

文章编号:2095-6134(2016)02-0155-07

京津唐地区气溶胶直接辐射强迫的遥感观测^{*}

张凤霞^{1,2}, 李正强^{1†}, 李凯涛^{1,2}, 张莹¹

(1 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

(2015 年 3 月 31 日收稿; 2015 年 5 月 5 日收修改稿)

Zhang F X, Li Z Q, Li K T, et al. Aerosol direct radiative forcing in Beijing – Tianjin – Tangshan region based on remote sensing measurements[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(2): 155-161.

摘要 利用 2012 年 3 月京津唐地区气溶胶综合观测实验的地基和卫星遥感数据, 结合 SBDART 辐射传输模型, 进行气溶胶直接辐射强迫研究. 结果表明, 该地区大气中细颗粒居多, 气溶胶消光较强, 散射性明显, 前向散射比例较大. 北京、塘沽、唐山大气顶气溶胶平均辐射强迫分别为 (-6.58 ± 5.06) 、 (-13.65 ± 11.51) 和 $(-11.68 \pm 7.72) \text{ W/m}^2$, 地表气溶胶平均辐射强迫分别为 (-30.14 ± 13.21) 、 (-39.11 ± 20.5) 和 $(-28.06 \pm 13.34) \text{ W/m}^2$, 大气层气溶胶平均辐射强迫分别为 (23.56 ± 9.50) 、 (25.46 ± 12.93) 和 $(16.38 \pm 8.23) \text{ W/m}^2$, 说明气溶胶对大气顶和地表产生显著降温效应, 对大气层产生增温效应, 因此有利于逆温结构的形成, 不利于大气污染物的扩散. 虽然北京站点辐射强迫值较小, 但其辐射强迫效率在 3 个站点中最大, 这主要是因为其单次散射反照率最小.

关键词 气溶胶直接辐射强迫; 气溶胶光学特性; 京津唐地区; SBDART

中图分类号: X51 文献标志码: A doi: 10.7523/j.issn.2095-6134.2016.02.003

Aerosol direct radiative forcing in Beijing-Tianjin-Tangshan region based on remote sensing measurements

ZHANG Fengxia^{1,2}, LI Zhengqiang¹, LI Kaitao^{1,2}, ZHANG Ying¹

(1 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We performed a comprehensive experiment in Beijing-Tianjin-Tangshan region during March 2012. The aerosol direct radiative forcing was explored using the radiative transfer model SBDART based on ground-based and satellite remote sensing data. The measured aerosol optical parameters indicated that there were a large number of fine particles in the atmosphere; aerosol's effect of extinction in solar radiation was evident; aerosol scattering was large; and the forward scattering was strong. The average aerosol direct radiative forcing values were (-6.58 ± 5.06) , (-13.65 ± 11.51) , and $(-11.68 \pm 7.72) \text{ W/m}^2$ on the top of atmosphere, (-30.14 ± 13.21) , (-39.11 ± 20.5) , and $(-28.06 \pm 13.34) \text{ W/m}^2$ at the surface, and (23.56 ± 9.50) , $(25.46 \pm$

^{*} 国家重大科学研究计划(2010CB950801)、国家自然科学基金(41222007)和中国科学院创新团队项目(KZZD-EW-TZ-09)资助

[†] 通信作者, E-mail: lizq@radi.ac.cn

12.93), and $(16.38 \pm 8.23) \text{ W/m}^2$ in the atmosphere at Beijing, Tanggu, and Tangshan, respectively. Aerosol cooling effect to the surface and top of atmosphere and aerosol heating effect to the atmosphere were strong, which could cause atmospheric temperature inversion and then suppress the pollutant dispersion. At Beijing site, aerosol radiative forcing was relatively small, but aerosol radiative forcing efficiency was the largest among the three sites, which was mainly because the single-scattering albedo of aerosols was the smallest at Beijing site.

