康颖, 王莉莉, 辛金元, 等. 2019. 基于 AERONET 和 OMI 数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 537−551. KANG Ying, WANG Lili, XIN Jinyuan, et al. 2019. Analysis of the Change Trend of Aerosol Single-Scattering Albedo in the Areas of Northern China Based on AERONET and OMI Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 537−551. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18006

基于 AERONET 和 OMI 数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势

康颖[1, 2] 王莉莉[2] 辛金元[2] 陶明辉[3] 宋涛[2] 巩崇水[2] 王跃思[1, 2] 李广[1]

1 甘肃农业大学林学院，兰州 730070
2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室，北京 100029
3 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室，北京 100101

摘　要　气溶胶单次散射反照率（SSA）表征气溶胶吸收特性，很大程度上决定了气溶胶辐射强迫的正负，对准确评估气候变化中的气溶胶辐射强迫具有重要意义。根据 2004 年 10 月至 2016 年 12 月地基 AERONET（AERosol RObotic NETwork）和 OMI（Ozone Monitoring Instrument）卫星数据，分析了中国北方典型地区（北京、香河、兴隆和兰州郊区）SSA 的变化趋势以及两组数据的一致性。4 个站 AERONET 和 OMI 的 SSA 年均值分别为：北京 0.89±0.04 和 0.90±0.04，香河 0.89±0.04 和 0.91±0.04，兴隆 0.92±0.04 和 0.91±0.04，兰州 0.91±0.04 和 0.90±0.04。4 个站点 SSA 季节变化一致，夏季高冬季低。SSA 年际变化趋势分析时，因有效数据较少且为非正态分布，用月中位数代替月均值，同时需对数据进行筛选和去季节变化，结果显示北京和香河均有地基和卫星有效数据时间尺度不同的情况，而兴隆 OMI 和兰州 AERONET 满足趋势分析要求。在研究期间，4 站 SSA 均呈上升趋势，说明近年来中国北方气溶胶的吸收性减弱，散射特性增强，尤其北京四季地基和卫星数据均呈上升趋势，但香河秋冬吸收性增强。同时，对 AERONET 和 OMI 两种反演算法得到的 SSA 一致性进行分析。香河结果差异较大，仅 30% 的数据在误差±0.03 的范围内，55% 在±0.05 的范围内；北京分别为 46%（±0.03）和 68%（±0.05），兴隆分别为 50%（±0.03）和 76%（±0.05），兰州数据一致性较好，分别为 51%（±0.03）和 86%（±0.05），总体来说是受人为活动影响比较明显的地区，数据一致性较差。

关键词　AERONET 卫星数据　OMI 卫星数据　气溶胶单次散射反照率（SSA）　变化趋势
文章编号　1006-9585(2019)05-0537-15　　**中图分类号**　P402　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18006

Analysis of the Change Trend of Aerosol Single-Scattering Albedo in the Areas of Northern China Based on AERONET and OMI Data

KANG Ying[1, 2], WANG Lili[2], XIN Jinyuan[2], TAO Minghui[3], SONG Tao[2], GONG Chongshui[2], WANG Yuesi[1, 2], and LI Guang[1]

1 *College of Forestry*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070
2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *State Key Laboratory of Remote Sensing Science*, *Institute of Remote Sensing and Digital Earth*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101

收稿日期　2018-01-08；**网络预出版日期**　2018-03-01
作者简介　康颖，女，1988 年出生，硕士，主要研究方向为大气气溶胶污染特征及成因分析。E-mail: kangying@dq.cern.ac.cn
通讯作者　李广，E-mail: lig@gsau.edu.cn
资助项目　国家自然科学基金项目 41471306、41775162、41505133
Funded by　the National Natural Science Foundation of China (Grants 41471306, 41775162, and 41505133)

Abstract The aerosol single-scattering albedo (SSA) refer to the characterization of aerosol absorption, which determines the positive and negative aerosol radiative forcing and accurate assessment of aerosol radiative forcing in climate change is of great significance. Based on AERONET (AERosol RObotic NETwork) and OMI (Ozone Monitoring Instrument) data from October 2004 to December 2016, the trend of aerosol SSA and comparison agreement with AERONET and OMI in the north of China (Beijing, Xianghe, Xinglong, and Lanzhou) were analyzed. The SSA annual mean of four sites were: Beijing 0.89±0.04 (AERONET) and 0.90±0.04 (OMI); Xianghe 0.89±0.04 (AERONET) and 0.91±0.04 (OMI); Xinglong 0.92±0.04 (AERONET) and 0.91±0.04 (OMI); Lanzhou 0.91±0.04 (AERONET) and 0.90±0.04 (OMI). All four sites showed the same seasonal variations, with high values in summer and low values in winter. Due to the limited data, the monthly average can not simply use to analyze the annual trend, we need to screen the data and remove the seasonal variation. The result showed that ground-based network and satellite had different time scales in both Beijing and Xianghe, while the OMI in Xinglong and AERONET in Lanzhou were meet the data requirements for trend analysis. The SSA of all four sites had the significant increases, indicating that the absorption of aerosol in the northern China have weaken and scattering have been enhanced in recent years. In particular, the AERONET and OMI retrievals of SSA were found an upward trend in four seasons at Beijing, but the absorption in autumn and winter was enhanced at Xianghe. In addition, due to the slight difference between AERONET and OMI, the data of AERONET and OMI were compared to accuracy of the results. The data of Xianghe revealed much bigger gap between the two inversions, which 30% of data agree within the absolute difference of ±0.03, and 55% agree within the difference of ±0.05; and 46% of Beijing data within ±0.03 and 68% within ±0.05, Xinglong 50% within ±0.03 and 78% within ±0.05; the data of Lanzhou was much better consistent, which 51% (86%) of data made agreement within the difference of ±0.03 (±0.05). In total, the data at sites which were more affected by human activities were consistently poor.

Keywords AERONET data, OMI data, Aerosol single-scattering albedo (SSA), Trend analysis

1 引言

气溶胶不仅影响环境和人类健康，它通过对太阳光的吸收和散射直接影响地球的能量收支，并通过云的微物理过程间接影响辐射平衡（Stocker et al.，2013）。而气溶胶对地气辐射能量平衡的影响主要取决于它的气溶胶特性，如粒径分布、化学组成和光学特性等（Hansen et al.，1997）。但是目前仍缺乏对气溶胶光学特性详细且准确的了解，使气溶胶辐射强迫成为当前研究地气辐射能量平衡中一个不确定因素（Hansen et al.，2000；Stocker et al.，2013）。气溶胶光学特性有两个基本参数气溶胶光学厚度AOD（Aerosol Optical Depth）和气溶胶单次散射反照率SSA（Aerosol Single-scattering Albedo），反应气溶胶对大气辐射的影响。AOD是整层气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分，用于描述气溶胶对于太阳辐射的总消光能力，包括吸收和散射（盛裴轩等，2003），AOD是描述气溶胶光学特性的首要因子，也是反应气溶胶辐射特性的重要参数，与气溶胶辐射强迫的大小直接相关（Gelencsér，2004）。而SSA是气溶胶的散射系数σ_s与消光系数σ_e的比值（盛裴轩等，2003），SSA反映气溶胶的吸收和散射的相对大小，很大程度上决定了气溶胶辐射强迫的正负，即加热还是冷却（Russell et al.，2002）。研究表明SSA从0.9降到0.8时，气溶胶的辐射强迫可以由负变正（Hansen et al.，1997）。此外，SSA的大小还影响着顶层气溶胶辐射强迫、太阳辐射入射强度和气溶胶层的辐射加热等，这些影响又通过间接效应对气候变化产生影响（Pilinis et al.，1995）。研究表明不同气溶胶种类的SSA特征存在差异，对于吸收性气溶胶（如黑炭、矿尘、棕炭气溶胶等）和非吸收性气溶胶（硫酸铵、水汽等）SSA的大小及随波长的变化都有较大差异，不同的吸收性气溶胶SSA随波长变化呈不同趋势。黑炭气溶胶的SSA随着波长的增长而减小；棕炭气溶胶在波长为440 nm的吸收性更强，SSA呈现为波长440～676 nm增长，从676～1020 nm有略微的下降趋势；对于矿尘，其SSA在440～1020 nm范围内呈上升趋势。但非吸收性气溶胶的SSA与波长没有明显关系（Wang et al.，2015）。因此准确定量SSA，对研究气溶胶辐射强迫的影响尤为重要，对气候变化领域准确评估气溶胶辐射效应有着重要意义。

