

李德平,程兴宏,孙治安,等. 北京不同区域气溶胶辐射效应. 应用气象学报,2018,29(5):609-618.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180509

## 北京不同区域气溶胶辐射效应

李德平<sup>1)</sup> 程兴宏<sup>2)3)\*</sup> 孙治安<sup>4)</sup> 王黎明<sup>5)</sup> 张本志<sup>6)</sup> 张天明<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(北京市气象探测中心,北京 100089)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

<sup>3)</sup>(中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081)

<sup>4)</sup>(澳大利亚气象局天气气候研究中心,墨尔本 3001)

<sup>5)</sup>(南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044)

<sup>6)</sup>(中国气象局气象探测中心,北京 100081)

### 摘 要

采用大气辐射传输模式 SES2 以及 2013 年 1 月—2015 年 10 月欧洲中期天气预报中心细网格再分析资料计算了北京地区 4 个观测站地面接收的短波辐射通量,分析了晴天和云天北京城郊气溶胶对总辐射的定量影响时空变化特征。结果表明:北京城区和近郊区气溶胶对总辐射的影响约为远郊区的 2 倍,北京南部和西部气溶胶对辐射的影响较大,晴天和云天北京城区和近郊区气溶胶对总辐射的削减值分别为  $146.23\sim 180.99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $202.11\sim 217.02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,晴天总辐射削减空间差异较大;秋冬季气溶胶对总辐射的影响明显大于春夏季,北京市观象台秋冬季气溶胶对总辐射的削减作用最大可达 60%,较春夏季高 10%~20%;北京城郊总辐射和直接辐射削减率与气溶胶光学厚度变化均呈线性关系,近地面  $\text{PM}_{2.5}$  浓度对辐射的影响不容忽视。

**关键词:** 气溶胶辐射效应; 影响差异; 北京城郊

### 引 言

近 20~30 年来,我国霾污染总体呈增加趋势,霾日数明显增加,且持续性霾污染天气过程增加显著,尤其是华北地区霾污染呈现持续时间长、范围广、影响大、污染重等特点<sup>[1-2]</sup>。霾和光化学污染已成为我国最严重的环境气象灾害,受到政府和公众广泛关注<sup>[3]</sup>。化石能源消耗造成的人为排放大气气溶胶显著增加以及不利的气象条件是我国近年来霾污染天气增多的主要原因<sup>[3-9]</sup>。大气气溶胶是影响地-气系统辐射平衡的重要辐射强迫因子,其对天气和气候的辐射反馈可分为直接和间接两部分<sup>[10-12]</sup>。一方面气溶胶通过反射和散射、吸收和释放等作用改变大气层顶和地表的太阳辐射量,从而改变地气

系统的能量收支,直接影响天气和气候变化;另外,气溶胶粒子还可作为云的凝结核改变云的光学特性和生命期,而间接影响天气和气候。目前大多数相关研究主要集中于气溶胶的直接和间接气候效应<sup>[13-16]</sup>,而对气溶胶在天气尺度上的辐射影响和反馈作用亦十分重要<sup>[17]</sup>。由于气溶胶生命周期较短(一般为几天到几周),而且区域性尺度较强,其辐射强迫作用一般位于排放源附近<sup>[13]</sup>,观测发现重污染过程大气气溶胶高浓度使城市地面接收的直接辐射减少 20%~30%<sup>[18-19]</sup>。

目前在天气尺度上研究气溶胶对太阳辐射、气温等气象要素的影响相对较少<sup>[17]</sup>。部分研究将气溶胶的辐射反馈过程离线耦合到 DREAM<sup>[20]</sup>、ECMWF<sup>[21]</sup>、WRF-ABL<sup>[22]</sup> 等天气预报模式中,或采用辐射传输模式 SBDART<sup>[23-24]</sup> 评估气溶胶对辐射、气温、气

2018-03-06 收到,2018-06-20 收到再改稿。

资助项目:北京市气象局科技项目(BMBKJ201501004),中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2016Y005)

\* 通信作者,邮箱:cxingh@cma.gov.cn

压等气象要素的影响。研究表明,北京地区重污染天气过程气溶胶的辐射强迫可达 $-136\sim-72\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[23]</sup>。由于气溶胶与太阳辐射之间存在复杂的相互作用,为了更好地研究气溶胶的短期直接和间接辐射反馈效应,人们试图采用中尺度气象-大气化学在线耦合模式在同一个数值模式框架中刻画大气物理过程与大气复合污染的相互影响。该类模式不仅可以很好地刻画气象场对气溶胶时空变化的显著影响,还可以在在一定程度上模拟出气溶胶与太阳辐射之间的互反馈过程<sup>[24-26]</sup>。近年来,国内外学者主要利用 WRF-Chem, GEOS-Chem, COSMO-ART, GRAPES-CUACE 等中尺度气象-大气化学在线耦合模式开展了气溶胶的天气尺度辐射效应研究<sup>[27-36]</sup>,结果表明:气溶胶的存在可使地面太阳辐射减小,进而显著改变温度、风速、边界层高度、降水量等气象条件。多数研究采用发展成熟、应用广泛的 WRF-Chem 完全在线耦合模式进行模拟<sup>[27,28,30,33-35]</sup>,部分研究<sup>[32-35]</sup>基于 WRF-Chem 模式和 2006—2007 年中国地区的排放源模拟了 2006 年 7 月、2008 年 7 月珠江三角洲、京津冀地区气溶胶对辐射、气温、风速、边界层高度等的影响。上述研究主要关注夏季中国部分地区的气溶胶辐射反馈效应,而针对华北地区冬季(如 2013 年 1 月)重霾污染天气过程气溶胶的辐射反馈效应研究鲜见报道,而且对重污染时段的  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气溶胶光学厚度(AOD)的模拟偏低<sup>[33-34]</sup>,导致气溶胶辐射反馈效应的模拟不确定性较大。为了减小气溶胶辐射效应模拟研究的不确定性,Cheng 等<sup>[36]</sup>采用自适应偏最小二乘回归法订正了 WRF-CMAQ-SES2 离线耦合模式系统模拟的 2013 年 1 月重霾污染过程中国地区 153 个站的气溶胶浓度及其垂直廓线,并设置两种模拟试验方案,研究了气溶胶对到达地面的短波辐射的影响效应及其地区差异。结果显示,采用不确定性较小的气溶胶垂直廓线资料模拟的总辐射和直接辐射更接近于实测值;2013 年 1 月重污染过程气溶胶对总辐射的削减值介于  $100\sim 500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,其辐射影响可为气溶胶气候效应的 2 个量级;由于气溶胶化学组成及其垂直分布的地区差异导致气溶胶的短期辐射影响程度自北向南呈减小趋势。