Key words aerosol direct radiative forcing; aerosol optical properties; Beijing-Tianjin-Tangshan region; SBDART

大气气溶胶在地球能量收支平衡和全球气候变化中起着重要作用. 气溶胶对能量收支平衡的影响可分为直接效应和间接效应 2 种. 直接效应是气溶胶通过将太阳光反射回太空、吸收太阳光等途径来改变地气系统的辐射平衡, 进而影响气候变化. 间接效应是一些气溶胶作为有效的云凝结核, 影响云的辐射性质和降雨过程^[1]. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告^[2]指出, 总的气溶胶有效辐射强迫估计值为 -0.9 ($-1.9 \sim -0.1$) W/m^2 , 但模式和观测之间的差异导致对气溶胶辐射强迫存在较大的不确定性^[3].

对于中国北方地区的气溶胶辐射强迫, 许多学者已经进行了研究. Che 等^[4]利用太阳-天空辐射计研究 2013 年 1 月华北平原严重灰霾期间气溶胶的光学特性和气溶胶辐射强迫, 结果表明严重灰霾污染期间, 气溶胶光学参数和辐射强迫变化剧烈. 其中, 500 nm 气溶胶光学厚度 (AOD_{500}) 可增至 1.0, 气溶胶 Ångström 指数 (AE) 大于 0.8, 单次散射反照率 (SSA) 的变化范围为 $0.87 \sim 0.95$, 北京城区地表的气溶胶日均直接辐射强迫可超过 -200 W/m^2 , 大气顶气溶胶日均直接辐射强迫可达到 $-40 \sim -60 \text{ W/m}^2$. 张小玲等^[5]利用华北区域地面观测和卫星遥感监测数据分析 2011 年 10 月的大气污染状况, 结果表明, 污染期间 AOD_{500} 可达到 $0.6 \sim 1.0$, 气溶胶吸收和散射导致地表入射太阳辐射下降达 $100 \sim 300 \text{ W/m}^2$, 而大气吸收太阳辐射增加达 $100 \sim 400 \text{ W/m}^2$. 为研究气溶胶辐射强迫与气溶胶光学参数的关系, 宋姚等^[6]利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据计算北京地区的气溶胶直接辐射强迫, 结果显示气溶胶光学厚度与气溶胶辐射强迫有较为明显的相关性, 北京地区气溶胶吸收性很强, 具有较强的加热作用; 吴彬等^[7]研究北京地区气溶胶辐

射强迫效率同气溶胶光学参数的相关性.

京津唐地区是中国重要的经济和人口聚集地区之一. 近年来伴随着城市化进程的加快, 大气污染形势日益严峻^[8-9], 灰霾频发, 对该地区环境产生了重要影响, 引起社会公众和政府部门的高度重视^[10-12]. 研究京津唐气溶胶辐射强迫对于研究华北地区气溶胶辐射强迫具有一定借鉴意义. 为加深对京津唐气溶胶直接辐射强迫的了解, 在北京、塘沽、唐山 3 个典型站点进行了从 2012 年 3 月 1 日至 2012 年 3 月 31 日为期 1 个月的综合观测实验. 3 个站点位置如图 1 中的十字型符号所示. 本文利用 3 个站点的地基太阳-天空辐射计气溶胶观测资料以及 MODIS 地表反照率数据和臭氧观测仪 (OMI) 的臭氧数据, 结合 SBDART 辐射传输模型, 计算该时期晴空气溶胶日均直接辐射强迫, 并研究气溶胶辐射强迫效率, 为京津唐区域气溶胶气候效应和环境影响等问题提供参考.