目前气溶胶光学特性参数主要基于地基观测和

卫星遥感观测获得。地基观测网主要有AERONET（Aerosol Robotic NETwork）（Holben et al.，1998)、AEROCAN （AERosol CANada ）（Bokoye et al.，2001）、日本气溶胶/辐射观测网SKYNET（Takamura and Nakajima， 2004）、CARSNET（China Aerosol Remote Sensing NETwork）（Che et al.，2009）和CSHNET （Chinese Sun Hazemeter Network）（辛金元等，2006），可以给出AOD、SSA、Ångstrom波长指数（AE)、粒径分布等主要的气溶胶光学特征参数。卫星遥感技术监测气溶胶光学特性主要有MISR （Multi-angle Imaging Spectroradiometer)、MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、OMI（Ozone Monitoring Instrument）等。MIRS可以有效的划分2～4种吸收性气溶胶（Kahn et al.，2010），MODIS（MODO4产品）给出气溶胶的光学厚度AOD和细粒子比FMF等，并给出可见光波段的SSA，但在中国地区SSA多数假设大于0.9（Levy et al.，2007)。OMI给出了近紫外线光谱区的气溶胶吸收性（Torres et al.，1998)，通过OMAERUV算法反演得到SSA（Torres et al.，2005，2007)。

过去十几年，中国经济快速发展，气溶胶浓度也一直处于一个较高水平（Che et al.，2015b)。中国北方地区由于其特殊的地理位置和经济发展形态，空气污染问题突出，但随着产业结构调整以及一系列的污染防控措施的执行，尤其2013年发布的“大气污染防止行动计划”，我国气溶胶的浓度和组分在这些年也不断发生变化（Boys et al.，2014)。因此分析北方典型地区气溶胶光学特征尤其是吸收特性的长期变化特征，对理解气溶胶光学性质的演变以及对气候变化的影响非常重要。但是，目前多数研究都是针对气溶胶的AOD和AE（Cheng et al.，2015；Che et al.，2015b；Xin et al.，2011；Wang et al.，2015)，针对表征气溶胶吸收特性指标SSA的长期演变特征，在中国北方地区的研究相对缺乏。此外，目前无论地基观测网还是卫星反演计算SSA的方法相对较少，应用广泛的主要有地基AERONET和OMI卫星反演的SSA数据，但两种反演方法结果的一致性缺乏定量评估，因此将长时间段的地基和卫星反演结果进行比对，有利于两者提高SSA的反演精度，同时有助于扩大卫星反演SSA的覆盖范围和可靠性（Ahn et al.，2014)。

本文利用2004～2016年的北京、香河、兴隆和兰州郊区的AERONET数据以及对应地区的OMI数据，分析中国北方典型地区（城市、城郊、区域背景）的气溶胶单次散射反照率SSA的演变特征，并对OMI和AERONET两种反演算法所得到的SSA进行比对，分析其结果的一致性。本文结果对研究气溶胶对气候变化的长期影响具有重要意义。

2 研究数据和方法

2.1 数据

2.1.1 AERONET数据

AERONET是地面太阳分光光度计观测网，利用CIMEL318仪器进行气溶胶光学特性观测。AERONET提供的气溶胶反演产品（http://aeronet.gsfc.nasa.gov/[2018-01-05]）通过可见光到近红外波段的光谱通道直接获取太阳辐射数据，计算7个波长340、380、440、500、675、870、1020 nm处的AOD、水汽柱含量等，同时结合天空光扫描数据反演440、675、870、1020 nm波长的气溶胶粒径分布、SSA和气溶胶相函数等（Dubovik and King，2000；Dubovik et al.，2000)。本文采用的AOD和SSA为Level 2.0所有观测数据（ALL Points)，它是经过前后视场校正、云处理和人工检查保证数据质量，具有较高的精度（Dubovik et al.，2000，2002)。本文提取4个中国北方站点（北京、香河、兴隆和兰州郊区，其中兰州站是兰州大学半干旱气候与环境监测站Sacol站，属于郊区站)，2004年10月至2016年12月在可见光波长440 nm的AOD和SSA。本文选取的站点详细信息和地理位置见表1和图1。

2.1.2 OMI数据

OMI是美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration， NASA）2004年发射的Aura卫星上搭载的臭氧检测仪，用来测量每天全球范围内270～500 nm波长的地球辐射。OMI以2600 km的幅度每天扫描全球，其中常

表1 本文选取的站点信息

Table 1 Information of sites

站点名称	站点类型	经度	纬度	海拔高度/m
北京	城市站	116.38°E	39.98°N	92
香河	城郊站	116.96°E	39.75°N	36
兴隆	区域背景站	117.58°E	40.40°N	970
兰州	城郊站	104.14°E	35.95°N	1965

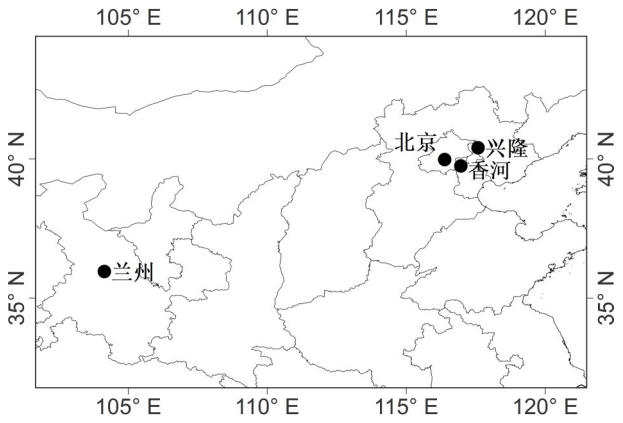

图1 本文选取的北京、香河、兴隆、兰州站点地理位置

Fig. 1 The locations of four sites in Beijing, Xianghe, Xionglong, and Lanzhou

用产品像元空间分辨率为13（南北）×24（东西）km²（Torres et al.，2005，2013）。利用气溶胶在紫外光谱区的吸收敏感性，使用近紫外线算法OMAERUV（OMI near-UV aerosol algorithm）获得波长354和388 nm的UV气溶胶指数（UV-AI）以及AOD和SSA（Torres et al.，2013；Ahn et al.，2014）。此外，OMAERUV算法升级后，根据地基数据AOD和基于空间光谱反射率可反演可见光波长（500 nm）的SSA（Lee et al.，2007）。最近，双通道OMI的OMAERUV算法做了改进，引入了新的碳质气溶胶模型。在改进后的算法里，利用大气红外探测仪AIRS（Atmospheric Infrared Sounder）测量的一氧化碳（CO）和OMI反演的UV-AI，可以判断气溶胶种类（Torres et al.，2013）。

美国航天局戈达德地球科学数据和信息服务中心GES-DISC（Goddard Earth Sciences-Data and Information Services Center）提供OMAERUV Level 2 Collection 0039（V1.4.2）气溶胶产品，数据下载自网站http://daac.gsfc.nasa.gov/[2017-05-01]，其空间分辨率为13（南北）×24（东西）km²，时间分辨率为1 d。OMAERUV算法产品含有携带数据质量信息的标志（flag），我们选取数据质量最好的也即标志为0的数据；同时根据行异常标识，去除行异常影响的数据。本文提取的是2004年10月至2016年12月的波长388 nm处的SSA、AOD、AAOD（Absorption Aerosol Optical Depth），波长500 nm处的SSA和气溶胶种类。OMI提供的气溶胶种类有三类：烟雾气溶胶、沙尘气溶胶、硫酸盐（城市/工业）气溶胶。在提取范围内，有多于一种气溶胶类型时，将该区域内的气溶胶类型定义为混合型气溶胶。

2.2 长期趋势分析方法

2.2.1 数据筛选

为了计算SSA的长期变化趋势，需选取最具有代表性和尽可能多的数据来进行计算。对于AERONET数据，首先基于Level 2.0数据的质量要求，在太阳天顶角大于50°，天空误差小于5%，和440 nm的AOD大于0.4的情况下，认为SSA是准确有效的（Holben et al.，2006）；其次，因为SSA不遵循正态分布，因此计算所有观测数据（ALL Points）的月中位数值，用更具有代表性的月中位数代替常规的月平均值（Li et al.，2014）。另外，为了保证数据的连续性和有效性，当每月数据超过5个，认为该月的月中位数有效，在2004年10月至2016年12月期间，每年有不少于6个月的有效数据，则保留该年数据，否则在年趋势分析时，删除该年的所有月中位数，而在季节趋势分析时，确保每个季节有效数据不少于2个月。对于OMI数据，使用同样的月中位数计算方法以及月、年和季节筛选标准。

2.2.2 长期趋势分析

因为SSA不遵循正态分布并且具有一定的季节相关性，在进行长期年际趋势分析时，首先需要去除季节影响（Li et al.，2014），因此对月SSA中位数取12个月滑动平均值，然后用最小二乘法线性拟合其变化趋势。

最小二乘法可以拟合SSA的线性趋势，也可分析其显著性水平（Weatherhead et al.，1998）。数据时间序列通过最小平方近似拟合：

$$Y_t = Y_0 + bt + N_t , \quad (1)$$

其中，Y_t是月中位数的非季节性时间序列，t是月份，b是线性趋势，Y_0是时间序列开始时的偏移量，N_t是干扰项。干扰项N_t表示为

$$N_t = \phi N_{t-1} + \varepsilon_t , \quad (2)$$

其中，ϕ表示线性拟合的斜率，ε_t为残差。

年趋势的标准偏差σ_b计算公式如下：

$$\sigma_b \approx \frac{\sigma_N}{n^{\frac{3}{2}}} \sqrt{\frac{1+\phi}{1-\phi}} , \quad (3)$$

