

## 编者按:

人类产生的黑碳气溶胶与二氧化碳都是由化石燃料和生物质燃料燃烧排放出来的,它们具有相同的来源。二氧化碳作为大气中主要的温室气体可使气候变暖;黑碳气溶胶会使地面冷却、大气加热,因而具有明显的气候效应,国内外对该方面的研究日益关注。研究表明,黑碳气溶胶可影响亚洲季风的强弱、爆发时间以及水循环过程;也可以影响云的形成以及大范围干旱和暴雨事件;还可影响冰川融化的速度等。因而,黑碳气溶胶被认为是引起气候变化的一个重要因子,是气溶胶-云相互作用关键科学问题中的一个重要部分。为了使读者比较全面地了解这个问题,我们邀请了有关专家撰写这方面的文章,较系统地介绍了黑碳气溶胶的气候效应、对我国局部冰雪的影响及其减排的政策建议。读者可以通过“气候变化与黑碳气溶胶专栏”对黑碳气溶胶的主要科学问题和减排技术有一个较全面的了解。

文章编号: 1673-1719 (2009) 06-0311-07

## 黑碳气溶胶气候效应的研究进展

张 华<sup>1</sup>, 王志立<sup>1,2</sup>

(1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 黑碳气溶胶能吸收从可见光到红外波段的太阳辐射, 已经被部分研究认为是造成全球变暖的一个潜在因子。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, 又可以作为云凝结核或冰核改变云的微物理特性, 间接影响区域或全球气候。对黑碳气溶胶的辐射强迫及其气候效应的研究现状进行总结和分析后, 指出了目前黑碳气溶胶气候效应研究中存在的不确定性, 并对未来的相关研究提出了一些建议。

**关键词:** 黑碳气溶胶; 辐射强迫; 气候效应

**中图分类号:** X16/P422/P467      **文献标识码:** A

### 引言

黑碳 (black carbon, BC) 气溶胶是大气气溶胶一种重要的组成成分, 主要是含碳物质不完全燃烧产生的不定型碳质。自工业革命以来, 世界人口数量快速增长, 人类大量使用煤、石油等化石燃料, 另外加上农业目的的生物焚烧和汽车尾气的排放, 使得大气中黑碳气溶胶的浓度迅速增加。Bond 等<sup>[1]</sup>对全球黑碳气溶胶的排放作了详细的分析, 指出黑碳的排放大约为 8.0 TgC/a, 其中化石燃料和生物质燃烧贡献 4.6 TgC/a, 露天焚烧贡献 3.3 TgC/a。Ito 等<sup>[2]</sup>研

究表明, 2000 年全球化石燃料燃烧排放的黑碳气溶胶为 2.8 TgC/a, 且从 20 世纪 50 年代以来增加了约 3 倍。50 年代以前, 北美和西欧为黑碳气溶胶排放的最大源, 但现在位于热带地区和东亚的发展中国家已成为黑碳最大的源区<sup>[3]</sup>。

黑碳气溶胶在大气气溶胶成分中所占比例较小, 一般占百分之几到百分之十几, 在大气中浓度一般也较低, 但它对气候和大气环境的影响却不容忽视。黑碳气溶胶对从可见光到红外波段范围内的太阳辐射都具有强烈的吸收作用, 从而增加地-气系统所吸收的太阳辐射能量, 增加大气温度, 已经被部分

收稿日期: 2009-06-11; 修订日期: 2009-07-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2006CB403707); 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200706036); 国家科技支撑计划课题“气候变化的检测和预估技术研究” (2007BAC03A01) 资助

作者简介: 张华 (1965—), 女, 研究员, 主要从事大气辐射传输模式、温室气体和气溶胶辐射强迫与气候效应研究。E-mail: huazhang@cma.gov.cn

研究认为是造成全球变暖的一个潜在因子<sup>[4-6]</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。

