

田军, 王体健, 庄炳亮, 等. 2013. 南京北郊黑碳气溶胶的浓度观测及辐射强迫研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 662–670, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12042. Tian Jun, Wang Tijian, Zhuang Bingliang, et al. 2013. Study on concentration and radiative forcing of black carbon aerosol in suburban Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 662–670.

南京北郊黑碳气溶胶的浓度观测及 辐射强迫研究

田军¹ 王体健¹ 庄炳亮¹ 姜爱军² 刘冬晴²

¹ 南京大学大气科学学院, 南京 210093

² 南京市气象局, 南京 210019

摘 要 利用 2008 年南京大学浦口校区气溶胶采样数据对碳气溶胶的浓度变化特征进行了分析, 建立了由气溶胶光学参量计算模块 (OPAC) 和辐射传输模型 (TUV) 组成的箱模式, 并结合实际观测资料, 利用该模式对南京北郊黑碳气溶胶的光学厚度及辐射强迫进行了评估。结果表明: 南京北郊黑碳气溶胶 (BC) 的年平均浓度为 $6.7 \pm 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 有机碳气溶胶 (OC) 的年平均浓度为 $21.3 \pm 13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 有机碳与黑碳气溶胶浓度的平均比值为 3.4。黑碳气溶胶浓度具有夏季低、冬春季高的特点。由箱模式计算得到的黑碳气溶胶的年均光学厚度为 0.07, 年均吸收系数为 44 Mm^{-1} 。白天正午晴空条件下黑碳所造成的最大瞬时地面辐射强迫可达 $-22.9 \pm 14.3 \text{ W}/\text{m}^2$, 在大气层顶造成的最大瞬时辐射强迫为 $12.5 \pm 7.3 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

关键词 黑碳气溶胶 光学参量计算模块 (OPAC) 辐射传输模型 (TUV) 辐射强迫

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0662-09

中图分类号 P422.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12042

Study on Concentration and Radiative Forcing of Black Carbon Aerosol in Suburban Nanjing

TIAN Jun¹, WANG Tijian¹, ZHUANG Bingliang¹, JIANG Aijun², and LIU Dongqing²

¹ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

² Nanjing Meteorology Bureau, Nanjing 210019

Abstract Black carbon (BC) is one of the most important absorbent aerosols in the atmosphere, and it has a significant impact on climate change. This study analyzed the concentration and seasonal variation of carbonaceous aerosols sampled on the Pukou campus of Nanjing University in 2008. With a box model coupled with OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) and TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible radiation model), the optical thickness and radiative forcing of BC were estimated on the basis of the sampling data. Investigations showed that the average concentrations of BC and organic carbon (OC) are $6.7 \pm 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $21.3 \pm 13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, and the average ratio of OC/BC is 3.4. The mass concentration of BC is higher in winter and fall but lower in summer. The model calculation suggests that the annual mean optical depth and absorbing coefficient of BC are 0.07 and 44 Mm^{-1} , respectively. In a clear sky at noon, BC has a maximum instantaneous direct radiative forcing of $-22.9 \pm 14.3 \text{ W}/\text{m}^2$ at the surface and $12.5 \pm 7.3 \text{ W}/\text{m}^2$ at the top of the atmosphere.

收稿日期 2012-03-14 收到, 2013-01-20 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB428503、2011CB403406, 国家科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206011-1、GYHY200806001-06, 国家人才培养基金项目 J1103410

作者简介 田军, 男, 1988 年出生, 硕士, 主要从事气溶胶光学特性及光化学烟雾模拟研究。Email: tianjun24@126.com

Keywords Black carbon aerosol, Optical properties of aerosols and clouds (OPAC), TUV, Radiative forcing

1 引言

碳质气溶胶(carbonaceous aerosol)是对气溶胶中含碳化学成分的总称,根据其存在形式,主要可分为黑碳气溶胶(Black Carbon, BC, 也称煤烟)和有机碳气溶胶(Organic Carbon, OC)。这两类碳气溶胶在光学性质方面有着明显的区别,黑碳气溶胶对太阳辐射有较强的吸收作用,而有机碳气溶胶则主要散射太阳辐射(朱厚玲, 2003)。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,对全球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(主要来自化石燃料和生物燃料燃烧)的贡献却是长期且持续的。随着交通工具的日益发展,由汽车尾气排放的黑碳气溶胶排放已成为城市黑碳气溶胶的重要来源。

近年来,黑碳气溶胶的气候效应备受关注,它对气候的影响主要体现为两种方式:一种是通过光学散射和光学吸收,直接产生辐射强迫;另一种是通过云物理过程影响云凝结核、云反照率等要素间接影响辐射强迫。Jacobson (2002) 研究发现,黑碳气溶胶的直接辐射强迫高达 0.5 W/m^2 ,其对全球变暖的贡献仅次于二氧化碳。Menon et al. (2002) 认为中国近 50 年来的南涝北旱与黑碳吸收太阳短波辐射、改变整个大气的环流结构有关。研究黑碳气溶胶的气候效应,需要建立相应的源排放清单。Bond et al. (2004) 建立了全球 BC 和 OC 的排放清单; Streets et al. (2001) 估算了中国大陆地区的黑碳排放; Streets et al. (2003) 建立了东亚地区污染气体和一次气溶胶的源排放清单,并在全球建立气溶胶观测网,实施对包括黑碳在内的气溶胶观测,以研究其空间分布和季节变化特征。

