

王恒阳,李祥琛,王 爽,等.基于蓝天空反照率的气溶胶辐射强迫模拟 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4469-4477.

Wang H Y, Li X C, Wang S, et al. Simulation of aerosol radiative forcing based on blue sky albedo [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4469-4477.

## 基于蓝天空反照率的气溶胶辐射强迫模拟

王恒阳<sup>1</sup>,李祥琛<sup>1</sup>,王 爽<sup>2</sup>,唐洪钊<sup>3\*</sup> (1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033; 2.吉林省突发事件预警信息发布中心,吉林 长春 130062; 3.自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048)

**摘要:** 利用 MODIS 短波段黑天空反照率(BSA)和白天空反照率(WSA)数据,结合 6S 辐射传输模型模拟的天空散射光比例因子计算得到蓝天空反照率,基于包头市 Aerosol Robotic Network (AERONET)站点的气溶胶光学厚度(AOD)、粒径分布和复折射系数数据通过 6S 辐射传输模型模拟 2018~2021 年地表(SFC)和大气层顶(TOA)ARF,并比较不同类型反照率(BSA 和 WSA)、不同气溶胶模型 ARF 与真实 ARF 的差距.结果表明:TOA ARF 均值为 $(1.54 \pm 3.8) \text{W/m}^2$ ,其值正负与地表反照率和单次散射反照率有关;大陆型和城市型 TOA ARF 均为正值,约为真实值的 2.2 和 8.6 倍;沙漠型 TOA ARF 大多为负值,在部分反照率较大的月份为正值.SFC ARF 均值为 $(-30.39 \pm 9.5) \text{W/m}^2$ ,夏秋季节绝对值较低;大陆型、城市型和沙漠型 SFC ARF 约为真实值的 1.1、1.76 和 0.77 倍,不同气溶胶模型对 SFC ARF 影响较小.利用三段法模拟的黑碳(BC)ARF 结果表明 SFC 和 TOA BCARF 均值分别为 $(-6.82 \pm 4.3) \text{W/m}^2$ 和 $(2.23 \pm 1.5) \text{W/m}^2$ ,SFC BCARF 占总 SFC ARF 的 7.3%~40.4%,夏季占比普遍较高.

**关键词:** 气溶胶辐射强迫; 6S; 反照率; 黑碳

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)09-4469-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230523.007

**Simulation of aerosol radiative forcing based on blue sky albedo.** WANG Heng-yang<sup>1</sup>, LI Xiang-chen<sup>1</sup>, WANG Shuang<sup>2</sup>, TANG Hong-zhao<sup>3\*</sup> (1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Jilin Emergency Warning Information Dissemination Center, Changchun 130062, China; 3.Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China). *China Environmental Science*, 2023,43(9): 4469~4477

**Abstract:** This article calculated the blue sky albedo using MODIS shortwave Black Sky Albedo (BSA) and White Sky Albedo (WSA) data combined with the 6S radiation transfer model simulated sky scattering light proportion factors. Based on the aerosol optical depths (AOD), particle size distribution, and complex refractive index data from the AERONET station in Baotou, the 6S radiation transfer model was used to simulate the surface (SFC) and top of atmosphere (TOA) ARF from 2018 to 2021. The differences between different types of albedos (BSA and WSA) and different aerosol models ARF and the true ARF were compared. The results showed that the average TOA ARF was  $(1.54 \pm 3.8) \text{W/m}^2$ , and its value was related to the surface albedo and single scattering albedo (SSA). The continental and urban TOA ARF were positive values, about 2.2 and 8.6 times the real value, respectively. The desert TOA ARF was mostly negative, and in some months with large albedo, it was positive. The average SFC ARF was  $(-30.39 \pm 9.5) \text{W/m}^2$ , with lower absolute values in summer and autumn. The continental, urban and desert SFC ARF were about 1.1, 1.76 and 0.77 times the real value, respectively, and different aerosol models had little effect on SFC ARF. The results of the three wavelengths method simulation of black carbon (BC) ARF showed that the average SFC and TOA BCARF were  $(-6.82 \pm 4.3) \text{W/m}^2$  and  $(2.23 \pm 1.5) \text{W/m}^2$ , respectively, and SFC BCARF accounts for 7.3% to 40.4% of the total SFC ARF, with a higher proportion in summer.

**Key words:** aerosol radiative forcing; 6S; albedo; black carbon

大气气溶胶通过吸收和散射太阳辐射影响地气系统的辐射平衡,从而对气候变化产生重要影响<sup>[1]</sup>.气溶胶还可能造成空气污染、能见度降低以及人体健康危害<sup>[2]</sup>.气溶胶根据其来源可分为自然气溶胶和人为气溶胶<sup>[3]</sup>,其中人为黑碳气溶胶(BC)对气候和人类影响较大<sup>[4]</sup>.气溶胶辐射强迫(ARF)是指大气气溶胶引起的净辐射变化,是气溶胶对气候影响的关键参数<sup>[5]</sup>,可以定量地评估气溶胶对气候的影

响.BC 是由化石燃料、生物燃料不完全燃烧产生<sup>[6]</sup>,能够吸收可见和近红外波段的太阳辐射<sup>[7-8]</sup>,是气溶胶化学组分中最有效的 ARF 因子<sup>[9-10]</sup>,对总 ARF 的贡献较大<sup>[11]</sup>.因此,ARF 是研究气溶胶对地气辐射平衡及气候影响的必要手段<sup>[12]</sup>.

