氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

近十年北京气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究

唐利琴 胡波 刘慧 赵舒曼 刘俊卿

Aerosol Optical Properties and Direct Radiative Forcing in Beijing in the Recent Decade

TANG Liqin HU Bo LIU Hui ZHAO Shuman LIU Junqing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20057

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

秸秆燃烧对北京秋季气溶胶浓度和短波辐射影响的模拟研究

A Modeling Investigation of the Impact of Crop Residue Burning on Aerosol Concentration and Shortwave Radiation in Beijing in Autumn

气候与环境研究. 2019, 24(3): 369 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18154

CMIP6情景中主要温室气体和气溶胶排放强度的时空分布特征分析

SpatialTemporal Characteristics of the Emission Intensities of Several Major Greenhouse Gases and Aerosols under CMIP6 Scenarios

气候与环境研究. 2020, 25(4): 366 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20005

一个适用于地球系统模式()的在线气溶胶与大气化学分量模式()的发展与评估

Development and Evaluation of the Online Aerosol and Atmospheric Chemistry Model for the Chinese Academy of Sciences Earth System Model

气候与环境研究. 2020, 25(1): 1 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19073

基于气象要素的气溶胶吸湿增长分析：以浙江省为例

Analysis of Aerosol Hygroscopic Growth Based on Meteorological Factors: A Case Study of Zhejiang Province

气候与环境研究. 2019, 24(2): 186 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17142

山西夏季气溶胶散射特征的飞机观测研究

气候与环境研究. 2019, 24(4): 482 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18020

基于腔减相移光谱技术测量大气气溶胶消光系数的应用研究

An Application Study on Measurement of Atmospheric Aerosol Extinction Coefficient Based on Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy Technique

气候与环境研究. 2017, 22(1): 108 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16084

关注微信公众号，获得更多资讯信息

唐利琴, 胡波, 刘慧, 等. 2021. 近十年北京气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究 [J]. 气候与环境研究, 26(2): 155−168. TANG Liqin, HU Bo, LIU Hui, et al. 2021. Aerosol Optical Properties and Direct Radiative Forcing in Beijing in the Recent Decade [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (2): 155−168. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20057

近十年北京气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究

唐利琴[1] 胡波[2] 刘慧[3] 赵舒曼[2] 刘俊卿[1]

1 西藏自治区人工影响天气中心，拉萨 850000
2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029
3 陕西省气象台，西安 710000

摘 要 利用 SBDART（Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer）辐射传输模式，结合 AERONET（Aerosol Robotic Network）北京站观测的气溶胶光学特性数据，评估北京地区近十年气溶胶以及黑碳气溶胶的辐射强迫，主要研究结果如下：北京近十年气溶胶平均光学厚度（aerosol optical depth, AOD_{440nm}）为 0.61±0.56，Ångström 波长指数均值为 1.09，单次散射反照率（single scattering albedo, SSA_{440nm}）的均值为 0.888±0.045；AOD 呈现下降趋势，SSA 呈上升趋势，表明该区域气溶胶污染有所改善。晴空条件下，大气层顶、地面和大气的气溶胶直接辐射强迫多年均值分别为−24.91±19.80 W m^{-2}、−65.52±43.78 W m^{-2}、40.61±28.62 W m^{-2}，即气溶胶对大气层顶和地表为冷却效应，对大气产生加热作用。气溶胶和黑碳气溶胶的直接辐射强迫绝对值的年际变化表现为微弱的下降趋势，季节变化特征为春夏季高，冬季低，这与 AOD 的变化规律一致。并且黑碳气溶胶的直接辐射强迫下降趋势与 SSA 的上升趋势呈现较好的反位相关系。

关键词 SBDART 模式 气溶胶 光学特性 黑碳 辐射强迫
文章编号 1006-9585(2021)02-0155-14 **中图分类号** P401 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20057

Aerosol Optical Properties and Direct Radiative Forcing in Beijing in the Recent Decade

TANG Liqin[1], HU Bo[2], LIU Hui[3], ZHAO Shuman[2], and LIU Junqing[1]

1 *Center of Weather Modification in Tibet Autonomous Region*, *Lhasa* 850000
2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *Shaanxi Meteorological Observatory*, *Xi'an* 710000

Abstract Combined with the aerosol optical characteristic data observed by Aerosol Robotic Network (AERONET) Beijing station, the Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) radiation transmission mode was used to evaluate the radiative forcing of aerosols and black carbon (BC) aerosols in Beijing in the recent decade. The main results are as follows: The mean values of aerosol optical depth (AOD) for 440 nm and Ångström exponent are 0.61±0.56 and 1.09, respectively, while the mean value of single scattering albedo (SSA) for 440 nm is 0.888±0.045. AOD shows a slight decreasing trend in the recent decade, but SSA shows a slight increasing trend, indicating that aerosol pollution in Beijing has improved. Under clear sky conditions, the annual radiative forcing values of the aerosol at the top

收稿日期 2020-05-06；**网络预出版日期** 2020-09-22
作者简介 唐利琴，女，1992 年出生，硕士研究生，从事大气辐射和人工影响天气预报指挥方向研究。E-mail: 1037442668@qq.com
通讯作者 胡波，E-mail: hub@post.iap.ac.cn
资助项目 北京市自然科学基金 8202050
Funded by Beijing Natural Science Foundation (Grant 8202050)

of the atmosphere, on the ground, and in the atmosphere are −24.91±19.80 W m^{-2}, −65.52±43.78 W m^{-2}, and 40.61±28.62 W m^{-2}, respectively. This indicates that the aerosol heats the atmosphere although it has a cooling effect on the top of the atmosphere and on the surface. The inter-annual variation of the absolute value of the direct radiative forcing of aerosols and BC aerosols shows a slight decreasing trend, and the seasonal variation is higher in spring and summer and lower in winter, which is consistent with the changing rule of AOD. The decreasing trend of direct radiative forcing of BC aerosols and the increasing trend of SSA show a good inverse phase relationship.

Keywords SBDART model, Aerosol, Optical characteristic, Black carbon (BC), Radiative forcing

1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中液体和固态颗粒物组成的多相体系的总称（盛裴轩等, 2003）。气溶胶可以通过吸收和散射太阳短波辐射和地球长波辐射对气候产生直接影响；还可以作为凝结核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应速度对气候产生间接影响（石广玉等, 2008; 张磊等, 2011; 宿兴涛和王汉杰, 2012）。因此气溶胶在云物理和降水形成过程中起着非常重要的作用，同时对地气系统的辐射平衡和全球气候变化也有重要影响（Sarkar et al., 2006）。

气溶胶的来源随时空动态变化且理化特性复杂多变，其光学特性与气溶胶的直接气候效应过程相关，因此气溶胶的辐射强迫对气候的影响存在极大的不确定性。黑碳气溶胶是含碳燃料的不完全燃烧产生的细颗粒污染物，具有强烈的吸光作用，是大气气溶胶的重要组成部分。有研究表明汽车尾气带来的黑碳气溶胶排放是大气，尤其是城市区域大气中黑碳气溶胶的重要来源（董真等, 2000），同时中国地区大气边界层黑碳气溶胶浓度最高值位于华北、华东（张华等, 2008）。北京地区虽然工业燃煤在近年来逐渐减少，但是机动车保有量却迅速增加，因此北京黑碳气溶胶浓度一直维持在较高水平。因为黑碳产生的直接辐射强迫效应很强且超过了甲烷（CH_4），是仅次于使气候变暖的二氧化碳（CO_2）的大气成分（Jacobson, 2001; 毛节泰和李成才, 2005; 章秋英等, 2009）。据 IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第五次评估报告指出，总的气溶胶辐射强迫值为−0.9 W m^{-2}，其不确定性为−1.9～−0.1 W m^{-2}，冰雪表面的黑碳造成的辐射强迫值为 0.04 W m^{-2}，其不确定性为 0.02～0.09 W m^{-2}（IPCC, 2013）。

京津冀地区是典型的大都市群，是全世界人口密度最大，经济发展最迅猛的地区之一。北京位于中心地带，其北部三面环山，不利于扩散的地形和季风性气候使得北京承受着以颗粒物为主的大气污染以及气溶胶引起的辐射强迫也是不可忽视的。因此本文利用 SBDART 辐射传输模式对近十年北京地区的直接辐射强迫进行分析。