其中，σ_N是N_t的标准偏差，n是时间序列中的总年

数（Hsu et al.，2012；Weatherhead et al.，1998）。根据年趋势的标准偏差σ_b进行统计检验，统计检验是依据统计理论来检验模型参数估计值的可靠性。本文给定显著性水平为95%，通过t检验，认为趋势显著。

2.3 地基和卫星SSA比对方法

2.3.1 时空匹配

OMI数据对应的空间尺度是13（南北）×24（东西）km^2（Torres et al.，2005）。AERONET是采用几个离散的方位角测量大气辐射，它的空间尺度相当于是在以站点为中心半径大约为5 km的范围内（Dubovik et al.，2000）。AERONET数据的AOD是直接获取，SSA则要在AOD大于0.4（440 nm），太阳天顶角大于50°条件下，反演计算所得（Holben et al.，2006）。因此，在太阳天顶角较大的时候，反演计算所得数据精度更好，满足这些大气条件的时候多为清晨和下午。而OMI过境时间一般为当地时间的13:30，因此OMI的过境时间可能和AERONET的测量时间不一致。

因此，为达到地基观测和卫星观测的时空匹配，对于满足条件的AERONET数据，取OMI过境时间前后3 h的平均值，OMI的空间尺度选择为AERONET站点为中心的0.5°（纬度）×0.5°（经度）的范围内平均值（Ahn et al.，2014）。通过对AERONET和OMI数据的时空转换匹配，实现数据具有可比性的目的，这种方法也是地基和MODIS卫星产品比对的方法（Wang et al.，2010）。

2.3.2 波长转换

AERONET和OMI反演计算所得气溶胶光学参数波段有所差异，AEROENT的SSA在可见光和近红外波段（440、675、860和1020 nm）（Dubovik et al.，2000），而OMI在354、388、500 nm波段（Torres et al.，2007）。波长最小差是在AERONET的440 nm和OMI的388 nm之间，在这个范围内，沙尘气溶胶和烟雾气溶胶的吸收性和波长的相关性很好（Russell et al.，2010），为了更好的比对两个反演结果，需要将OMI的388 nm的SSA转化为440 nm的SSA。根据OMAERUV碳质气溶胶模型的假设（Torres et al.，2013），在近紫外波段，气溶胶的吸收性对波长有很强的依赖性，表现为吸收性Ångstrom波长指数（Absorption Ångstrom Exponent，AAE）的取值范围在2.5～3.0；在388 nm和500 nm之间，有中等依赖性，AAE取值为1.0。另外根据外场实验（Kirchstetter et al.，2004），AOD（τ）和Ångstrom波长指数（α）之间是一个关于波长（λ）的连续单调幂函数：

$$\tau(\lambda)=\beta\lambda^{-\alpha}, \quad (4)$$

其中，β为Ångstrom混浊系数。

因此，对于烟雾气溶胶SSA从近紫外到可见光的波长转化需要分两步，首先在388～440 nm这个波段内，取AE和AAE为1.0，把OMI在388 nm的AOD和AAOD转换为440 nm的数据，第二步利用计算得到的440 nm的AOD和AAOD差值除以440 nm的AOD，获得440 nm的SSA。

对于沙尘气溶胶、硫酸盐气溶胶，因为这两个气溶胶模态在预设的AAE下，从近紫外到可见光是一个连续的吸收光谱，所以OMI在440 nm的SSA直接求取388 nm和500 nm SSA的插值。

此外，值得注意的是，因为气溶胶的SSA都是基于不同的假设反演计算所得，所以对OMI和AERONET的数据进行比对，不是将两组数据进行验证分析，是不同反演算法得到SSA的一致性分析。

3 结果与讨论

3.1 北京SSA变化趋势及卫星和地基结果比对分析

在2004年10月至2016年12月期间，北京AERONET实际观测时间是2004年10月至2016年7月，OMI自2004年10月发射成功后，数据完整。因此根据AERONET的实际观测时间内的数据和提取的OMI数据，计算其SSA的年平均值和季节平均值，结果见表2。结果显示，北京地区AERONET反演所得SSA的年均值为0.89±0.04，其中夏季的SSA值最高为0.93±0.03，其次是春季0.90±0.03，秋季（0.88±0.04）和冬季（0.87±0.04）值比较低；OMI反演所得SSA的年均值为0.90±0.04，其中也是夏季的SSA值最高为0.92±0.03，其次春季和秋季，SSA值都为0.91±0.04，冬季值最低为0.90±0.04。无论是AERONET还是OMI反演所得的SSA都有明显的季节变化，表现为夏季高，冬季低的特点，主要因为中国北方城市秋冬季都会进入供暖期，产生大量吸收性气溶胶，如黑炭气溶胶（BC）、棕炭气溶胶（BrC）等，（Giles et al.，2012；Wang et al.，2015），使SSA值降低。

表 2　北京、香河、兴隆、兰州站 AERONET 反演的 SSA（440 nm 可见光波长）和 OMI 反演的 SSA（388 nm）的年和季节的平均值和标准偏差

Table 2　Annual and seasonal mean values and standard deviations of AERONET (AERosol RObotic NETwork) SSA (Aerosol Single-scattering Albedo) at 440 nm and OMI (Ozone Monitoring Instrument) SSA at 388 nm in Beijing, Xianghe, Xionglong, and Lanzhou

	北京站 SSA		香河站 SSA		兴隆站 SSA		兰州站 SSA	
	AERONET	OMI	AERONET	OMI	AERONET	OMI	AERONET	OMI
年	0.89±0.04	0.90±0.04	0.89±0.04	0.91±0.04	0.92±0.04	0.91±0.04	0.91±0.04	0.90±0.04
春季	0.90±0.03	0.91±0.04	0.89±0.03	0.92±0.04	0.92±0.03	0.92±0.03	0.91±0.03	0.90±0.03
夏季	0.93±0.03	0.92±0.03	0.94±0.03	0.92±0.04	0.93±0.08	0.93±0.03	0.93±0.03	0.91±0.03
秋季	0.88±0.04	0.91±0.04	0.89±0.04	0.90±0.04	0.93±0.03	0.91±0.04	0.91±0.04	0.91±0.04
冬季	0.87±0.04	0.90±0.04	0.87±0.04	0.89±0.04	0.91±0.03	0.90±0.04	0.90±0.04	0.90±0.04

表 3　北京、香河、兴隆、兰州站 AERONET 反演的 SSA（440 nm）和 OMI 反演的 SSA（388 nm）的年和季节线性趋势拟合方程的斜率 *k*

Table 3　Annual and seasonal trends *k* of the slope of fitting equation for AERONET SSA at 440 nm and OMI SSA at 388 nm at four sites

	北京 *k*		香河 *k*		兴隆 *k*		兰州 *k*	
	AERONET	OMI	AERONET	OMI	AERONET	OMI	AERONET	OMI
年际	0.0001*	0.0000	0.0001*	0.0000		0.0001	0.0004*	
春季	0.0008	0.0015	0.0006*	−0.0004				
夏季	0.0004		0.0003					
秋季	0.0010		−0.0004	0.0005				
冬季	0.0004	0.0013	0.0001	−0.0007*				

注：*表示通过 95% 置信度信度水平。

根据 2.2.1 节中介绍的方法，计算月中位数后，对数据进行有效筛选，数据量太少的年月进行删除。筛选后 AERONET 的有效数据时间段为 2005 年至 2016 年 7 月，其中 2008 年因数据过少删除，但 2008 年春季数据有两个月的完整数据，在做季节趋势分析时，保留 2008 年春季数据；OMI 的有效时间段为 2005 年至 2009 年 10 月。筛选后的数据，用 12 个月滑动平均值去除季节影响，再用最小二乘法进行线性拟合，表 3 和图 2a 显示 AERONET 呈显著性上升趋势，斜率为 0.0001，图 2b 显示 OMI 无明显上升趋势，其斜率大于 0.0000。而如果不进行有效数据筛选，直接使用月平均值进行最小二乘法线性拟合，图 3a 和 3b 显示 AERONET 上升趋势的斜率是 0.0002，图 3b 显示 OMI 呈显著性下降趋势，斜率为-0.0001，两者差异较大。因此，从北京计算结果可以表明，对数据进行筛选和去季节性变化后，其趋势有所改善，且两种反演结果一致。所以在进行长期趋势分析时，都需进行数据筛选和去季节性变化，不能简单利用月均值。