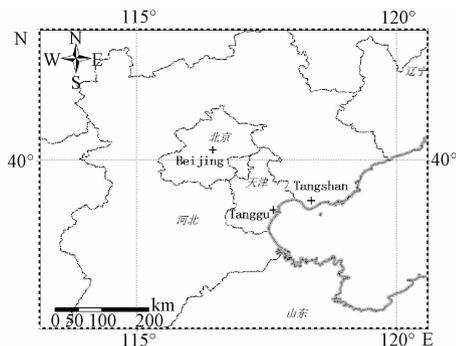


图 1 观测站点分布图

Fig. 1 Locations of the three observation sites

1 方法

1.1 原理及模型介绍

地表 (SFC) 和大气顶 (TOA) 的气溶胶直接辐射强 (ARF) 分别定义为地表和大气顶有气溶胶与无气溶胶存在时净辐射通量的变化, 大气层

(ATM)的气溶胶辐射强迫是大气顶和地表的辐射强迫之差^[13-14],即

$$\Delta F_{\text{TOA}} = F(a)_{\text{TOA}} - F_{\text{TOA}}, \quad (1)$$

$$\Delta F_{\text{SFC}} = F(a)_{\text{SFC}} - F_{\text{SFC}}, \quad (2)$$

$$\Delta F_{\text{ATM}} = \Delta F_{\text{TOA}} - \Delta F_{\text{SFC}}, \quad (3)$$

$$F = F_{\downarrow} - F_{\uparrow}, \quad (4)$$

其中, $F(a)$ 表示有气溶胶时的净辐射通量, F 表示没有气溶胶时的净辐射通量. ΔF_{TOA} 、 ΔF_{SFC} 、 ΔF_{ATM} 分别表示大气顶、地表和大气层的气溶胶辐射强迫. F_{\downarrow} 和 F_{\uparrow} 分别表示向下和向上方向的辐射通量.

日均气溶胶直接辐射强迫为 24 h 内的瞬时辐射强迫求平均^[15]:

$$dF = \frac{1}{24} \int \Delta F(t) dt. \quad (5)$$

气溶胶辐射强迫效率 (ARFE, W/m^2) 定义为波长 500 nm 单位 AOD 产生的直接辐射强迫, 是一个对气溶胶辐射强迫进行比较的表达方法^[16]. 将气溶胶辐射强迫与光学厚度进行线性拟合, 其斜率就是气溶胶瞬时辐射强迫效率:

$$\text{ARFE} = \text{ARF}/\text{AOD}_{500}. \quad (6)$$

本文辐射强迫计算采用 SBDART (Santa Barbara disort atmospheric radiative transfer) 模型^[17], 该辐射传输模型由美国加利福尼亚大学地球系统计算学院研发, 可用于计算晴空和有云条件下地气系统辐射传输, 并可计算特定高度的向上和向下的辐射通量. SBDART 模型提供热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季、亚北极冬季和 US62 标准大气廓线. 同时, 还提供了乡村型、城市型和海洋型等标准气溶胶模式和水汽、甲烷、一氧化碳、二氧化硫等的混合比垂直廓线及其他 13 种微量气体的垂直廓线.

气溶胶直接辐射强迫计算流程如图 2 所示. 本文中, SBDART 模型计算气溶胶直接辐射强迫输入的参数包括太阳-天空辐射计 440、675、870、1 020 nm 波段的 AOD、SSA、不对称因子 (g)、AE, OMI 的臭氧数据和 MODIS 地表反照率数据 (MOD09). 水汽廓线和温室气体浓度等也会微弱影响气溶胶辐射强迫的计算^[18], 本文对这些参数采用模式默认设置数值.