2 数据和模式介绍

2.1 数据介绍

本文数据包括 3 个部分：一是来自 AERONET 北京站 2005～2015 年 level 1.5 的气溶胶光学特性参数数据；二是来自 OMI（Ozone Monitoring Instrument）臭氧柱总量三级产品 OMTO3e.003，空间分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度），时间分辨率为 1 d；三是来自 CERN（Chinese Ecosystem Research Network）北京站地面总辐射观测数据。

2.2 SBDART 平行辐射传输模式

SBDART 辐射传输模式主要用于计算晴空或者有云状态下地球大气顶和地表平行大气的辐射传输，包括了影响紫外、可见光和红外辐射的所有重要物理过程。SBDART 模式是基于 FORTRAN 语言编写的，模式内部采用复杂的离散坐标辐射模块和低分辨率的大气模式，并考虑了水滴和冰晶的米散射过程。在辐射传输模式运行时 4～10 月选用中纬度夏季大气标准廓线，其他月份选择中纬度冬季大气标准廓线。模式输入参数包括时间、经纬度、波长范围（0.3～3 μm）、气溶胶光学特性 [包括气溶胶光学厚度（aerosol optical depth, AOD）、单次散射反照率（single scattering albedo, SSA）、不对称因子（g）、地表反照率（surface albedo, ALB）]、水汽数据和臭氧柱浓度。

AERONET 北京站位于中国科学院大气物理研究所，是典型的城市气溶胶观测站点。利用 SBADRT 模式计算的大气层顶、地面向下和向上总辐射与 AERONET 反演结果相比较（见表 1），其中拟合

表 1　2005 ~ 2015 年 AERONET 北京站辐射反演值和 SBDART 模拟值比较

Table 1　Comparison between inversion values of AERONET Beijing station and those calculated from SBDART model from 2005 to 2015

AERONET反演值（X）	SBDART模拟值（Y）	拟合斜率	R^2	平均偏差（MBE）
大气层顶向下辐射通量	大气层顶向下辐射通量	0.97	0.999	−2.97%
大气层顶向上辐射通量	大气层顶向上辐射通量	1.07	0.984	4.54%
地面向下辐射通量	地面向下辐射通量	0.98	0.999	−3.01%
地面向上辐射通量	地面向上辐射通量	1.08	0.992	1.06%

斜率在0.97～1.08之间变化，相关系数R^2均高于0.98，且最大平均偏差的绝对值仅为4.54%，说明SBDART的模拟结果很好。同时将SBDART模式模拟的地表向下辐射通量与CERN北京站的地表辐射通量观测值对比（如图1），拟合斜率为0.95，相关系数R^2为0.92，平均偏差（mean bias error, MBE）、平均绝对偏差（absolute mean bias error, MABE）以及均方根误差（root-mean-square error, RMSE）的值分别为9.08%、10.43%、15.38%，说明SBDART输入参数的选取是合理的。

3　气溶胶光学特性变化规律

3.1　AOD 和Ångström 波长指数

根据2005～2015年北京站AOD和Ångström波长指数（$\alpha_{440-870}$）的数据进行分析，从图2中可以看出，2005～2015年北京站440 nm、675 nm、870 nm和1020 nm波段AOD均值为分别为0.61±0.56、0.38±0.35、0.29±0.26、0.25±0.22，AOD随波长的增加呈现明显的下降趋势，说明气溶胶对短波段的衰减作用更强，近十年各波段AOD的值总体呈现微弱的下降趋势，表明北京地区气溶胶污染有所改善。第一个高值出现在2006年，这与2006年春季沙尘天气多发有关（Hu et al., 2017）。第二个高值则出现在2013年。由于大气环境的持续恶化，在2013年国务院颁布“大气十条”条例治理大气污染，此后AOD值也随之下降，在2015年出现了这11年期间的最小值。Ångström波长指数绝大多数在1以上，表明北京地区颗粒物以细粒子为主，这与北京的污染主要来自人为排放是

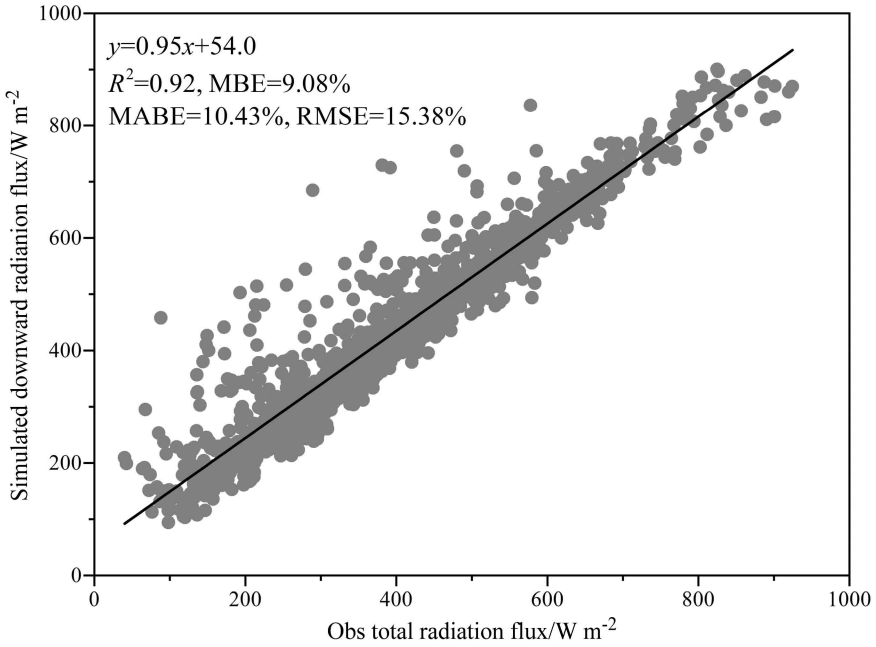

图 1　2005～2015 年 CERN 北京站地表总辐射通量观测值与 SBDART 模式模拟地表向下辐射通量对比

Fig. 1　Comparison between observed total radiation flux at surface of CERN (Chinese Ecosystem Research Network) Beijing station and simulated downward radiation flux from SBDART model from 2005 to 2015

一致的。但 2006 年春季沙尘天气多发使大量粗粒子输入北京，因此Ångström 波长指数出现最小值为 0.958。

由图 3 可知，AOD 和Ångström 波长指数具有明显的月变化特征。在 440 nm 波段，AOD 从 1 月的 0.49 逐渐增长到 6 月的 0.89，此后再次逐渐降低到 12 月的 0.41，与 Wang et al.（2011）分析的北京 2005～2009 年 AOD 在 440 nm 波段的特征一致。Ångström 波长指数也从 4 月的 0.93 增长到 8 月的 1.31。北京夏季为雨季，高温高湿的环境促进了气溶胶的吸湿增长和气粒转化使细粒子浓度增大，因此 AOD 值增高（He et al., 2012）和Ångström 波

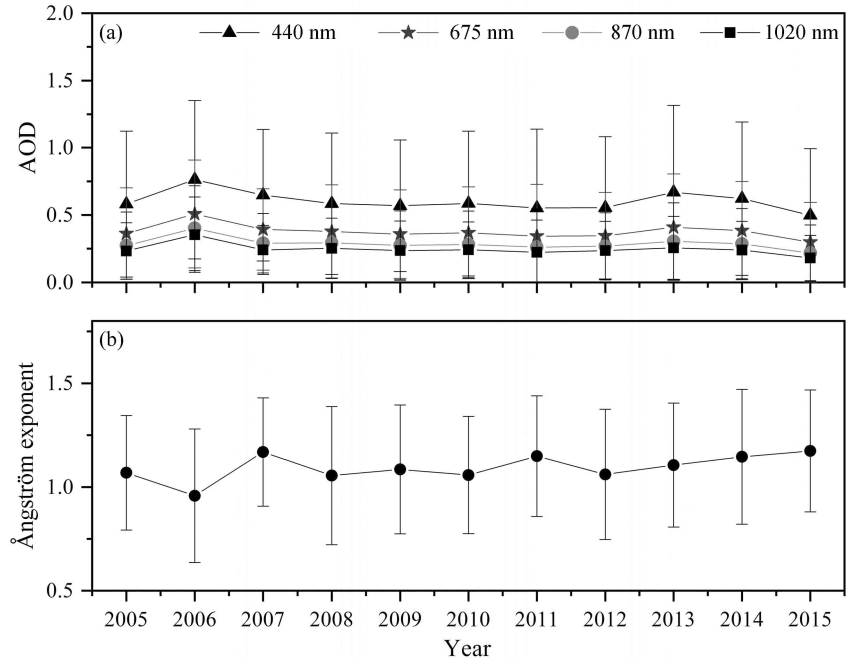

图 2　2005～2015 年北京站气溶胶光学厚度（AOD）和Ångström 波长指数（$\alpha_{440-870}$）变化特征

Fig. 2　Annual variation characteristics of aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent ($\alpha_{440-870}$) at Beijing station from 2005 to 2015