### 1 黑碳气溶胶的源强分布和清除

黑碳气溶胶的排放分为自然源和人为源两种,自然源包括火山喷发、森林火灾等,人为源主要包括煤和石油等化石燃料燃烧、生物焚烧和汽车尾气排放等。Bond等<sup>[1]</sup>给出了黑碳气溶胶年排放强度的全球分布(图1)。从图中可以看出,黑碳气溶胶源强主要有4个大值区:中国东部、西欧、南美洲和非洲中部,其次在北美南部和澳大利亚也有一定范围的分布。中国作为燃煤大国,原煤燃烧是黑碳气溶胶排放的最主要来源。此外,我国农村有燃烧农作物秸秆的习俗,这也是我国黑碳气溶胶源排放的主要来源之一。曹国良等<sup>[7]</sup>对中国2000年黑碳排放量进行了估算,得出的黑碳排放量为1.50 Tg,东部比西部排放量大,且黑碳的排放具有明显的季节变化,冬季排放量大,夏季排放量较小,这主要与中国居民的采暖期有关。

黑碳气溶胶在大气中的寿命一般为几天,比温室气体的寿命要短得多,且空间分布极不均匀,它的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。

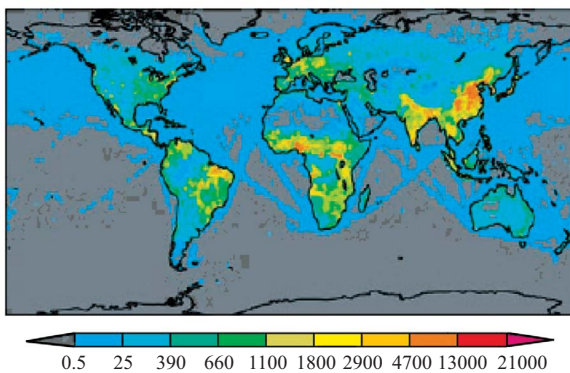


图1 黑碳气溶胶排放强度的全球分布(单位:t/a)<sup>[1]</sup>  
Fig. 1 Global distribution of BC aerosol emission intensity (unit: t/a)<sup>[1]</sup>

### 2 黑碳气溶胶的辐射强迫

20世纪50年代,由于著名的伦敦烟雾事件的发生,黑碳气溶胶逐渐引起了各国科学家的注意。到了20世纪80年代初,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科学家们所认识,并作为气溶胶气候效应的一个重要方面展开了深入研究。

近年来,通过一些外场试验像对流层气溶胶辐射强迫观测试验(TARFOX)<sup>[8]</sup>,气溶胶特征试验-II(ACE-II)<sup>[9]</sup>和印度洋试验(INDOEX)<sup>[10]</sup>等,许多科学家对吸收性的黑碳气溶胶的辐射强迫进行了系统的研究。与CO<sub>2</sub>的温室效应在大气中和地表都产生正的辐射强迫不同,黑碳气溶胶在大气顶产生正的辐射强迫,但在地表产生负的辐射强迫<sup>[5,11]</sup>。IPCC<sup>[12]</sup>综合不同的研究给出的黑碳气溶胶在大气顶的直接辐射强迫为(+0.24±0.14)W/m<sup>2</sup>。Ramanathan等<sup>[6]</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(图2),结果表明:气溶胶在大气顶总的辐射强迫为-1.4 W/m<sup>2</sup>,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顶的直接辐射强迫为+0.9 W/m<sup>2</sup>,比除了CO<sub>2</sub>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 W/m<sup>2</sup>,几乎为所有温室气体对大气加热值的两倍。目前,对黑碳气溶胶辐射强迫的不同研究结果之间的差别还很大。大多数气候模式

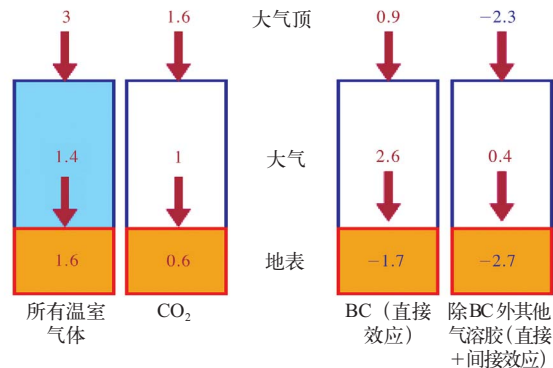


图2 温室气体辐射强迫、黑碳气溶胶直接辐射强迫与非黑碳气溶胶总辐射强迫之间的比较(单位:W/m<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>  
Fig. 2 Comparison of the global mean radiative forcing due to greenhouse gases (GHGs), BC and non-BC aerosols (unit: W/m<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>

