

激光与光电子学进展

2009 年至 2018 年全球气溶胶光学厚度时空分布特性研究

毛前军*, 金穗穗

武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065

摘要 气溶胶光学厚度(AOD)是表征气溶胶含量及大气污染程度的关键因素。利用 CALIPSO 卫星 level 2 气溶胶廓线产品,分析 2009 年至 2018 年全球范围典型区域内 AOD 的时空变化特征及其变化趋势。结果表明:全球范围的 AOD 表现出一定的时空差异性。在空间尺度上,AOD 高值中心主要分布在印度、沙特阿拉伯等地区;在时间尺度上,也存在明显的季节差异性。印度、沙特阿拉伯及中国北方等典型地区在 MAM 和 DJF 时期达到 AOD 峰值,巴西则在 JJA 时期达到 AOD 峰值。每个典型地区也存在显著的 AOD 趋势差异,印度地区 AOD 上升趋势最强。

关键词 大气光学; 气溶胶; 光学厚度; 时空分布; 全球范围

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0301001

Investigation of Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Global Aerosol Optical Depth from 2009 to 2018

Mao Qianjun*, Jin Suisui

School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China

Abstract Aerosol optical depth (AOD) is a key factor for characterizing aerosol content and atmospheric pollution. In this study, level 2 aerosol profile products of the CALIPSO satellite were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics and trends of AOD in specific regions worldwide from 2009 to 2018. Results show that AOD has a certain temporal and spatial difference in different areas. On the spatial scale, high AOD value centers are mainly distributed in India, Saudi Arabia, and other regions; moreover, on the temporal scale, noticeable seasonal differences exist. Specific regions such as India, Saudi Arabia, and northern China show peak AOD during the MAM and DJF periods, while Brazil peak during the JJA period. Moreover, significant AOD trend differences exist in each typical region, with the strongest upward trend in India.

Key words atmospheric optics; aerosol; optical depth; spatial and temporal distribution; global range

OCIS codes 010.1110; 280.1100

1 引言

大气气溶胶作为大气的重要组成成分,对大气

环境污染及地-气系统辐射收支有不小的影响。气溶胶粒子主要通过直接效应和间接效应^[1]两种辐射强迫机制来影响大气的辐射收支平衡,不同效应的

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-06-08; 录用日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(51876147)

E-mail: maoqianjun@163.com

产生取决于气溶胶颗粒的光学特性和微物理特性。气溶胶光学厚度(AOD)作为气溶胶的一个重要光学特性参数,其本质含义是指在晴朗无云天气下,气溶胶消光系数在垂直方向上的积分,用于描述气溶胶对大气辐射的吸收和散射作用。由于AOD可以反映整层大气的消光作用,这意味着AOD可以作为衡量空气污染程度的重要参数。

目前,获取AOD观测值的有效方式主要有地基观测和卫星观测。近年来,在全球范围已经建立起了比较完善的气溶胶光学特性地基观测网络,例如美国建立的全球地基自动观测网络(AERONET)^[2]。地基站点可以提供准确的气溶胶相关参数,但是由于站点的分布受到地理位置的限制,并不能持续地观测任意空间范围的大气气溶胶变化。而卫星遥感监测技术时空覆盖范围广,能够支撑任意区域性气溶胶分布的相关研究,但是反演精度不高^[3]。MODIS、MISR等被动式遥感监测卫星对于气溶胶在水平方向上的分布和传输具有较好的观测效果,但是无法提供气溶胶在垂直方向上的信息。CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星作为主动式遥感监测卫星,则可以解决这一问题^[4]。同时,越来越多的学者结合CALIPSO卫星数据对AOD展开了研究。例如Bridhikitti^[5]采用了CALIPSO卫星提供的AOD数据,针对曼谷地区的气溶胶种类及其时空分布特征展开分析,研究结果表明,曼谷地区上方存在的烟雾层导致整个地区的AOD值偏高。徐成鹏等^[6]利用CALIPSO卫星提供的2006年至2012年无云天气下中国地区的气溶胶数据,对沙尘天气发生频率较高的4个典型地区展开分析。研究结果证明,4个地区的沙尘气溶胶具有一定的季节性分布特征。高星星等^[7]则在2006年至2015年间对华北地区不同污染程度下的AOD时空分布展开了研究,研究发现,在不同污染条件下,能见度与AOD之间存在一定的线性关系。