1.2 数据介绍

太阳-天空辐射计 CE318 是进行大气气溶胶光学特性观测的参考仪器. CE318 在紫外到近

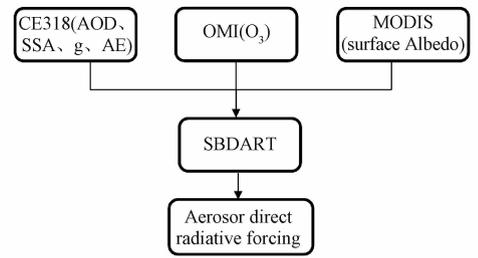


图 2 气溶胶直接辐射强迫计算流程图

Fig. 2 Flow chart of calculation of aerosol direct radiative forcing

红外波段 (340 ~ 1 640 nm) 共设有 8 个光谱通道, 它既可以自动进行太阳直射辐射观测, 也可以进行平纬圈 (ALM) 和主平面 (PPL) 天空光扫描观测. CE318 测得的太阳直射辐射数据可以用来计算气溶胶光学厚度、大气透过率和水汽总量等信息; 而主平面和平纬圈天空扫描数据可以用来反演气溶胶粒子的单次散射反照率、不对称因子和散射相函数等光学参数^[19].

臭氧是大气中的微量成分, 它强烈吸收波长短于 300 nm 的太阳辐射. 本文应用的臭氧数据^[20]来源于美国 Aura 卫星上的大气成分探测传感器 OMI. 该传感器可以探测可见光和紫外波段的太阳后向散射辐射, 利用臭氧在 331.2 nm 和 317.5 nm 波段的强吸收特性进行臭氧总量的反演. 本研究中采用 OMI Level 3 全球臭氧格网产品, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

地表反照率表征地球表面对太阳辐射的反射能力, 是影响气溶胶辐射强迫的重要因素. 本文地表反照率数据来源于 MODIS 的 MOD09 地表反照率产品^[21]. MODIS 可以每天覆盖全球一次, 提供可见光、近红外和红外共 36 个通道的遥感数据. MOD09 产品基于 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型建立查找表反演计算得到, 并经过了严格的大气校正、几何校正和辐射校正. 本文使用的 MOD09A1 数据是 500 m 分辨率的地表反射率 8 天合成产品.

2 结果分析

2.1 SBDART 辐射通量计算结果与观测数据的比较

本次实验在唐山设置了 Kipp&zone 辐射表, 用来直接观测地面接收到的向下辐射通量, 该仪

器的观测光谱范围为 $0.3 \sim 2.8 \mu\text{m}$. 将实测和 SBDART 模型计算(依据图 2 流程)的地面下行辐射通量进行对比(图 3)可以看出,计算和实测结果具有较好的相关性,直线拟合的斜率为 0.96,相关系数达到 0.94. SBDART 计算结果和实测数据的平均相对误差为 5.8%. 可见,基于气溶胶、臭氧、地表反照率观测数据,采用 SBDART 模型能较为准确的计算辐射通量,可用于气溶胶直接辐射强迫分析.