收稿日期: 2023-01-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3903005;2022YFB3903000)

\* 责任作者,高级工程师, tanghz@pku.edu.cn

目前,针对 ARF 的计算主要是将气溶胶特性参数输入到辐射传输模型中进行数值模拟.已有研究利用 SBDART 模型结合 AERONET 数据评估了北京地区近 10a ARF,大气层顶、地面和大气中的气溶胶直接辐射强迫多年均值分别为 $(-24.91 \pm 19.80) \text{ W/m}^2$ 、 $(-65.52 \pm 43.78) \text{ W/m}^2$ 、 $(40.61 \pm 28.62) \text{ W/m}^2$ ,表明气溶胶对大气层顶(TOA)和地表(SFC)产生冷却效应,对大气产生加热作用,并利用三段法模拟了 BC ARF<sup>[13]</sup>.此外有研究发现在高反射率地区(沙漠和雪)TOA ARF 为正值对大气层顶产生加热作用,因此计算 ARF 时必须考虑地表反照率所带来的影响<sup>[14]</sup>,同时需要考虑气溶胶模型的设定对 TOA ARF 的影响<sup>[15]</sup>.为更加真实地模拟 ARF,本文利用 MODIS(中分辨率成像光谱仪)短波段白天天空反照率(WSA)和黑天空反照率(BSA)遥感影像结合 6S 辐射传输模型模拟的天空散射光比例因子计算得到真实反照率即蓝天反照率.同时基于 2018~2021 年 AERONET(全球自动观测网络)包头市站点(AOE\_Baotou)中的气溶胶光学厚度(AOD)、粒径分布和复折射系数的实部与虚部数据,利用 6S 辐射传输模型模拟在真实地表反照率和真实气溶胶模型条件下地表和大气层顶短段波气溶胶直接辐射强迫,并分析了不同类型地表反照率(BSA 和 WSA)和不同气溶胶模型条件下与真实条件下 ARF 的差距.最后,本文利用三段法结合 MERRA-2M2T1NXAER 遥感影像中的 Angstrom 指数获取了包头站点的 BCAOD 进而计算了 BC ARF.

## 1 实验数据与方法

### 1.1 研究区域

AERONET 包头市站点(AOE\_Baotou)位于中国内蒙古自治区包头市( $40.852^\circ\text{N}$ , $109.629^\circ\text{E}$ ).包头市夏季相对潮湿炎热,其中一半以上的降水出现在 7 月和 8 月.站点附近地物以沙地为主,地表反照率较大,其周围干燥的晴空条件被认为是辐射定标理想的实验条件,因此建立了自主辐射定标场网(RadCalNet).RadCalNet 是国际卫星对地观测委员会(CEOS)定标与真实性检验工作组(WGCV)于 2014 年提出的国际场地定标最新理念,核心是自动化、无人值守、可追溯,可以提供观测场地 400~1000nm 的反射率数据以及对应的 550nm AOD、水汽、臭氧、

地表压力和温度等参数<sup>[16]</sup>.AERONET 包头市站点高反射率地物有助于分析不同反照率对 ARF 的影响,此外通过计算 ARF 可以定量地分析气溶胶对气候的影响程度以及 6S 辐射传输模型中内置的气溶胶模型与真实气溶胶模型的差异.

### 1.2 实验数据

本文所使用的 AOD、粒径分布、复折射系数的实部与虚部以及单次散射反照率(SSA)数据均来自 AERONET.AERONET 是由 NASA 建立的全球气溶胶光学性质监测网络<sup>[17]</sup>,在全球拥有 500 多个站点,主要使用太阳光度计直接观测太阳,具有低不确定度(0.01~0.02)和高时间分辨率(15min)等优势<sup>[18]</sup>,并可以获得高精度的 AOD 及其微物理参数<sup>[19]</sup>.考虑到数据的质量和数量,本文选择包头市 1.5 级的气溶胶数据.6S 模型中需要输入 550nm AOD,可以利用 440nm AOD、870nm AOD 和 440~870nm Angstrom 指数,将 440 或 870nm 的 AOD 插值为 550nm AOD<sup>[20]</sup>.地表反照率数据选择 MODIS MCD43A3V6 全球反照率数据集短波段 BSA 与 WSA,数据集以给定日期为中心,使用 16d 的 Terra 和 Aqua MODIS 数据以 500m 的分辨率生成,可以提供 MODIS 的 7 个波段以及 3 个宽带(可见光、近红外和短波)的 BSA 和 WSA<sup>[21]</sup>.MODIS 由于配备有星上定标器,太阳光波段反射率精度为 $\pm 2\%$ <sup>[22]</sup>,自 2002 年发射以来,一直提供高精度的地气系统辐射观测数据.沙尘、黑碳和有机碳气溶胶 Angstrom 指数(470~870nm)选用 MERRA-2M2T1NXAER 遥感影像,该数据提供间隔为 1h 的各气溶胶成分(黑碳、灰尘、海盐、硫酸盐和有机碳)的柱浓度、550nm 消光和散射 AOD 以及 470~870nm 的 Angstrom 指数等,以上两种遥感数据集均可在 Google Earth Engine(GEE,<https://code.earthengine.google.com/>)中进行处理和下载.由于以上 3 种数据时间间隔不同,以 AERONET 数据时间为基准,按照时间最近匹配其他数据进行 ARF 的模拟计算.

### 1.3 研究方法

**1.3.1 蓝天反照率的计算** 天空散射光比例因子是太阳漫射辐照度与太阳总辐照度的比值,与气溶胶的特性有关<sup>[21]</sup>.目前,有关地表反照率的研究往往忽视了天空散射光比例因子直接使用 WSA 或利用经验公式<sup>[23]</sup>计算蓝天反照率.本文利用 GEE 遥

感云平台提取出 2018~2021 年 AERONET 包头市站点的 MODIS MCD43A3V6 短波段 BSA 与 WSA 日均值,将太阳天顶角和 AOD 等参数输入到 6S 辐射传输模型中计算天空散射光比例因子,利用式(1)计算出短波段蓝天空反照率。

$$\alpha = \beta \cdot \alpha_w + (1 - \beta) \alpha_B \quad (1)$$

式中: $\alpha_w$ 代表短波段 WSA;  $\alpha_B$ 代表短波段 BSA;  $\beta$ 为天空散射光比例因子; $\alpha$ 为最终得到的短波段蓝天空反照率<sup>[24]</sup>。

**1.3.2 气溶胶辐射强迫的计算** ARF 指大气气溶胶引起的净辐射变化,常用来评估气溶胶对大气的影晌程度,其计算公式如式(2)所示。

$$\text{ARF} = (F_1 \downarrow - F_1 \uparrow) - (F_0 \downarrow - F_0 \uparrow) \quad (2)$$