从表 3 和图 2 看，AERONET 反演的 SSA 振幅变化比 OMI 的大，主要因为 AERONET 为单点结果，受周边排放源影响大，而 OMI 为站点 0.5°范围内的均值，所以波动相对较小。整体，两者反演的 SSA 的变化范围都在 0.80～0.95。SSA 显著性上升趋势，说明在过去的十年间，北京地区气溶胶的吸收性明显下降，导致这一现象的原因主要是气溶胶成分的改变，如增加散射的硫酸盐和硝酸盐含量升高，吸收性气溶胶 BC 含量降低（Yang et al.，2011；Li et al.，2013，2014）。另外根据图 2，AERONET 和 OMI 反演的四季变化趋势均呈上升趋势，与 AERONET 长期反演结果相吻合，说明导致这一变化的主要原因是本地源的改变而不是季节性输送造成的（Li et al.，2014；Gong et al.，2017）。其中，因为北京市春季粗粒子所占比重相对较大（阎逢旗等，2013），粒径较大的矿尘和沙尘都具有较强的吸收性（Wang et al.，2015），所以春季 SSA 的明显上升，说明北京城市地区的春季沙尘有所减

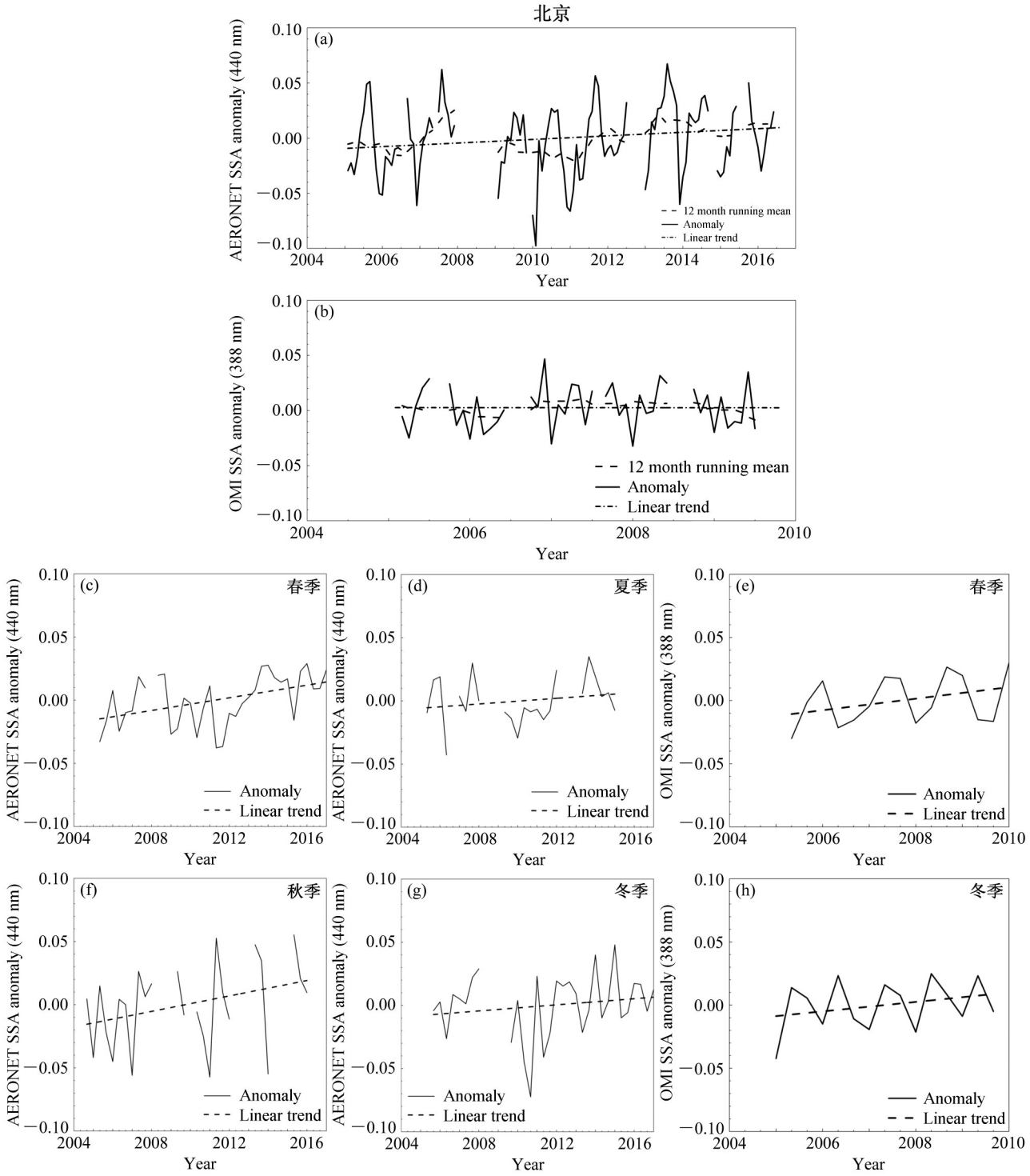

图2　北京站AERONET反演的SSA距平（a）年、（c）春季、（d）夏季、（f）秋季、（g）冬季变化趋势；北京站OMI反演的SSA距平（b）年、（e）春季、（h）冬季变化趋势

Fig. 2　Time series of AERONET SSA anomaly for (a) year, (c) spring, (d) summer, (f) autumn, and (g) winter, and OMI SSA anomaly for (b) year, (e) spring, and (h) winter, respectively in Beijing

少。在秋、冬季，SSA的增大说明近些年的管控，使得和BC、BrC排放相关的煤炭燃烧有所减少（刘唯佳等，2015；Wang et al.，2015）。与其他季节相比，夏季的变化相对较小。

此外在研究期间，图2显示AERONET长期变化趋势有两个明显的峰值，一个是在2007年，因

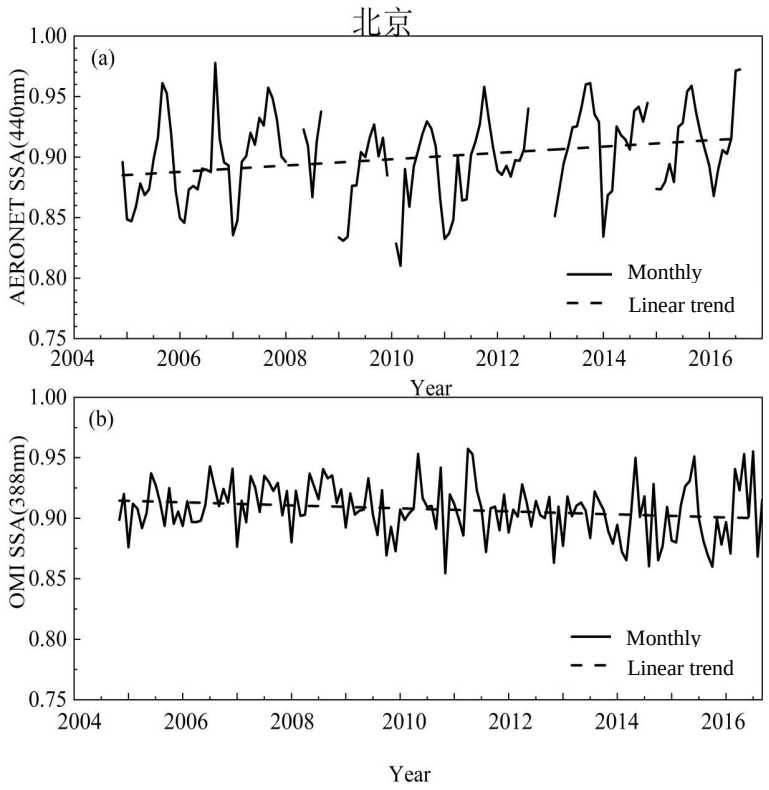

图3 北京站（a）AERONET、（b）OMI反演的SSA月均值变化趋势

Fig. 3 Time series of monthly mean (a) AERONET SSA (a) and (b) OMI SSA in Beijing

为2004～2007年是奥运筹备期，大量的人为活动导致了气溶胶浓度的升高，无机组分也增加，使得SSA值升高（Yang et al.，2011）；另一个是在2013年，并在2013年以后有缓慢的下降趋势，那是因为京津冀地区污染严重，且污染源多为工业污染和当地的人为污染（如汽车尾气等），大气中可能含有较多的硫酸盐和硝酸盐，硫酸盐和硝酸盐等二次污染物有较强的散射性，使SSA增大（王跃思等，2014）；为控制大气污染，国家在2013年颁布了“大气污染防治行动计划”，在严格管控下，气溶胶浓度有所下降，并且因为气溶胶含量的变化，大气中二氧化硫，氮氧化物含量下降，导致气溶胶的散射性下降，SSA值下降（Che et al.，2015a；Gong et al.，2017）。

根据之前的外场实验，对于生物质燃烧所产生的气溶胶，AERONET和OMI反演的SSA的绝对差不超过0.01，对于沙尘气溶胶可以增加到0.03，对于硫酸盐气溶胶和混合型气溶胶也为0.03，可适度的增加到0.05（Russell et al.，2010；Ahn et al.，2014）。表4和图4给出北京地区有46%的数据落在了±0.03内，68%的数据落在了±0.05内，均方根偏差RMSD为0.05。另外因为北京地区不仅有大量的车辆尾气排放，煤炭燃烧等，还有从西北地区输送的沙尘气溶胶（Chen et al.，2013， 2016），所以图4显示北京地区气溶胶种类比较多，其中代表城市/工业气溶胶模态的硫酸盐气溶胶和烟雾气溶胶占比较高，并且混合性气溶胶的占比与背景站兴隆站相比，明显偏高，超出±0.05范围的多为烟雾气溶胶。此外，当AERONET反演SSA>0.90时，

