



# 长江三角洲地区大气气溶胶柱单次 散射反照率特性研究

## 摘要

利用 OMI 卫星资料 2006—2017 年的 483.5 nm 波长的气溶胶柱单次散射反照率日均数据,分析了整层大气气溶胶单次散射反照率在长三角地区的时空分布特征,特别是其年际、月、季节变化特征。长江三角洲地区的大气气溶胶柱单次散射反照率越靠近海洋越大,而越靠近内陆越小。日均气溶胶柱单次散射反照率在 0.881~0.971 范围内变化,多年的平均值为  $0.939 \pm 0.024$ ,最大分布概率出现在 0.965~0.970 区间,其值约为 25%。长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率的年平均值集中于 0.938~0.940 之间,年际变化很小,变化值小于 1%;月均柱单次散射反照率在 6、8、9 月有最大值,其值为 0.968,而在 2 月有最小值,其值为 0.915;季节平均单次散射反照率在夏季最大,其值为 0.968,而在冬季最小,其值为 0.919。

## 关键词

气溶胶; 单次散射反照率; 长江三角洲地区; 时空变化特征

中图分类号 P427

文献标志码 A

收稿日期 2018-07-13

资助项目 国家自然科学基金(41505127);江苏省自然科学基金(BK20150901);江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB170009);南京信息工程大学人才启动经费(2015r002);南京信息工程大学大学生创新创业训练计划(201610300205)

## 作者简介

张小林,男,博士,主要研究方向为大气探测与卫星遥感.xlnzhang@nuist.edu.cn

- 1 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 大气物理学院/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京,210044

## 0 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固态、液态粒子和气体载体组成的多相体系,这些气溶胶粒子大部分以亚微米尺度大小存在<sup>[1-2]</sup>,它们对地球气候、大气环境和人类健康有着深远影响<sup>[3-5]</sup>。气溶胶粒子可以散射和吸收短波和长波辐射,进而直接改变地球-大气系统的辐射能量平衡<sup>[6]</sup>。单次散射反照率是气溶胶光学特性的最重要的参量之一,定义为气溶胶吸收与气溶胶消光(散射和吸收之和)之比,表示气溶胶散射和吸收两个过程的综合效应,可以看作气溶胶净辐射效应的指示参量<sup>[7]</sup>。

气溶胶辐射强迫对单次散射反照率十分敏感,当单次散射反照率变化时,气溶胶辐射强迫甚至可以在正的或者负的直接辐射强迫之间转换<sup>[8]</sup>。由于辐射强迫对气溶胶单次散射反照率变化的高度敏感性,因此有必要获得气溶胶单次散射反照率的相应数值大小,以便较为准确地在地球气候模式或者大气光化学模式中应用。长三角地区是中国经济最为发达的地区之一,目前该地区气溶胶单次散射反照率的研究更多集中在地面几个典型测量点的特性,而对该地区整层气溶胶单次散射反照率时空特性研究仍显不足。

本文利用 OMI 卫星资料对长三角地区整层大气气溶胶单次散射反照率(柱单次散射反照率)特性进行分析,以获得其长时间序列的时空分布特征,为其在气候模式中的使用提供依据。

## 1 方法

OMI 是由美国国家航空航天局(NASA)于 2014 年发射的 Aura 地球观测系统卫星上携带的 4 个传感器之一,由荷兰、芬兰和 NASA 联合制造,其数据具有较高的可靠性,被认为是研究整层大气气溶胶特性的重要工具<sup>[9]</sup>。本文所使用的气溶胶柱单次散射反照率数据来源于 OMI 二级 OMAERO 产品,数据处理时去除了云的干扰,所选择的波长为 483.5 nm,研究时间段为 2006 年 1 月—2017 年 12 月,研究地区为  $114^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ ,  $25^{\circ} \sim 38^{\circ} \text{N}$ ,主要为长三角地区。需要注意的是,OMI 卫星数据会由于云的存在而失真,但去除云的干扰则会造成数据缺失;此外,反演算法的不同对数据产品也有一定的影响<sup>[10-12]</sup>。借助于 OMI