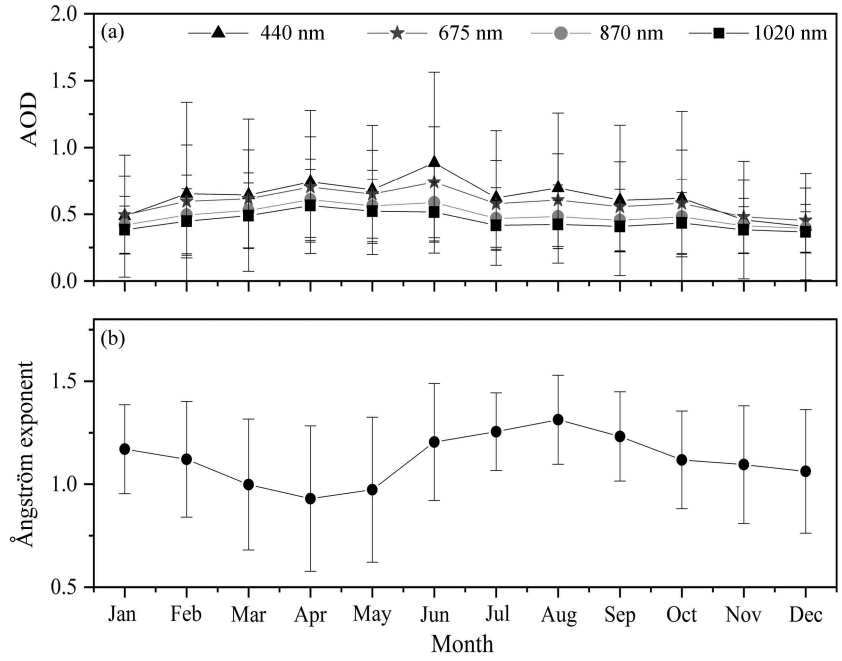

图 3　同图 2，但为月变化特征

Fig. 3　Same as Fig. 2, but for monthly variation characteristics

长指数增大。春季沙尘和大风扬沙天气使北京粗粒子增多，所以春季Ångström 波长指数较小。

3.2　单次散射反照率

通过研究近十年北京地区气溶胶 SSA 随波长的变化（图略），SSA 在 440 nm、675 nm、870 nm 和 1020 nm 波段均值都在 0.85 以上，表明北京地区的气溶胶以散射性为主。2005～2012 年北京站 SSA 呈现缓慢波动上升趋势（图 4），2013～2015 年 SSA 的值一直维持在 0.90 左右，这与 2006～2012 年北京黑碳气溶胶质量浓度呈现减小的趋势能较好的符合（张骁等, 2015）。SSA 具有明显的月变化特征，8 月出现全年最高值，在 11 月出现最低值，各波段的 SSA 变化趋势是一致的（图 5）。Fu et al.（2017）对北京、香河和兴隆三地的 SSA 的研

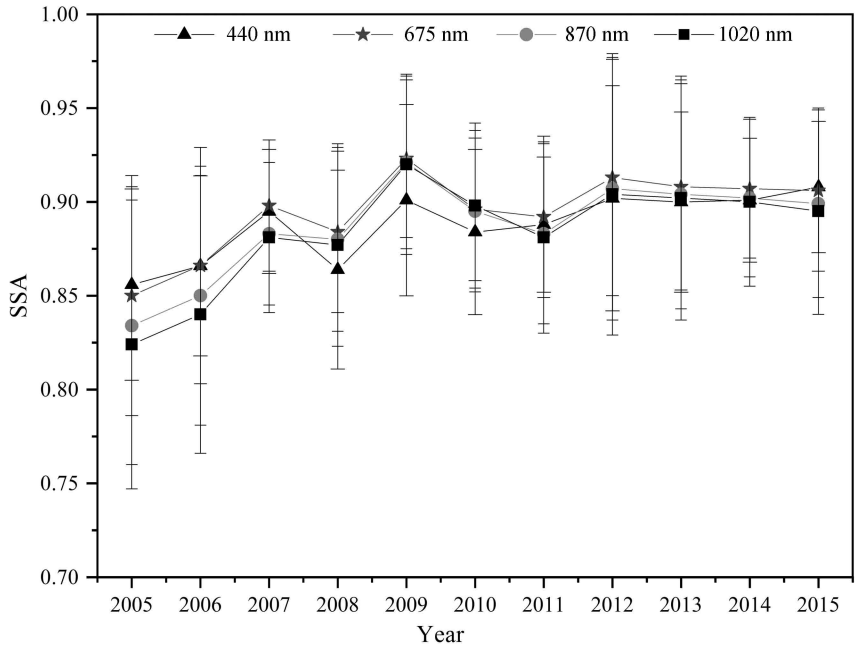

图 4　2005～2015 北京站单次散射反照率（SSA）年变化特征

Fig. 4　Annual variation characteristics of single scattering albedo (SSA) in Beijing station from 2005 to 2015

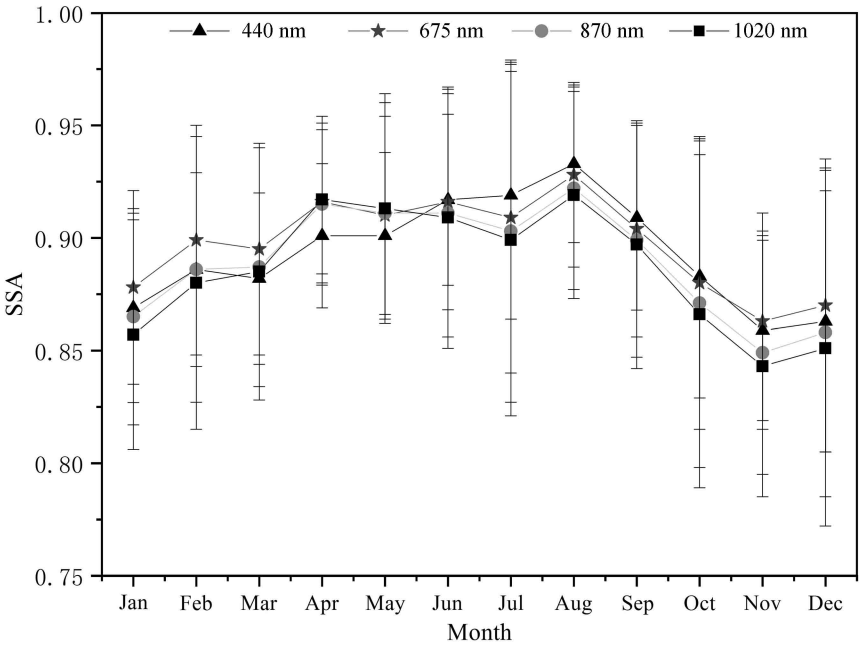

图 5　同图 4，但为月变化特征

Fig. 5　Same as Fig. 2, but for monthly variation characteristics

究发现，也是表现夏季高冬季低。8 月为北京雨季，吸湿增长和二次粒子的生成加强了气溶胶的散射作用，因此 SSA 在 8 月出现最大值（Xia X et al., 2007; Xia X G et al., 2007）。秋冬季节，北京及周边省份的生物质燃烧和燃煤排放的碳质气溶胶提高了气溶胶吸收作用，使得各波段的 SSA 值较低（周奕珂, 2017）。