针对大气气溶胶的辐射效应模式计算的不确定性的评估及改进, Lin 等<sup>[37]</sup>采用统计方法以及观测的总云量和低云量估算云对辐射的影响,并与地

面观测的短波辐射进行比较,分析了风速对气溶胶短波辐射效应的影响。该研究采用统计方法和观测云量估算云对辐射的削减作用存在一定的不确定性,且未考虑水汽的影响;除风速外,相对湿度对霾污染过程气溶胶的吸湿增长起关键作用<sup>[38]</sup>,改变气溶胶的光学性质,对大气辐射强迫<sup>[39]</sup>的时空变化产生重要影响。因此,本文在 Lin 等<sup>[37]</sup>的研究基础上采用可准确刻画云和水汽对辐射影响的大气辐射传输模式,即采用大气辐射传输模式 SES2 和 2013 年 1 月—2015 年 10 月 ECWFM 再分析资料云和水汽场计算了北京地区 4 个观测站点考虑云和水汽影响的、地面接收的短波辐射通量,并与地面观测的辐射通量进行比较分析气溶胶的辐射效应。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文采用 2013 年 1 月—2015 年 10 月 ECMWF  $0.125^\circ\times 0.125^\circ$ , 3 h 1 次的云和水汽细网格再分析资料计算北京市观象台、海淀、石景山和上甸子 4 个辐射观测站地面接收的逐 3 h 短波辐射通量,并采用同期 4 个站的逐时辐射、云量观测资料研究了北京地区晴天和云天气溶胶辐射效应及其城郊差异,然后利用 4 个站或邻近环境监测站的地面观测  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度资料分析不同污染等级气溶胶对辐射的影响,上述观测资料均进行了质量控制。另外采用了同期北京市观象台和上甸子站逐日气溶胶光学厚度观测资料<sup>[40]</sup>分析了整层气溶胶对辐射的影响。各站使用资料见表 1。位于北京密云县东北边界的区域大气本底站上甸子站离城区较远(约 140 km),受污染源的影响较小,气溶胶浓度相对较低,地面观测  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度明显低于北京城区和近郊区 3 个站;另外 3 个站位于城区和近郊区,受本地和周边地区的污染源影响较大,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高。本文根据北京市观象台的总云量资料以及晴天的判断标准,即白天 08:00, 14:00(北京时,下同)共 2 个时次总云量均小于 2 成认为是晴天<sup>[41]</sup>,将 2013 年 1 月—2015 年 10 月分为晴天和云天,分别讨论了晴天和云天情况下北京地区 4 个站气溶胶引起的地面辐射削减率的时空变化特征以及 AOD,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和风速、湿度对各站辐射削减的影响。

表1 北京城郊4个辐射观测站使用资料  
Table 1 Available data at four stations in Beijing

观测站	总辐射、风速、湿度、云量	AOD
北京市观象台	2013-01—2015-10	2013-01—2015-10
海淀站	2014-01—2015-09	
石景山站	2014-04—2015-10	
上甸子站	2013-01—2015-10	2013-01—2015-10

## 1.2 方法

由于云、水汽、气溶胶是影响太阳短波辐射的主要因素,为研究气溶胶对辐射的影响,需剔除云和水汽的影响。本文参考 Lin 等<sup>[37]</sup>的研究方法,采用地面观测的短波辐射与考虑云和水汽,但未考虑气溶胶影响的辐射估算值之差作为气溶胶对辐射的影响。Lin 等<sup>[37]</sup>采用统计方法以及观测总云量和低云量估算云对辐射的影响,未考虑水汽的作用,本文采用的大气辐射传输模式可较准确刻画云和水汽的影响,并利用2013年1月—2015年10月ECMWF再分析资料云和水汽场计算了北京地区4个站考虑云和水汽影响的、地面接收的短波辐射通量。式(1)和(2)分别为气溶胶影响的辐射削减值和削减率:

$$R_S = R_{sim} - R_{obs}, \quad (1)$$

$$R = \frac{R_S}{R_{obs}}. \quad (2)$$

其中, $R_S$ 为气溶胶对辐射的削减估算值, $R_{sim}$ 为考虑云和水汽但未考虑气溶胶影响的地面太阳辐射模拟值, $R_{obs}$ 为观测辐射, $R$ 为气溶胶对辐射的削减率。

## 2 结果分析

### 2.1 北京城郊气溶胶对总辐射的影响差异

表2给出了4个站晴天样本和总样本情况下总辐射的削减率,可以看到,无论是晴天样本还是总样本,北京市观象台、石景山站、海淀站的总辐射削减值和削减率均大于上甸子站,尤其是削减值差异更大,即北京城区和近郊区气溶胶对总辐射的影响大于远郊区,晴天时总辐射削减值约为远郊区的2倍。上述城郊差异与大气污染物的空间分布较一致,即北京南部和西部污染较重,气溶胶对总辐射的影响较大。北京城区和近郊区(南、北、西面)晴天样本和总样本辐射削减值为 $146.23 \sim 180.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $183.53 \sim 229.97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,两种天气条件下的总辐射削减值大于 Wang 等<sup>[42]</sup>的研究结果:2004年10月29日( $\text{PM}_{10}$ 为 $320.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )北京地区发生霾污染过程时地面接收的总辐射平均减少了 $76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与该研究相比,本研究时段内北京地区发生

表2 4个站总辐射削减

Table 2 Global horizontal irradiance reduction ratios at four stations

观测站	晴天样本		总样本	
	削减值/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	削减率/%	削减值/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	削减率/%
北京市观象台	180.99	30	229.97	41
海淀站	146.23	33	183.53	36
石景山站	168.03	32	201.79	34
上甸子站	94.75	26	121.09	28