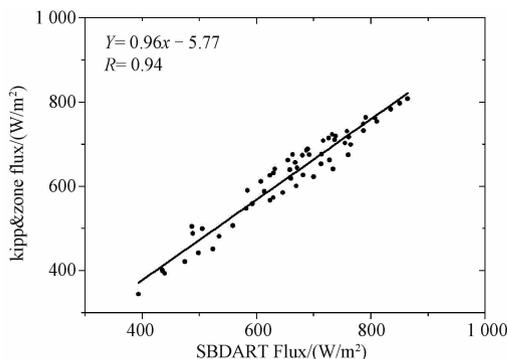


图 3 辐射通量计算结果与实验期间观测数据的对比

Fig. 3 Comparison of SBDART calculation results with direct flux measurements

2.2 气溶胶光学特性分析

AOD、SSA、 g 和 AE, 这 4 个参数是计算气溶胶辐射强迫的关键参数. 实验期间,北京、塘沽、唐山 3 个站点的平均气溶胶光学参数如表 1 所示. AOD 是气溶胶消光系数在垂直方向上的积分,用来描述整层大气气溶胶对太阳光的衰减作用,能够反映大气中气溶胶的含量. 通常来说, AOD 越小,空气越清洁;反之, AOD 越大,大气污染越严重. 北京站点 440 nm 处平均 AOD 为 (0.43 ± 0.28) ,塘沽站点为 (0.82 ± 0.67) ,其值最大,唐山站点为 (0.66 ± 0.44) . Che 等^[4]研究表明,中国北方清洁天气平均 AOD_{500} 小于 0.3,本次实验 3 个站点的 AOD 均值都大于 0.4,说明该地区存在较高程度的污染. SSA 反映了气溶胶总体消光中散射所占的比例,用来描述气溶胶的辐射吸收特性. 北京站点 440 nm 处 SSA 为 (0.85 ± 0.04) ,塘沽站点 SSA 介于北京和唐山站点之间,为 (0.90 ± 0.03) ,唐山站点 SSA 最大,为 (0.93 ± 0.03) . 该地区 SSA 均值都大于 0.85,说明该地区气溶胶散射性较强^[22]. g 反映了气溶胶前向散射比例,越接近 1 说明前向散射越强. 北京站点 440 nm 处

g 为 (0.70 ± 0.02) ,塘沽站点 g 略大,为 (0.72 ± 0.02) ,唐山站点略小于塘沽站点,为 0.71 ± 0.03 . 晴空条件下, g 的变化范围是从极清洁条件下的 0.1 到严重污染条件下的 0.75^[23]. 该地区 g 均小于 0.75,也说明空气污染较严重,气溶胶前向散射比例大. AE 反映气溶胶颗粒物的相对大小,值越大气溶胶中细粒子比例越高. 北京站点 440 ~ 870 nm 的 AE 为 (0.95 ± 0.24) ,塘沽站点 AE 居中,为 (1.04 ± 0.27) ,唐山站点 AE 最大,为 (1.17 ± 0.29) . 该地区 AE 值都在 0.95 以上,说明气溶胶主要以细粒子为主. 概括来讲,京津唐地区 3 个站点 AOD 均大于 0.4,空气中气溶胶含量较多,消光作用较强;SSA 均大于 0.85,气溶胶散射性较强; g 均小于 0.75,前向散射比例较高;AE 均大于 0.95,大气中细颗粒居多. 这主要是由于该地区受到人为排放气溶胶的显著影响^[24].

表 1 实验期间 3 个站点的平均气溶胶光学参数

Table 1 Mean aerosol optical properties at the three observation sites during the experiment

站点	AOD ₄₄₀	SSA ₄₄₀	g_{440}	AE ₄₄₀₋₈₇₀
北京	0.43 ± 0.28	0.85 ± 0.04	0.70 ± 0.02	0.95 ± 0.24
塘沽	0.82 ± 0.67	0.90 ± 0.03	0.72 ± 0.02	1.04 ± 0.27
唐山	0.66 ± 0.44	0.93 ± 0.03	0.71 ± 0.03	1.17 ± 0.29

2.3 气溶胶直接辐射强迫分析

实验期间,北京、塘沽和唐山 3 个站点的日均气溶胶直接辐射强迫如图 4 所示. 北京站点大气顶、地表和大气层气溶胶直接辐射强迫分别为 (-6.58 ± 5.06) 、 (-30.14 ± 13.21) 和 $(23.56 \pm 9.50) \text{W}/\text{m}^2$. 大气顶气溶胶直接辐射强迫较小,可能是受到春季沙尘的影响,因为沙尘气溶胶对太阳辐射存在较强的吸收,吸收性气溶胶增多将减小大气顶气溶胶直接辐射强迫^[25]. 塘沽站点大气顶、地表和大气层的气溶胶直接辐射强迫分别为 (-13.65 ± 11.51) 、 (-39.11 ± 20.5) 和 $(5.46 \pm 12.93) \text{W}/\text{m}^2$,其值均高于北京和唐山站点,这与该站点 AOD₄₄₀ 均值最高相关,同时说明塘沽站点气溶胶对太阳辐射的影响较大. 唐山站点大气顶、地表和大气层气溶胶直接辐射强迫分别为 (-11.68 ± 7.72) 、 (-28.06 ± 13.34) 和 $(16.38 \pm 8.23) \text{W}/\text{m}^2$. 单次散射反照率是决定气溶胶直接辐射强迫是导致冷却还是加热效应的重要因子. 当 SSA > 0.95 时,气溶胶在大气顶产生显著