国内对黑碳气溶胶的研究起步较晚,主要关注黑碳的源排放(曹国良等, 2006)、浓度的时空分布以及变化特征(汤洁等, 1999; 许黎等, 2007)以及黑碳气溶胶的直接效应(吴润和符淙斌, 2005)。庄炳亮等(2009)将区域气候模式(RegCM)与对流层大气化学模式(TACM)耦合,模拟研究了中国地区黑碳气溶胶的空间分布和第一间接辐射强迫及其气候效应。在研究黑碳气溶胶气候效应

的过程中,还存在许多不确定性,如由于黑碳气溶胶源汇的多变性导致建立准确的源排放清单比较困难,再加上缺乏系统的观测,很难得到实际的黑碳谱分布、浓度垂直分布、光学特性以及混合方式等方面的数据(许黎等, 2007),而这些资料对于准确模拟估计黑碳气溶胶的气候效应至关重要。碳气溶胶观测方面, Cao et al. (2003) 于 2001 年冬季在珠三角几个主要城市进行了碳气溶胶的观测,并分析了其浓度特征。Zhang et al. (2007) 分析了 2006 年全国 18 个站(包括乡村站、城市站、背景站)的碳气溶胶浓度,为研究全国碳气溶胶分布提供了重要依据。

本文针对南京北郊开展碳气溶胶的采样和观测,从实际观测资料入手,通过引入由气溶胶光学参量计算模块和辐射传输模型组成的箱模式,计算黑碳气溶胶的光学厚度及其所引起的直接辐射强迫,为进一步认识黑碳气溶胶的气候效应提供依据。

2 资料及方法

2.1 站点说明和数据采集

南京大学浦口观测场($32^{\circ}03'N$, $118^{\circ}78'E$, 图 1 五角星位置)位于南京市浦口高新技术开发区内,紧邻交通主干道,距南京市主要的钢铁、化工园区不到 6 km。采样站点选取在开阔的山坡,周围以农作物和草地为主,仪器架设在距地面 3.5 m 的平台上,受局地人为源影响较小,因此采样数据具有较好的代表性。

观测仪器为美国 AIRMETRICS 便携式空气采样器,采样滤膜是 47 mm Teflon 滤膜,采样时间从 2008 年 1 月持续到 2008 年 12 月,每周二和周四采样,每次持续 24 h,如遇到下雨等不利天气则停止观测。所有采样膜都避光保存,并由中国气象局大气成分中心进行分析,排除特殊气象条件、缺测等因素,最终得到了 76 个有效样本数据。2008 年南京地区地面气温、气压、相对湿度、风速等常规气象要素观测资料来自美国怀俄明大学的气象数据网站(<http://weather.uwyo.edu/> [2010-04-19])。

2.2 模式介绍

OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds)



图1 观测站点及周边污染源分布

Fig. 1 The location and industrial pollution sources around the observation site

(Hess et al., 1998) 是由德国慕尼黑大学和马克斯普朗克气象学研究所 (MPI) 开发的气溶胶与云光学特性程序包。该软件包的气溶胶基本组分是在 Shettle et al. (1979)、Deepak and Gerber (1983) 以及 d'Almeida et al. (1991) 的研究基础上对全球气溶胶数据集 GADS 中的气溶胶组分稍作修改得到的。

OPAC 中气溶胶颗粒物的谱分布采用对数正态分布:

$$\frac{dN_i(r)}{dr} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi r \log \sigma_i \ln 10}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log r_{\text{mod } N, i}}{\log \sigma_i} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中, $r_{\text{mod } N, i}$ 为组分 i 的模半径, σ_i 为谱分布的宽度, N_i 为组分 i 的粒子数密度 (单位: cm^{-3}), OPAC 中黑碳气溶胶 $r_{\text{mod } N}$ 为 $0.0118 \mu\text{m}$, σ 为 2.0。在计算气溶胶光学厚度时, 需要用到气溶胶粒子数浓度的垂直分布, 但是由于缺乏相关的观测资料, OPAC 中采用气溶胶浓度的垂直廓线 (公式 2), 以实际观测的地面浓度资料为基础, 推导出气溶胶数浓度的垂直分布。

$$N(h) = N(0)e^{-\frac{h}{Z}}, \quad (2)$$

其中, h 代表了离地高度 (单位: km), Z 是大气标高, 模式默认为 8 km , $N(0)$ 为地面气溶胶数浓度。根据廓线函数公式 (2), 可以由地面气溶胶浓度积分算出它的柱浓度。