OMAERO 二级产品的单次散射反照率日均数据, 研究整层大气(地面到卫星, 近似整层大气)气溶胶柱单次散射反照率在长三角地区的时空分布特征, 重点研究其年际、月、季节变化特征, 为其在气候模式中使用提供数据参考。

## 2 结果与讨论

### 2.1 柱单次散射反照率的时空变化

2006—2017 年平均的大气气溶胶柱单次散射反照率在长江三角洲地区空间分布如图 1 所示。总体而言, 长江三角洲地区的大气气溶胶柱单次散射反照率越靠近海洋越大, 而越靠近内陆越小; 在海洋上其值大多超过 0.9, 而在内陆则基本小于 0.9。这主要与海洋上空海盐等散射型气溶胶较多, 而内陆上空则相对较少有关。

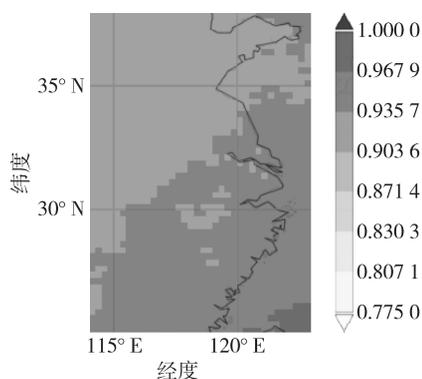


图 1 长江三角洲地区 2006—2017 年气溶胶柱单次散射反照率的平均空间分布

Fig. 1 Aerosol column single scattering albedo map of area-averaged time series over the Yangtze Delta region (region: 114°–123°E, 25°–38°N) derived from OMI data from January 1, 2006 to December 31, 2017

图 2 为长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率日平均值在 2006—2017 年的时间变化情况。总体上, 大气气溶胶柱单次散射反照有明显的年际周期变化, 在一年中夏季最高, 而冬季最低。日均气溶胶柱单次散射反照率在 0.881~0.971 范围内变化, 多年的平均值为  $0.939 \pm 0.024$ 。气溶胶柱单次散射反照率的变化相对较小, 这主要是由于本文研究的是整层大气气溶胶单次散射反照率, 受地面气溶胶源排放的影响相对较小。Eck 等<sup>[13]</sup>利用 AERONET 数据对南非地区的大气气溶胶柱单次散射反照率进行了研究, 研究结果与本文大体相当, 仅在生物质燃烧时大气气溶胶柱单次散射反照率相较会稍低。Andrews 等<sup>[14]</sup>也利用地基的 AERONET 数据对美国

地区的大气气溶胶柱单次散射反照率进行了研究, 其结果也基本相似。全球不同地区的柱大气气溶胶单次散射反照率总体变化类似, 可能是因为气溶胶单次散射反照率受气溶胶排放源影响较大, 柱单次散射反照率则是整层大气的平均效果, 而中高层大气受气溶胶排放源影响则较小。

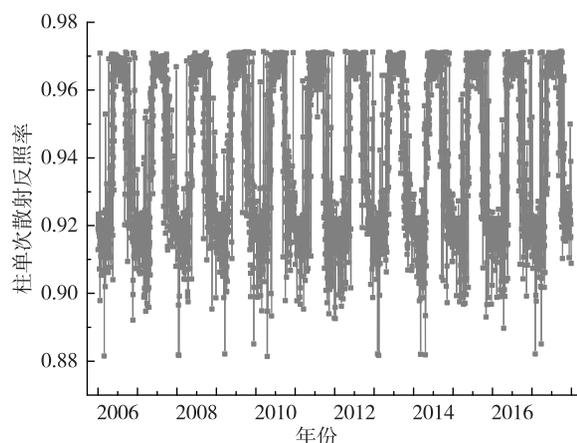


图 2 长江三角洲地区平均气溶胶柱单次散射反照率 2006—2017 年的时间变化

Fig. 2 Temporal aerosol column single scattering albedo of area-averaged time series over the Yangtze Delta region from 2006 to 2017