综上,国内外学者结合卫星遥感监测技术,对区域性和短时间序列的AOD时空分布展开了不同程度的研究。但是目前的研究大多对较小区域、较短时间序列的AOD时空分布和趋势进行分析,在时间序列和数据选取方面仍有不足。因此,本文结合CALIPSO卫星数据,分析全球尺度范围近十年(2009年至2018年)的AOD时空分布特征及变化趋势,为全球范围的气溶胶时空分布研究提供方法参

考,进而获取更为普遍的规律。

2 研究方法

2.1 卫星数据来源

CALIPSO卫星是由美国航空和航天局(NASA)和法国国家空间研究中心(CNES)共同开发研制的,其主要任务是探测大气中云和气溶胶的垂直分布特征。CALIPSO卫星上搭载的正交偏振云和气溶胶激光雷达CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)是首个可以连续观测的星载激光雷达,能够以高分辨率观测大范围云和气溶胶的垂直分布^[8]。本文选取CALIOP的level 2 Aerosol profile产品,联合白天和夜晚的观测数据进行研究。原始数据来源于NASA官网,网址为<https://subset.larc.nasa.gov/calipso/login.php>。

2.2 研究区域

基于CALIPSO卫星,提取了全球区域2009年至2018年的AOD数据,所有的有效数据以 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的空间网格进行划分。基于全球气候环境复杂和地理类型多样的特点,本文结合Mehta等^[9]的研究成果,在全球范围选取了6个典型区域展开详细的分析,6个典型区域地理范围如表1所示。

表1 研究区域的信息

Table 1 Information of study regions

Study area	Abbreviation	Geographic scope
Brazil	BRA	30.0°W-85.0°W, 0°S-30.0°S
China	CHN	100.0°E-130.0°E, 20.0°N-40.0°N
India	TD	60.0°E-100.0°E, 10.0°N-40.0°N
Indonesia	TDN	96.0°E-140.0°E, 11.0°S-15.0°N
Saudi Arabia	SA	40.0°E-60.0°E, 18.0°N-30.0°N
Central Africa	CA	10.0°W-45.0°E, 10.0°S-10.0°N

2.3 研究方法

对2009年至2018年全球范围的CALIPSO卫星数据进行统计,分析全球范围的AOD时空分布状况。主要采用最小二乘法来计算典型区域AOD年均变化趋势。最小二乘法是一种基本的数据分析方法,可以用于长时间序列AOD值的变化趋势分析。其原理是最小化各个离差的平方和来保证各个离差的绝对值最小,并且通过样本数据来估计一元线性方程的相关参数,使得估计误差的平方和最小。以时间为自变量,对年均AOD值与年份进行回归分析,进而得到一元线性方程。计算公式为

$$K = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \quad (1)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (2)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3)$$

式中: x_i 为年份时间序数; y_i 为当年(季节)的 AOD 值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为年份序数和 AOD 的年(季节)平均值。当 $K > 0$, 表示 AOD 呈上升趋势, 污染程度加重; 当 $K < 0$, 表示 AOD 呈减小趋势。