了多次更严重的霾污染天气,2013年1月污染最重时刻北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过了 $800 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[43]</sup>,北京城区 $\text{PM}_{10}$ 浓度是上述研究 $\text{PM}_{10}$ 最大浓度的2~3倍,因此,本研究中气溶胶对总辐射的削减值远大于上述研究结果。

### 2.2 晴天和云天气溶胶对辐射影响的时间变化

图1给出了4个站总辐射削减率的月变化特征,图2为北京市观象台 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与总辐射削减率的月变化特征。可以看到,4个站辐射削减的月变化呈显著的季节变化特征,即秋冬季各站

点的辐射削减率较大,春夏季远低于秋冬季,且晴天情况下4个站的季节变化特征更显著。另外,2015年秋冬季4个站的辐射削减率大于2013年和2014年秋冬季。

由图2可以看到,总辐射削减率的季节变化特征与 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节变化较一致,即秋冬季地面观测 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较大,气溶胶对总辐射的影响明显大于春夏季。秋冬季气溶胶对总辐射的削减作用最大可达60%,其削减率较春夏季高10%~20%。

晴天条件下,上甸子站气溶胶对辐射的影响明显小于其他 3 个站;云天条件下,北京市观象台与上甸子站的辐射削减小于其他 2 个站,且北京市观象台和上甸子站的辐射削减差异不大,这与云-气溶

胶-辐射之间复杂的相互作用有关。4 个站中海淀站和石景山站的辐射削减较大,这与 4 个站的污染状况差异有关。

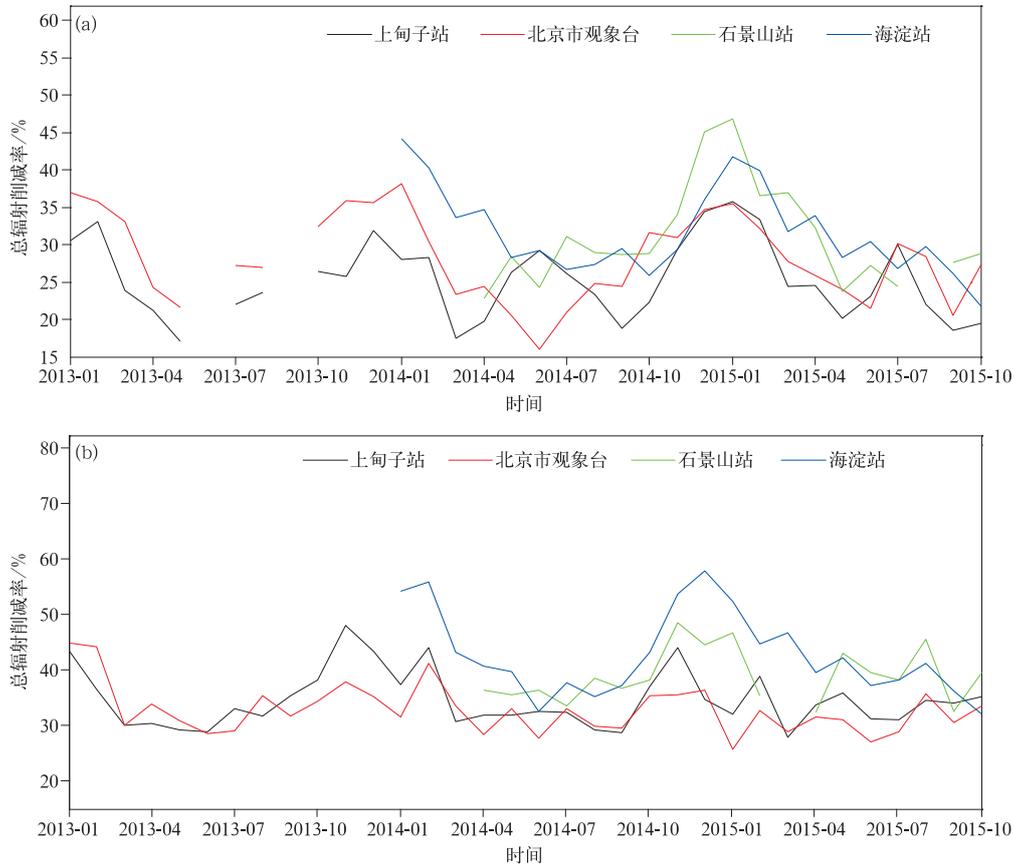


图 1 2013 年 1 月—2015 年 10 月晴天(a)、云天(b)总辐射削减率变化

Fig. 1 Monthly variation of global horizontal irradiance reduction ratios at four stations in clear days(a) and cloudy days(b) from Jan 2013 to Oct 2015