3.3 体积谱分布

AERONET 北京站给出了 0.05～15 μm 波段范围内 22 个波长的气溶胶体积浓度分布。2005～2015 年北京站体积谱分布的年变化特征如图 6 所示，近十年来，北京地区气溶胶体积谱分布出现两个峰值，对于细模态而言，峰值基本出现在 0.15 μm 处；对于粗模态而言，各年的谱峰值与对应的体积浓度均略有差异，粒度谱的峰值基本集中在 2.24～3.86 μm。由于受到沙尘影响，2006 年气溶胶粗模态体积浓度明显高于其他年份。

图 7 呈现了 2005～2015 年北京站体积谱分布的月际变化特征。不同于北美和西欧地区气溶胶体积谱分布表现为单峰型分布（Dubovik et al., 2002），北京地区体积谱分布的季节变化特征表现为双峰型分布。夏季，北京气溶胶细模态的粒径峰值与气溶胶体积浓度比粗模态增长快，这与江琪等（2013）提出的在高相对湿度条件下，细粒子的体积增长比粗粒子快相吻合。同时，细粒子主要包含硫酸盐、硝酸盐、铵盐等，这些成分极易吸湿增长，北京夏季环境高温高湿，造成细粒子气溶胶体积浓度在夏季达到峰值。春季多发的沙尘和大风扬沙天气使粗模态的粒径峰值对应的体积浓度显著高于其他季节，其值为 0.130 $\mu m^3\ \mu m^{-2}$。

4 气溶胶直接辐射强迫

4.1 气溶胶直接辐射强迫变化特征

利用 SBDART 模式模拟得到近十年北京地区气溶胶直接辐射强迫的情况。在大气层顶（top of atmosphere, TOA）、地面（surface, SUF）和大气中（atmosphere, ATM）气溶胶直接辐射强迫均值分别−24.91±19.80 W m^{-2}、−65.52±43.78 W m^{-2}、40.61±28.62 W m^{-2}，即气溶胶直接辐射强迫对大气层顶和地面表现为冷却效应，对大气则是加热作用；与宋姚和麻金继（2012）对北京地区 2004～2009 年期间所做的大气层顶的直接辐射强迫值−27～−35 W m^{-2} 基本吻合。晴空大气状况下气溶胶直接辐射强迫的年变化特征如图 8 所示，除了大气层顶辐射强迫变化较小，地面和大气辐射强迫的绝对值都表现为下降趋势，与 AOD 的年变化特征具有良好的一致性。2006 年因多次沙尘过程使得直接

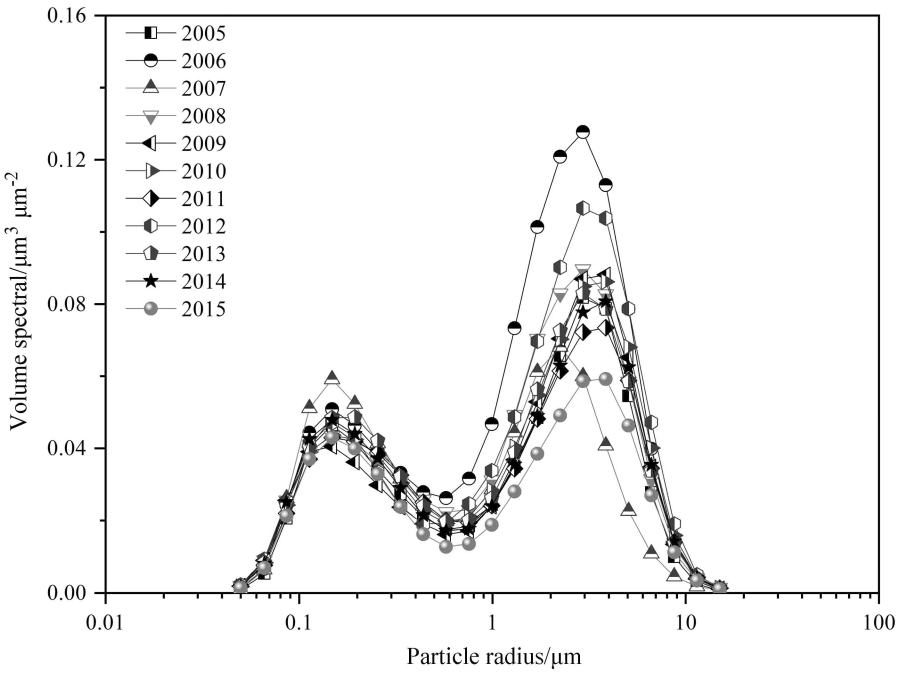

图 6 2005～2015 北京站气溶胶体积谱分布年变化特征

Fig. 6 Annual variation characteristics of aerosol volume spectral distribution at Beijing station from 2005 to 2015

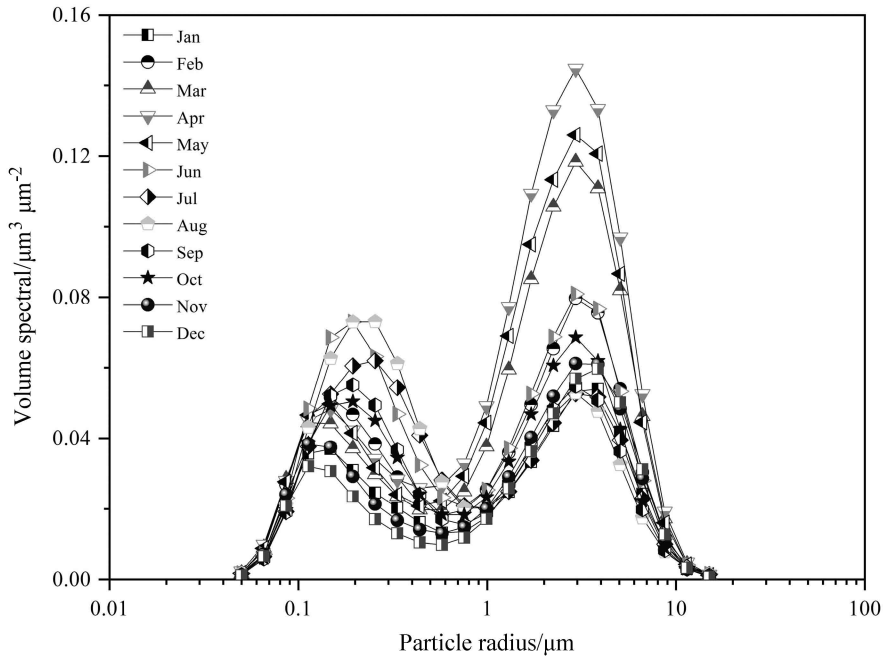

图 7　同图 6，但为月变化特征

Fig. 7　Same as Fig. 6, but for monthly variation characteristics

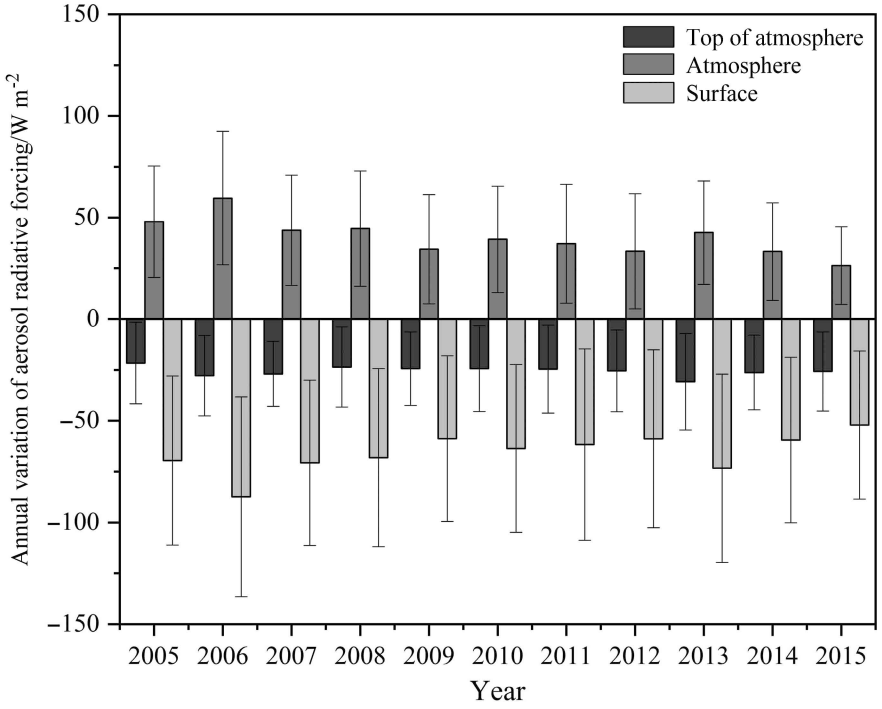

图 8　2005～2015 年北京地区气溶胶直接辐射强迫年变化特征

Fig. 8　Annual variation characteristics of aerosol direct radiative forcing in Beijing area from 2005 to 2015