式中: $F_1$ 代表当气溶胶存在时向下或向上的辐射通量,  $\text{W/m}^2$ ;  $F_0$ 代表无气溶胶时向下或向上的辐射通量<sup>[25]</sup>。在利用 6S 辐射传输模型模拟 ARF 时,除了输入某时刻的太阳天顶角、AOD 和蓝天空反照率之外,还应输入气溶胶的粒径分布与复折射系数的实部与虚部用来建立气溶胶模型,从而更加真实地进行数值模拟。6S 中需要输入 20 个波长的复折射系数,可以利用 AERONET 提供的已知波长复折射系数通过内插和外插计算得到<sup>[14]</sup>,波长范围设置为 0.25~4 $\mu\text{m}$ 。为研究不同类型反照率及不同气溶胶模型对 ARF 模拟的影响,本文还计算了地表反照率选择 WSA、BSA 以及气溶胶模型选择 6S 内置的大陆型(Continental)、城市型(Urban)和沙漠型(Desert)各条件下 ARF 与真实(Real)ARF 的差距。根据上式计算的 ARF 为某一时刻瞬时的模拟结果,为消除太阳天顶角不同带来的影响,利用式(3)和式(4)计算 ARF 日均值<sup>[5,26]</sup>。

$$\text{ARF}_{\text{Day}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ARF}(\mu_i) f(\mu_i) \Delta\mu_i}{\sum_{i=1}^n f(\mu_i) \Delta\mu_i} \quad (3)$$

$$f(\mu) = -\frac{24}{2\pi \sqrt{(\cos \varphi \cos \delta)^2 - (\mu - \sin \varphi \cos \delta)^2}} \quad (4)$$

式中: $\text{ARF}_{\text{Day}}$ 为 ARF 日均值;  $\text{ARF}(\mu_i)$ 表示当太阳天顶角余弦值为  $\mu_i$  时 ARF 的瞬时值;  $\varphi$  为纬度;  $\delta$  代表太阳赤纬;  $\mu$  为太阳天顶角余弦值,可以根据时间及经纬度,利用式(5)计算得到。

$$\cos \theta_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (5)$$

式中: $\theta_s$ 为太阳天顶角;  $\omega$ 为时角。

**1.3.3 三段法计算黑碳气溶胶光学厚度** 沙尘、黑

碳和有机碳气溶胶作为主要的 3 类吸收性气溶胶,能够吸收太阳短波辐射,影响地气系统的辐射收支平衡<sup>[27]</sup>。在无云或少量云等条件下,BC AOD 等典型的吸收型气溶胶光学厚度(AAOD),可以使用 SSA 和 AOD,根据式(6)计算得到<sup>[28]</sup>。

$$\text{AAOD}(\lambda) = (1 - \text{SSA}(\lambda)) \times \text{AOD}(\lambda) \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 代表波长。陈斌根据以上结论利用 440,675,870nm 3 个波长的 AOD、SSA 以及对应的 Angstrom 指数,对式(7)进行解方程得到 3 类吸收性 AOD<sup>[29]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{AAOD}(\lambda) = & \text{AAOD}_{\text{Dust}}(\lambda_{\text{ref}}) \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ref}}}\right)^{-\text{AAE}_{\text{Dust}}} \\ & + \text{AAOD}_{\text{BC}}(\lambda_{\text{ref}}) \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ref}}}\right)^{-\text{AAE}_{\text{BC}}} \\ & + \text{AAOD}_{\text{OC}}(\lambda_{\text{ref}}) \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ref}}}\right)^{-\text{AAE}_{\text{OC}}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\text{AAE}_{\text{Dust}}$ 、 $\text{AAE}_{\text{BC}}$ 和  $\text{AAE}_{\text{OC}}$ 分别为沙尘、黑碳和有机碳气溶胶在波长  $\lambda$  和  $\lambda_{\text{ref}}$  之间的 Angstrom 指数;  $\text{AAOD}_{\text{Dust}}$ 、 $\text{AAOD}_{\text{BC}}$ 和  $\text{AAOD}_{\text{OC}}$ 分别是沙尘、黑碳和有机碳气溶胶在波长  $\lambda_{\text{ref}}$  的光学厚度。本文基于三段法,通过 GEE 遥感云平台提取出 MERRA-2M2T1NXAER 遥感影像中 AERONET 包头市站点 2018~2021 年沙尘、黑碳和有机碳气溶胶的 Angstrom 指数(470~870nm)小时数据以及 AERONET 站点 3 个波长(440,675,870nm)的 SSA 数据解算出 550nm BCAOD 进而计算 BCARF。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表反照率月均值

利用 GEE 遥感云平台提取出 2018~2021 年 AERONET 包头市站点位置的 MODIS BSA 与 WSA 日均值,并结合 6S 辐射传输模型计算出短波段蓝天空反照率,其结果如图 1 所示。由于在计算 ARF 时需要匹配地表反照率数据、AOD、粒径分布和复折射系数等参数,因此剔除了数据较少的月份,最终得到了研究时段内的 33 个有效月均值数据,其中缺少 2018 年 1~2 月、2019 年 1~3 月及 9~12 月、2020 年 1~2 月及 12 月、2021 年 1~3 月的月均值数据。

由图 1 可知,研究区域内地表反照率较高,WSA、BSA 和蓝天空反照率整体均值分别为(0.215 $\pm$ 0.03)、(0.206 $\pm$ 0.03)和(0.208 $\pm$ 0.03),地表反照率较高的月份主要集中在 11~12 月和 3~4 月,其中蓝

天空反照率最大值出现在 2021 年 11 月为 $(0.32 \pm 0.02)$ ,低温、积雪以及土壤中水分的降低会导致反照率增加<sup>[21]</sup>.地表反照率较低的月份主要集中在温度高、降水充足的 7、8 月份,蓝天空反照率最小值

出现在 2020 年 8 月为 $(0.155 \pm 0.01)$ .大多数月份的 WSA 要大于 BSA,仅有少部分地表反照率较大的月份 BSA 会高于 WSA,蓝天空反照率位于 WSA 和 BSA 之间.