的负辐射强迫,即冷却地气系统;当 $SSA < 0.85$ 时,气溶胶在大气顶产生的辐射强迫为正值,对地气系统有加热作用;当 SSA 介于 0.85 和 0.95 之间时,受地表反照率和气溶胶光学特性的影响,辐射强迫效应不确定^[26]. 该地区靠近渤海,受海洋型气溶胶影响较大,气溶胶散射性较强, SSA 均介于 $0.85 \sim 0.95$ 之间,但对大气顶均产生负辐射强迫. 总体而言,京津唐地区气溶胶直接辐射强迫整体上较高,气溶胶对大气顶和地表产生降温效应,对大气层产生增温效应,有利于逆温结构的形成,加剧污染物的积聚^[12].

2.4 气溶胶辐射强迫效率分析

为进一步研究气溶胶对辐射强迫的影响,进行气溶胶辐射强迫效率分析. 图 5 为 3 个站点大

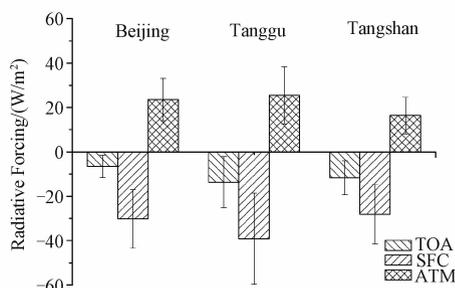


图 4 实验期间不同站点的晴空日均气溶胶直接辐射强迫

Fig. 4 Daily mean aerosol direct radiative forcing at the three sites under clear sky

气顶、地表和大气层瞬时直接辐射强迫随 AOD 的变化关系图. 图中拟合直线的斜率绝对值即为气溶胶辐射强迫效率.