表4 AERONET反演的SSA（440 nm）和OMI反演的SSA（440 nm）数据对比统计参数表

Table 4 Statistical results for OMI SSA (440 nm) versus AERONET (440 nm) SSA comparison

站名	N	RMSD	$Q_{0.03}$	$Q_{0.05}$
北京	319	0.05	46%	68%
香河	364	0.06	30%	55%
兴隆	62	0.04	50%	76%
兰州	74	0.04	51%	86%

注：N表示参与对比的数据个数；RMSD是两种反演算法结果的均方根偏差；$Q_{0.03}$和$Q_{0.05}$表示两种反演算法所得结果落在绝对差为0.03和0.05范围内的百分比。

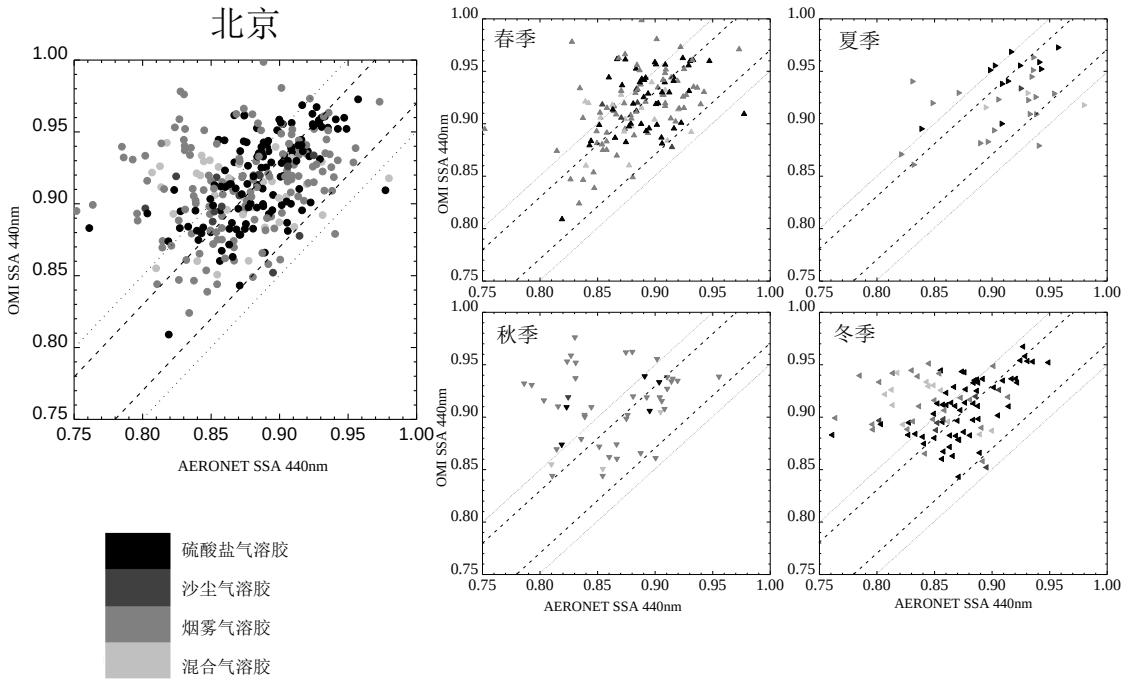

图4　北京站OMI和AERONET反演的SSA（440 nm）比对：（a）年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季

Fig.4　OMI versus AERONET SSA comparison at 440 nm for (a) year, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter in Beijing

ARERONET和OMI的反演差异较小，当地基观测SSA＜0.85时，OMI结果绝大部分高于地基值。总体来看，OMI反演结果普遍比AERONET反演结果高，且数据差异主要在秋冬季。

3.2　香河SSA变化趋势及卫星和地基结果比对分析

在研究期间，AERONET的实际观测时间为2004年10月至2015年8月，OMI数据完整，根据表2，香河AERONET反演SSA的年均值为0.89±0.04，其中夏季的SSA最高为0.94±0.03，其次是春季和秋季（0.89±0.04），冬季（0.87±0.04）值比较低；OMI反演SSA的年均值为0.91±0.04，其中夏季和春季的SSA最高为0.92±0.03，其次是秋季的0.90±0.04，冬季值最低为0.90±0.04。AERONET和OMI反演所得的SSA都有明显的季节变化，表现为春夏季高，秋冬季低的特点，可能是因为秋季是农耕季节会有秸秆焚烧，冬季较低的相对湿度引起的局地扬沙，以及秋冬季的燃煤供暖，产生大量其具有较强吸收性的气溶胶粒子（Gong et al.，2014，2017）。

根据表3和图5，在根据长期分析方法筛选数据后，AERONET数据的有效时间为2004年10月至2015年8月，反演SSA呈显著性上升趋势，其斜率为0.0001；OMI数据筛选后时间段为2004年10月至2012年10月，其中因数据量过少，删除2009、2010、2011年3年数据，OMI反演SSA呈无明显上升趋势，其斜率小于0.0001，趋势趋于平稳，SSA变化幅度不大。AERONET反演结果振幅变化较大，两者反演的SSA的变化范围都在0.80～0.95之间。结果与北京AERONET反演SSA结果类似，是因为香河地理位置和北京临近，污染类型与北京相似（Gong et al.，2014）。AERONET和OMI反演的SSA均呈上升趋势，说明香河地区的气溶胶吸收性也有所下降，但是不同于北京地区，各季节的变化趋势并不一致（图4），无论是AERONET还是OMI都存在这一现象。说明比起北京，香河地区除了本地人为源的变化外，自然沙尘源以及人为源的季节性输送都对香河地区有较大的影响，导致香河地区气溶胶的吸收性存在季节性差异（Gong et al.，2014，2017）。其中秋冬季SSA下降，说明香河的吸收性气溶胶在这两个季节没有得到的控制。

根据表4和图6，香河有30%的数据落在±0.03范围内，55%的数据落在±0.05的范围内，是四个

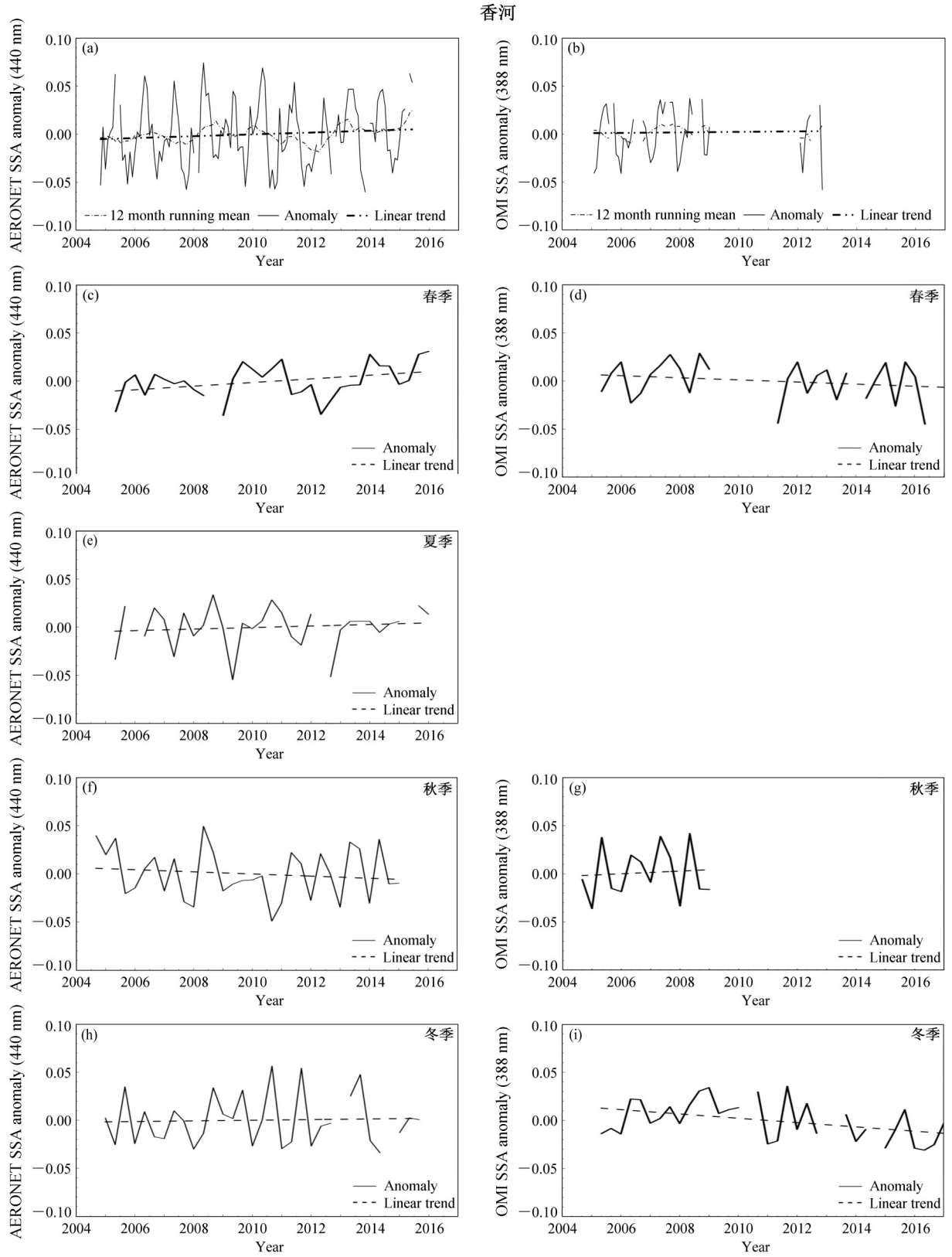

图5 香河站AERONET反演的SSA距平（a）年、（c）春季、（e）夏季、（f）秋季、（h）冬季变化趋势；香河站OMI反演的SSA距平（b）年、（d）春季、（g）秋季、（i）冬季变化趋势