辐射强迫出现高值，分别为−27.82±19.80 W m^{-2}（TOA）、−87.40±49.14 W m^{-2}（SUF）、59.57±32.87 W m^{-2}（ATM）。地面和大气中辐射强迫的最小值与 AOD 的最小值出现的年份相对应，均在 2015 年，辐射强迫值分别为−52.08±36.39 W m^{-2}、26.34±19.09 W m^{-2}。

气溶胶在大气层顶和地面的直接辐射强迫与气溶胶的粒径分布、AOD 和 SSA 密切相关。大气层顶在 4 月和 8 月辐射强迫值达−30.70±17.91 W m^{-2}和−30.34±21.92 W m^{-2}（图 9），这种强烈的冷却

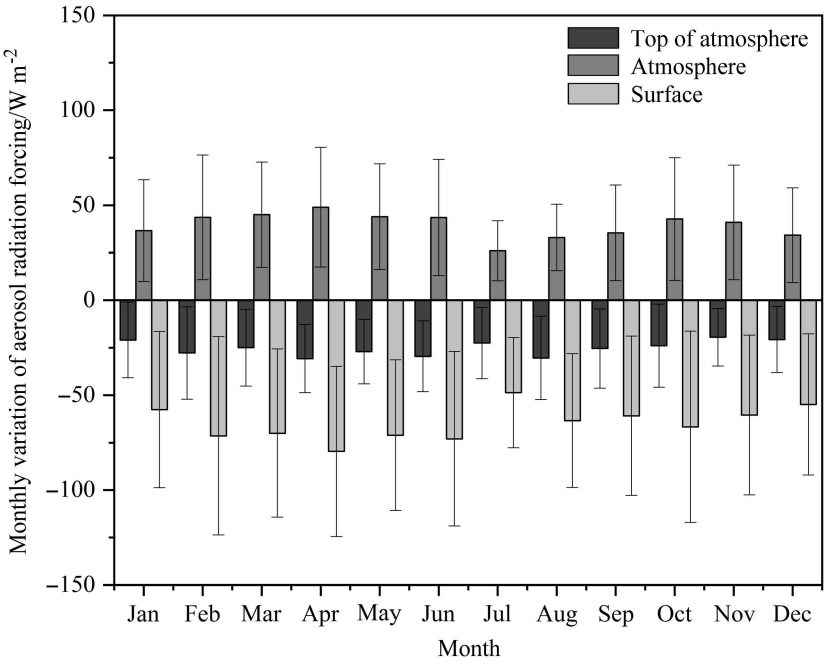

图 9 同图 8，但为月变化特征

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for monthly variation characteristics

效应与气溶胶的 SSA 值在 4 月和 8 月偏高，气溶胶的散射性强有关。气溶胶地面直接辐射强迫值依然是春季明显高于其他三个季节，而夏季的 7 月出现全年的最低值−48.59±29.03 W m^{-2}。大气中气溶胶的直接辐射强迫值春、夏、秋、冬四季的值依次为 45.98±29.00 W m^{-2}、34.20±21.31 W m^{-2}、39.74±29.18 W m^{-2} 和 38.17±28.18 W m^{-2}。由于北京的雨季是在 7～8 月，气溶胶的湿沉降作用显著，大气相对比较干净，因此夏季辐射强迫值较小。春季以及秋冬季节大气气溶胶直接辐射强迫明显增加，基于以下两个原因：一是由于春季沙尘、扬尘的影响使气溶胶粒子多；二是秋冬季节吸收性的碳质气溶胶明显增多，它在红外波段有较强的吸收作用，能够加热大气同时降低大气层顶的冷却作用。

4.2 气溶胶直接辐射强迫效率研究

气溶胶的直接辐射强迫效率是指气溶胶在大气层顶、地面和大气中产生的直接辐射强迫与 500 nm 波段气溶胶光学厚度的比值，即消除了气溶胶光学厚度对辐射强迫的影响，更容易了解气溶胶其他光学特性对辐射强迫的影响。

表 2 描述了北京地区从 2005～2015 年，大气层顶、地面以及大气中气溶胶直接辐射强迫效率，其中辐射强迫和 AOD 的数据均采用日均值计算。从表中可知，大气层顶和地面的辐射强迫与 AOD 线性相关性良好，R^2 高达 0.83 和 0.91，大气的辐射强迫与 AOD 的线性拟合结果也表现较好，R^2=0.68。从拟合结果来看，增加单位的 AOD 值，大气层顶、地面和大气中辐射强迫的变化，即它们的辐射强迫效率分别为−38.0 W m^{-2}、−87.8v W m^{-2} 和 49.8 W m^{-2}，地面的辐射强迫效率最大，说明 AOD 值的变化对地表直接辐射强迫的影响最大。

4.3 气溶胶直接辐射强迫与 AAOD、SSA 的关系

吸收性气溶胶主要有黑碳、沙尘和有机碳气溶胶，因此气溶胶吸收光学厚度（aerosol absorbent optical depth, AAOD）的值与这三类气溶胶含量相关。北京地区 AAOD 的值春、夏、秋、冬四个季

表 2 2005 ~ 2015 年北京地区大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫与 AOD（440 nm）的拟合关系

Table 2 Fitting relationships between the direct radiative forcing efficiency of aerosols and AOD (440 nm) at the top of the atmosphere, on the ground, and in the atmosphere in Beijing area from 2005 to 2015

	大气层顶	地面	大气中
拟合方程	y=−38.0x−4.5	y=−87.8x−18.3	y=49.8x+13.8
相关系数R^2	0.83	0.91	0.68

节分别为0.07±0.02、0.05±0.03、0.05±0.02、0.06±0.02，其值主要集中在0.05～0.20之间。相对于气溶胶以自然源为主的拉萨地区来说，AAOD值小于0.06（Gong et al., 2017）；而北京地区，气溶胶来源随季节变化有所差异，主要来源还是人为气溶胶为主，春季受到沙尘的影响，因此AAOD值较高；而秋冬季由于燃煤和生物质燃烧增加黑碳气溶胶含量，也使AAOD的值较高。

大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫与气溶胶吸收性光学厚度AAOD（440 nm）的关系如图10所示，其中辐射强迫和AAOD的数据均采用日均值计算。由图10可知，除冬季个别AAOD值较低的天数，大气层顶辐射强迫为正值，其余时间大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫的绝对值都是随着AAOD的增加而增加，其中大气层顶和地面的辐射强迫为负值，表现为冷却效应；大气中辐射强迫为正值，表现为加热效应。直接辐射强迫与AAOD（440 nm）在大气层顶、地面和大气中的线性拟合结果如表3所示。根据R^2来看，地表和大气中辐射强迫与AAOD的线性关系非常显著，说明AAOD对地—气系统有显著的影响。每增加单位尺度的AAOD，地面以及大气的辐射强迫增加高达806.80 W m^{-2}、544.25 W m^{-2}，其中AAOD的变化对地面辐射强迫的影响是最显著的。

单次散射反照率是气溶胶光学特性中衡量气溶胶吸收强弱的一个重要参数，也是决定气溶胶辐射效应是加热还是冷却的重要因子。TOA辐射强迫对SSA的变化非常敏感：当SSA值高时，大气层顶辐射强迫为负；当SSA值低时，TOA的辐射强迫为正值。在撒哈拉地区SSA增加10%，TOA辐射强迫会减小10.6 W m^{-2}（Papadimas et al., 2012），衣娜娜等（2017）通过模拟得到中国西北地区SSA变化0.01时，TOA的辐射强迫增加或者减少9.3 W m^{-2}。利用SSA（440 nm）和辐射强迫日均值的数据，得到如图11的关系图。秋冬季节受到生物质燃烧和燃煤的影响，碳质气溶胶增加使气溶胶的散射性降低，因此当秋冬季节的某些时日SSA（440 nm）的值低于0.8时，大气层顶的辐射强迫会出现正的辐射强迫；随着SSA的增大，大气层顶直接辐射强迫从加热效应逐步转变为冷却效应，这与巩崇水（2014）对北京气溶胶直接辐射强迫气候效应分析的结论一致。