图 3 为 2006—2017 年期间长三角地区大气气溶胶日均柱单次散射反照率的统计分布。气溶胶柱单次散射反照率最大分布概率出现在 0.965~0.970 区间, 其值约为 25%, 而位于 0.915~0.920 和 0.920~0.925 区间的气溶胶柱单次散射反照率分布概率分别有近 15%。整层大气气溶胶柱单次散射反照率的数值整体较大, 绝大多数超过 0.900, 表明就整层大气而言气溶胶类型以散射型粒子为主。

### 2.2 柱单次散射反照率的年、月和季节变化

图 4 为长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率年平均值的变化情况。长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率的年平均值集中于 0.938~0.940 之间, 年际变化很小, 变化值小于 1%。这可能与大气柱单次散射反照率受地面气溶胶排放源的影响相对较小有关, 特别是卫星高度以下的中高高度。

图 5 为长三角地区 2006—2017 年大气气溶胶柱单次散射反照率月平均值的变化情况。可以看出, 气溶胶月均柱单次散射反照率在 6、8、9 月有最大值, 其值为 0.968; 在 2 月有最小值, 其值为 0.915; 其他月份的数值则介于两者之间, 且随着月份增加而连续变化。

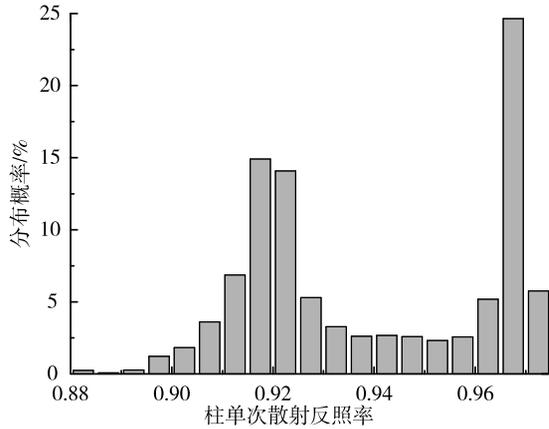


图3 长江三角洲地区日均气溶胶柱单次散射反照率 2006—2017 年的统计分布

Fig. 3 Percentage statistics of daily area-averaged aerosol column single scattering albedo over the Yangtze Delta region from 2006 to 2017

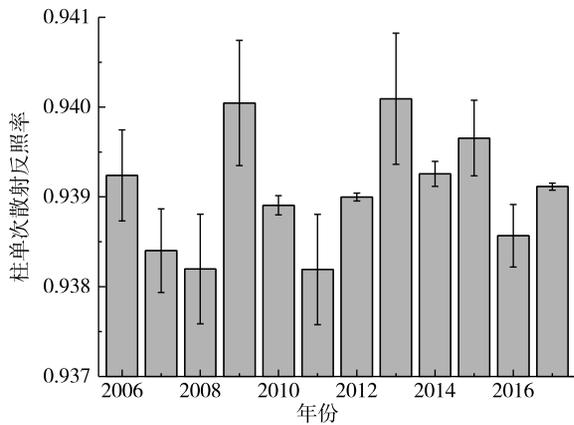


图4 长江三角洲地区年平均气溶胶柱单次散射反照率

Fig. 4 Yearly mean area-averaged aerosol column single scattering albedos over the Yangtze Delta region

图6为长三角地区2006—2017年大气气溶胶柱单次散射反照率季节平均值的变化情况.长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率在春夏秋冬4个季节的平均值分别为  $0.929 \pm 0.002$ 、 $0.968 \pm 0.001$ 、 $0.941 \pm 0.003$  和  $0.919 \pm 0.001$ . 总体而言,气溶胶柱单次散射反照率在夏季最大,而在冬季最小,这与月平均值的情形一致.大气气溶胶柱单次散射反照率的季节性变化,主要受气溶胶源与汇的季节性变化以及气象因素的变化影响.冬季供暖加热等所带来的黑碳等吸收性气溶胶排放增加,同时冬季更稳定的天气条件(较低的大气边界层和较小的风速)不利于黑碳污染物等的扩散清除<sup>[15]</sup>,导致气溶胶吸收成分比例增加,进而使得冬季的气溶胶单次散射反

照率较低.夏季具有较强的大气对流能力,同时长三角地区正值雨季,且台风过境次数增多,有利于黑碳污染物等的干湿清除,这可能是导致夏季吸收成分相对较低而气溶胶单次散射反照率较高的原因之一.

