Sci, 2009, 26 (1): 57–66.

## A Research Overview of Black Carbon Aerosols

Huang Guan, Liu Wei, Liu Zhihong and Zhang Yang

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Black carbon aerosol is an important part of atmospheric aerosols, Black Carbon (BC) has become one of the focus on the study of global climate changes because of its dual role in global climate change and regional air quality. On the basis of reviewing relevant literatures at home and abroad in recent years, the sources and source intensity distributions of BC are analyzed, results show that the emissions from industrial and residential energy consumption are the main contributors in atmospheric BC, and the spatial distribution of global BC emissions is uneven, which is consistent with regional economic development and population density. Then the basic characters and impacts of BC are summed up, and the impact mechanism of BC on climate are focused on, the results show that BC not only can change the radiation balance of gas-ground system through direct climate effects, but also can affect regional or global climate through the reflection effect of the cloud, the change effect of the underlying surface and as cloud condensation nuclei. Then the advantages and disadvantages of the typical BC measuring methods are compared. At last, the main problems and development directions of the study of BC were reviewed briefly.

**Key words:** black carbon aerosol; emission source; spatial distribution; climatic effects