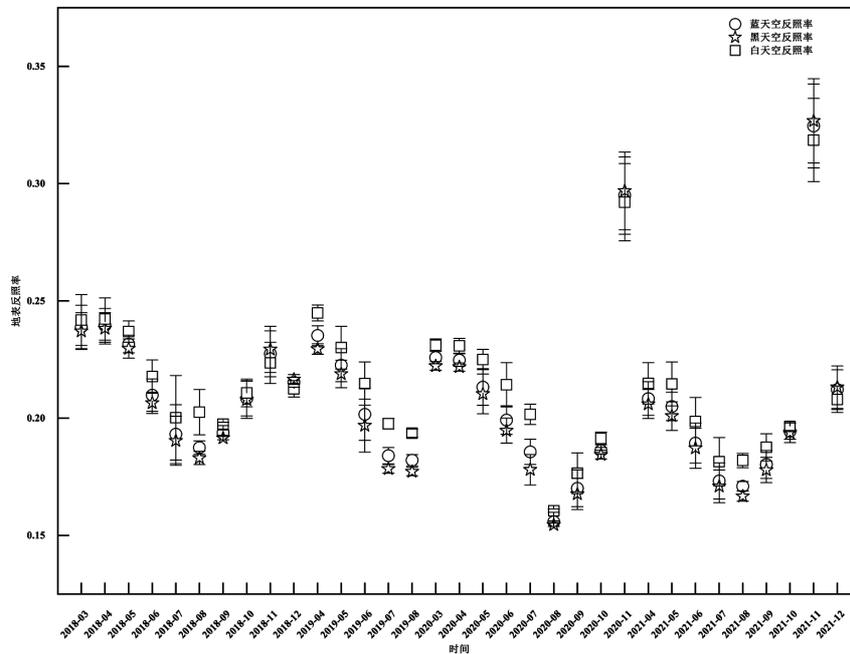


图 1 2018~2021 年 AERONET 包头市站点 MODIS 地表反照率月均值

Fig.1 Monthly mean MODIS surface albedo at AERONET Baotou station from 2018 to 2021

## 2.2 大气层顶气溶胶辐射强迫月均值

基于 2018~2021 年 AERONET 包头市站点的 AOD 及其微物理参数,利用 6S 辐射传输模型计算了真实气溶胶模型条件下的使用不同类型反照率 (BSA、WSA 和蓝天空反照率)的 TOA ARF,以及在蓝天空反照率条件下使用 6S 辐射传输模型中内置的大陆型 (Continental)、城市型 (Urban) 和沙漠型 (Desert) 气溶胶模型的 TOA ARF,结果如图 2 所示.

由图 2 可知,真实 TOA ARF (蓝天空反照率+真实气溶胶模型) 在研究时间段内整体均值为 $(1.54 \pm 3.8) \text{W/m}^2$ ,变化较为明显,在某些月份为正值或负值从而对大气层顶产生升温和冷却作用.最大值出现在 2020 年 5 月为 $(18.31 \pm 12.7) \text{W/m}^2$ ,最小值出现在 2019 年 8 月为 $(-3.84 \pm 3.4) \text{W/m}^2$ .TOA ARF 在大部分月份表现为正值,原因在于高反照率地物会使 TOA ARF 变为正值,此外气溶胶的吸收特性增强也会导致 TOA ARF 为正值.TOA ARF 为负值的月份主要集中在 7~9 月份,由图 1 可知这些月份的蓝天空反照率较低,因此导致 TOA ARF 为负值.不同地表反照率对

TOA ARF 计算结果的影响主要体现在数值差异,但在部分月份会出现正负差异,造成正负差异的原因在于这些月份的 ARF 日均值正负差异变化较大且 BSA 与 WSA 差距较大,求均值时会产生正负差异.TOA ARF 与地表反照率成正相关,随着地表反照率的增加 TOA ARF 由负值逐渐增加至正值,因此使用 WSA 计算的 TOA ARF 普遍大于真实 ARF,使用 BSA 计算的 TOA ARF 普遍小于真实 TOA ARF,其均值分别为 $(1.85 \pm 4.0) \text{W/m}^2$  和 $(1.40 \pm 3.7) \text{W/m}^2$ ,使用 BSA 计算的 TOA ARF 更接近真实情况.

通过不同气溶胶模型计算的 TOA ARF 结果可知,大陆型和城市型气溶胶模型计算的 TOA ARF 均为正值,而沙漠型大部分为负值,仅在 2020 年 11 月、2021 年 11~12 月为正值.为分析造成该结果的原因,将太阳天顶角和 550nm AOD 分别设定为  $20^\circ$  和 0.2,按照 0.01 步长增加地表反照率分别计算大陆型、城市型和沙漠型气溶胶模型 TOA ARF,结果表明当地表反照率分别大于 0.15、0.06 和 0.26 时对应的 TOA ARF 由负值转为正值.由图 1 可知蓝天空反照率均值

为 0.208,因此大陆型和城市型气溶胶模型计算的 TOA ARF 均为正值.对于一些反照率较大的月份蓝天空反照率可达 0.3,从而导致沙漠型气溶胶模型计算的 TOA ARF 为正值.在整个研究时段内,大陆型和城市型 TOA ARF 均值分别为 $(3.44 \pm 1.93)W/m^2$  和  $(13.28 \pm 5.2)W/m^2$ ,约为真实情况下的 2.2 倍和 8.6 倍,这说明包头市真实气溶胶模型与 6S 辐射传输模型中内置的气溶胶模型差距较大.相对于大陆型和城市型气溶胶模型,包头市真实气溶胶模型在其他参数相同

的情况下对大气层顶的影响较小,尤其相对于城市型气溶胶模型,这是由于城市气溶胶中黑碳等吸收性气溶胶占比较高导致 TOA ARF 的结果偏差巨大.TOA ARF 对 SSA 的变化非常敏感<sup>[30]</sup>,从 2020 年 5 月的 TOA ARF 结果可以看出,真实 TOA ARF 要大于大陆型和城市型 TOA ARF,这是因为该月份 440nm SSA 均值仅为 0.68,说明该月份吸收性气溶胶占比相对于城市型气溶胶还要大,气溶胶吸收的太阳辐射较多导致真实 TOA ARF 大于城市型 TOA ARF.