OPAC 内含 10 种气溶胶在 8 种相对湿度条件下

的微物理和光学特性数据, 波长范围为 $0.25 \sim 40 \mu\text{m}$ 。光学参数包括消光系数、散射系数、吸收系数、单次散射反照率、非对称因子等。此外根据实际情况, OPAC 还可以计算不同气溶胶成分外混合得到的光学特性。

TUV (Troposphere Ultraviolet and Visible radiation model) 是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的对流层紫外和可见光波段辐射传输模式 (Madronich and Flocke, 1999)。该模式利用离散坐标法求解辐射传输方程, 对辐射传输路径上的各种消光作用均有较为详细的考虑, 可以计算波长范围 $121 \sim 1000 \text{ nm}$ 的太阳入射辐射强度、光化学辐射通量、光解速率系数等多种辐射量。TUV 目前被广泛应用于 CMAQ、WRF-CHEM、MOZART-4 等区域和全球大气化学模式中。主要的输入参数: 经度、纬度、日期、时间; 波长和高度; 地面参数: 地面反照率、气压、臭氧的柱含量; 云和气溶胶的参量: 光学厚度、单次散射反照率、不对称因子。

3 浓度变化特征分析

基于 2008 年 76 组样本的分析结果, 统计了各成分的浓度年均值、方差、最大值和最小值 (表 1)。TC (=OC+BC)、OC、BC 年均浓度和标准差分别为 $28.3 \pm 17.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $21.3 \pm 13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $6.7 \pm 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, OC 浓度 (OCC) /BC 浓度 (BCC) 年均均为 3.4。

表 1 2008 年碳气溶胶样本的统计

Table 1 The statistics of carbonaceous aerosol sample during 2008

	TCC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OCC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BCC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OCC/BCC
最大值	83.1	57.5	25.6	6.8
最小值	7.3	5.5	1.3	2.0
平均值	28.3	21.3	6.7	3.4
标准差	17.4	13.3	4.6	0.3

注：TCC 表示 TC 的浓度。

表 2 给出了南京 2008 年碳气溶胶平均浓度与其他城市的对比情况，南京碳气溶胶的浓度在全国处于中等偏上的水平。从全国范围来看，碳气溶胶的浓度分布存在明显的地域特征，主要表现为内陆地区大于沿海城市，这主要和能源结构、大气扩散条件以及天气形势等因素有关。从季节上来看，冬季碳气溶胶的浓度远大于夏季，北京、广州、深圳、珠海、香港等城市冬季 OC、BC 浓度约为夏季浓度的 2 倍。

表 2 全国不同城市碳气溶胶观测结果统计

Table 2 The statistics of observed carbonaceous aerosol in different cities of China

地点	采样时间	OCC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BCC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OCC/ BCC	参考文献
北京	2002 年 9~11 月	21.2	7.3	3	Duan et al. (2005)
	2001 年夏季	10.7	5.7	2.2	Mo et al. (2004)
	2002 年冬季	36.7	15.2	3.5	Mo et al. (2004)
	1999 年 7 月~ 2000 年 6 月	23.9	8.79	2.9	Yang et al. (2005)
上海	1999 年 3 月~ 2000 年 3 月	14.6	6.1	2.5	Yang et al. (2005)
	2005 年 12 月~ 2006 年 2 月	28.9	4.8	7	Meng et al. (2007)
西安	2003 年 12 月~ 2004 年 2 月	61.9	12.3	5.1	Cao et al. (2005)
	2006 年春季和 秋季	57.5	8.3	4.8	Ye et al. (2007)
广州	2001 年冬季	22.6	8.3	2.7	Cao et al. (2003)
	2002 年夏季	15.8	5.9	2.7	Cao et al. (2003)
深圳	2001 年冬季	13.2	6.1	2.2	Cao et al. (2003)
	2002 年夏季	7.6	4.2	1.8	Cao et al. (2003)
珠海	2001 年冬季	12.2	5	2.5	Cao et al. (2003)
	2002 年夏季	5.4	1.9	2.9	Cao et al. (2003)
香港	2001 年冬季	9.6	4.7	2.3	Cao et al. (2003)
	2002 年夏季	5.3	3.2	1.9	Cao et al. (2003)
背景站	2006 年	3	0.35	8.5	Zhang et al. (2007)
区域站	2006 年	16.1	3.6	4.5	Zhang et al. (2007)
城市站	2006 年	33.1	11.2	3.0	Zhang et al. (2007)
南京浦口	2008 年	21.3	6.7	3.4	本文工作

图 2 反映了碳气溶胶浓度的逐月变化情况。图 2a 中 1 月 BC 月平均浓度达到最大 ($12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，其余月份变化平缓，全年平均值为 $6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。与 BC 不同，OC 浓度在 5、6 月又出现了一个明显的峰值，可能与周边地区秸秆燃烧有着一定的联系。TC 月平均浓度于 1 月份达到最大 ($47.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，9 月份最低 ($17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，年均值为 $28.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图 2b 和图 2c 可以看出 OC 与 TC 的浓度变化趋势几乎一致，表明 OC 是 TC 的重要组成部分。