3 结果与分析

3.1 全球 AOD 空间分布概况

通过提取全球范围内的 AOD 年均值可分析出, 全球 AOD 表现出明显的地域性差异。AOD 高值区域 (> 0.7) 主要分布在南亚次大陆以及中国境内, 中值区域 ($0.35 \sim 0.6$) 主要分布在南美洲北部、非洲中部等区域, AOD 低值区域 (< 0.35) 则均匀地分布在欧洲、北美洲及大洋洲等地区。从整体上来看, 亚洲 AOD 高值中心位于印度、印度尼西亚、巴基斯坦和中国东部等地 (> 0.4), 非洲中部 AOD 值在 $0.6 \sim 0.8$, 南美洲整体 AOD 值较低 (< 0.3)。全球范围近 10 年的 AOD 值在总体上呈现出相似的分布格局, 但是逐年的 AOD 分布仍存在一定的差异性。在 2009 年至 2018 年, AOD 高值中心仍集中于印度、沙特阿拉伯、中国东部等地区。印度从 2009 年到 2018 年的 AOD 高值范围逐步缩小, AOD 值从南部到北部逐渐递增, 为 $0.6 \sim 0.9$; 沙特地区从 2009 年到 2013 年 AOD 高值范围进一步扩大; 中国境内污染区域从 2009 年到 2018 年逐步集中于华北平原和塔克拉玛干沙漠等地, AOD 值为 $0.7 \sim 0.8$ 。

3.2 全球 AOD 季节尺度空间分布

全球范围的 AOD 按照季节尺度平均后也呈现不一样的空间分布特征。由于南北半球在季节划分上存在差异, 此处将 12 个月份划分为 DJF、MAM、JJA 和 SON, 共 4 个季度。DJF 和 MAM 时期的整体全球 AOD 值比 JJA 和 SON 时期更高。AOD 在 DJF 时期达到峰值的地区主要有中国西北地区等地。中国北方的塔克拉玛干沙漠作为境内最主要的天然气溶胶源地, 在 DJF 时期出现 AOD 峰值, 这是由于在该时期存在频繁的沙尘暴事件及沙漠地区常见的自然表面扬尘现象。在 MAM 时期, 达到 AOD 峰值的主要有西非撒哈拉沙漠、印度及中国华北平原地区。中国华北平原作为小麦的主要产地, 在 MAM 时期存在大量的秸秆燃烧现象, 因此污染程度加重。在 JJA 和 SON 时期, AOD 高

值以巴西平原靠近赤道区域为中心向四周扩散, 这是在 JJA 时期, 巴西地区大量的季节性森林砍伐和相关农业产品燃烧^[10] (例如甘蔗等) 共同作用的结果。总的来说, 根据区域性变化, 将 AOD 的季节性差异分成三种类型: 第一种类型是指 AOD 在 MAM 时期达到峰值, 主要有印度、印度尼西亚等地; 第二种类型是指 AOD 在 DJF 时期达到峰值, 主要以中国塔克拉玛干沙漠等地为代表; 第三种类型是指 AOD 在 JJA 时期达到峰值, 以巴西为代表地区。

3.3 典型区域 AOD 均值分布及趋势分析

3.3.1 典型区域 AOD 均值分布

图 1 为典型地区 10 年 AOD 均值的分布情况, 印度 (TD) 地区整体的 AOD 均值最高, 为 $0.3 \sim 0.5$, 沙特阿拉伯 (SA) 次之; 非洲中部 (CA) AOD 均值集中在 $0.25 \sim 0.5$; 印度尼西亚 (TDN) 和巴西 (BRA) 地区的 AOD 值在 0.2 左右波动。