4.4　晴空大气黑碳气溶胶的直接辐射强迫

黑碳气溶胶（BC）占大气气溶胶的比例虽然较小，但是它特殊的光学性质对可见光到红外波段的太阳辐射都有强烈的吸收。和沙尘气溶胶相比，其质量吸收系数大了两个数量级（秦大河, 2005）。虽然黑碳气溶胶的含量不大，但是它对大气的强烈加热效应，使黑碳气溶胶的辐射强迫成为国际科学界的研究热点。本文先通过“三波段法”（陈斌, 2012）计算得到BC气溶胶的AAOD，然后通过模式模拟北京地区2005～2015年黑碳气溶胶的直接辐射强迫，并对其变化特征进行分析（图12和图13）。BC气溶胶对可见光和红外波段太阳辐射的强烈吸收作用，可以加热大气，同时减少到达地面的辐射通量，因此使得在大气层顶和大气中均表现为正的辐射强迫，而地面为负的辐射强迫值。大气层顶、地面和大气中黑碳气溶胶直接辐射强迫多年均值分别4.41±3.85W m^{-2}、−15.60±12.86 W m^{-2}、20.01±16.53 W m^{-2}，直接辐射强迫绝对值的年变化趋势比较一致，均表现为下降趋势，与张骁等（2015）发现的2006～2012年北京黑碳气溶胶质量浓度呈现减小趋势基本一致。此外沙尘天气也会影响黑碳气溶胶的辐射强迫，因为沙尘过程不仅带来大量沙尘粒子，同时也裹挟周边的黑碳粒子输入北京且不利于黑碳气溶胶的沉降（于丽萍等, 2006），因此近十年间黑碳气溶胶直接辐射强迫的极大值依然出现在2006年，其值分别为TOA：6.33±5.25 W m^{-2}，SUF：−25.72±23.69 W m^{-2}，ATM：32.05±28.83 W m^{-2}。

在大气层顶、地面和大气中直接辐射强迫的绝对值表现为夏季大，冬季小（图13）。大气层顶、地面和大气中的黑碳气溶胶直接辐射强迫的极大值和次大值分别出现在6月（TOA：7.43±5.79 W m^{-2}、SUF：−24.29±19.52 W m^{-2}、ATM：31.72±25.30 W m^{-2}）和10月（TOA：5.12±5.06 W m^{-2}、SUF：−21.51±21.81 W m^{-2}、ATM：26.63±26.87 W m^{-2}）。在大气中，4～10月黑碳气溶胶的辐射强迫都维持在20 W m^{-2}以上，而冬季辐射强迫值最小，虽然黑碳气溶胶浓度是秋冬季浓度较大，春夏季浓度较小（柴牲等, 2012; 于丽萍等, 2014），但是BC气溶胶的辐射强迫与黑碳浓度值相关，同时也受到太阳天顶角的影响。夏季由于天顶角较小，因此辐射强迫值较高；虽然冬季由于采暖等原因使得黑碳含量增加，但是北京冬季的天顶角较大，单

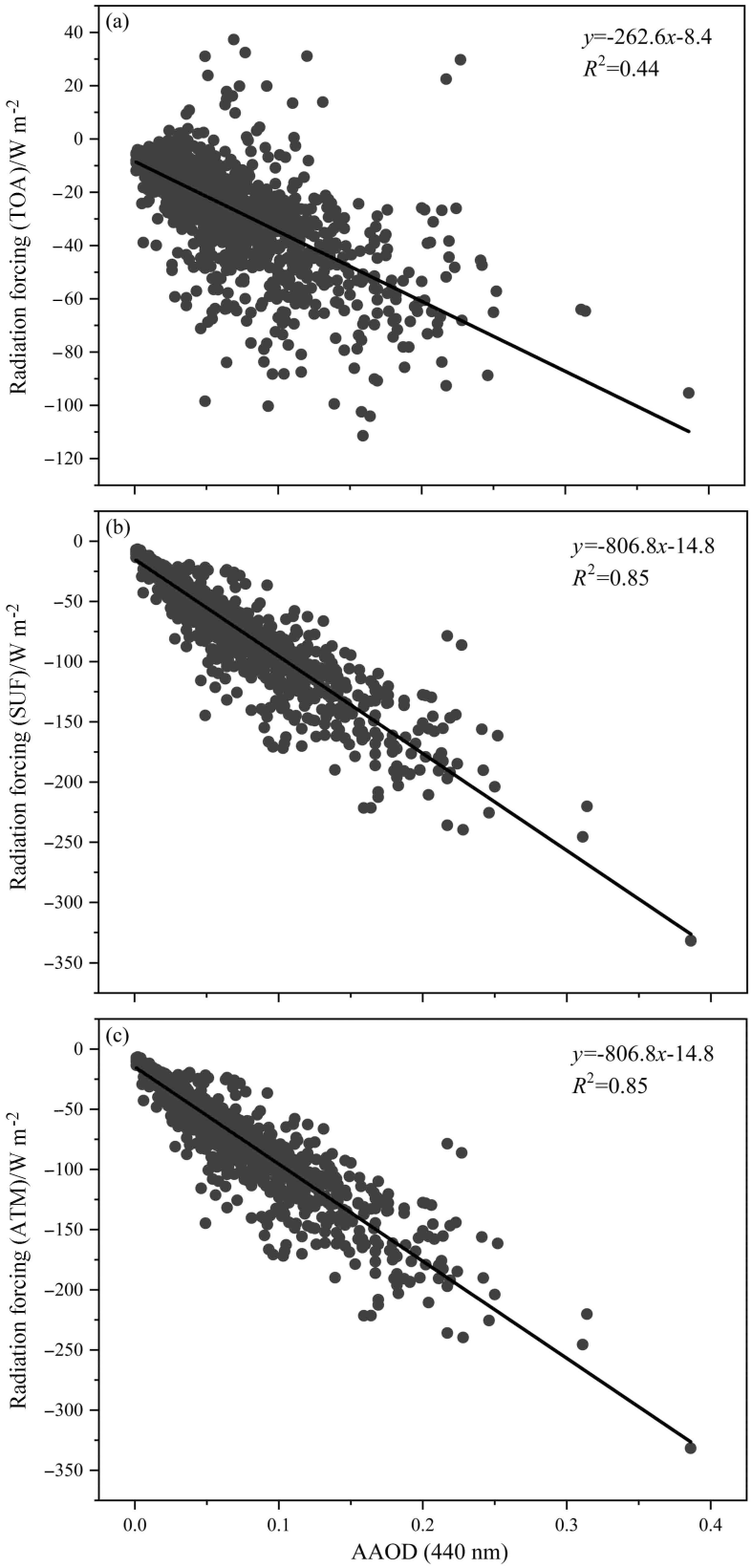

图 10 2005～2015 年北京地区大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫与气溶胶吸收光学厚度（AAOD，440 nm）的关系

Fig. 10 Relationship between the direct radiative forcing efficiency of aerosols and aerosol absorbent optical depth (AAOD, 440 nm) at the top of the atmosphere, on the surface, and in the atmosphere in Beijing area from 2005 to 2015

表 3　2005 ~ 2015 年北京地区大气层顶、地面和大气中气溶胶直接辐射强迫与 AAOD（440 nm）的拟合关系

Table 3　Fitting relationships between the direct radiative forcing efficiency of aerosols and AAOD (440 nm) at the top of the atmosphere, on the ground, and in the atmosphere in Beijing area from 2005 to 2015

	大气层顶	地面	大气中
拟合方程	y=−262.6x−8.4	y=−806.8x−14.8	y=544.2x+6.4
相关系数R^2	0.44	0.85	0.91