图 3 显示了 OCC/BCC 的月变化情况，5 月份 OCC/BCC 值最大 (3.72)，8 月份最小 (2.41)，全年平均值为 3.45。若以 $\text{OCC/BCC} > 2$ 为二次污染的判断依据 (Chow et al., 1996)，则浦口站全年皆存在不同程度的二次污染，其中 1 月和 5 月污染最为严重，7、8 月份较轻。

图 4 为 OC、BC 浓度的散点图，OC、BC 两者存在明显的正相关，对应相关系数为 0.86 (经检验满足 $n-2$ 的 t 分布)，表明二者具有一定的同源性。

4 辐射特性估计

4.1 箱模式参数的设置

OPAC 输入参数包括：气溶胶的类型、混合层高度、光谱波段 (共 61 个)、相对湿度 (分 8 档：0%、50%、70%、80%、90%、95%、98%、99%)，在实际应用中需要根据实时气象资料计算并更新相对湿度及混合层高度。由于模式只考虑 8 种相对湿度条件，计算时选择与实际相对湿度最接近的分档相对湿度作为参数输入。混合层高度的计算需要利用南京地面气象观测数据，按照罗氏法 (史慧敏和沈觉成，1992) 来估计。

$$H = \frac{121}{6} (6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (3)$$

其中， H 为计算的平均混合层高度 (单位：m)； $T - T_d$ 为露点温度差； P 为 Pasquill 稳定度级别的取值； U_z 为 z 高度处所观测的平均风速 (单位：m/s)； z_0 为地面粗糙度，一般根据地表粗糙情况和城市大小来取值，乡村取 0.03~0.2 m，市区取 0.8~2.0 m，由于浦口站位于南京市近郊，本文取值为 0.4 m， f 为地转参数。根据国标规定的稳定度分级方法，利用南京市 2008 年的地面气象观测资料计算得到采样

期间的稳定度级别(图 5a),再通过公式(3)计算得到正午的混合层高度(图 5b),结果表明秋季正

午混合层高度较低,平均高度为 825 m,而春季平均高度可以达到 1573 m。

TUV 主要的输入参数包括:经纬度(32.03°N, 118.78°E)、日期时间、波段划分(280~1000 nm, 分为 200 个波段)、高度、实际的气压、臭氧的柱含量(本文设为固定值 300 DU)。光学厚度、单次散射反照率、不对称因子由 OPAC 气溶胶光学模块提供。

4.2 光学厚度及辐射强迫

实际情形下,大气气溶胶非常复杂,除了黑碳气溶胶外还有很多其它散射和吸收性气溶胶(硫酸

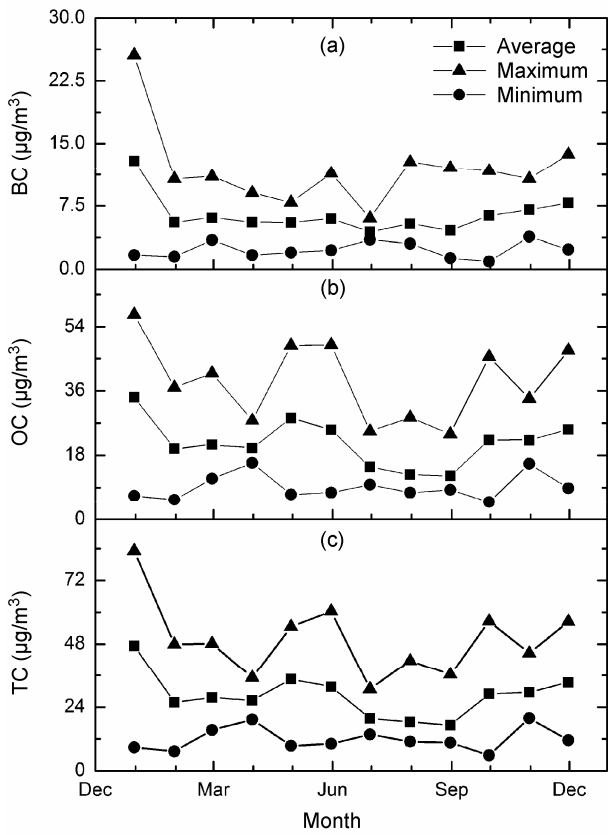


图 2 碳气溶胶的月平均浓度变化情况: (a) BC; (b) OC; (c) TC
Fig. 2 Monthly average concentration of carbonaceous aerosols: (a) BC (Black Carbon); (b) OC (Organic Carbon); (c) TC (BC+OC)