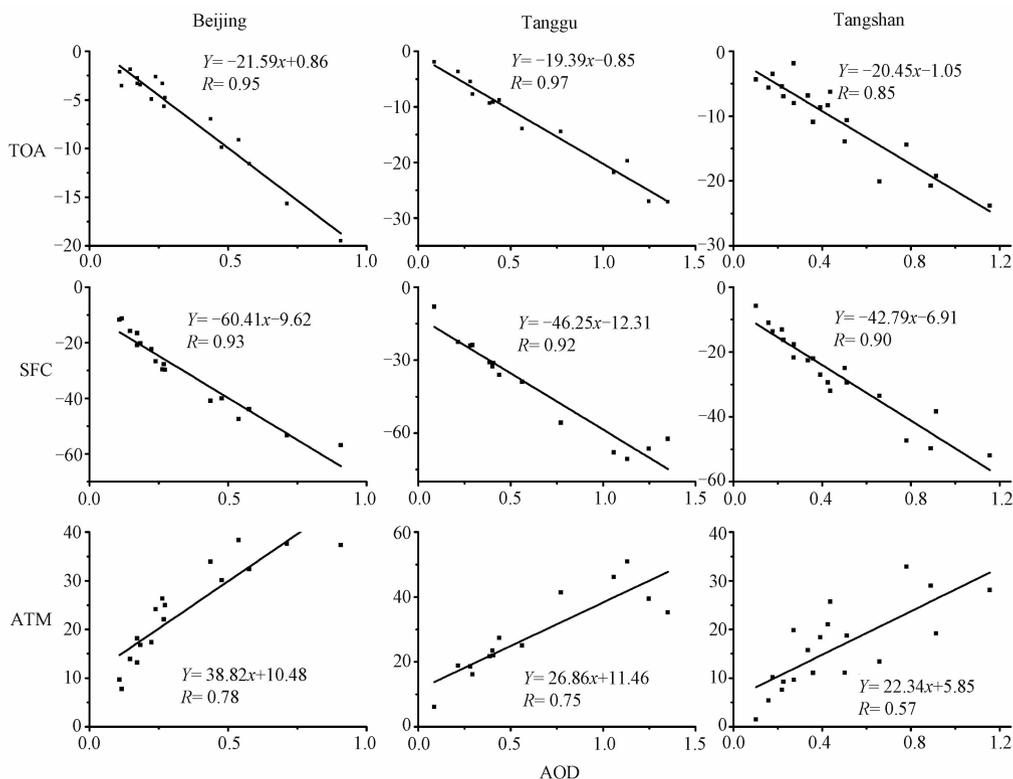


图 5 大气顶、地表和大气层气溶胶瞬时直接辐射强迫与 AOD 的线性回归

Fig. 5 Instantaneous aerosol direct radiative forcing at TOA, in the surface, and in the atmosphere as functions of AOD

从图 5 中可以看出,气溶胶瞬时辐射强迫与 AOD 有良好的相关性,相关系数较高. 当 AOD 增大时,气溶胶辐射强迫绝对值增大;反之, AOD 减小时,气溶胶辐射强迫减小. 地表处的斜率最大,说明地表处的辐射强迫对 AOD 变化最敏感,这是由于地表处辐射强迫值较大的原因. 大气层内的气溶胶辐射强迫效率主要表现了气溶胶的吸收作

用. 当 AOD 增大时,大气吸收的太阳辐射增多,导致大气增温. 大气顶的辐射强迫效率对 AOD 的敏感性相对最小. 3 个站点中,北京站点在大气顶、地表和大气中的辐射强迫效率最大,分别为 -21.59 、 -60.41 和 38.82 W/m^2 ,这主要是由于北京站点 SSA 最小,气溶胶吸收性较强、前向散射较小,到达地面的辐射通量减少,使大气层吸收

更多的辐射能量,从而在大气顶、地表和大气层的辐射强迫效率就大^[7].塘沽和唐山受海洋型气溶胶成分影响,吸收性成分比例相对北京而言偏小^[27],单次散射反照率显著高于北京,因此气溶胶辐射强迫效率低于北京.塘沽站点在大气顶、地表和大气层的辐射强迫效率分别为 -19.39 、 -46.25 和 26.86 W/m^2 .塘沽地表和大气层中的辐射强迫效率相对唐山较大,可能是因为相对较大的 AOD 和较小的 SSA 的缘故.唐山站点在大气顶、地表和大气中的辐射强迫效率分别为 -20.45 、 -42.79 和 22.34 W/m^2 .唐山 SSA 最大,气溶胶散射性强,辐射强迫效率相对较小.

3 结论

本文利用地基和卫星遥感资料,借助辐射传输模型分析了 2012 年 3 月京津唐地区气溶胶光学特性及直接辐射强迫,研究得出以下结论:

1)2012 年 3 月京津唐地区大气中气溶胶含量较高,观测结果显示:北京、塘沽、唐山站点平均 AOD 分别为 (0.43 ± 0.28) 、 (0.82 ± 0.67) 和 (0.66 ± 0.44) ,平均 SSA 分别为 (0.85 ± 0.04) 、 (0.90 ± 0.03) 和 (0.93 ± 0.03) ,平均 g 分别为 (0.70 ± 0.02) 、 (0.72 ± 0.02) 和 (0.71 ± 0.03) ,平均 AE 分别为 (0.95 ± 0.24) 、 (1.04 ± 0.27) 和 (1.17 ± 0.29) .这说明京津唐地区气溶胶有较强的消光作用,散射性较强,气溶胶前向散射比例大,气溶胶中细颗粒居多.