都没有考虑黑碳气溶胶与其他气溶胶的内部混合,因此得出的黑碳气溶胶的辐射强迫值偏低,大多在 $+0.2 \sim +0.4 \text{ W/m}^2$ 之间<sup>[13-14]</sup>。但大量的观测研究表明,黑碳气溶胶能够与硫酸盐、有机碳等水溶性气溶胶内部混合,从而极大地改变其本身的光学特性,增大黑碳气溶胶的正辐射强迫<sup>[15-16]</sup>。虽然黑碳气溶胶在大气顶产生正的辐射强迫,但大气中总的气溶胶的直接辐射强迫为负值,IPCC 总结不同模式得出的全球人为气溶胶总的年平均辐射强迫约为 $-0.4 \text{ W/m}^2$ ,多个卫星观测的平均值约为 $-0.55 \text{ W/m}^2$ <sup>[12]</sup>。

其次,云也是影响黑碳气溶胶辐射强迫的一个重要因子。当云层位于黑碳气溶胶层以上时,能够反射部分直接到达气溶胶层的太阳辐射,极大地减少黑碳气溶胶对太阳辐射的吸收,因此减小黑碳气溶胶在大气顶和地面引起的辐射强迫;当云层位于黑碳气溶胶层以下时,由于云对太阳辐射的反射,会造成黑碳气溶胶对太阳辐射的二次吸收,使得黑碳气溶胶在大气顶引起的正辐射强迫增加,在地面的负辐射强迫减小。张华等<sup>[5]</sup>和王志立等<sup>[11]</sup>研究了云对黑碳气溶胶直接辐射强迫的影响,得出了相同的结论。

地表太阳辐射通量对地表径流、地表潜热和植被覆盖等都有非常重要的影响,因此清楚地了解黑碳气溶胶在地表的辐射强迫也是非常重要的。无论是吸收性的气溶胶还是散射性的气溶胶,对太阳辐射的消光作用都会导致到达地表的辐射通量减少,所以造成地面的辐射强迫均为负值。目前,已有一些研究显示气溶胶的消光作用导致了全球变暗<sup>[17]</sup>。但是,全球变暗是否直接由气溶胶引起还具有很大的不确定性,有待进一步的研究。

### 3 黑碳气溶胶的气候效应

黑碳气溶胶对气候的影响方式有3种:一种是它能够直接吸收太阳辐射和红外辐射,扰动地球大气系统的能量收支,直接影响气候;第二种是它能与硫酸盐、有机碳等水溶性气溶胶混合作为云凝结核或直接作为冰核,改变云的微物理和辐射性质以及云的寿命,间接影响气候系统。另外,处于云层中