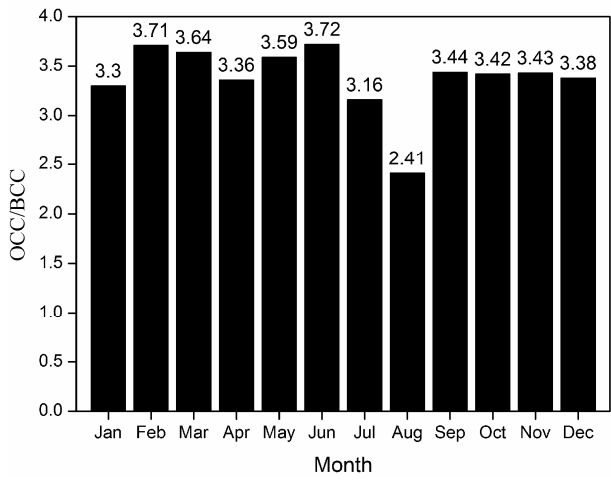


图 3 OCC/BCC 月变化
Fig. 3 Monthly variation of aerosol concentration ratio of OC to BC

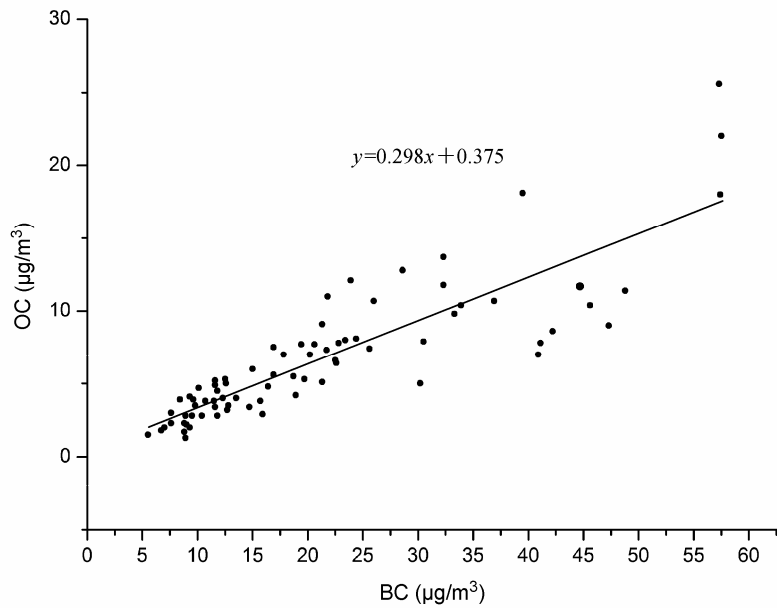


图 4 OC、BC 浓度的散点图
Fig. 4 Scatter plot of OC and BC concentrations

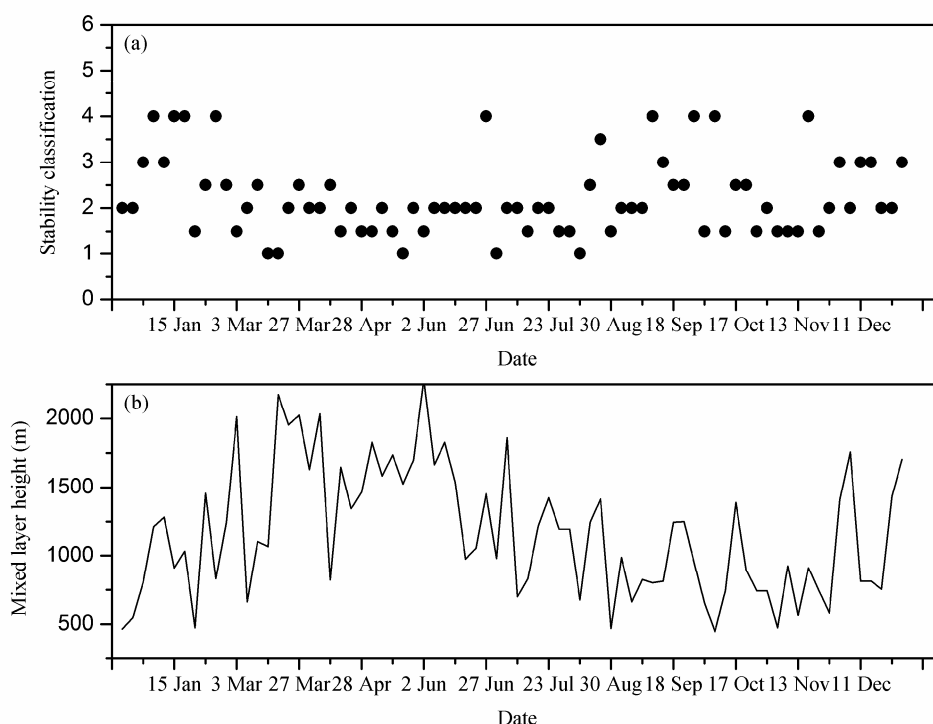


图5 观测期间每日中午12:00(北京时间,下同)(a)稳定性和(b)混合层高度

Fig. 5 (a) The atmosphere stability and (b) mixing layer height at 1200 LST during the observational days