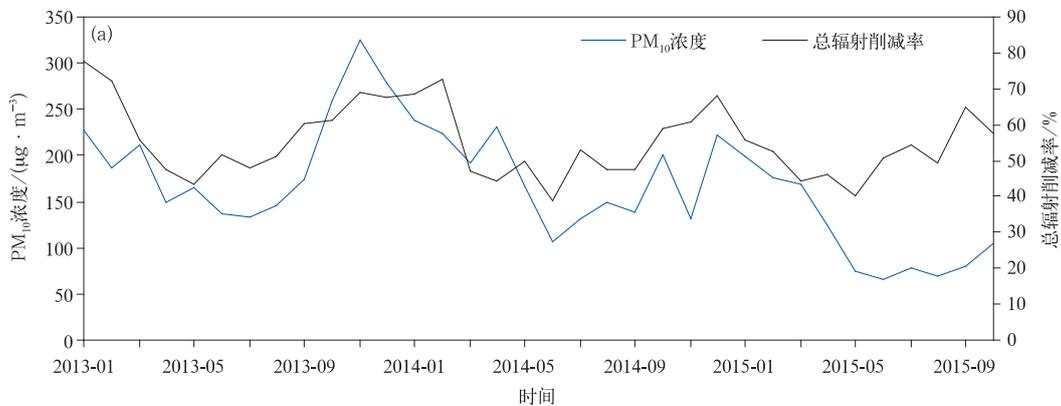
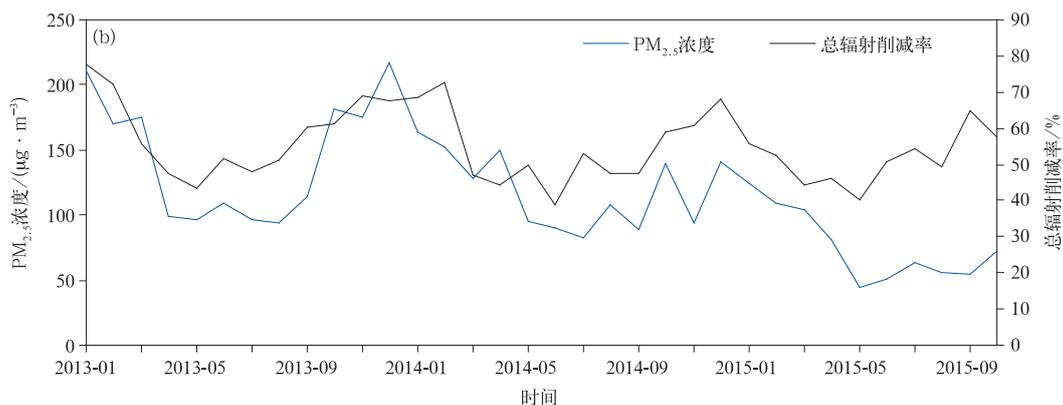


图 2 2013 年 1 月—2015 年 10 月北京市观象台地面观测  $PM_{10}$  浓度(a)、 $PM_{2.5}$  浓度(b)与总辐射削减率月变化

Fig. 2 Monthly variation of  $PM_{10}$  (a) and  $PM_{2.5}$  (b) concentrations on the ground and GHI reduction ratios at Beijing Weather Observatory from Jan 2013 to Oct 2015



续图 2

### 2.3 气溶胶对最大观测总辐射影响的时间变化

本文计算了 4 个站每日 12:00—14:00 辐射观测最大时刻的辐射削减率,其月变化特征如图 3 所示。可以看到,晴天和云天情况下 4 个站点最大辐

射观测时刻的辐射削减率亦存在显著的季节变化特征,与所有时刻的辐射削减率季节变化类似,但晴天情况下上甸子站的辐射削减季节变化与其他 3 个站有一定差异。

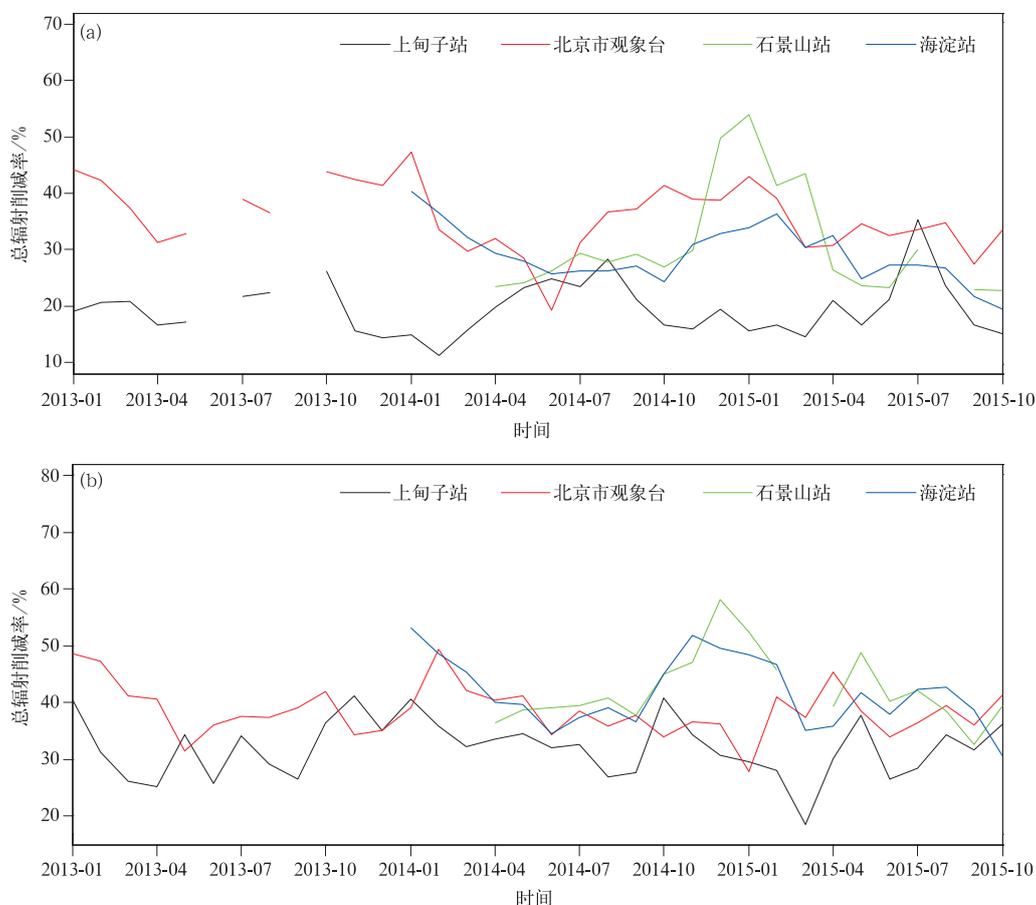


图 3 2013 年 1 月—2015 年 10 月 12:00—14:00 晴天(a)、云天(b)最大辐射观测时刻的总辐射削减率月变化

Fig. 3 Monthly variation of reduction ratios of maximum global horizontal irradiance in clear days(a) and cloudy days(b) at 1200—1400 BT from Jan 2013 to Oct 2015

无论晴天还是云天情况下,上甸子站的辐射削减率远小于其他 3 个站,即北京远郊区气溶胶对中午时段的总辐射削减远小于城区和近郊区,这反映出北京城郊大气污染差异对气溶胶辐射效应的影响。