Fig. 5 Time series of AERONET SSA anomaly for (a) year, (c) spring, (e) summer, (f) autumn, and (h) winter, and OMI SSA anomaly for (b) year, (d) spring, (g) autumn, and (i) winter, respectively in Xianghe

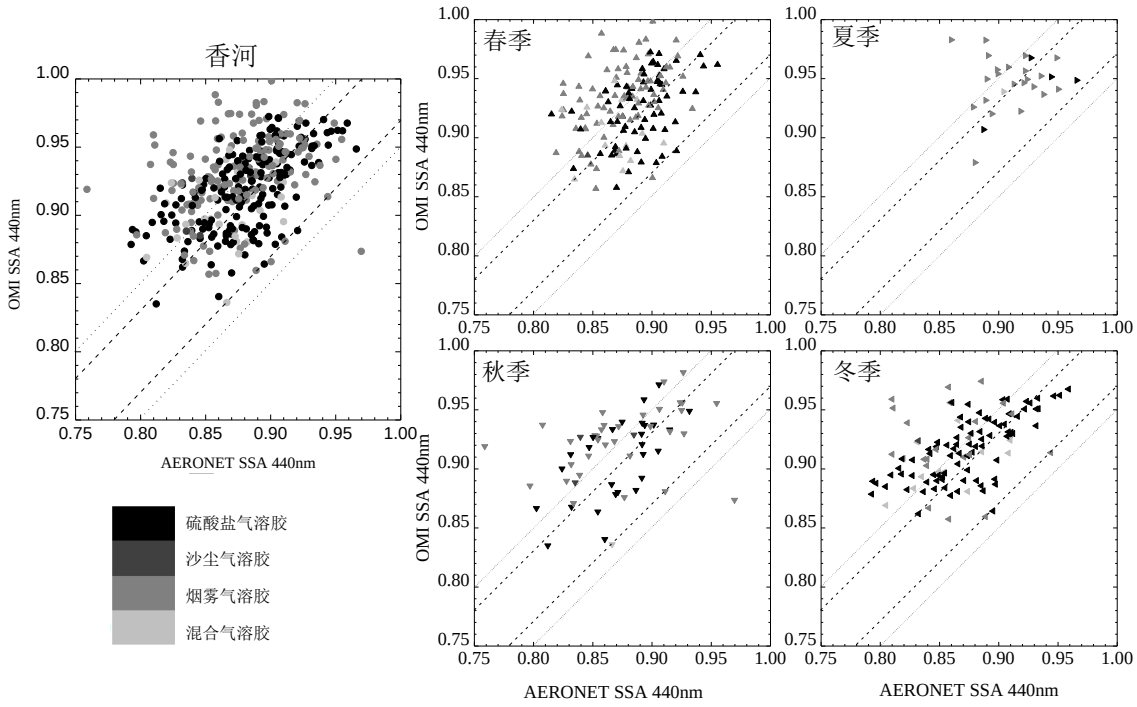

图6　香河站OMI和AERONET反演的SSA（440 nm）比对：（a）年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季

Fig.6　OMI versus AERONET SSA comparison at 440 nm for (a) year, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter in Xianghe

站中最少的，说明香河是四个站中AERONET和OMI反演结果差异最大的站点。主要因为香河站位于北京和天津之间，属于城郊地区，周边工业快速发展，当地气溶胶分布不均，这给OMI的反演计算带来了较大的困难，所以和地基数据的差异较大。香河站气溶胶种类也较多，以硫酸盐气溶胶为主，其次是烟雾气溶胶。其中冬季主要以硫酸盐气溶胶，主要是因为冬季供暖期燃煤产生了大量含有硫酸盐的气溶胶（Gong et al.，2017）。而且OMI反演结果普遍高于AERONET，和夏季比，秋冬季的误差更大，春季其次。

3.3　兴隆SSA变化趋势及卫星和地基结果比对分析

在研究期间，AERONET实际观测时间段是2006年2月至2012年5月，OMI数据完整。表2结果显示，背景站兴隆AERONET反演SSA的年均值为0.91±0.04，其中夏季和春季的SSA最高为0.92±0.04，其次是秋季（0.90±0.04），冬季（0.89±0.04）值比较低；OMI反演SSA的年均值为0.92±0.04，其中夏季（0.93±0.08）和秋季（0.93±0.03）的SSA最高，值得注意的是夏季的标准差SD比较大，其次春季为0.92±0.04，冬季值最低为0.90±0.04。明显兴隆站的SSA值更高，由于兴隆站作为区域背景站，远离城郊地区，人为源较少，直接排放的BC、BrC较少，其次污染主要来自区域老化气团输送（Xin et al.，2011），所以兴隆气溶胶吸收性要比城郊地区弱。

在分析长期变化趋势时，因为根据数学统计方法，兴隆AERONET反演结果有效数据太少，不具有统计意义，所以只给出OMI反演结果年变化趋势，OMI数据时间为2005～2008年。从表3和图7看，SSA无明显上升趋势，其斜率为0.0001，且变化不明显，因为兴隆站作为区域背景站，受人为活动影响较小，主导其变化的主要是自然源，所以年际变化差异较小。此外，SSA的变化范围在0.85～0.95，SSA值高于华北的城郊地区，说明兴隆站的气溶胶散射更大，吸收性更小（Gong et al.，2017）。根据图8，兴隆有半数的点落在了±0.03的误差外，有76%的数据落在了±0.05内，RMSD较小为0.04。兴隆站的气溶胶多为硫酸盐气溶胶和混合型气溶胶，AERONET和OMI反演误差要小一些，数据的一致性更好。当AERONET反演SSA＜0.90时，OMI值偏高；当AERONET反演SSA>0.90，AERONET反演结果偏高。

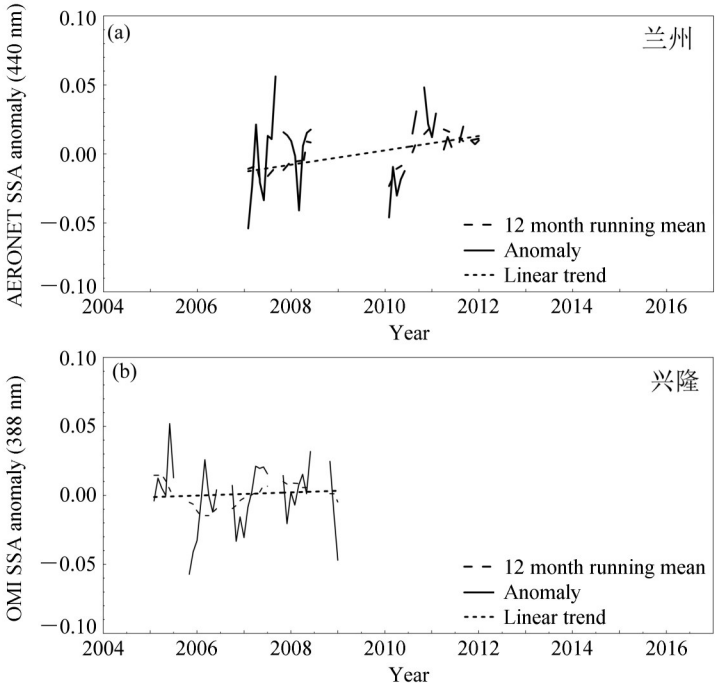

图7 （a）兰州站AERONET反演的SSA距平（440 nm）和（b）兴隆站OMI的反演SSA距平（388 nm）趋势分析

Fig. 7 Time series of (a) AERONET SSA anomaly (440 nm) in Lanzhou and (b) OMI SSA anomaly (388 nm) in Xinglong