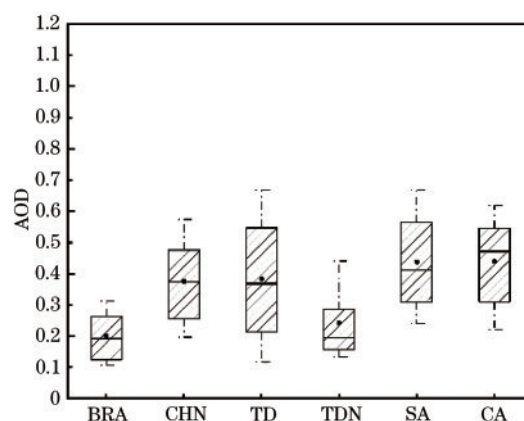


图 1 典型区域 10 年 AOD 均值分布图

Fig. 1 10-year average distribution of AOD in typical regions

图 2 为典型地区在 4 个时期的 AOD 均值对比。各地区的 AOD 平均值在 MAM 时期的差异性最大, DJF 次之。在 MAM 时期, 沙特阿拉伯的 AOD 峰值 (> 1.0) 最大。在 DJF 时期, 印度地区 AOD 值在 $0.25 \sim 0.6$ 波动。在 JJA 时期和 SON 时期, AOD 均值的差异性甚微。图 3 为 6 个典型区域平均 AOD 与季节和年份的关系。巴西地区在 SON 和 JJA 时期的 AOD 值明显高于其他两个季度, 结合研究发现, 这是由于在 8 月至 10 月的旱季, 存在高频次的森林砍伐和生物质燃烧现象^[11]。研究证明, 中国 (CHN) 地区 AOD 值偏高主要是内部的人为气溶胶及来自西北地区的沙尘气溶胶共同作用的结果, 同时, 来自欧洲和周围俄罗斯陆地的气溶胶粒子由于长途运输及缓慢的清除过程, 对中国造成了一定的

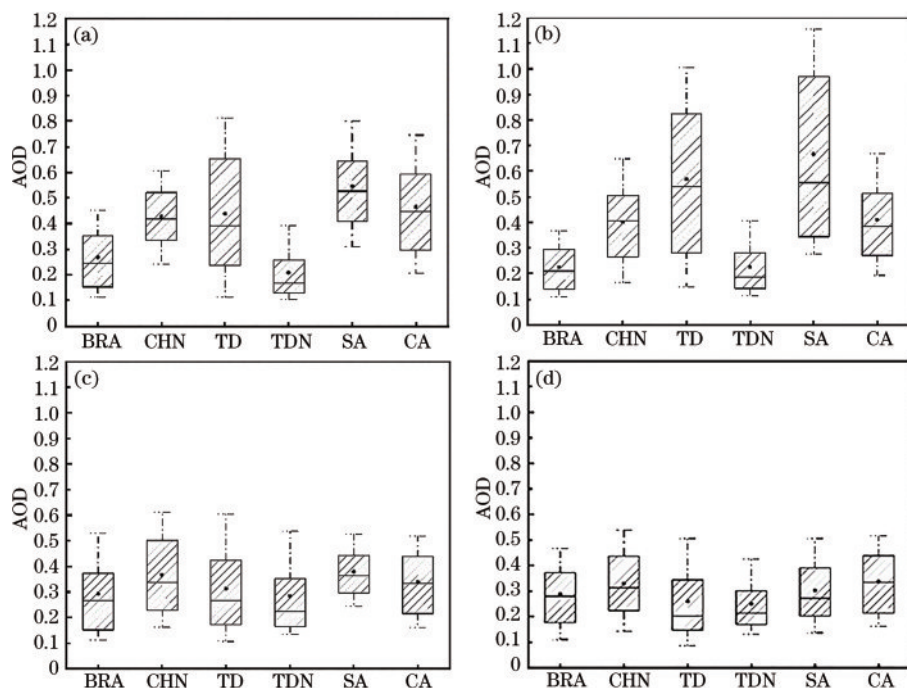


图2 典型区域的季节 AOD 均值图。(a) DJF;(b) MAM;(c) JJA;(d) SON
 Fig. 2 Seasonal mean AOD maps in typical regions. (a) DJF; (b) MAM; (c) JJA; (d) SON