#### 2.4 不同污染状况下的总辐射削减变化特征

为了分析不同污染状况下的总辐射削减率变化,本文根据中国环境保护部 2012 年 2 月 29 日发布的《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》<sup>[44]</sup>中的  $PM_{2.5}$  浓度分级标准,分别统计了晴天和云天情况下秋冬季北京市观象台与各分段  $PM_{2.5}$  浓度对应的总辐射削减率与地面观测  $PM_{2.5}$  分段平均浓度的变化关系(图略)。可以发现,晴天中度以上污染( $PM_{2.5}$  浓度大于  $115 \mu g \cdot m^{-3}$ )随着  $PM_{2.5}$  浓度的增加,总辐射削减亦呈增加趋势,而且在

$PM_{2.5}$  浓度达到严重污染水平时( $250 \sim 350 \mu g \cdot m^{-3}$ )总辐射削减率达到最大, $PM_{2.5}$  浓度更大时辐射削减率降低,这可能与不同污染状况下大气气溶胶的数浓度、粒子大小和形状、粒径分布等差异有关。

云天时当  $PM_{2.5}$  浓度小于  $350 \mu g \cdot m^{-3}$  时总辐射削减差异较小,大于该阈值时,总辐射削减有明显增加,这可能与云天湿度较大导致气溶胶浓度吸湿增长作用显著增强,从而造成气溶胶辐射影响增加有关。即云天相对湿度较小时,颗粒物的吸湿增长作用不明显, $PM_{2.5}$  浓度较小;但随着相对湿度的增加,吸湿增长作用明显增强, $PM_{2.5}$  浓度呈爆发式增长,导致气溶胶对辐射的削减作用增加。

图 4 和图 5 分别给出了总样本上甸子站和北京市观象台总辐射和直接辐射削减率与地面观测  $PM_{10}$

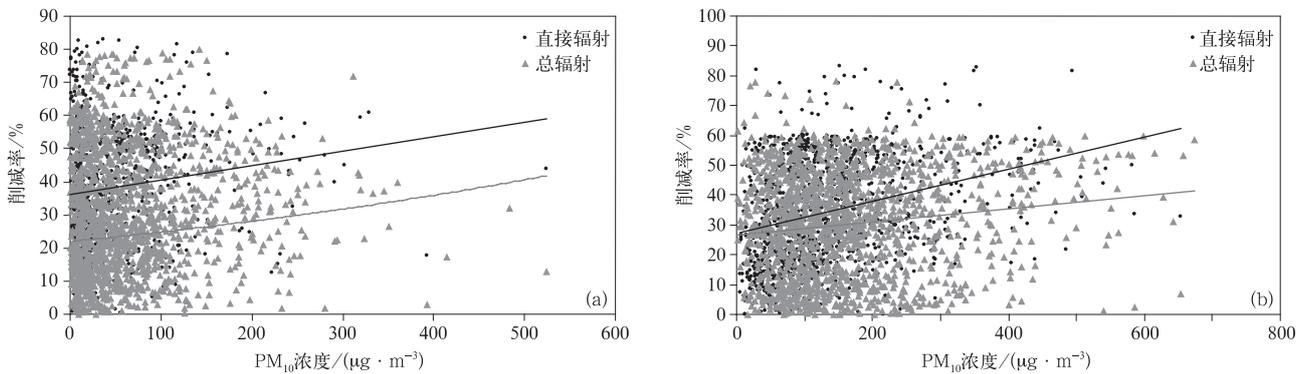


图 4 2013 年 1 月—2015 年 10 月上甸子站(a)、北京市观象台(b)总辐射和直接辐射削减率与地面观测  $PM_{10}$  浓度关系

Fig. 4 Relations of global horizontal irradiance and direct radiation reduction ratios to surface  $PM_{10}$  concentrations at Shangdianzi Station(a) and Beijing Weather Observatory(b) from Jan 2013 to Oct 2015

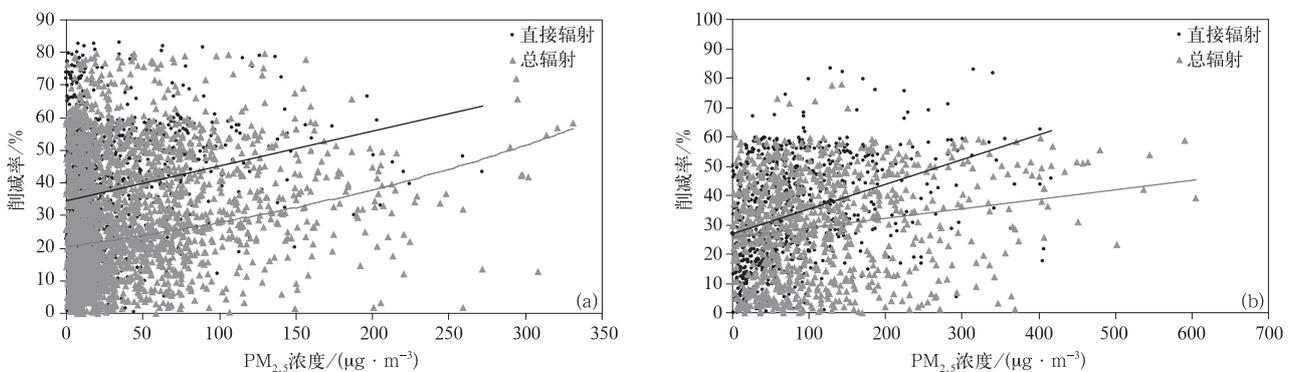


图 5 2013 年 1 月—2015 年 10 月上甸子站(a)、北京市观象台(b)总辐射和直接辐射削减率与地面观测  $PM_{2.5}$  浓度关系

Fig. 5 Relations of global horizontal irradiance and direct radiation to reduction ratios to surface  $PM_{2.5}$  concentrations at Shangdianzi Station(a) and Beijing Weather Observatory(b) from Jan 2013 to Oct 2015

和  $PM_{2.5}$  浓度的散点分布特征。上甸子和北京市观象台的总辐射、直接辐射与  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  的相关系数均达到 0.01 显著性水平,可见,近地层气溶胶对短波辐射有一定影响。另外  $PM_{2.5}$  浓度与短波辐射的相关系数略大于  $PM_{10}$ ,这说明细颗粒物对太阳辐射的吸收和散射作用较重要。