的黑碳气溶胶吸收太阳辐射,加热云层大气,从而直接导致云的蒸发、减少,这称为黑碳气溶胶的半直接效应。

#### 3.1 对全球气候的影响

黑碳气溶胶浓度的时空分布极不均匀,因此气候模式成为研究黑碳气溶胶全球气候效应比较有效的工具。Chung 等<sup>[18]</sup>利用 Goddard 太空研究所第二代大气环流模式模拟了人为黑碳气溶胶的直接辐射强迫及其气候效应,指出黑碳气溶胶与硫酸盐气溶胶为外部混合时,其辐射强迫为 $+0.33 \text{ W/m}^2$ ,且造成全球年平均表面温度升高 $0.2 \text{ K}$ ;当二者为内部混合时,其辐射强迫为 $+0.6 \text{ W/m}^2$ ,造成全球年平均表面温度升高 $0.37 \text{ K}$ 。这两种混合方式都将导致热带 $0^\circ \sim 20^\circ \text{N}$  地区降水增加, $0^\circ \sim 20^\circ \text{S}$  地区降水减少,从而造成赤道辐合带(ITCZ)向北移动。但是 Kristjansson 等<sup>[19]</sup>利用 NCAR 的大气环流模式 CCM3 的模拟结果表明,大气中总的气溶胶直接和间接效应引起全球冷却约 $1.33 \text{ K}$ ,且导致了 ITCZ 的南移。Gu 等<sup>[20]</sup>的模拟结果也表明总的气溶胶的直接效应造成地表温度降低,ITCZ 降水减少。Zhang 等<sup>[21]</sup>在气候模式中同时考虑了碳类气溶胶(黑碳和有机碳)的直接气候效应和黑碳气溶胶的半直接效应,模拟结果表明:碳类气溶胶将减弱北半球哈得来环流和极地环流。利用在线耦合的气溶胶-气候模式研究<sup>[22]</sup>表明,黑碳气溶胶对大气温度、地表温度、辐射通量、地表潜热等多个气象参数都有影响。地表和大气对辐射的响应将由大气顶辐射强迫值决定,因此尽管地表接收的太阳辐射通量减少,黑碳气溶胶最终导致大气和地表的温度升高<sup>[6]</sup>。黑碳气溶胶对大气的加热作用主要集中在 $0 \sim 12 \text{ km}$  高度,北半球大部分地区年平均温度升高甚至达 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[23]</sup>。但是,Penner 等<sup>[24]</sup>指出黑碳气溶胶总辐射强迫依赖于气溶胶的注入高度,黑碳气溶胶的注入高度越高,其造成的负的长波辐射强迫越强,且能增加低层大气的云量,从而起到降低大气温度的效果。图 3 给出了近 50 a 来全球降水变化趋势,从图中可以看出,近 50 a 来降水变化比较明显的特征是非非洲萨赫勒地区、印度季风区降水的减少和中国的南涝北旱等。

观测表明，自然变率和气溶胶的强迫作用是造成上述降水变化的主要因素<sup>[26]</sup>。

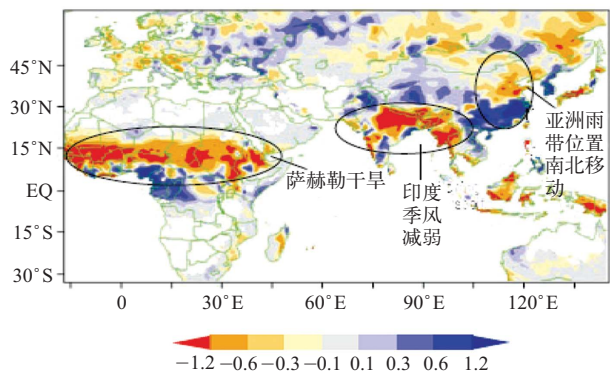


图3 1950—2002降水变化趋势(单位: mm/d)<sup>[25]</sup>

Fig. 3 Precipitation trend from 1950 to 2002 (unit: mm/d)<sup>[25]</sup>

### 3.2 对季风的影响

黑碳气溶胶能促使大气和地球表面能量平衡发生变化，改变大气环流和地球水循环，这必将对季风活动产生重要影响。Menon等<sup>[27]</sup>在大气环流模式GISS中加入气溶胶的光学厚度，通过人为地改变气溶胶的单次散射反照率，研究了东亚季风区黑碳气溶胶的气候效应，模拟结果表明中国夏季近50 a来经常发生的南涝北旱现象可能与黑碳气溶胶有关。但Zhang等<sup>[21]</sup>同时考虑了黑碳和有机碳气溶胶的影响，模拟结果却表明：碳类气溶胶通过其直接和半直接效应加热所在的大气层，导致中国南方地区的云量减少，降水减少，到

达地面的太阳辐射增加，引起地面温度升高，而中国北方地区的上述现象正好与此相反，得出了与Menon等完全相反的结论(图4)。Lau等<sup>[28-29]</sup>分别利用观测资料和气候模式研究指出，青藏高原南北侧的吸收性气溶胶可能导致5月底到6月初孟加拉湾西南气流加强，降水增多，促进了南亚夏季风的爆发。黑碳气溶胶还能加热对流层，引起北印度洋和印度次大陆垂直上升运动增强和降水增加<sup>[25]</sup>。王志立等<sup>[30]</sup>模拟研究了南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响，指出南亚地区黑碳气溶胶的加热效应造成孟加拉湾及沿岸地区夏季季风雨季的提前，导致南亚夏季风提前爆发，且增强了南亚夏季风，但是该地区黑碳气溶胶通过影响表面气压、垂直运动等减弱了东亚夏季风，且导致西太平洋副高北移西伸，使我国梅雨带位置向东北方向移动。有研究还表明，在气候变化时间尺度上，气溶胶阻挡了到达地表的太阳辐射，引起地表冷却，导致热带水循环逐渐减慢和亚洲季风减弱<sup>[31]</sup>。