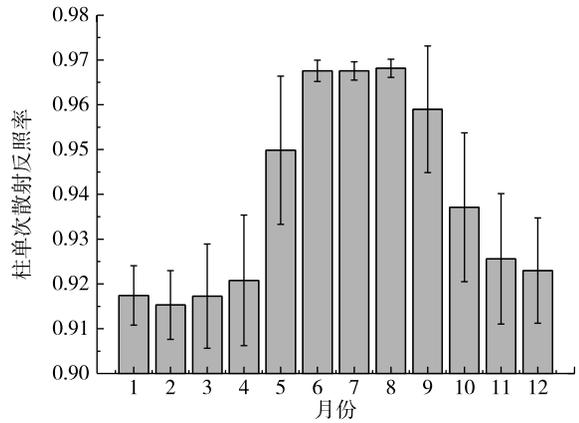


图5 长江三角洲地区月平均气溶胶柱单次散射反照率

Fig. 5 Monthly mean area-averaged aerosol column single scattering albedos over the Yangtze Delta region

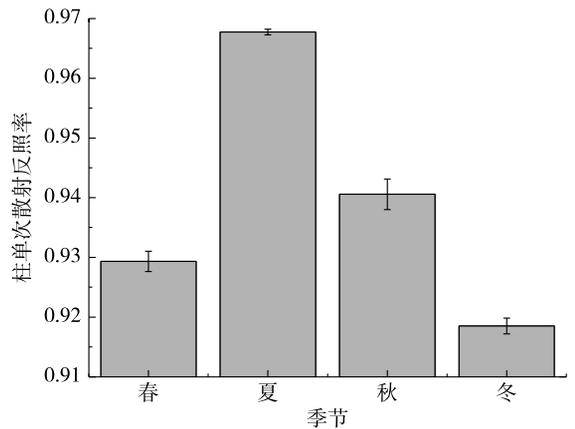


图6 长江三角洲地区季节平均气溶胶柱单次散射反照率

Fig. 6 Seasonal mean aerosol column single scattering albedos over the Yangtze Delta region

### 3 结论

本文利用 OMI 卫星资料 2006—2017 年的气溶胶柱单次散射反照率日均数据,研究了整层大气气溶胶单次散射反照率在长三角地区的时空分布特征,并研究其年际、月、季节变化特征.

长江三角洲地区的大气气溶胶柱单次散射反照率越靠近海洋越大,而越靠近内陆越小.日均气溶胶柱单次散射反照率在  $0.881 \sim 0.971$  范围内变化,多年的平均值为  $0.939 \pm 0.024$ ,最大分布概率出现在

0.965~0.970 区间,其值约为 25%。长三角地区大气气溶胶柱单次散射反照率的年平均值集中于 0.938~0.940 之间,年际变化很小,变化值小于 1%;月均柱单次散射反照率在 6、8、9 月有最大值,其值为 0.968,而在 2 月有最小值,其值为 0.915;春夏秋冬的季节平均值分别为  $0.929 \pm 0.002$ 、 $0.968 \pm 0.001$ 、 $0.941 \pm 0.003$  和  $0.919 \pm 0.001$ ,在夏季最大,而在冬季最小。本文研究结果可为气溶胶单次散射反照率在气候模式中的使用等提供数据参考。