### 2.5 AOD 对总辐射削减的影响

本文采用上甸子站和北京市观象台 AOD 观测资料,定量分析了整层气溶胶的光学特性与总辐射削减的影响关系。

图 6、图 7 分别给出了晴天样本和总样本上甸子站和北京市观象台总辐射和直接辐射削减率与 AOD 分布特征。可以看到,两个站 AOD 与总辐射和直接辐射削减率均呈线性和指数关系,而且晴天

样本两者的相关系数均高于总样本,即晴天气溶胶对总辐射和直接辐射的影响更显著。晴天样本和总样本上甸子站和北京市观象台的总辐射、直接辐射与 AOD 的相关系数均达到 0.001 的显著性水平。即随着 AOD 的增加,总辐射和直接辐射削减率显著增大,而且 AOD 对直接辐射削减率的影响大于总辐射,尤其是污染较重的北京市观象台两者差异较大,这是由于总辐射中包含了散射,且云分布的不确定性以及气溶胶粒子对散射的影响较复杂<sup>[36]</sup>导致的。即大气污染严重时气溶胶可显著削减到达地面的短波辐射。另外,上甸子站 AOD 与总辐射削减率的拟合相关系数大于北京市观象台,直接辐射差异不明显,即北京市观象台气溶胶对总辐射的削减作用除受到 AOD 影响外,还与其他气象条件有

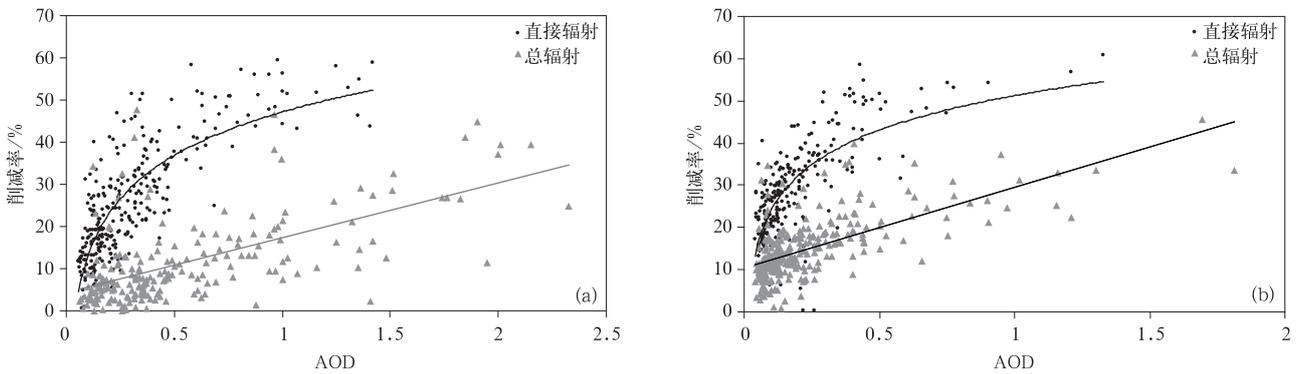


图 6 2013 年 1 月—2015 年 10 月晴天上甸子站(a)、北京市观象台(b)总辐射和直接辐射削减率与 AOD 关系

Fig. 6 Relations of global horizontal irradiance and direct radiation reduction ratios to AOD at Shangdianzi Station(a) and Beijing Weather Observatory(b) in clear days from Jan 2013 to Oct 2015

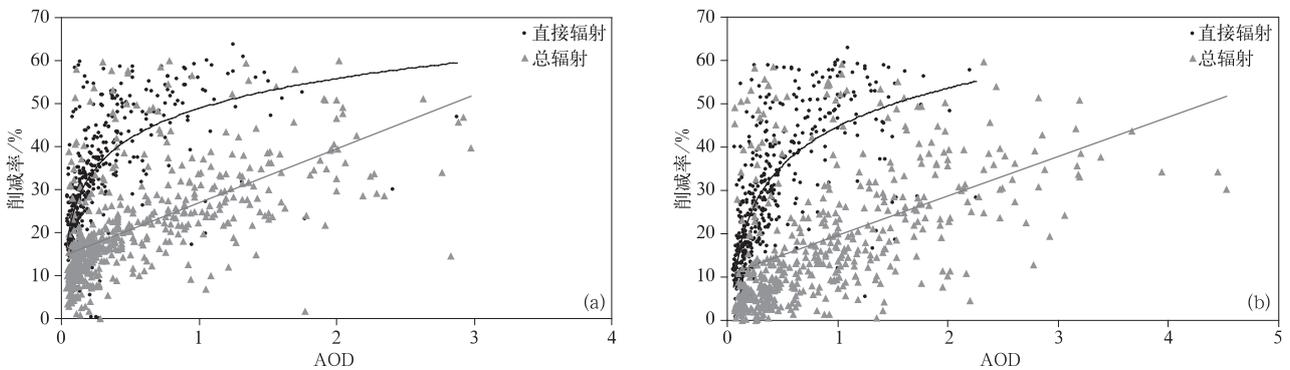


图 7 2013 年 1 月—2015 年 10 月上甸子站(a)、北京市观象台(b)总辐射和直接辐射削减率与 AOD 关系

Fig. 7 Relations of global horizontal irradiance and direct radiation reduction ratios to AOD at Shangdianzi Station(a) and Beijing Weather Observatory(b) from Jan 2013 to Oct 2015

关。由图4、图5和图6、图7可知,地面观测  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度与短波辐射削减率的相关性远小于 AOD,表明总辐射和直接辐射削减率取决于整个大气柱气溶胶短波辐射的吸收和散射作用,而不完全受近地层气溶胶的影响。

### 3 结论与讨论

本文研究表明:

1) 北京城区和近郊区气溶胶对总辐射的影响远大于远郊区,晴天时总辐射削减值约为远郊区的2倍;晴天情况下北京不同地区的总辐射削减值差异大于云天。北京城郊总辐射削减率的空间差异与大气污染物的空间分布较一致,北京远郊区气溶胶对中午时段的总辐射削减远小于城区和近郊区,反映出北京城郊大气污染差异对气溶胶辐射效应的影响。