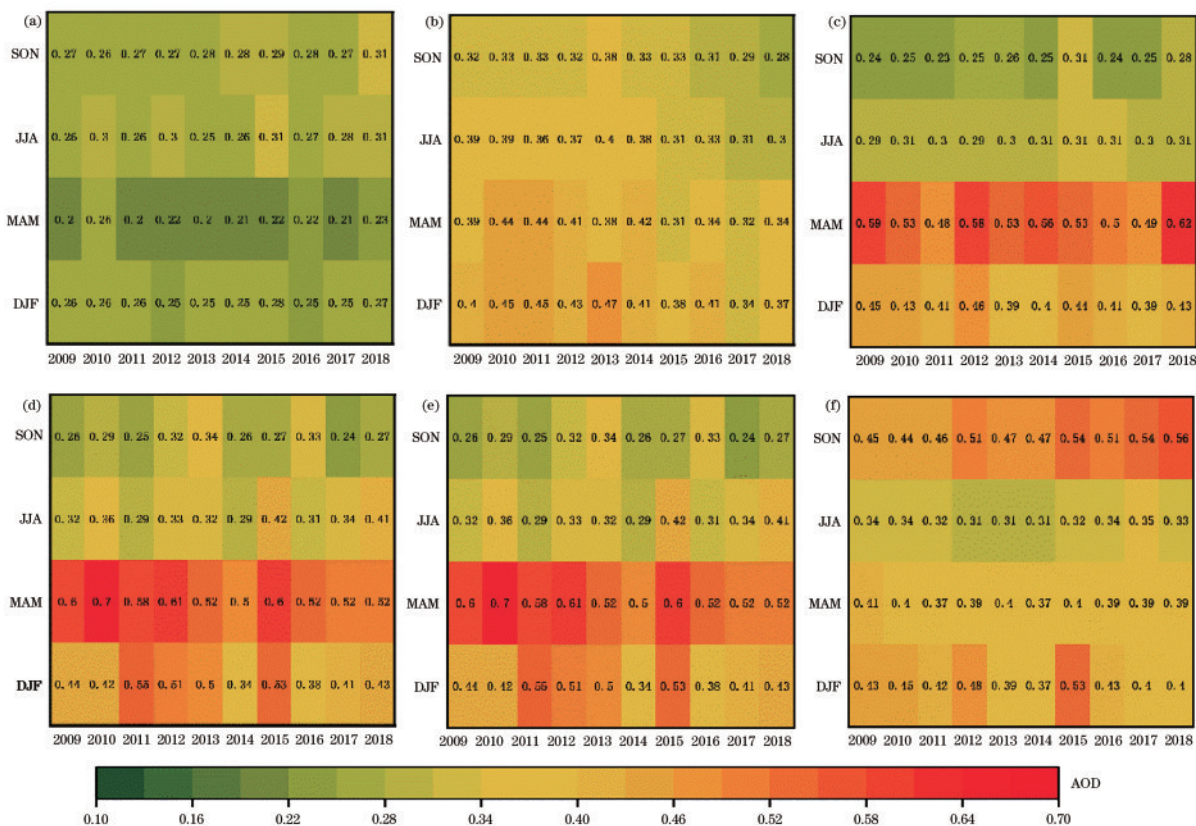


图3 典型区域的平均 AOD 与季节和年份的关系。(a)巴西;(b)中国境内;(c)印度;(d)印度尼西亚;
 (e)沙特阿拉伯;(f)非洲中部
 Fig. 3 Relationship between average AOD and season and year in typical regions. (a) Brazil; (b) China;
 (c) India; (d) Indonesia; (e) Saudi Arabia; (f) Central Africa

污染^[12]。结合图 3 的数据,中国地区的 AOD 峰值出现在 DJF 和 MAM 时期,这是由于来自蒙古和中国西北部沙尘粒子的入侵和高强度太阳辐射导致的地表粒子上涌^[13]。

印度地区在 MAM 时期的区域 AOD 平均值高达 0.62,在 JJA 时期 AOD 显著下降。这是由于高温和高风速给该区域带来了大量的沙尘粒子,粗颗粒物的相对浓度增大,气溶胶的传输活动也随之增强。随着印度工业化的迅速推进,再加上印度人口基数大,产生了大量的人为气溶胶(例如矿业粉尘和工业排放的气溶胶),使得印度地区的 AOD 高居不下。

印度尼西亚地区的季节性 AOD 差异不大。在 JJA 和 SON 时期,AOD 为 0.23~0.44,略高于其他时期。Mehta 等^[9]结合 MODIS 卫星数据,印度尼西亚地区的观测结果同样显示,在 SON 时期,AOD 达到峰值。这是因为在 SON 时期存在大量的生物质燃烧现象,同时周围海洋的海盐气溶胶也有一定影响。

沙特阿拉伯与印度表现出相似的 AOD 季节性变化。MAM 时期 AOD 值大于 DJF 时期 AOD 值大于 JJA 时期 AOD 值大于 SON 时期 AOD 值。在 MAM 时期,AOD 均值达 0.7。这是因为沙特阿拉