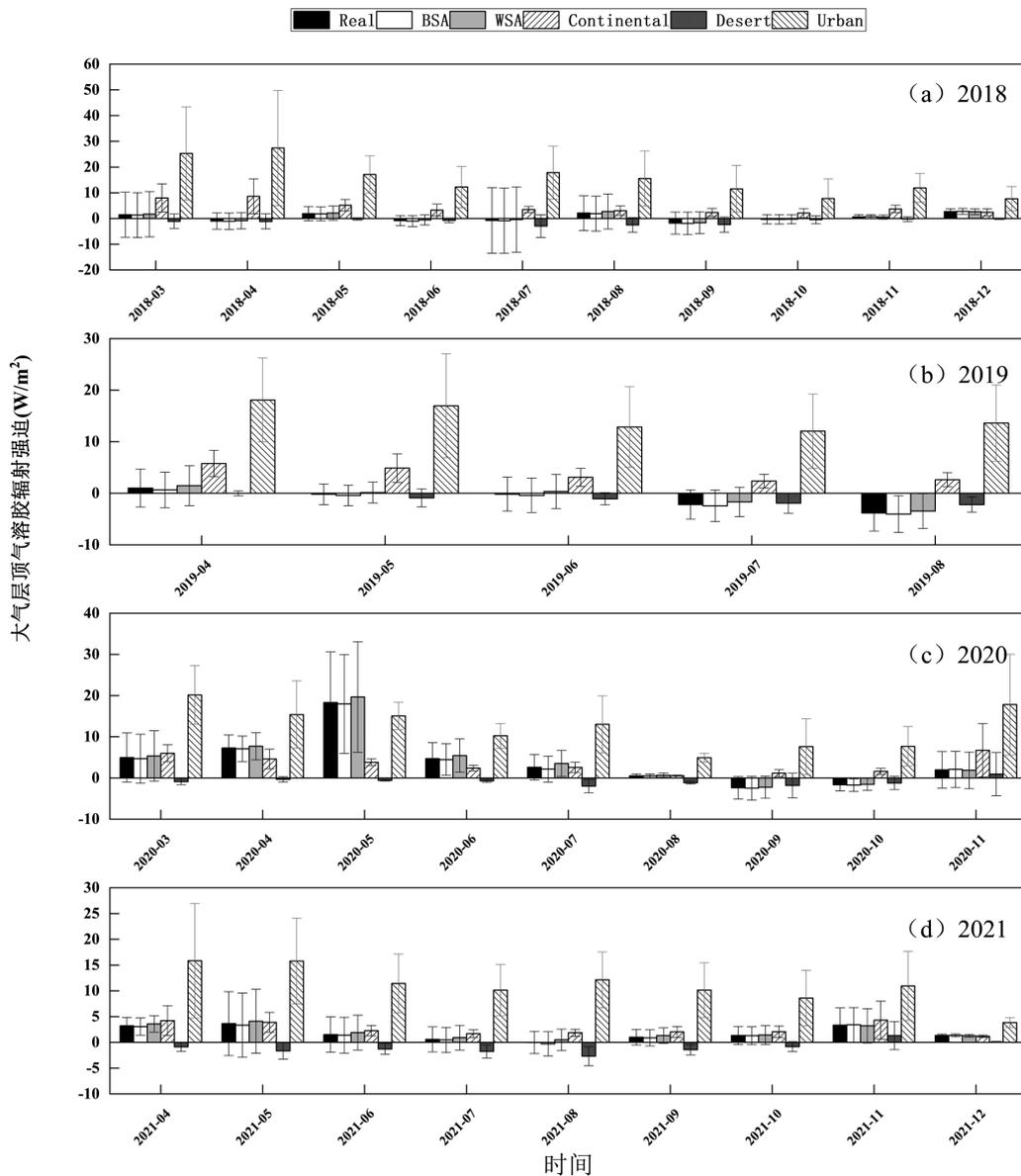


图2 2018~2021 年 AERONET 包头市站点不同类型反照率及不同气溶胶模型 TOA ARF  
Fig.2 TOA ARF of different types of albedos and aerosol models at AERONET Baotou station from 2018 to 2021

2.3 地表气溶胶辐射强迫月均值

不同类型反照率及不同气溶胶模型模拟的 SFC

ARF 结果如图 3 所示.

从图 3 可知,SFC ARF 均为负值对地表产生降

温作用,真实 SFC ARF 均值为 $(-30.39 \pm 9.5)W/m^2$ ,与北京、长三角等重工业城市相比其绝对值较小<sup>[13,15]</sup>,气溶胶对地表辐射平衡的影响程度较低<sup>[31]</sup>.真实 SFC ARF 在 2020 年 5 月绝对值最大为 $(-55.27 \pm 26.9)W/m^2$ ,在 2021 年 12 月绝对值最小为 $(-12.95 \pm 3.3)W/m^2$ .由于缺少冬季的数据,真实 SFC ARF 在春夏秋 3 个季节的均值分别为 $(-40.4 \pm 7.7)W/m^2$ 、 $(-28.87 \pm 6.0)W/m^2$ 、 $(-23.74 \pm 5.2)W/m^2$ .夏秋季节降水较多,大气相对干净,辐射强迫较小,春季气温较低不利于气溶胶的扩散,此外北方供暖和春季沙尘、扬尘会导致大气气溶胶含量增加,辐射强迫增大.从不同类型反照率计算的 SFC ARF 绝对值来看,BSA 计算的结果普遍大于真实结果,WSA 计算的结果普遍小于真实结果.地表反照率增加会导致在其他参数