2)晴空条件下,北京、塘沽、唐山的大气顶的气溶胶日均直接辐射强迫分别为 (-6.58 ± 5.06) 、 (-13.65 ± 11.51) 和 $(-11.68 \pm 7.72) \text{ W/m}^2$,地表为 (-30.14 ± 13.21) 、 (-39.11 ± 20.5) 和 $(-28.06 \pm 13.34) \text{ W/m}^2$,大气层为 (23.56 ± 9.50) 、 (25.46 ± 12.93) 和 $(16.38 \pm 8.23) \text{ W/m}^2$.这表明该区域气溶胶造成大气增温,地表降温,有利于逆温结构的形成,不利于大气污染物的扩散.

3)观测期间,气溶胶直接辐射强迫与 AOD 有良好的相关性,并随 AOD 的增加而增大.其中地表处的辐射强迫效率最大,大气层的辐射强迫效率次之,大气顶的辐射强迫效率最小.北京站点虽然辐射强迫值小,但其辐射强迫效率在 3 个站点中最大,这主要是因为其 SSA 最小.

感谢中国科学院遥感与数字地球研究所

AERONET 北京 RADI 站点工作人员.

参考文献

- [1] 廖国男. 大气辐射导论 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2004.
- [2] Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 张华, 黄建平. 对 IPCC 第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 40-44.
- [4] Che H, Xia X, Zhu J, et al. Column aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during a serious haze-fog month over North China Plain in 2013 based on ground-based sunphotometer measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(4): 2 125-2 138.
- [5] 张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 等. 区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2 439-2 448.
- [6] 宋姚, 麻金继. 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, 2012, 7(6): 445-451.
- [7] 吴彬, 张筱萌, 王堰. 气溶胶辐射强迫效率研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(4): 253-261.
- [8] Li Z, Gu X, Wang L, et al. Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(20): 10 171-10 183.
- [9] 张小玲, 唐宜西, 熊亚军, 等. 华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2014, 31(3): 337-344.
- [10] 丁峰, 张阳, 李鱼. 京津冀大气污染现状及防治方向探讨 [J]. 环境保护, 2014, 42(21): 55-57.
- [11] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考 [J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 353-363.
- [12] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义, 现状及展望 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396.
- [13] 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): 1 147-1 158.
- [14] 张华, 马井会, 郑有飞. 沙尘气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. 气象学报, 2009, 67(4): 510-521.
- [15] Li Z, Lee K H, Wang Y, et al. First observation-based estimates of cloud-free aerosol radiative forcing across China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D7): D00 18.
- [16] Magi B I, Fu Q, Redemann J, et al. Using aircraft measurements to estimate the magnitude and uncertainty of the shortwave direct radiative forcing of southern African biomass

- burning aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research; Atmospheres*, 2008, 113(D5):D05213.
- [17] Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth' s atmosphere [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10): 2 101-2 114.
- [18] Zhang H, Shen Z, Wei X, et al. Comparison of optical properties of nitrate and sulfate aerosol and the direct radiative forcing due to nitrate in China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 113: 113-125.
- [19] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research; Atmospheres*, 2000, 105(D8): 9 791-9 806.
- [20] Balis D, Kroon M, Koukouli M E, et al. Validation of ozone monitoring instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations [J]. *Journal of Geophysical Research; Atmospheres*, 2007, 112(D24): D24S46.
- [21] Privette J L, Myneni R B, Knyazikhin Y, et al. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 232-243.
- [22] 车慧正, 石广玉, 张小曳. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5): 699-704.
- [23] Zege E P, Ivanov A P, Ka tsev I L. *Image transfer through a scattering medium* [M]. Springer Verlag, 1991.
- [24] 张志薇, 王宏斌, 张镭, 等. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶微物理特性分析及比较 [J]. *中国环境科学*, 2014(8): 1 927-1 937.
- [25] Xia X, Wang M. Latest advances in aerosol absorption and its climate effects [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 630-635.
- [26] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2 119-2 124.
- [27] 宋怀荣. 黄渤海海域和北京地区大气气溶胶物理特性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.