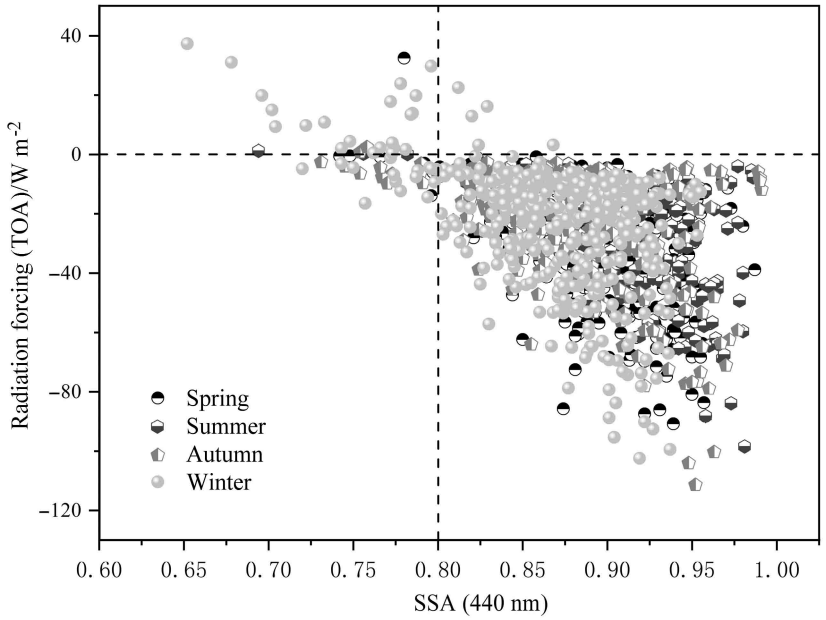

图 11　2005～2015 年北京地区大气层顶气溶胶直接辐射强迫与 SSA（440 nm）的关系

Fig. 11　Relationship between the direct radiative forcing efficiency of aerosols and SSA (440 nm) at the top of the atmosphere in Beijing area from 2005 to 2015

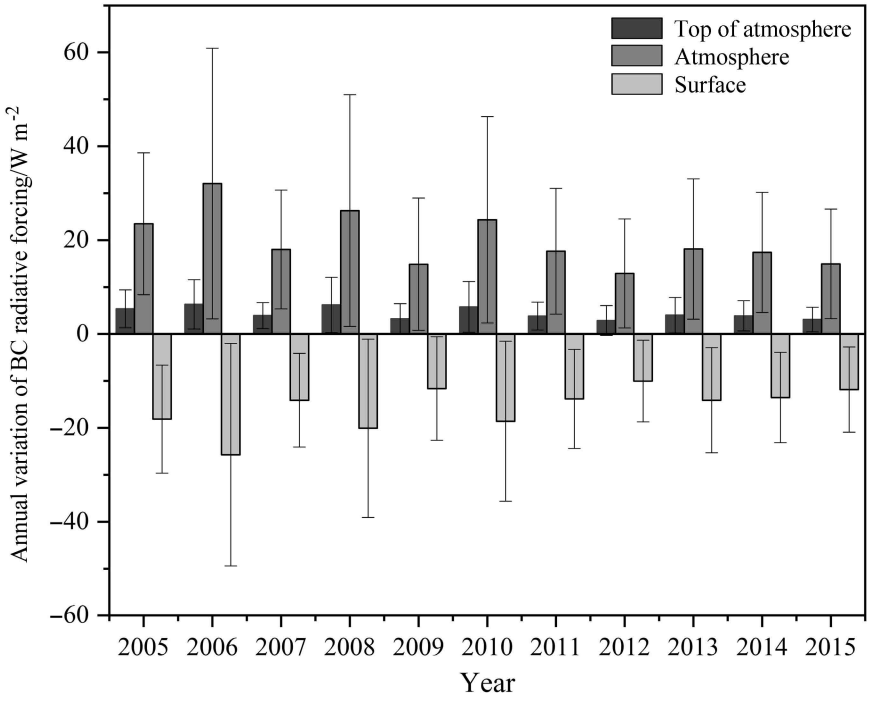

图 12　2005～2015 年北京地区黑碳（BC）气溶胶直接辐射强迫年变化特征

Fig. 12　Annual variation characteristics of black carbon (BC) aerosol direct radiative forcing in Beijing area from 2005 to 2015

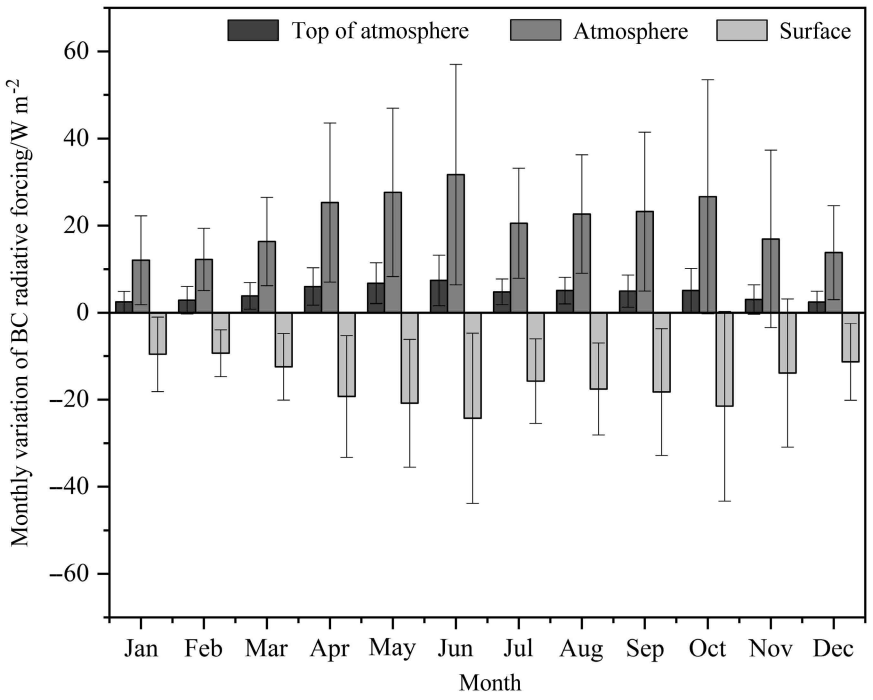

图 13 同图 12，但为月变化特征

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for monthly variation characteristics

位面积上接受的辐射通量减小，因此使冬季的辐射强迫值较低。与 6 月相比，7 月、8 月的辐射强迫值有明显下降趋势，虽然它们的天顶角差异较小，但是 7 月、8 月为北京的雨季，对 BC 的湿沉降比较显著以及云对辐射的衰减造成的。通过计算发现大气中 BC 气溶胶占总气溶胶辐射强迫的比值在 6～8 月均值维持在 68% 以上，说明夏季气溶胶的对大气加热作用主要来自 BC 气溶胶。

5 结论

基于 AERONET 观测数据发现，北京近十年气溶胶平均光学厚度（AOD_{440nm}）为 0.61±0.56，Ångström 波长指数均值为 1.09，SSA 的均值为 0.888±0.048，表明北京气溶胶以细粒子和散射性为主；AOD 呈现下降趋势，SSA 呈现缓慢波动上升趋势，说明该区域气溶胶污染有所改善。晴空条件下，大气层顶、地面和大气的气溶胶直接辐射强迫多年均值分别−24.91±19.80 W m^{-2}、−65.52±43.78 W m^{-2}、40.61±28.62 W m^{-2}，气溶胶和黑碳直接辐射强迫的绝对值的年际变化特征均表现为微弱的下降趋势，且季节变化特征均是春夏季高冬季小，这与 AOD 的变化规律一致。并且黑碳气溶胶的直接辐射强迫下降趋势与 SSA 的上升趋势呈现较好的反位相关系。此外辐射强迫夏季大还与北京夏季天顶角较小，单位面积上接受的辐射通量较大有关；冬季虽然因为采暖等原因使得黑碳含量增加，但由于北京冬季的天顶角较大，因此冬季总体的辐射强迫值较低。

致谢 感谢陈洪滨研究员、夏祥鳌研究员和 Philippe_Goloub 先生提供的 AERONET 北京站气溶胶数据；感谢 Staranes 先生和 Ricchiazzi 先生开发的 SBDART 模式。

参考文献（References）

柴贶, 孙敏峰, 张金跃. 2012. 北京冬春黑碳气溶胶浓度与气象条件分析 [C]//S6 大气成分与天气气候变化. 沈阳: 中国气象学会, 44.