相同情况下地表上行太阳辐射度增加,因此 SFC ARF 绝对值与地表反照率成反比<sup>[32]</sup>.研究时段内使用 WSA 和 BSA 模拟的 SFC ARF 均值分别为 $(-30.07 \pm 9.4)W/m^2$  和 $(-30.54 \pm 9.6)W/m^2$ ,说明反照率对 SFC ARF 的影响较小.不同气溶胶模型模拟的 SFC ARF 均为负值,仅在数值方面存在差异.研究时段内大陆型、城市型和沙漠型气溶胶模型模拟的 SFC ARF 均值分别为 $(-33.16 \pm 9.8)W/m^2$ 、 $(-53.77 \pm 15.8)W/m^2$  和 $(-23.26 \pm 6.7)W/m^2$ ,为真实情况的 1.1、1.76 和 0.77 倍.相较于 TOA ARF,不同气溶胶模型对 SFC ARF 的影响程度较小.此外,在 7~10 月,沙漠型 SFC ARF 与真实 SFC ARF 差距较小,且在 2020 年 10 月相差 1%,说明在夏秋季节包头市气溶胶类型更接近于沙漠型.

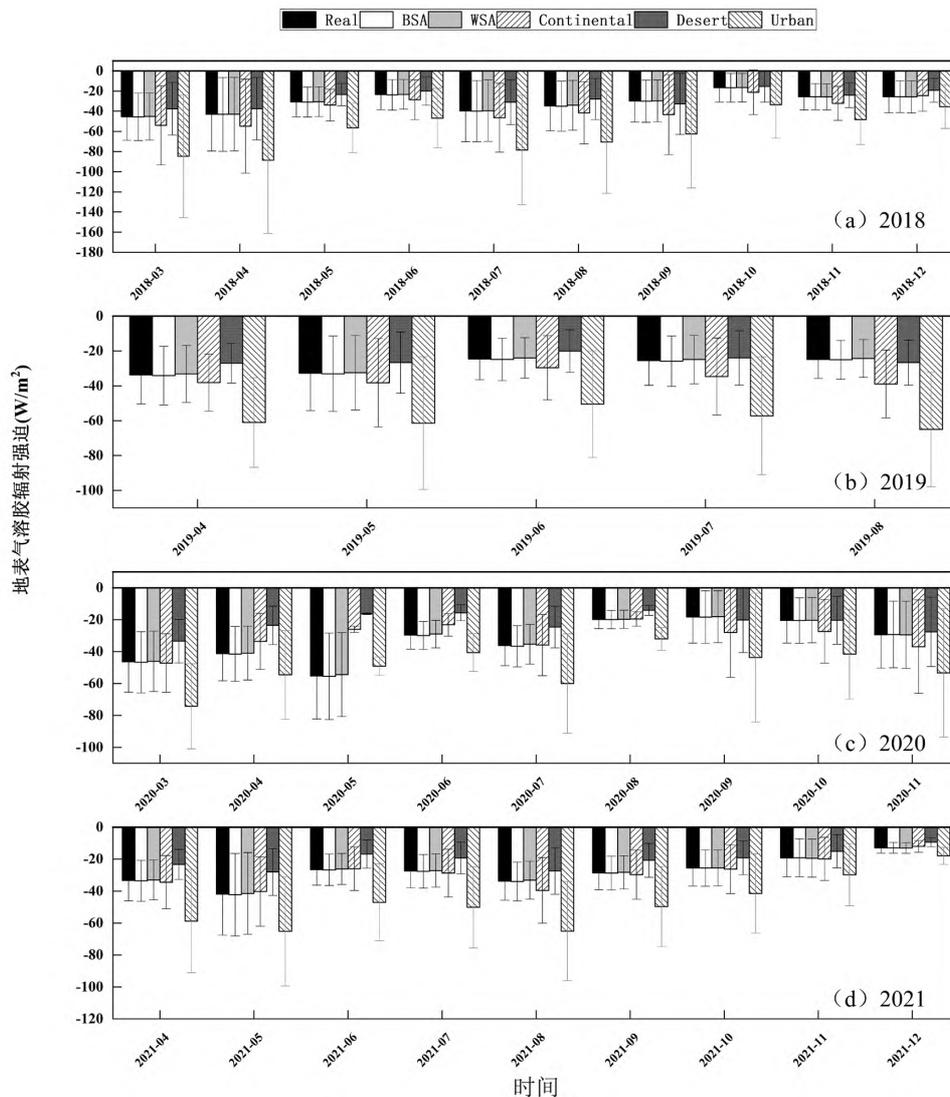


图 3 2018~2021 年 AERONET 包头市站点不同类型反照率及不同气溶胶模型 SFC ARF

Fig.3 SFC ARF of different types of albedos and aerosol models at AERONET Baotou station from 2018 to 2021