盐、硝酸盐等),但是本次观测缺乏其他气溶胶成分的数据,为了使得计算更接近实际情况,本文在计算BC所造成的辐射强迫时,选用OPAC中默认的大陆平均气溶胶作为背景气溶胶,并以此设计了两个对比方案:方案1只考虑大陆平均气溶胶,方案2在大陆平均气溶胶的基础上,加入实际观测的黑碳气溶胶浓度。最后通过方案2与方案1计算的辐射通量差值来反映黑碳气溶胶对太阳辐射的影响。

一般情况下,气溶胶在550 nm的光学特性能够代表其在整个短波谱段消光的平均状况(马井会等,2007)。因此本文将之前计算得到的混合层高度、两种方案下的气溶胶数浓度以及相对湿度作为OPAC的输入参量,计算550 nm波段的光学参数(图6a),再把计算结果作为TUV的输入条件,评估其对太阳辐射的影响(图7)。从图6a中可以很明显地看出,冬春季黑碳气溶胶引起了光学厚度的大幅度增加,其中1月的月均光学厚度增加了0.09。图6b给出的是方案2计算得到的光学参数,在考虑黑碳的情况下,年均散射系数为 80 Mm^{-1} ,年均吸收系数为 50 Mm^{-1} ,年均单次散射反照率为0.63。Shih(1999)通过对气溶胶光学性质的长期观测,得出香港的SSA年平均值为0.72。柯宗建

(2004)研究得到上甸子单次散射反照率平均值为 0.847 ± 0.06 ,临安单次散射反照率平均值为 0.719 ± 0.07 ,该研究认为临安地区的单次反照率相对较低,原因可能是当地乡镇企业这几年发展迅速,黑碳排放量逐年增加,吸收系数增大,而观测到的散射系数略有减小,最终使得单次散射反照率相对较小。本文计算结果较临安和上甸子的观测值偏低,可能的原因在于设计数值试验时将大陆平均气溶胶作为背景气溶胶,存在对硫酸盐等强散射型气溶胶浓度的低估,造成了单次散射反照率的偏低。

将前面得到的光学厚度、单次散射反照率、非对称因子以及下垫面参数作为TUV的输入条件,计算280~1000 nm之间各波段的辐射通量,然后通过积分得到整个波段范围内的净辐射通量,结果如图7所示。整个净辐射与太阳高度角有很好的 consistency,太阳高度角越大,净辐射通量越大。图7a和图7b对比可知,因为黑碳的吸收作用,增加了大气层顶净辐射,对高层大气有增暖作用,计算得到大气层顶的辐射强迫达 $12.5 \pm 7.3 \text{ W/m}^2$,BC对地面辐射有明显的削弱作用,计算得到地面的辐射强迫达到 $-22.9 \pm 14.3 \text{ W/m}^2$ 。Zhuang et al.(2010)利用耦合的区域气候化学耦合模拟系统RegCCMS对

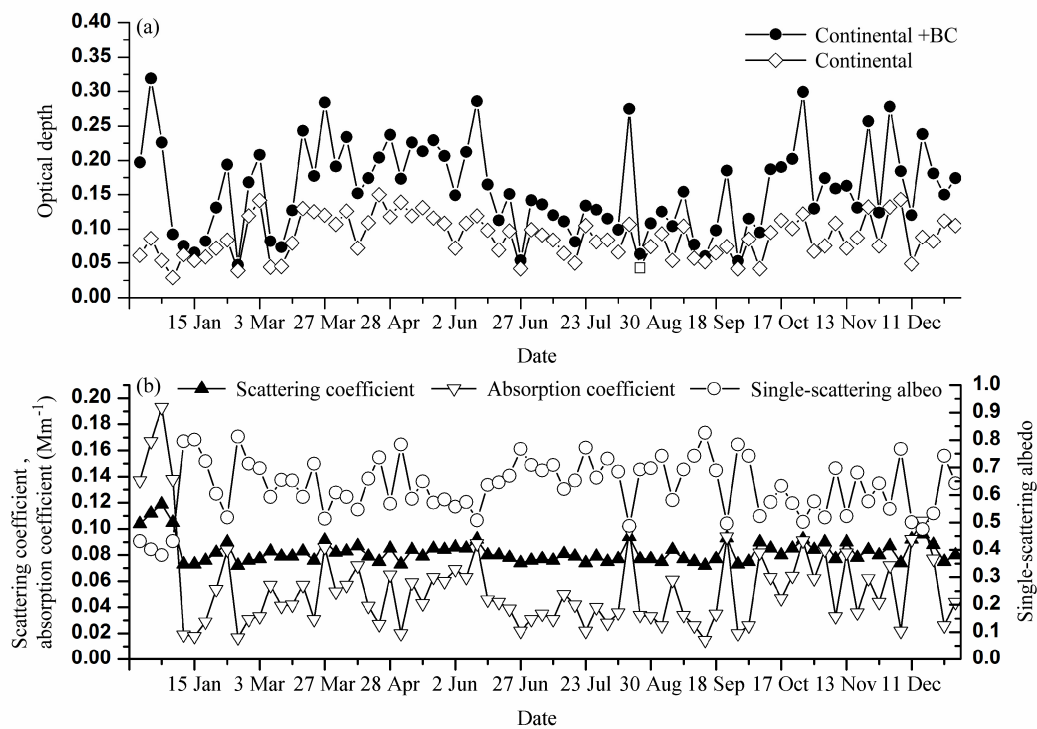


图 6 观测期间白天 (a) 方案 1 (Continental) 与方案 2 (Continental+BC) 计算得到的光学厚度 (b) 方案 2 计算得到的光学参数
Fig. 6 (a) The optical depth of case 1 (Continental) and case 2 (Continental+BC) and (b) the optical parameters of case 2 during the daytime