Chai S, Sun M F, Zhang J Y. 2012. Analysis of black carbon aerosol concentration and meteorological conditions in Beijing in winter and spring [C]//S6 Atmospheric Composition and Weather Change (in Chinese). Shenyang: China Meteorological Society, 44.

陈斌. 2012. 利用卫星和 AERONET 观测资料对东亚地区吸收性气溶胶识别及其光学特征分析 [D]. 兰州大学博士学位论文, 119pp.

Chen B. 2012. Detection light-absorbing aerosols and their properties from satellite and AERONET observations over East Asia [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 119pp.

董真, 黄世鸿, 李子华. 2000. 相对湿度对大气气溶胶可见辐射吸收的影响 [J]. 气象科学, 20(4): 487−493.

Dong Z, Huang S H, Li Z H. 2000. Influence of relative humidity on absorption of visible

radiation of aerosol [J]. Sci. Meteor. Sinica (in Chinese), 20(4): 487−493. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2000.04.007

Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. J. Atmos. Sci., 59(3): 590−608. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2

Fu Y F, Zhu J C, Yang Y J, et al. 2017. Grid–cell aerosol direct shortwave radiative forcing calculated using the SBDART model with MODIS and AERONET observations: An application in winter and summer in eastern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(8): 952−964. doi:10.1007/s00376-017-6226-z

巩崇水. 2014. 中国大陆地区不同生态系统气溶胶直接辐射强迫气候效应的初步研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 119pp. Gong C S. 2014. The preliminary research of aerosol climate effect by direct radiative forcing in different ecosystems in mainland China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 119pp.

Gong C S, Xin J Y, Wang S G, et al. 2017. Anthropogenic aerosol optical and radiative properties in the typical urban/suburban regions in China [J]. Atmos. Res., 197: 177−187. doi:10.1016/j.atmosres.2017.07.002

He Q S, Li C C, Geng F H, et al. 2012. Aerosol optical properties retrieved from Sun photometer measurements over Shanghai, China [J]. J. Geophys. Res., 117(D16): D16204. doi:10.1029/2011JD017220

Hu B, Zhao X J, Liu H, et al. 2017. Quantification of the impact of aerosol on broadband solar radiation in North China [J]. Sci. Rep., 7: 44851. doi:10.1038/srep44851

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. New York: Cambridge University Press, 1535pp.

Jacobson M Z. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 409(6821): 695−697. doi:10.1038/35055518

江琪, 银燕, 秦彦硕, 等. 2013. 黄山地区气溶胶吸湿增长特性数值模拟研究 [J]. 气象科学, 33(3): 237−245. Jiang Q, Yin Y, Qin Y S, et al. 2013. Nujmerical simulation study on hygroscopic growth of aerosols in Huangshan area [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33(3): 237−245. doi:10.3969/2012jms.0150

毛节泰, 李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. 气象学报, 63(5): 622−635. Mao J T, Li C C. 2005. Observation study of aerosol radiative properties over China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(5): 622−635. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.008

Papadimas C D, Hatzianastassiou N, Matsoukas C, et al. 2012. The direct effect of aerosols on solar radiation over the broader Mediterranean basin [J]. Atmos. Chem. Phys., 12(15): 7165−7185. doi:10.5194/acp-12-7165-2012

秦大河. 2005. 中国气候与环境演变（上） [J]. 资源环境与发展, 1(3): 1−4. Qin D H. 2005. Climate and environment evolution in China (I) [J]. Resour. Environ. Dev (in Chinese), 1(3): 1−4.

Sarkar S, Chokngamwong R, Cervone G, et al. 2006. Variability of aerosol optical depth and aerosol forcing over India [J]. Adv. Space Res., 37(12): 2153−2159. doi:10.1016/j.asr.2005.09.043

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 25–28. Shen P X, Mao J T, Li J G, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 25–28.

石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. 大气科学, 32(4): 826−840. Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 826−840. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.11

宋姚, 麻金继. 2012. 利用 MODIS 数据计算北京地区的气溶胶直接辐射强迫 [J]. 大气与环境光学学报, 7(6): 445−451. Song Y, Ma J J. 2012. Estimation of aerosol direct radiative forcing in Beijing area using MODIS data [J]. J. Atmos. Environ. Opt. (in Chinese), 7(6): 445−451. doi:10.3969/j.issn.1673-6141.2012.06.007

宿兴涛, 王汉杰. 2012. 近 10 年东亚沙尘气溶胶时空分布与起尘通量的数值研究 [J]. 高原气象, 31(3): 676−687. Su X T, Wang H J. 2012. Simulation study on the spatial and temporal distributions and emission flux of dust aerosol over East Asia in the latest decade [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(3): 676−687.

Wang S P, Fang L, Gu X F, et al. 2011. Comparison of aerosol optical properties from Beijing and Kanpur [J]. Atmos. Environ., 45(39): 7406−7414. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.055

Xia X, Chen H, Goloub P, et al. 2007. A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China [J]. J. Geophys. Res., 112(D12): D12203. doi:10.1029/2006JD008119

Xia X G, Li Z Q, Holben B, et al. 2007. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. J. Geophys. Res., 112(D22): D22S12. doi:10.1029/2007JD008859

衣娜娜, 张镭, 刘卫平, 等. 2017. 西北地区气溶胶光学特性及辐射影响 [J]. 大气科学, 41(2): 409−420. Yi N N, Zhang L, Liu W P, et al. 2017. Optical characteristics and radiative effects of atmospheric aerosol over Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2): 409−420. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15272

于丽萍, 孙敏锋, 许仕清, 等. 2006. 北京大气黑碳气溶胶观测及初步分析 [C]//中国气象学会 2006 年年会“提高大气监测自动化水平、为业务技术体制改革作贡献”分会场论文集. 成都: 中国气象学会, 43. Yu L P, Sun M F, Xu S Q, et al. 2006. Observation and preliminary analysis of black carbon aerosol in Beijing [C]// Proceedings of the 2006 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society "Improving the Automation Level of Atmospheric Monitoring and Making Contributions to the Reform of Operational Technical System" (in Chinese). Chengdu: Chinese Meteorological Society, 43.

于丽萍, 李栋, 杜传耀, 等. 2014. 2013 年北京黑碳气溶胶浓度特征及影响因素分析 [C]//2014 中国环境科学学会学术年会（第六章）. 成都: 中国环境科学学会, 62. Yu L P, Li D, Du C Y, et al. 2014. Analysis of the characteristics and influencing factors of black carbon aerosol concentration in Beijing in 2013 [C]// 2014 Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences (Chapter 6) (in Chinese). Chengdu: Chinese Society of Environmental Sciences, 62.

张华, 马井会, 郑有飞. 2008. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟

研究 [J]. 大气科学, 32(5): 1147−1158. Zhang H, Ma J H, Zheng Y F. 2008. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(5): 1147−1158. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.13

章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 2009. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究 [J]. 中国沙漠, 29(1): 183−188. Zhang Q Y, Niu S J, Shen J G, et al. 2009. Observational study on aerosol absorption properties in winter and spring in semiarid area [J]. J. Desert Res. (in Chinese), 29(1): 183−188.

张磊, 张镭, 张丁玲, 等. 2011. 兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征 [J]. 中国环境科学, 31(8): 1248−1255. Zhang L, Zhang L, Zhang D L, et al. 2011. Property of black carbon concentration over outskirts of Lanzhou, Northwest China [J]. China Environ. Sci. (in Chinese), 31(8): 1248−1255.

张骁, 汤洁, 武云飞, 等. 2015. 2006—2012 年北京及周边地区黑碳气溶胶变化特征 [J]. 中国粉体技术, 21(4): 24−29, 35. Zhang X, Tang J, Wu Y F, et al. 2015. Variations of black carbon aerosol observed in Beijing and surrounding area during 2006−2012 [J]. China Powder Sci. Technol. (in Chinese), 21(4): 24−29, 35. doi:10.13732/j.issn.1008-5548.2015.04.006

周奕珂. 2017. 京津冀地区生物质燃烧对北京空气质量的影响 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 71pp. Zhou Y K. 2017. The impact of biomass burning over Beijing−Tianjin−Hebei region on air quality in Beijing [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 71pp.