2) 总辐射削减率的季节变化特征与  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  浓度的季节变化较一致,即秋冬季  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度较大,气溶胶对总辐射的影响明显大于春夏季,秋冬季气溶胶对总辐射的削减作用最大可达60%,其削减率较春夏季高10%~20%。

3) 晴天条件下,上甸子站气溶胶对辐射的影响明显小于其他3个站。晴天时中度以上污染随  $PM_{2.5}$  浓度的增加,总辐射削减呈增加趋势,而且在  $PM_{2.5}$  浓度达到严重污染水平时总辐射削减率达到最大,但  $PM_{2.5}$  浓度更大时辐射削减率降低;云天时当  $PM_{2.5}$  浓度小于  $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  时总辐射削减差异较小,大于该阈值时,总辐射削减有明显增加。

4) 北京城郊 AOD 与总辐射和直接辐射削减率均呈线性和指数关系,且晴天气溶胶对总辐射和直接辐射的影响更显著。即随着 AOD 的增加,总辐射和直接辐射削减率显著增大,AOD 对直接辐射削减率的影响大于总辐射。高层气溶胶对短波辐射的吸收和散射作用更大,细颗粒物对太阳辐射的吸收和散射作用亦较重要。

本文采用 ECMWF 再分析资料计算云和水汽对短波辐射的影响,并基于辐射计算值与观测值的差值计算气溶胶对短波辐射的短期影响效应,总样本情况下总辐射的削减值和削减率均大于晴天,这可能是因为本研究方法仅考虑了气溶胶对辐射的直接影响,而未考虑气溶胶-云-辐射的复杂相互作用;辐射削减不仅由  $PM_{10}$  或  $PM_{2.5}$  等气溶胶浓度造成,

还与云、水汽的影响有关,而且气溶胶-云-辐射之间的复杂相互作用亦会影响大气辐射传输过程,由于本文中采用的 ECMWF 再分析资料的云和水汽资料存在一定的不确定性,而且未考虑气溶胶-云-辐射的相互作用,因此,本文得出的初步结论有待进一步验证。另外,本研究对于如何完全剔除云的影响仍存在一定不确定性,今后将采用 GSI(gridpoint statistical interpolation system,格点统计插值)气象资料同化方法改进云和水汽的模式,从而改进云和水汽对辐射的影响效应,还将采用 WRF-Chem 等在线耦合模式研究北京地区霾污染过程气溶胶-云-辐射的互反馈机制,以减小气溶胶辐射效应研究的不确定性。

致谢:本文工作得到中国气象科学研究院车慧正研究员、中国气象局公共气象服务中心申彦波研究员、国家气象中心周军高级工程师、北京市气象局宋巧云高级工程师、刘文军高级工程师等的大力协助和支持,在此表示感谢。

### 参考文献

- [1] 王伟光,郑国光.气候变化绿皮书:应对气候变化报告(2013).北京:社会科学文献出版社,2013.
- [2] 徐祥德,丁国安,卞林根.北京城市大气环境污染机理与调控原理.应用气象学报,2006,17(6):815-828.
- [3] 徐晓斌.我国霾和光化学污染观测研究进展.应用气象学报,2016,27(5):604-619.
- [4] 贺泓,王新明,王跃思,等.大气灰霾成因与控制.中国科学院院刊,2013,28(3):344-352.
- [5] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考.科学通报,2013,58(1):1-10.
- [6] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等.珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究.应用气象学报,2008,19(1):1-9.
- [7] 王晓云,潘莉卿,吕伟林,等.北京城区冬季空气污染物垂直分布与气象状况的观测分析.应用气象学报,2001,12(3):279-286.
- [8] 靳军莉,颜鹏,马志强,等.北京及周边地区2013年1—3月  $PM_{2.5}$  变化特征.应用气象学报,2014,25(6):690-700.
- [9] 张雅斌,林琳,吴其重,等.“13·12”西安重污染气象条件及影响因素.应用气象学报,2016,27(1):35-46.
- [10] Liou K N, Sasamori T. On the transfer of solar radiation in aerosol atmosphere. *J Atmos Sci*, 1975, 32: 2166-2177.
- [11] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis // Contribution of WG I to the IPCC AR4. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [12] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of WG I to the IPCC AR4. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] 石广玉,王标,张华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应.大气科学,2008,32(4):826-840.