伯内部沙漠广布,有大内得夫和鲁卜哈利等多个沙漠,再加上 MAM 时期降雨较少,大量的沙尘暴和沙漠扬尘事件频繁发生。非洲中部 AOD 值则在 SON 和 DJF 时期到达峰值,AOD 值均在 0.5 以上。中非地区受到来自大西洋的暖流影响,空气湿度增加,进而加速了气溶胶粒子的吸湿增长过程。

3.3.2 典型区域 AOD 空间趋势分析

图 4 为 2009 年至 2018 年 6 个典型区域的 AOD 趋势图。印度地区的 AOD 增长趋势在中部区域体现尤为明显,趋势值达 0.02 以上。印度恒河平原的 AOD 增长趋势更为显著。巴西境内的 AOD 小幅度增长趋势主要集中在巴西高原,在亚马逊盆地附近部分区域表现为下降趋势,该地区的 AOD 下降趋势可能与 Reddington 等报道的森林火灾的减少有关^[14]。在非洲西部靠近几内亚湾地区,AOD 以上升趋势为主,从中部到东部表现为较弱的下降趋势。在印度尼西亚地区,苏门答腊岛及苏拉威西岛等区域均表现为 AOD 弱增长趋势。沙特阿拉伯从西到东表现为大幅度下降趋势,沿海地区下降趋势尤为明显。中国境内 AOD 值由华中向华南逐渐递减。AOD 的负增长可能与国家环保总局(SEPA)在 2006 年后实施的一系列减少空气污染的措施等人为因素有关^[15]。

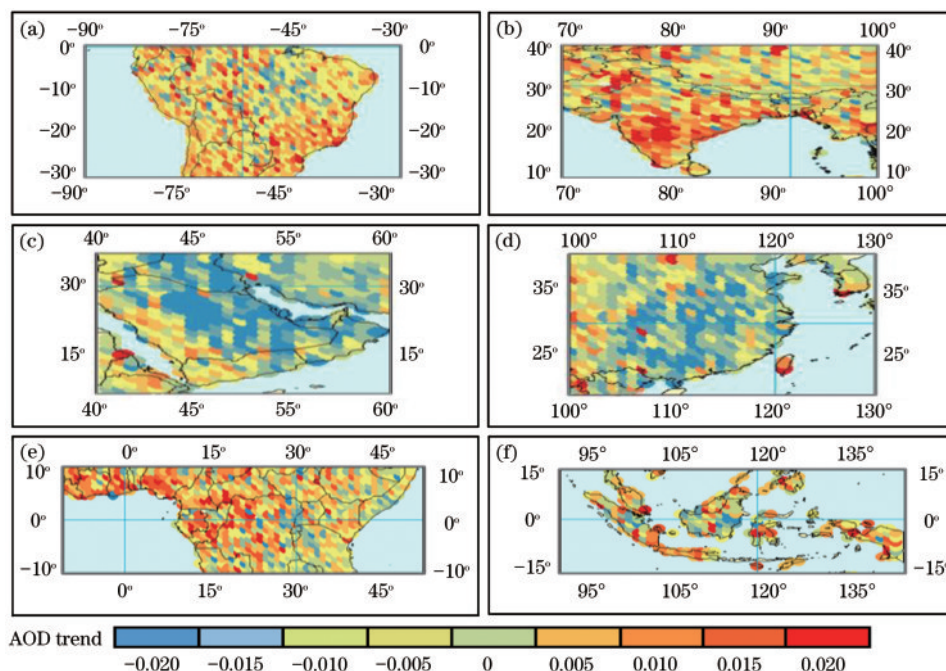


图 4 典型区域 2009 年至 2018 年 AOD 趋势分布图。(a)巴西;(b)中国境内;
(c)印度;(d)印度尼西亚;(e)沙特阿拉伯;(f)非洲中部

Fig. 4 Distribution of AOD trends in typical regions from 2009 to 2018. (a) Brazil;
(b) China; (c) India; (d) Indonesia; (e) Saudi Arabia; (f) Central Africa