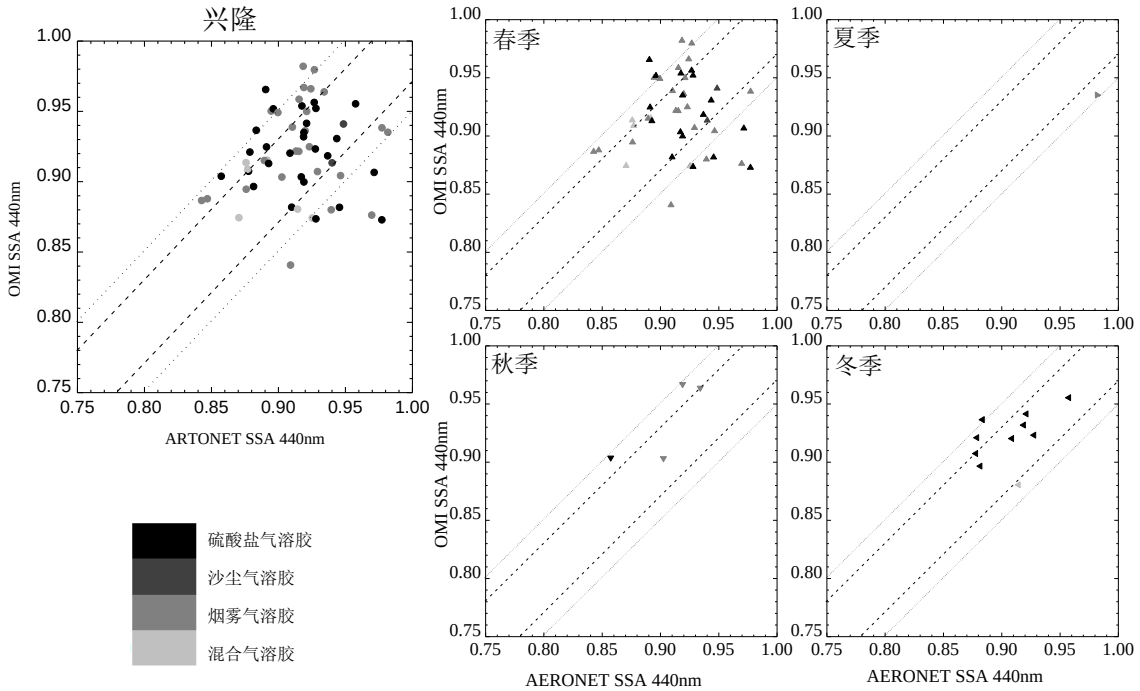

图8 兴隆站OMI和AERONET反演的SSA（440 nm）比对：（a）年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季

Fig. 8 OMI versus AERONET SSA comparison at 440 nm for (a) year, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter in Xinglong

3.4 兰州分析结果

AERONET提供的有效数据时间段为2006年8月至2013年8月，根据表2得，兰州站AERONET反演SSA的年均值为0.91±0.04，其中夏季的SSA最高为0.93±0.03，其次是秋季（0.91±0.03）和春季（0.91±0.04），冬季（0.90±0.04）比较低；OMI

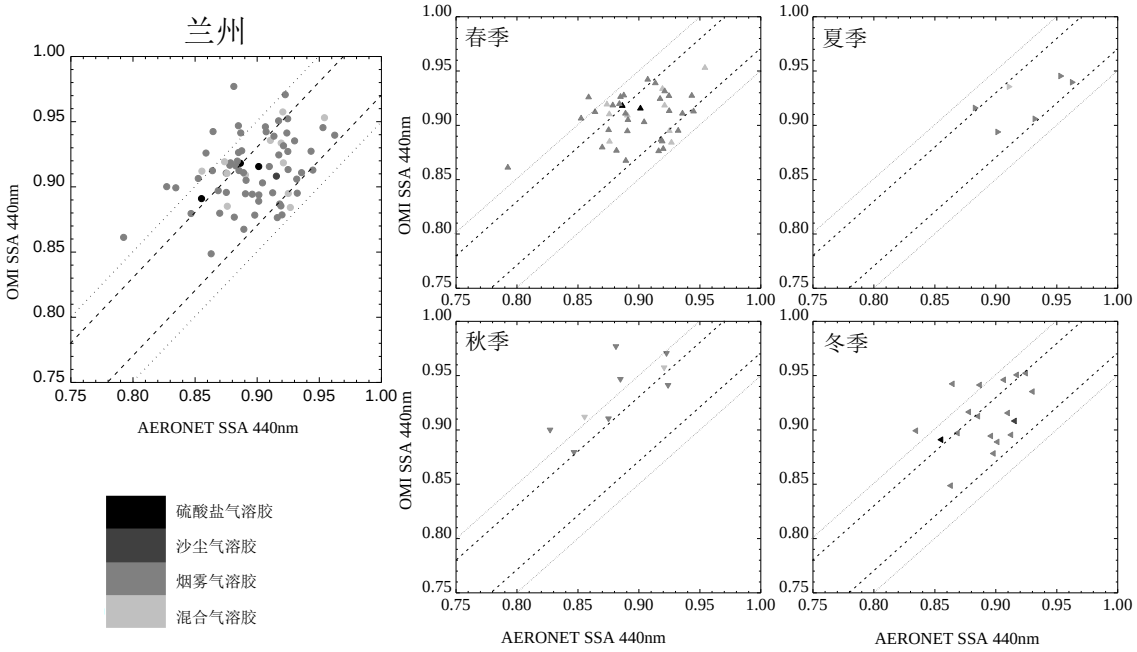

图9　兰州站OMI和AERONET反演的SSA（440 nm）比对：（a）年；（b）春季；（c）夏季；（d）秋季；（e）冬季

Fig. 9　OMI versus AERONET SSA comparison at 440 nm for (a) year, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter in Lanzhou

反演SSA的年均值为0.90±0.04，其中夏季（0.91±0.03）和秋季（0.93±0.04）的SSA比较高，冬季（0.90±0.04）和春季（0.90±0.03）比较低。与北京和香河比，兰州站的SSA值更高，主要因为兰州站位于距兰州市区47 km的兰州大学榆中校区，海拔较高，受人为活动影响较小。气溶胶成分相对单一，吸收性较弱（衣娜娜等，2015）。兰州站有明显的季节变化，春季和冬季值偏低，这可能和冬季供暖产生的吸收性气溶胶增多和春季的沙尘天气有关（白鸿涛等，2013；Xin et al.，2016）。

同兴隆站一样，符合统计检验长期趋势的只有AERONET反演数据，AERONET长期趋势分析的时间段为2007～2011年，其中因数据量太少，删除2008年数据。从表3和图7看，AERONET反演SSA呈显著性上升趋势，其斜率为0.0004，SSA的变化范围是0.85～0.95，但年际变化并没有华北地区的明显。因为根据图9，兰州约半数的点落在了±0.03的误差外，有85%的点落在了±0.05误差范围内，RMSD为0.04。气溶胶以烟雾气溶胶为主，数据的一致性在4个站中最好。

4　结论

北京AERONET和OMI的SSA年均值为0.89±0.04和0.90±0.04,香河为0.89±0.04和0.91±0.04，兴隆为0.92±0.04和0.91±0.04，兰州为0.91±0.04和0.90±0.04。北京和城郊站香河的SSA值相当，略低于兴隆和兰州，说明北京和近郊地区的光学特性相类似，与区域背景站相比，北京和香河气溶胶的吸收性更强，华北地区的城市站点比西北地区的吸收性强。4个站点均呈现一定的季节特性，表现为夏季SSA最高，冬季最低：夏季SSA为0.93～0.94（AERONET）和0.91～0.92（OMI），冬季0.87～0.91（AERONET）和0.89～0.90（OMI）。

因为SSA不遵循正态分布，且数据太少，所以比起月平均值，其月中位数更能代表其平均水平，因此使用中位数进行长期趋势分析。考虑数据的有效性，对所有数据根统计学方法进行筛选，并用滑动平均值去除其季节性变化和最小二乘法线性拟合长期趋势，这样的分析方法能较真实的反映SSA的长期变化趋势。结果显示，北京、香河、兴隆和兰州SSA均呈上升趋势，说明北方城市气溶胶的吸收性有所下降，散射性上升。另外各站季节性变化存在一些差异，其中多数站点春季表现为上升趋势，则冬季表现为有上升有下降，说明不同地区在冬季吸收性变化不同。

为了分析两种SSA反演算法的一致性，对

AERONET 和 OMI 的 SSA 进行比较发现，香河的数据一致性最差，只有 30% 和 50% 的数据落在误差±0.03±0.05 范围内，其次是北京的 46% 和 68% 和兴隆的 50% 和 76%，数据一致性最好的是兰州，51% 和 86%。总体上看，受人为活动影响较大的北京和香河的数据一致性较差，主要受气候变化和自然源变化影响的兴隆和兰州郊区的一致性要较好。比对结果表明，OMI 数据普遍比 AERONET 值高，且秋冬季差异更大。

参考文献（Refereneces）

Ahn C, Torres O, Jethva H. 2014. Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over land [J]. J. Geophys. Res., 119: 2457−2473. doi: 10.1002/2013JD020188