- [14] 胡慧敏,郭宏泰.大同市空气污染对太阳辐射的影响.应用气象学报,1992,3(4):468-472.
- [15] 吉振明,高学杰,张冬峰,等.亚洲地区气溶胶及其对中国区域气候影响的数值模拟.大气科学,2010,34(2):262-274.
- [16] 喻丽,申双和,陶苏林,等.基于空气污染指数的太阳日总辐射计算方法.应用气象学报,2015,26(3):291-299.
- [17] 廖礼,漏嗣佳,符瑜,等.中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响.大气科学,2015,39(1):68-82.
- [18] Jacovides C P, and Coauthors. Spectral solar irradiance and some optical properties for various polluted atmospheres. *Sol Energy*, 2000,69:215-227.
- [19] Latha K M, Badarinath K V S. Spectral solar attenuation due to aerosol loading over an urban area in India. *Atmos Res*, 2005,75:257-266.
- [20] Pérez C, Nickovic S, Pejanovic G, et al. Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts. *J Geophys Res*, 2006,111(D16), DOI:10.1029/2005JD006717.
- [21] Rodwell M J, Jung T. Understanding the local and global impacts of model physics changes: An aerosol example. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2008,134(635):1479-1497.
- [22] 邓涛,张镭,陈敏,等.高云和气溶胶辐射效应对边界层的影响.大气科学,2010,34(5):979-987.
- [23] Wang Y, Che H Z, Ma J Z, et al. Aerosol radiative forcing under clear, hazy, foggy, and dusty weather conditions over Beijing, China. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, DOI: 10.1029/2009GL037181.
- [24] 赵燃.北京区域大气气溶胶污染及其辐射强迫研究.兰州:兰州大学,2014.
- [25] Zhang Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: History, current status, and outlook. *Atmos Chem Phys*, 2008,8:2895-2932.
- [26] Zhang Y, Pan Y, Wang K, et al. WRF/Chem-MADRID: Incorporation of an aerosol module into WRF/Chem and its initial application to the TexAQS2000 episode. *J Geophys Res*, 2010,115(D18), DOI:10.1029/2009JD013443.
- [27] Baklanov A, Schlünzen K, Suppan P, et al. Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: Current status and prospects. *Atmos Chem Phys*, 2014,14(1):317-398.
- [28] Fast J D, Gustafson W I, Easter R C, et al. Evolution of ozone, particulates and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *J Geophys Res*, 2006,111, D21305.
- [29] Chapman E G, Gustafson W I, Easter R C, et al. Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources. *Atmos Chem Phys*, 2009,9:945-964.
- [30] Bangert M, Kottmeier C, Vogel B, et al. Regional scale effects of the aerosol cloud interaction simulated with an online coupled comprehensive chemistry model. *Atmos Chem Phys*, 2011,11:4411-4423.
- [31] Forkel R, Werhahn J, Hansen A. B, et al. Effect of aerosol-radiation feedback on regional air quality—A case study with WRF/Chem. *Atmos Environ*, 2012,53:202-211.
- [32] Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over East Asia. *J Geophys Res*, 2007,112, D03212, DOI: 10.1029/2006JD007114.
- [33] Wang Xuemei. WRF/CHEM modeling of impacts of weather conditions modified by urban expansion on secondary organic aerosol formation over Pearl River Delta. *Particuology*, 2009, 7(5):384-391.
- [34] Wang H, Sh G. Y, Zhang X Y, et al. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region—Part 2: Aerosols' radiative feedback effects. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2014(14):28269-28298.
- [35] 马欣,陈东升,高庆先,等.应用 WRF-chem 模式模拟京津冀地区气溶胶污染对夏季气象条件的影响.资源科学,2012,34(8):1408-1415.
- [36] Cheng Xinghong, Sun Zhian, Li Deping, et al. Short-term aerosol radiative effects and their regional difference during heavy haze episodes in January 2013 in China. *Atmos Environ*, 2017(165):248-263.
- [37] Lin C G, Yang K, Huang J P, et al. Impacts of wind stilling on solar radiation variability in China. *Sci Rep*, 2015, 5, 15135, DOI:10.1038/srep15135.
- [38] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014,514:218-222.
- [39] Malm C W, Day E D. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity. *Atmos Environ*, 2001,35:2845-2860.
- [40] Che H Z, Xia X G, Zhu J, et al. Aerosol optical properties under the condition of heavy haze over an urban site of Beijing, China. *Environ Sci Pollut Res*, 2015,22:1043-1053.
- [41] 程兴宏,刘瑞霞,申彦波,等.基于卫星资料同化和 LAPS-WRF 模式系统的云天太阳辐射数值模拟改进方法.大气科学,2014,38(3):577-589.
- [42] Wang Y, Che H, Ma J, et al. Aerosol radiative forcing under clear, hazy, foggy, and dusty weather conditions over Beijing, China. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L06804. DOI: 10.1029/2009GL037181.
- [43] 程兴宏,徐祥德,安兴琴,等.2013年1月华北地区重霾污染过程 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的 CMAQ 源同化模拟研究.环境科学学报,2016,36(2):638-648.
- [44] 中国环境保护部.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行).北京:中国环境科学出版,2012.

## Radiative Effects of Aerosols in Different Areas of Beijing

Li Deping<sup>1)</sup> Cheng Xinghong<sup>2)3)</sup> Sun Zhian<sup>4)</sup> Wang Liming<sup>5)</sup>  
Zhang Benzhi<sup>6)</sup> Zhang Tianming<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (*Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089*)

<sup>2)</sup> (*State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>3)</sup> (*Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>4)</sup> (*Research and Environmental Division, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne 3001*)

<sup>5)</sup> (*Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*)

<sup>6)</sup> (*CMA Meteorological Observation Center, Beijing 100081*)

### Abstract

Shortwave radiation fluxes on the ground at four stations in Beijing are calculated using the second Sun-Edward-Slingo radiative transfer (SES2) model and cloud and vapor data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis dataset (ECMWF-thin) with  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  spatial resolution from January 2013 to October 2015. And impacts of aerosol on surface radiation on synoptic scale in clear-sky and cloudy days in the urban and suburb of Beijing are respectively analyzed based on the difference between the modeled global horizontal irradiances (GHI) with the inclusion of cloud and vapor and the corresponding observations. Spatial-temporal variation characteristics of quantificational aerosol radiative effects on the synoptic scale in the urban (polluted area) and at Shangdianzi Regional Background Station (clean area) are preliminarily studied in different haze pollution episodes. Quantitative models between deduction ratios of GHI caused by aerosol and  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in the urban and suburb of Beijing are established. Results show that aerosol radiative effects on the synoptic scale in the urban are about twice of that at Shangdianzi Station, and those in south and west are larger than other areas. GHI reductions caused by aerosol fall in  $146.23 - 180.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  in clear-sky days and  $202.11 - 217.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  in cloudy days, and differences of GHI deduction in different districts in clear sky are larger than those in cloudy days. Aerosol radiative effects on the synoptic scale in autumn and winter when concentrations of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  are higher in the same period are obviously larger than those in spring and summer. Reduction ratios of GHI in southern suburbs of Beijing in autumn and winter are 10%–20% higher than those in spring and summer during 2013–2015. Linear relationship between reduction ratios of GHI and direct radiation (DIR) and AOD in the urban and suburb of Beijing are found and impacts of AOD on DIR are larger than GHI, especially in the urban with heavy haze. Additionally, impacts of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration on GHI and DIR cannot be ignored. Results above have certain scientific and practical application values for better understanding the interaction between aerosol and meteorological conditions such as solar radiation, and improvements of refined assessments and forecasts of solar energy resources.

**Key words:** aerosol radiative effects; impacts difference; urban and suburb of Beijing