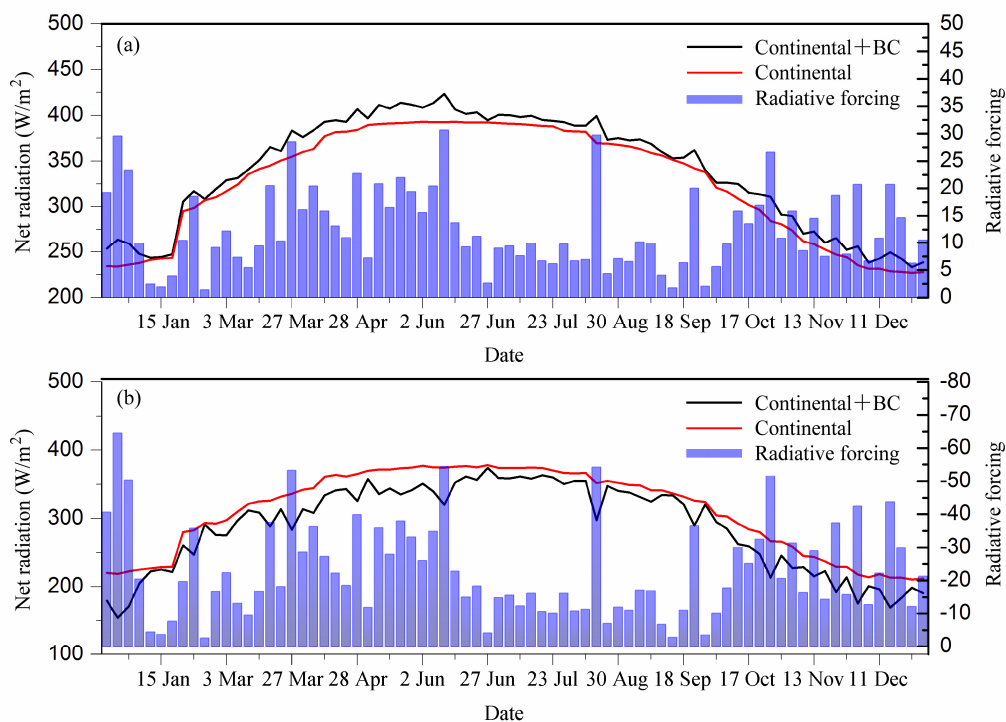


图 7 方案 1 (Continental) 和方案 2 (Continental+BC) 模拟得到的净辐射通量以及 BC 引起的辐射强迫: (a) 大气层顶; (b) 地面
Fig. 7 The calculated net radiation flux of case 1, case2, and radiative forcing of BC at (a) the top of atmosphere and (b) the surface

中国地区 2006 年黑碳气溶胶的直接辐射强迫进行了模拟, 结果表明南京区域晴空大气顶的辐射强迫为 $4 \sim 5 \text{ W/m}^2$, 地面辐射强迫为 $-14 \sim -11 \text{ W/m}^2$ 。

本文估计结果相对偏大, 原因可能是计算的是黑碳在正午 12:00 造成的辐射强迫, 该值为一天中的最大值, 而 Zhuang et al. (2010) 模拟得到的是 BC 年

日均辐射强迫。

5 结论

通过分析南京北郊南京大学浦口气象园 2008 年 BC、OC 气溶胶的观测资料, 并利用 OPAC 和 TUV 模式对黑碳气溶胶的光学特性参数和辐射强迫进行评估, 得出结论如下:

(1) 南京北郊 BC 年均浓度为 $6.7 \pm 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, OC 年均浓度为 $21.3 \pm 13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, BC 浓度具有明显的季节变化特征, 夏季浓度低, 冬春季浓度高。1 月黑碳气溶胶浓度最高, 达到 $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 7 月浓度最低, 仅为 $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。BC、OC 有着很好的相关性, 表明两者具有一定的同源性。OCC/BCC 年均值为 3.4, 最高值出现在 5 月, 可能与秸秆燃烧有关。

(2) OPAC 模拟结果表明, 南京北郊黑碳气溶胶的年均光学厚度为 0.07, 年均吸收系数为 44 Mm^{-1} 。在黑碳气溶胶浓度最高的 1 月, 吸收系数达 100 Mm^{-1} , 而单次散射反照率仅为 0.56, 为全年最低。