### 3.3 对雪冰的影响

大量观测研究表明，由于黑碳气溶胶对大气的加热作用，自20世纪50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>[32-33]</sup>。在当前全球变暖背景下，黑碳气溶胶沉降在雪冰表

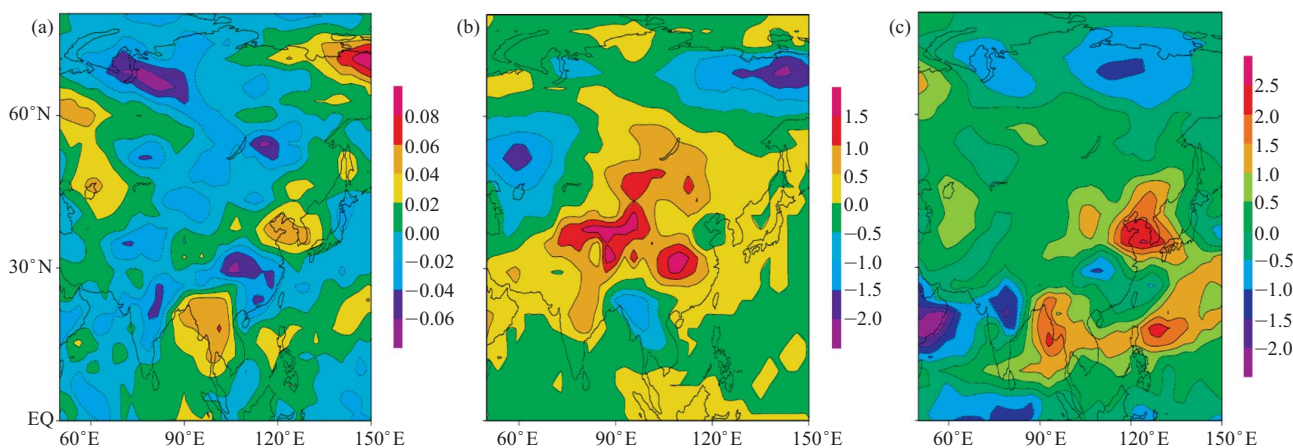


图4 碳类气溶胶对东亚夏季总云量(a)(单位: %)、地表温度(b)(单位: K)、降水(c)(单位: kg/m<sup>2</sup>)的影响<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Effects of carbonaceous aerosol on total cloud cover (a) (unit: %), surface temperature (b) (unit: K), and total precipitation (c) (unit: kg/m<sup>2</sup>) in summer in East Asia<sup>[21]</sup>

面会增强其吸收热量的能力,使冰雪温度升高,进一步加速全球冰川的融化;同时,其通过降低雪冰反照率,对全球变暖产生重要贡献<sup>[34]</sup>。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,造成本来就紧张的冰雪水资源大量浪费。

#### 4 黑碳气溶胶研究中的不确定性

首先,黑碳气溶胶的源排放、柱含量的计算、合理的气溶胶参数化方案、精确的辐射传输模式及所用的气候模式,对估算黑碳气溶胶辐射强迫及其气候效应都会产生重要影响。定量评价黑碳气溶胶对区域或全球气候变暖的贡献时,不仅需要准确知道不同地区、各种排放源产生黑碳气溶胶的可靠数据,而且还要了解其各种光学参数,如消光系数、单次散射反照率、非对称因子,以及黑碳与其他气溶胶的混合方式和混合状态等特征。要达到这一目标,我们还有相当多的实际工作要做。其次,气候模式自身的参数化方案也是造成黑碳气溶胶气候效应研究不确定的因子之一。最后,黑碳气溶胶对云凝结核或冰核的影响更是一个不确定的因子,亟待加强该方面的研究工作。