4 结 论

结合 CALIPSO 卫星近 10 年的 AOD 数据,对全球范围的 AOD 时空分布特性及其变化趋势展开研究。在空间尺度上,AOD 高值中心(>0.7)主要分布在南亚次大陆及中国境内,AOD 中值区域($0.35\sim 0.6$)集中在南美洲北部、非洲中部等区域,AOD 低值区域($0\sim 0.35$)则大范围地分布在欧洲、北美洲等地区。在时间尺度上,可以将全球范围 AOD 季节性特征概括为三种类型:第一种类型是指 AOD 在 MAM 时期达到峰值,主要有印度、印度尼西亚等地;第二种类型是指在 DJF 时期达到峰值,主要有中国西北地区;第三种类型是指在 JJA 时期达到峰值,以巴西为代表地区。典型地区中,印度和沙特阿拉伯的季节性差异最明显。中国地区在 DJF 时期的 AOD 均值最高,印度和沙特阿拉伯地区在 MAM 时期呈现 AOD 高值,印度尼西亚和巴西在 JJA 时期表现为 AOD 高值,非洲中部在 SON 和 DJF 时期达到 AOD 峰值。6 个典型区域近 10 年的 AOD 趋势也各有差异。总体而言,印度地区表现为强上升趋势,巴西、非洲中部、印度尼西亚则表现出弱上升趋势,沙特阿拉伯和中国境内均表现出下降趋势。

致谢 感谢美国国家航空航天局提供的 CALIPSO 卫星数据资料。

参 考 文 献

- [1] Liu J J, Liu Y, Wang G Y, et al. Applicability of MODIS C061 aerosol optical depth products in Xi'an region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001004.
刘晶晶, 刘芸, 王国英, 等. MODIS C061 气溶胶光学厚度产品在西安地区的适用性研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001004.
- [2] Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1201003.
罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1201003.
- [3] Mehta M. A study of aerosol optical depth variations over the Indian region using thirteen years (2001-2013) of MODIS and MISR Level 3 data [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109: 161-170.
- [4] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, et al. Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701002.
陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0701002.
- [5] Bridhikitti A. Atmospheric aerosol layers over Bangkok Metropolitan Region from CALIPSO observations [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 127: 1-7.
- [6] Xu C P, Ge J M, Huang J P, et al. Observations of dust aerosol over China based on CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1353-1362.
徐成鹏, 葛颀铭, 黄建平, 等. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国沙尘气溶胶观测[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1353-1362.
- [7] Gao X X, Chen Y, Zhang L, et al. Aerosol properties based on CALIPSO data in representative regions over China [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2018, 54(4): 431-439.
高星星, 陈艳, 张镭, 等. 基于 CALIPSO 卫星数据的中国典型区域气溶胶特性[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(4): 431-439.
- [8] Chen X L, Jin L J. Vertical distribution characteristics of aerosols in different weathers based on CALIPSO satellite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020101.
陈晓磊, 金莲姬. 基于 CALIPSO 卫星的不同天气类型下气溶胶垂直分布特征对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020101.
- [9] Mehta M, Singh R, Singh A, et al. Recent global aerosol optical depth variations and trends: a comparative study using MODIS and MISR level 3 datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 181: 137-150.
- [10] Ogugbuaja V O, Barsisa L Z. Atmospheric pollution in North-East Nigeria: measurement and analysis of suspended particulate matter [J]. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 2001, 15(2): 109-118.
- [11] Lara L L, Artaxo P, Martinelli L A, et al. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(26): 4627-4637.
- [12] Quinn P K, Shaw G, Andrews E, et al. Arctic

- haze: current trends and knowledge gaps[J]. *Tellus B*, 2007, 59(1): 99-114.
- [13] Logan T, Xi B, Dong X, et al. Classification and investigation of Asian aerosol absorptive properties [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(4): 2253-2265.
- [14] Reddington C L, Butt E W, Ridley D A, et al. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 768-771.
- [15] Lu Z, Streets D G, Zhang Q, et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(13): 6311-6331.