(3) TUV 模拟结果表明, 南京北郊黑碳气溶胶正午地面辐射强迫为 $-22.9 \pm 14.3 \text{ W}/\text{m}^2$, 在大气层顶引起的辐射强迫为 $12.5 \pm 7.3 \text{ W}/\text{m}^2$, 该值反映了黑碳气溶胶对太阳辐射造成的极端影响。

参考文献 (References)

- Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697.
- 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 2006. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (6): 259–264. Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang, et al. 2006. Inventory of black carbon emission from China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 2 (6): 259–264.
- Cao J J, Lee S C, Ho F K, et al. 2003. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta region, China during 2001 winter period [J]. *Atmos. Environ.*, 37: 1451–1460.
- Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5: 3127–3137.
- Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, et al. 1996. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmos. Environ.*, 30 (12): 2079–2112.
- d'Almeida G, Koepke P, Shettle E. 1991. *Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics* [M]. Hampton, VA: Deepak Publishing.
- Deepak A, Gerber H. 1983. Report of the Experts Meeting on Aerosols and Their Climatic Effects Williamsburg, VA, 28–30 March 1983 [R]. Williamsburg: World Meteorological Organization.
- Duan F K, He K B, Ma Y L, et al. 2005. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. *Chemosphere* 60, 355–364.
- Hess M, Koepke P, Schult I. 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (5): 831–844.
- Jacobson M Z. 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter possibly the most effective method of slowing global warming [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D19): 4410.
- 柯宗建. 2004. 我国东部地区气溶胶光学特性观测研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文: 51–54. Ke Zongjian. 2004. The Observation study of aerosol optical properties of eastern part of China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Science: 51–54.
- 马井会, 郑有飞, 张华. 2007. 黑碳气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. *气象科学*, 27 (5): 549–556. Ma Jinghui, Zheng Youfei, Zhang Hua. 2007. The optical depth global distribution of black carbon aerosol and its possible reason analysis [J]. *Journal of the Meteorology Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 549–556.
- Madronich S, Flocke S. 1999. The Role of Solar Radiation in Atmospheric Chemistry [M]. Germany: Springer-Verlag, 1–26.
- Meng Z Y, Jiang X M, Yan P, et al. 2007. Characteristics and sources of PM_{2.5} and carbonaceous species during winter in Taiyuan, China [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 6901–6908.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 297: 2250–2253.
- Mo D, Zhuang G S, Li X X, et al. 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 3443–3452.
- 史慧敏, 沈觉成. 1992. 南京北郊低空污染气象条件若干特征 [J]. *地理研究*, 11 (2): 60–67. Shi Huimin, Shen Juecheng. 1992. The features of the meteorological conditions for low-level pollution in northern suburbs of Nanjing, China [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 11 (2): 60–67.
- Shettle E P, Fenn R W. 1979. Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties [R]. National Center for Atmospheric Research.
- Shih M Y. 1999. Light scattering and absorption Properties of aerosols in the Hong Kong region [D]. M. S. thesis, Hong Kong Polytechnic University.
- Streets D G, Gupta S, Waldhoff T S, et al. 2001. Black carbon emissions in China [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 4281–4296.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D21): 8809, doi: 10.1029/2002JD003093.
- 汤洁, 温玉璞, 周凌晞. 1999. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *应用气象学报*, 10 (2): 160–170. Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi. 1999. Observational study of black carbon in clean air area of Western China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 10 (2): 160–170.
- 吴润, 符淙斌. 2005. 近五年来东亚春季黑炭气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究 [J]. *大气科学*, 29 (1): 111–119. Wu Jian, Fu Congbin.

2005. Simulation research of distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol in recent five spring seasons over East Asia region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 111–119.
- 许黎, 王亚强, 罗勇, 等. 2007. 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, 3 (6): 328–333. Xu Li, Wang Yaqiang, Luo Yong, et al. 2007. Research progress in climate effects of black carbon aerosol and its expanding fields [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (6): 328–333.
- Yang F, He K, Ye B, et al. 2005. One-year record of organic and elemental Carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 5: 1449–1457.
- Ye D, Zhao Q, Jiang C T, et al. 2007. Characteristics of elemental Carbon and organic Carbon in PM10 during spring and autumn in Chongqing, China [J]. China Particuology, 5: 255–260.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, et al. 2007. Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006 [J]. J. Geophys. Res., 113, D14111, doi: 10.1029/2007JD009525.
- 朱厚玲. 2003. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Zhu Houling. 2003. The study on the temporal and spatial distribution of black carbon in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Science.
- 庄炳亮, 王体健, 李树. 2009. 中国地区黑碳气溶胶的第一间接辐射强迫与气候效应 [J]. 高原气象, 28 (5): 1095–1104. Zhuang Bingliang, Wang Tijian, Li Shu. 2009. The first indirect radiative forcing of black carbon aerosol and its effect on regional climate of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (5): 1095–1104.
- Zhuang B L, Jiang F, Wang T J. 2010. Investigation on the direct radiative effect of fossil fuel black-carbon aerosol over China [J]. Theor. Appl. Climatol., 104: 301–312.