#### 5 总结与讨论

近几年国际上许多专家呼吁将黑碳的排放列入温室气体排放清单。而 Zhang 等<sup>[21]</sup>的研究指出,吸收性的黑碳和散射性的有机碳同时排入大气中,在研究黑碳气溶胶气候效应的同时,应该同时考虑有机碳的影响。他们的研究表明,用不同的气候模式来研究黑碳或碳类气溶胶的气候效应会得出不同的结论,所以,应该加强模式研究,并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,而不是用一种假定的气溶胶光学模型来给出黑碳气溶胶对中国气候变化贡献的结论。

黑碳气溶胶在大气气溶胶的气候效应中扮演着复杂而重要的角色,因此研究黑碳气溶胶的辐射强迫及其气候效应对区域或全球气候变化具有极其重要的意义,同时对保护大气环境和人体健康也具有积极作用。由于黑碳气溶胶的生命周期比较短,因此我们能够通过控制它的排放快速地达到减缓全球变暖的效果。

在未来的研究中,我们认为如下几个方面是研究的重点:完善的源排放数据的获取与分析;气溶胶表面的多相化学反应及其与其他气溶胶的混合状态的研究;黑碳气溶胶对冰川融化的影响及气候反馈;黑碳气溶胶的间接气候效应。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气候效应的不确定性。■

#### 参考文献

- [1] 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 (14203), doi:10.1029/2003JD003697
- [2] Ito A, Penner J E. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870–2000 [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, 19, GB2028, doi:10.1029/2004GB002374
- [3] 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, doi:10.1029/2006GB002840
- [4] Hansen J, Sato M, Ruedy R, *et al.* Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario [J]. *PNAS*, 1998, 97: 9875–9880
- [5] 张华, 马井会, 郑有飞. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. *大气科学*, 2008, 32 (5): 1147–1158
- [6] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature*, 2008, 1: 221–227
- [7] 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 (2): 259–264
- [8] 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

- [9] 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
- [10] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J *et al.* The Indian Ocean experiment: an integrated assessment of the climate forcing and effects of great Indo-Asian haze [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 28371–28398
- [11] 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
- [12] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [13] Highwood E J, Kinnersley R P. When smoke gets in our eyes: the multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health [J]. *Environ Intl*, 2006, 32: 560–566
- [14] Koch D, Bond T C, Streets D, *et al.* Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, doi:10.1029/2005JD007024
- [15] Chung S H, Seinfeld J H. Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107, doi:10.1029/2001JD001397
- [16] Sato M, Hansen J, Koch D, *et al.* Global atmospheric black carbon inferred from AERONET [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 6319–6324
- [17] Wild M, Gilgen H, Roesch A, *et al.* From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at the Earth's surface [J]. *Science*, 2005, 308: 847–850
- [18] Chung S H, Seinfeld J H. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110 (11102), doi:10.1029/2004JD005441
- [19] 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, doi:10.1029/2005JD006299
- [20] Gu Y, Liou K N, Xue Y, *et al.* Climatic effects of different aerosol types in China simulated by the UCLA general circulation model [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111, D15201, doi:10.1029/2005JD006312
- [21] 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
- [22] Wang C. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, D03106, doi:10.1029/2003JD004084
- [23] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, *et al.* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption [J]. *Nature*, 2007, 448: 575–578
- [24] Penner J E, Zhang S Y. Soot and smoke aerosol may not warm climate [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D21), 4657, doi:10.1029/2003JD003409
- [25] Chung C, Ramanathan V. Weakening of North Indian SST gradients and the monsoon rainfall in India and the Sahel [J]. *J Climate*, 2006, 19: 2036–2045
- [26] Chung C, Ramanathan V. Relationship between trends in land precipitation and tropical SST gradient [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, doi:10.1029/2007GL030491
- [27] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, 297: 2250–2252
- [28] Lau K M, Kim M K, Kim K M. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau [J]. *Clim Dyn*, 2005, 26 (7/8): 855–864
- [29] Lau K M, Kim K M. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall and circulation [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L21810, doi:10.1029/2006GL027546
- [30] 王志立, 张华, 郭品文. 南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响 [J]. *高原气象*, 2009, 28 (2): 419–424
- [31] Ramanathan V, Chung C, Kim D, *et al.* Atmospheric brown clouds: impacts on South Asian climate and hydrological cycle [J]. *PANS*, 2005, 102 (15): 5326–5333
- [32] Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, *et al.* Tropical glacier and ice core evidence of climate changes on annual to millennial time scales [J]. *Climatic Change*, 2003, 59: 137–155
- [33] 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: 303–309
- [34] Warren S, Wiscombe W. Dirty snow after nuclear war [J]. *Nature*, 1985, 313: 467–470