白鸿涛, 陈勇航, 王洪强, 等. 2013. 黄土高原半干旱区气溶胶光学特性季节变化特征 [J]. 干旱区地理, 34: 292−299. Bai Hongtao, Chen Yonghang, Wang Hongqiang, et al. 2013. Seasonal variation of aerosol optical properties at AERONET of the semi-arid region in Loess Plateau [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 34: 292−299. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.02.010

Bokoye A I, Royer A, O'Neil N T, et al. 2001. Characterization of atmospheric aerosols across Canada from a ground-based sunphotometer network: AEROCAN [J]. Atmos. -Ocean, 39: 429−456. doi:10.1080/07055900.2001.9649687

Boys B L, Martin R V, van Donkelaar A, et al. 2014. Fifteen-year global time series of satellite-derived fine particulate matter [J]. Environ. Sci. Technol., 48: 11109−11118. doi:10.1021/es502113p

Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. 2009. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. J. Geophys. Res., 114: D03206. doi: 10.1029/2008JD011030

Che H Z, Zhao H J, Wu Y F, et al. 2015a. Application of aerosol optical properties to estimate aerosol type from ground-based remote sensing observation at urban area of northeastern China [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 132: 37−47. doi: 10.1016/j.jastp.2015.06.015

Che H Z, Zhao H J, Wu Y F, et al. 2015b. Analyses of aerosol optical properties and direct radiative forcing over urban and industrial regions in Northeast China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 127: 345−354. doi:10.1007/s00703-015-0367-3

Chen H, Gu X, Cheng T, et al. 2013. The spatial−temporal variations in optical properties of atmosphere aerosols derived from AERONET dataset over China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 122: 65−73. doi: 10.1007/s00703-013-0268-2

Chen H, Cheng T H, Gu X F, et al. 2016. Characteristics of aerosols over Beijing and Kanpur derived from the AERONET dataset [J]. Atmospheric Pollution Research, 7: 162−169. doi:10.1016/j.apr.2015.08.008

Cheng T T, Xu C, Duan J Y, et al. 2015. Seasonal variation and difference of aerosol optical properties in columnar and surface atmospheres over Shanghai [J]. Atmos. Environ., 123: 315−326. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.029

Dubovik O, King M D. 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. J. Geophys. Res., 105: 20673−20696. doi:10.1029/2000JD900282

Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. J. Geophys. Res., 105: 9791−9806. doi:10.1029/2000JD900040

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: 590−608.

Gelencsér A. 2004. Carbonaceous Aerosol [M]. Netherlands: Springer.

Giles D M, Holben B N, Eck T F, et al. 2012. An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions [J]. J. Geophys. Res., 117: D17203. doi:10.1029/2012JD018127

Gong C S, Xin J Y, Wang S G, et al. 2014. The aerosol direct radiative forcing over the Beijing metropolitan area from 2004 to 2011 [J]. Journal of Aerosol Science, 69: 62−70. doi:10.1016/j.jaerosci.2013.12.007

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]. Atmospheric Research, 197: 177−187. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.07.002

Hansen J, Sato M, Ruedy R. 1997. Radiative forcing and climate response [J]. J. Geophys. Res., 102: 6831−6864. doi: 10.1029/96JD03436

Hansen J, Sato M, R Ruedy, et al. 2000. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 97: 9875−9880. doi:10.1073/pnas.170278997

Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. 2006. Aeronet's Version 2.0 quality assurance criteria[C]//Proceedings of SPIE 6408, Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds. Goa, India: SPIE. doi: 10.1117/12.706524

Holben N B, Eck T F, Slutsker I, et al. 1998. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sens. Environ., 66: 1−16. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5

Hsu N C, Gautam R, Sayer A M, et al. 2012. Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12: 8037−8053. doi:10.5194/acp-12-8037-2012

Kahn R A, Gaitley B J, Garay M J, et al. 2010. Multiangle Imaging SpectroRadiometer global aerosol product assessment by comparison with the Aerosol Robotic Network [J]. J.Geophys. Res., 115: D23209. doi:10.1029/2010JD014601

Kirchstetter T W, Novakov T, Hobbs P V. 2004. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon [J]. J. Geophys. Res., 109: D21208. doi: 10.1029/2004JD004999

Lee K H, Li Z Q, Wong M S, et al. 2007. Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and

satellite measurements [J]. J. Geophys. Res., 112: D22S15. doi:10.1029/2007JD009077

Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance [J]. J. Geophys. Res., 112: D13211. doi:10.1029/2006JD007811

Li J, Carlson B E, Dubovik O, et al. 2014. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 14: 12271−12289. doi:10.5194/acp-14-12271-2014

Li L, Chen J M, Wang L, et al. 2013. Aerosol single scattering albedo affected by chemical composition: An investigation using CRDS combined with MARGA [J]. Atmospheric Research, 124: 149−157. doi:10.1016/j.atmosres.2012.11.007

刘唯佳, 韩永翔, 王静, 等. 2015. 北京2010年10月一次典型灰霾过程光学特性分析 [J]. 中国环境科学, 35(7): 1931−1937. Liu Weijia, Han Yongxiang, Wang Jing, et al. 2015. Aerosol optical properties during one typical haze event over October 2010 in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 35(7): 1931−1937. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2015.07.002

Pilinis C, Pandis S N, Seinfeld J H. 1995. Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosols to aerosol size and composition [J]. J. Geophys. Res., 100: 18739−18754. doi:10.1029/95JD02119

Russell P B, Redemann J, Schmid B, et al. 2002. Comparison of aerosol single scattering albedos derived by diverse techniques in two North Atlantic experiments [J]. J. Atmos. Sci., 59: 609−619. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0609:COASSA>2.0.CO;2

Russell P B, Bergstrom R, Shinozuka Y, et al. 2010. Absorption angstrom exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10: 1155−1169.

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, 62−122. Shen Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 62−122.

Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York: IPCC.

Takamura T, Nakajima T. 2004. Overview of SKYNET and its activities [J]. Optica Puray Aplicada, 37: 3303−3308.

Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. 1998. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis [J]. J. Geophys. Res., 103: 17099−17110. doi:10.1029/98JD00900

Torres O, Bhartia P K, Sinyuk A, et al. 2005. Total Ozone Mapping Spectrometer measurements of aerosol absorption from space: Comparison to SAFARI 2000 ground-based observations [J]. J. Geophys. Res., 110: D10S18. doi:10.1029/2004JD004611

Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, et al. 2007. Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview [J]. J. Geophys. Res., 112: D24S47. doi:10.1029/2007JD008809

Torres O, Ahn C, Chen Z. 2013. Improvements to the OMI near-UV aerosol algorithm using A-train CALIOP and AIRS observations [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 6: 3257−3270. doi:10.5194/amt-6-3257-2013

Wang J C, Zhu C J, Zhu Y, et al. 2015. Characterization of aerosol properties in Beijing from long-term AERONET monitoring (2003−2012) [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 43: 825−839. doi:10.1007/s12524-014-0441-1

Wang L L, Wang Y S, Xin J Y, 2010. Assessment and comparison of three years of Terra and Aqua MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval (C005) in Chinese terrestrial regions [J]. Atmospheric Research, 97: 229−240. doi:10.1016/j.atmosres.2010.04.004

王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 44: 15−26. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 57: 14−25. doi:10.1007/s11430-013-4773-4

Weatherhead E C, Reinsel G C, Tiao G C, et al. 1998. Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data [J]. J. Geophys. Res., 103: 17149−17161. doi:10.1029/98JD00995

辛金元, 王跃思, 李占清, 等. 2006. 中国地区太阳分光辐射观测网的建立与仪器标定 [J]. 环境科学, 27: 1697−1702. Xin Jinyuan, Wang Yuesi, Li Zhanqing, et al. 2006. Introduction and calibration of the Chinese sun hazemeter network [J]. Chinese Journal of Environmental Science (in Chinese), 27: 1697−1702. doi:10.3321/j.issn:0250-3301.2006.09.001

Xin J Y, Gong C S, Wang S G, et al. 2016. Aerosol direct radiative forcing in desert and semi-desert regions of northwestern China [J]. Atmospheric Research, 171: 56−65. doi:10.1016/j.atmosres.2015.12.004

Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, et al. 2011. Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. Atmos. Environ., 45: 6317−6325. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.052

阎逢旗, 宋怀荣, 郭祺, 等. 2013. 北京市大气气溶胶体积谱特性分析 [J]. 中国海洋大学学报, 43(9): 112−116. Yan Fengqi, Song Huairong, Guo qi, et al. 2013. Analysis of atmospheric aerosol volume distribution in Beijing [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 43(9): 112−116. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.2013.09.018

Yang F, Tan J, Zhao Q, et al, 2011. Characteristics of $PM_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 5207−5219. doi:10.5194/acp-11-5207-2011

衣娜娜, 张镭, 曹贤洁, 等. 2015. SACOL黑碳和沙尘气溶胶辐射强迫分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 51: 381−387. Yi Nana, Zhang Lei, Cao Xianjie, et al. 2015. Analysis of radiative forcing of black carbon and dust aerosol over SACOL [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 51: 381−387. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2015.03.012