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Krieger U K, Braun C. Light-scattering intensity fluctuations in single aerosol particles during deliquescence [ J ]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2001, 70(4/5/6):545-554
- [ 2 ] Brewer R, Belzer W. Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(30):5223-5233
- [ 3 ] Haywood J, Shine K. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model [ J ]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(543):1907-1930
- [ 4 ] Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, et al. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(32):11207-11212
- [ 5 ] 王宁宁,谭涌波,师正,等.气溶胶对云中水成物粒子荷电情况的影响 [ J ]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 5(4):331-335  
WANG Ningning, TAN Yongbo, SHI Zheng, et al. Effect of aerosol on electric charge of particle [ J ]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 5(4):331-335
- [ 6 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: the physical science basis* [ M ]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013
- [ 7 ] Wang W, Rood M J, Carrico C M, et al. Aerosol optical properties along the northeast coast of North America during the New England air quality study: intercontinental transport and chemical transformation 2004 campaign and the influence of aerosol composition [ J ]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D10), DOI:org/10.1029/2006JD007579
- [ 8 ] Cheng Y F, Wiedensohler A, Eichler H, et al. Relative humidity dependence of aerosol optical properties and direct radiative forcing in the surface boundary layer at Xinken in Pearl River Delta of China: an observation based numerical study [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25):6373-6397
- [ 9 ] Torres O, Ahn C, Chen Z. Improvements to the OMI near-UV aerosol algorithm using A-train CALIOP and AIRS observations [ J ]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11):3257-3270
- [ 10 ] Kauppi A, Kolmonen P, Laine M, et al. Aerosol-type retrieval and uncertainty quantification from OMI data [ J ]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(11):4079-4098
- [ 11 ] Zara M, Boersma K F, de Smedt I, et al. Improved slant column density retrieval of nitrogen dioxide and formaldehyde for OMI and GOME-2A from QA4ECV: intercomparison, uncertainty characterisation, and trends [ J ]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(7):4033-4058
- [ 12 ] Määttä A, Laine M, Tamminen J, et al. Quantification of uncertainty in aerosol optical thickness retrieval arising from aerosol microphysical model and other sources, applied to Ozone Monitoring Instrument (OMI) measurements [ J ]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(5):1185-1199
- [ 13 ] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. A seasonal trend of single scattering albedo in southern African biomass-burning particles: Implications for satellite products and estimates of emissions for the world's largest biomass-burning source [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(12):6414-6432
- [ 14 ] Andrews E, Ogren J A, Kinne S, et al. Comparison of AOD, AAOD and column single scattering albedo from AERONET retrievals and in situ profiling measurements [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(9):6041-6072
- [ 15 ] Zhang X L, Rao R Z, Huang Y B, et al. Black carbon aerosols in urban central China [ J ]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 150:3-11

## Aerosol column single scattering albedos over the Yangtze Delta region

ZHANG Xiaolin<sup>1,2</sup> XU Mengjie<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Aerosol column single scattering albedos over the Yangtze Delta region were analyzed to study monthly, seasonal, and yearly variations. Daily Ozone Monitoring Instrument (OMI) satellite data for the period between January 1, 2006 and December 31, 2017 was used for this study. The single scattering albedo was measured for the wavelength of 483.5 nanometers. The area-averaged time series albedo map revealed that the albedo is generally higher over the ocean than inland. The daily aerosol column single scattering albedo is range from 0.881 to 0.971, with a mean value of  $0.939 \pm 0.024$ . The maximum distribution probability lies in the range of 0.965–0.970 with a probability of 25%. The annual mean aerosol column single scattering albedos are in the range of 0.938–0.940, with narrow variations. The monthly average single scattering albedos vary from the lowest value of 0.915 during February to the highest of 0.968 during June, July, and August. From a seasonal perspective, single scattering albedo is lowest in winter ( $0.919 \pm 0.001$ ), moderate in spring ( $0.929 \pm 0.002$ ) and fall ( $0.941 \pm 0.003$ ), and maximum in summer ( $0.968 \pm 0.001$ ).

**Key words** aerosol; single scattering albedo; the Yangtze Delta region; spatial-temporal variation