## 2.4 黑碳气溶胶辐射强迫月均值

基于三段法,通过 GEE 遥感云平台提取出 MERRA-2M2T1NXAER 遥感影像中 AERONET 包

头市站点 2018~2021 年 Angstrom 指数并解算出 BCAOD, 结合上文计算的蓝天空反照率计算 BCARF 月均值,结果如图 4 所示。

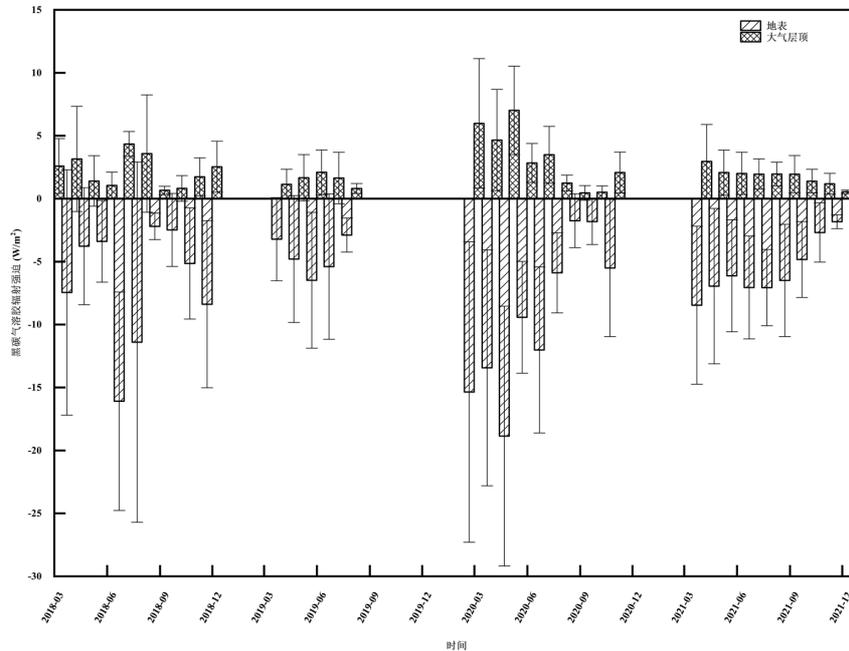


图 4 2018~2021 年 AERONET 包头市站点利用三段法计算的 BC ARF

Fig.4 BCARF calculated by three wavelengths method at AERONET Baotou station from 2018 to 2021

BC 气溶胶对可见和近红外波段具有较强的吸收作用,因此 TOA BCARF 均为正值,对大气层顶产生加热作用,SFC BCARF 为负值对地面产生冷却作用.通过 6S 辐射传输模拟发现地表反照率大于 0,TOA BCARF 即表现为正值.SFC 和 TOA BCARF 多年均值分别为 $(-6.82 \pm 4.3)W/m^2$  和 $(2.23 \pm 1.5)W/m^2$ ,与徐州<sup>[21]</sup>、北京<sup>[13]</sup>、南京<sup>[33]</sup>等重工业城市相比,其辐射效应偏低,因此空气中 BC 含量较低.BCARF 高值主要出现在春季,其中 SFC BCARF 最大值在 2020 年 5 月为 $(-18.86 \pm 10.3)W/m^2$ ,TOA BCARF 最大值在 2020 年 5 月为 $(7.01 \pm 3.5)W/m^2$ .春夏秋 3 个季节的 SFC BCARF 均值分别为 $(-8.90 \pm 5.2)W/m^2$ 、 $(-7.76 \pm 3.8)W/m^2$  和 $(-3.65 \pm 1.8)W/m^2$ ,TOA BCARF 均值分别为 $(3.27 \pm 1.9)W/m^2$ 、 $(2.25 \pm 1.0)W/m^2$  和 $(1.20 \pm 0.6)W/m^2$ .春季由于供暖和低温导致 BC 气溶胶的累积,使得 BCARF 较高,而夏季的太阳天顶角普遍较小,单位面积上接收到的太阳辐射通量增加,使得 BC ARF 增加.SFC BCARF 占总 SFC ARF 的 7.3%~40.4%,占比均值为 7.3%,其中 7、8 月份占比均达到 25%以上,说明夏季气溶胶对地表的冷却

作用主要来自 BC 气溶胶。

## 3 结论

3.1 使用 AERONET 包头市站点提供的 2018~2021 年 AOD、粒径分布、复折射系数数据和 MODSI 遥感影像中提取的短波段 BSA 与 WSA 数据,利用 6S 辐射传输模型模拟了在蓝天空反照率和真实气溶胶模型条件下 TOA 和 SFC ARF.

3.2 TOA ARF 整体均值为 $(1.54 \pm 3.8)W/m^2$ ,其值有正有负,与地表反照率有关,随着反照率的增加,TOA ARF 由负值逐渐增加至正值.研究区域内蓝天空反照率均值为 $(0.208 \pm 0.03)$ ,因此该地区 TOA ARF 大部分为正值.

3.3 SFC ARF 整体均值为 $(-30.39 \pm 9.5)W/m^2$ ,夏秋季节绝对值相对较低.不同类型反照率(BSA、WSA 和蓝天空反照率)对 ARF 的影响较小,仅存在数值方面的差异,但不同气溶胶模型对 ARF 影响较大,TOA ARF 结果可能存在正负差异,对 SFC ARF 的影响程度小于 TOA ARF.

3.4 城市型气溶胶模型与真实气溶胶模型的结果

偏差最大,约为真实 TOA ARF 的 8.6 倍,约为真实 SFC ARF 的 1.76 倍。

3.5 利用三段法模拟的 BCARF 结果表明,SFC 和 TOA BCARF 多年均值分别为 $(-6.82 \pm 4.3)$ 和 $(2.23 \pm 1.5)W/m^2$ ,表现为春高秋低的趋势.SFC BCARF 占总 ARF 的 7.3%~40.4%,其中夏季占比偏高。