## Advances in Studies of Black Carbon Effects on Climate

Zhang Hua<sup>1</sup>, Wang Zhili<sup>1,2</sup>

(1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Black carbon (BC) aerosol can strongly absorb the solar radiation in a very broad spectral range from the visible to infrared waveband, therefore it is thought to be a potential factor that causes the global warming. BC aerosol not only alters the radiation equilibrium of the earth-atmosphere system through its direct effect, but also indirectly affects the global or regional climate through changing cloud microphysical properties by acting as cloud condensation nuclei or ice nuclei. In this paper, we reviewed the recent progresses in the studies on the radiative forcing due to BC and its climatic effects, reported the uncertainties existing in current researches, and gave some suggestions for the relevant studies in the future.

**Key words:** black carbon aerosol; radiative forcing; climate effect

### 消息

#### 令人困惑的古代气候变化

由于在全球变暖中起到了促进作用，二氧化碳被搞得声名狼藉，而且这也是罪有应得。然而，科学家们称，5500 万年前地球温度有过一次神秘的升高，但是这次升高不能完全责怪二氧化碳。新的研究显示，当时还有其他情况造成了地球的升温，只是没人知道这到底是什么样的情况。

在过去的几十年中，研究人员一直在搜集一桩神秘事件的数据资料，该事件被称为“古新世—始新世极热 (PETM)”事件。这些数据资料来自大西洋和太平洋深海海床的岩心。资料显示：在古新世—始新世极热时期，地球的表面温度在一万年之内升高达 9℃，而那个时期一开始就比当今地球的温度还要高，升温之后一直保持了近十万年的高温水平。

从表面上来看，罪魁祸首好象是二氧化碳。不知是什么原因，古新世—始新世极热时期大气中的二氧化碳浓度从 1000 mL/m<sup>3</sup> 上升到 1700 mL/m<sup>3</sup>，比当今的二氧化碳浓度水平 (385 mL/m<sup>3</sup>) 高出 4 倍。

但是，新一轮分析并不完全支持这个设想。夏威夷马诺大学的海洋学家理查德·齐伯 (Richard Zeebe) 及同事以沉积物岩心提供的数据资料为基础，进行了海洋和大气的碳循环模拟。他们甚至还进行了以下模拟：把古新世—始新世极热时期二氧化碳水平加倍 (达 2000 mL/m<sup>3</sup>)，提高大气的敏感性，看看全球气温会发生什么变化。不久前，研究人员在《自然—地球科学》(Nature Geoscience) 杂

志在线版上报道说，模拟所获得的最大升温值是 3.5℃。研究小组称，这意味着一定是某种其他的现象将温度提升了多达 5.5℃。因此，目前这种莫名其妙的温度升高给研究人员的理解造成了缺憾，无法使他们彻底明白是什么引起了重大而急剧的气候变化，

“有可能其他的温室气体 (如甲烷) 对全球变暖起到了促进作用”，齐伯说。也有可能这些模拟低估了气候对二氧化碳升高的敏感性。“如果情况是这样，那就意味着我们对气候系统的理解并不到位”，他说。

现在齐伯的研究小组正在关注古新世—始新世极热时期之后几百万年之内所发生的较小的变暖事件。“我们目前正在努力，希望能够发现这些较小的变暖事件是否也由相同的机制引起”，齐伯说。他们的想法是要确定古新世—始新世极热时期的变暖特点是唯一的还是普遍的。

印第安纳州普渡大学西拉法叶分校的地球化学家加布里埃尔·鲍恩 (Gabriel Bowen) 赞成这项研究。“长期以来，我们有一种直觉：古新世—始新世极热时期的气候反应有些可疑”，他说，“这项研究推翻了该观点：古新世—始新世极热时期的气候只对二氧化碳有所反应。”鲍恩还指出：“现在我们面临的紧急挑战是，找出那次事件中进一步提高气温幅度的因素，然后搞清楚这对于地球的未来意味着什么。”

邢台学院外语系 胡德良译自：美国《科学》杂志网站  
原作者：Phil Berardelli