#### 参考文献:

- [1] Rana A, Jia S G, Sarkar S. Black carbon aerosol in India: A comprehensive review of current status and future prospects [J]. *Atmos Res*, 2019,218:207-230.
- [2] Gharibzadeh M, Alam K, Abedini Y, et al. Climatological analysis of the optical properties of aerosols and their direct radiative forcing in the Middle East [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2019,183:86-98.
- [3] Knobelspiesse K, Cairns B, Redemann J, et al. Simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties during the MILAGRO field campaign [J]. *Atmos Chem Phys*, 2011,11(13):6245-6263.
- [4] Lai C H, Lin C H, Liao C C. Respiratory deposition and health risk of inhalation of particle-bound heavy metals in the carbon black feeding area of a tire manufacturer [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2017,10(10):1281-1289.
- [5] Srivastava A K, Yadav V, Pathak V, et al. Variability in radiative properties of major aerosol types: A year-long study over Delhi An urban station in Indo-Gangetic Basin [J]. *Sci Total Environ*, 2014,473:659-666.
- [6] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001,409(6821):695-697.
- [7] Cappa C D, Onasch T B, Massoli P, et al. Radiative absorption enhancements due to the mixing state of atmospheric black carbon [J]. *Science*, 2012,337(6098):1078-1081.
- [8] Satheesh S K, Vinoj V, Moorthy K K. Radiative effects of aerosols at an urban location in southern India: Observations versus model [J]. *Atmos Environ* (1994), 2010,44(39):5295-5304.
- [9] 陈勇航,白鸿涛,黄建平,等.西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究 [J]. *中国环境科学*, 2008,28(2):97-101.  
Chen Y H, Bai H T, Huang J P, et al. Comparison of cloud radiative forcing on the atmosphere-earth system over Northwestern China with respect to typical geo-topographic regions [J]. *China Environmental Science*, 2008,28(2):97-101.
- [10] 屈 垚,刘卉昆,周 岳,等.西安冬季大气棕碳光学特征及辐射强迫 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(10):4486-4493.  
Qu Y, Liu H K, Zhou Y, 等. Optical properties and radiative forcing contribution of brown carbon in Xi'an during winter [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4486-4493.
- [11] Bibi S, Alam K, Chishtie F, et al. Observations of black carbon aerosols characteristics over an urban environment: Radiative forcing and related implications [J]. *Sci Total Environ*, 2017,603:319-329.
- [12] Hansen J, Sato M, Kharecha P, et al. Earth's energy imbalance and implications [J]. *Atmos Chem Phys*, 2011,11(24):13421-13449.
- [13] 唐利琴,胡 波,刘 慧,等.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*, 2021,26(2):155-168.
- Tang L Q, Hu B, Liu H, et al. Aerosol optical properties and direct radiative forcing in Beijing in the recent decade [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021,26(2):156-169.
- [14] Garcia O E, Diaz J P, Exposito F J, et al. Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data [J]. *Atmos Chem Phys*, 2012,12(11):5129-5145.
- [15] 李雅雯,陈 健,张海龙,等.基于 GOCI 数据的霾天气气溶胶辐射强迫的日内变化——以长江三角洲为例 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(2):497-505.  
Li Y W, Chen J, Zhang H L, et al. Diurnal variations of aerosol radiative effect under haze weather condition using GOCI data-A case study of Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(2):497-505.
- [16] Bouvet M, Thome K, Berthelot B, et al. RadCalNet: A radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared spectral range [J]. *Remote Sens (Basel)*, 2019,11(20).
- [17] 贺 欣,周 茹,姚 媛,等.基于 AERONET 的中国地区典型站点气溶胶类型变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(2):485-496.  
He X, Zhou R, Yao Y, et al. The spatiotemporal variations of aerosol types in representative sites of China basing on the Aerosol Robotic Network [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(2):485-496.
- [18] Nichol J E, Bilal M. Validation of MODIS 3km Resolution Aerosol Optical Depth Retrievals Over Asia [J]. *Remote Sens (Basel)*, 2016,8(4).
- [19] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2000,105(D16):20673-20696.
- [20] Petrenko M, Ichoku C, Leptoukh G. Multi-sensor aerosol products sampling system (MAPSS) [J]. *Atmos Meas Tech*, 2012,5(5):913-926.
- [21] Chen W, Wang H Y, Zhao H M, et al. Google Earth Engine-assisted black carbon radiative forcing calculation over a heavy industrial city in China [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2020,13(3):329-338.
- [22] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. On-Orbit Calibration and performance of aqua MODIS reflective solar bands [J]. *Ieee Trans Geosci Remote Sens*, 2010,48(1):535-546.
- [23] Stokes G M, Schwartz S E. The atmospheric radiation measurement (ARM) program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1994,75(7):1201-1221.
- [24] Lewis P, Barnsley M J. Influence of the sky radiance distribution on various formulations of the Earth surface albedo [J]. *International Symposium on Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing Isprs*, 1994:701-715.
- [25] Boiyo R, Kumar K R, Zhao T L, et al. A 10-year record of aerosol optical properties and radiative forcing over three environmentally distinct AERONET sites in Kenya, East Africa [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2019,124(3):1596-1617.
- [26] Chen Y, Schleicher N, Fricker M, et al. Long-term variation of black carbon and PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China with respect to meteorological conditions and governmental measures [J]. *Environ Pollut*, 2016,

- 212:269-278.
- [27] Wild M, Ohmura A, Makowski K. Impact of global dimming and brightening on global warming [J]. *Geophys Res Lett*, 2007,34(4): 4702-4705.
- [28] Russell P B, Bergstrom R W, Shinzuka Y, et al. Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010,10(3):1155-1169.
- [29] 陈 斌. 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:兰州大学, 2012.
- Chen B. Detection Light-Absorbing Aerosols and Their Properties from Satellite and AERONET Observations over East Asia [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [30] Papadimas C D, Hatzianastassiou N, Matsoukas C, et al. The direct effect of aerosols on solar radiation over the broader Mediterranean basin [J]. *Atmos Chem Phys*, 2012,12(15):7165-7185.
- [31] 肖钟湧,江 洪. 长江三角洲地区大气顶气溶胶直接辐射强迫遥感估算 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(5):799-807.
- Xiao Z Y and Jiang H. Estimations of aerosol direct radiative forcing at the top of the atmosphere using remote sensing data in Yangtze River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(5):799-807.
- [32] 王文君. 基于卫星和地基观测的长三角地区气溶胶直接辐射效应研究 [D]. 南京信息工程大学, 2016.
- Wang W J. Study on aerosol direct radiative effect based on satellite and ground observation in Yangtze river delta [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016.
- [33] 田 军,王体健,庄炳亮,等. 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*, 2013,18(5):662-670.
- Tian J, Wang T J, Zhuang B L, et al. Study on concentration and radiative forcing of black carbon aerosol in suburban Nanjing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013,18(5):662-670.

**致谢:** 本研究采用了 Aeronet 官网、Google Earth Engine 提供的数据, 在此表示衷心的感谢!同时感谢审稿人对本文提出的宝贵的意见!

**作者简介:** 王恒阳(1995-),男,吉林通化人,助理研究员,硕士,主要从事气溶胶辐射强迫和遥感辐射定标方面的研究.wanghengyang@ciomp.ac.cn.