

基于 CALIPSO 卫星遥感数据的全球典型区域气溶胶光学特性研究

毛前军*, 金穗穗, 张恒星

武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉 430065

摘要 利用 CALIPSO 卫星提供的 2 级气溶胶层产品, 通过统计分析多个气溶胶光学特性参数, 研究 2009—2018 年全球范围典型区域内气溶胶光学特性的空间分布特性及其季节属性。结果表明: 沙特阿拉伯和印度的气溶胶光学厚度 (AOD) 月均值呈单峰型, 在 6 月到 7 月达到峰值; 中国和非洲中部的 AOD 月均值变化为双峰型, 最值出现在 4 月到 6 月和 12 月到次年 1 月。粒子退偏振比 (PDR) 和粒子色比 (CR) 的区域差异性为巴西地区颗粒物不规则程度最大, PDR 值为 0.5~0.7; 中国、印度和印度尼西亚等地则主要以细模态粒子为主, CR 值为 0.1~0.2。在 DJF 和 MAM 时期, 以沙特地区颗粒物非球形趋势最强, 在 JJA 和 SON 时期, 以沙特和非洲中部颗粒物粒径最大, CR 值变化范围为 0.756~0.829。各地区气溶胶粒子非规则程度均呈增强趋势, 趋势系数变化范围为 0.01~0.025, 以巴西增强趋势最明显, 粒子粒径则表现为弱下降趋势。

关键词 遥感; 全球范围; 气溶胶光学厚度; CALIPSO 卫星; 退偏振比; 色比

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2428002

Aerosol Optical Properties of Typical Areas of the World Based on CALIPSO Satellite Remote Sensing Data

Mao Qianjun*, Jin Suisui, Zhang Hengxing

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

Abstract Spatial distribution characteristics and seasonal attributes of aerosol optical properties in typical regions around the world are studied through the statistical analysis of multiple aerosol optical parameters using two-level aerosol layer products provided by the cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation (CALIPSO) satellite remote sensing data from 2009 to 2018. Results show that the monthly averages of the aerosol optical depth (AOD) in Saudi Arabia and India are unimodal, reaching a peak from June to July; the monthly average changes of the AOD in China and Central Africa are bimodal, with the highest values appearing from April to June and from December to January. The regional difference between the particulate depolarization ratio (PDR) and color ratio (CR) is the degree of irregularity of particles, which is the largest in Brazil with a PDR value of 0.5–0.7. In China, India, and Indonesia, fine-mode particles are mainly encountered with a CR value of 0.1–0.2. During the DJF and MAM periods, the nonspherical trend of particles in Saudi Arabia was the strongest, and during the JJA and SON periods, the particles in Saudi Arabia and Central Africa had the largest particle size with a CR value ranging from 0.756 to 0.829. The irregularity of aerosol particles in each region shows an increasing trend, and the variation range of the trend coefficient is 0.01–0.025; the increasing trend is most obvious in Brazil, and the particle size shows a weak downward trend.

Key words remote sensing; global scope; aerosol optical depth; CALIPSO satellite; depolarization ratio; color ratio

OCIS codes 010.3640; 010.1110; 280.1100

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-01-18; 录用日期: 2021-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(51876147)

通信作者: *maoqianjun@163.com

1 引言

气溶胶粒子是指悬浮在大气环境中的固体或者液体微粒系,主要通过形成云凝结核或直接以散射和吸收的方式来影响气候效应,气溶胶由于光学特性的复杂性成为影响辐射强迫研究中最大的不确定因素之一。其中气溶胶光学厚度(AOD)主要用于描述气溶胶对光的衰减作用,可以反映整个大气层的污染程度^[1]。不同形状和粒径大小气溶胶粒子的折射率和消光系数存在差异,对气溶胶的散射辐射特性会产生影响。粒子退偏振比(PDR)和粒子色比(CR)作为气溶胶的主要光学特性参数,可用于判别气溶胶颗粒物的非规则程度和粒径相对大小的动态变化规律^[2]。因此研究区域性长时间序列气溶胶相关光学特性的时空变化,对评估全球/局部大气污染程度和辐射效应分析等方面具有重要意义。

目前,探究区域气溶胶空间分布特征的技术手段主要有地基站点观测和卫星遥感监测。卫星遥感由于可以提供全球大范围的气溶胶光学特性观测,得到广泛应用。其中云和气溶胶激光雷达和红外开拓者(CALIPSO)卫星作为第一颗能监测云和气溶胶在垂直方向上分布特征的卫星,不仅能提供全球范围内气溶胶水平分布特性和垂直分布信息,还可以自动识别气溶胶类型^[3]。同时也有大量学者对 CALIPSO 卫星数据的准确性做出了验证,例如 Ma 等^[4]对 CALIPSO 卫星和 MODIS 卫星的 AOD 数据进行对比,发现二者呈现一定的相关性,证实了 CALIPSO 卫星数据的可靠性,但是 MODIS 卫星的 AOD 在部分地区反演精度更高,在南非和撒哈拉沙漠地区 CALIPSO 卫星的 AOD 值明显更高,最大差异为 0.25。国内外学者结合 CALIPSO 卫星数据

对长时间序列气溶胶分布特征也做出了大量研究,Mehta 等^[5]利用 CALIPSO 卫星研究印度地区的 AOD 时空分布,结果表明大气污染严重的区域主要集中在印度恒河平原,且以夏季时的污染程度最严重。高星星等^[6]则探讨了近 10 年中国典型地区 AOD 时空变化和季节光学属性,研究证明中国 AOD 高值区域与人口密集区域呈一定的相关性,且以塔克拉玛干沙漠和青藏高原地区的粒子非球形趋势最大,污染程度更加严重。沈吉等^[7]则针对长三角地区的 AOD 和 PDR 展开研究,研究结果表明,在夏秋季气溶胶粒子的消光能力最强,其形状更规则。沈仙霞等^[8]则根据 PDR 和 CR 等参数,探讨了上海地区不同空气质量下气溶胶的季节光学属性,发现重污染时期以不规则颗粒物为主,粒子散射消光能力更强。

结合国内外已有研究,目前对于气溶胶光学特征空间分布的探讨主要集中在较小区域和较短时间序列内,针对全球尺度下的气溶胶长期特征变化的研究相对不足。因此本文根据全球尺度下 2009—2018 年内典型区域 AOD 时空分布特征,并通过 CALIPSO 卫星对典型区域内气溶胶类型进行识别,同时探讨代表区域内气溶胶 PDR 及 CR 的相关关系,并进行趋势分析。结果为研究全球范围内气溶胶污染特性及其气候效应提供一定的参考价值。

2 研究区域及研究方法

2.1 研究区域

本研究在全球范围选取 6 个 AOD 高值典型区域作为代表区域,包括中国、巴西、印度、印度尼西亚、沙特阿拉伯、非洲中部,地理范畴如表 1 所示。

表 1 代表区域的基本信息

Table 1 Basic information on the study regions

Study area	Abbreviation	Geographic scope
China	CHN	73.0° E—136.0° E, 17.0° N—54.0° N
Brazil	BRA	30.0° W—85.0° W, 10.0° S—30.0° S
India	IDA	60.0° E—100.0° E, 10.0° N—40.0° N
Indonesia	IDNA	96.0° E—140.0° E, 11.0° S—15.0° N
Saudi Arabia	SA	37.0° 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

2.2 数据与方法

CALIPSO 卫星是一种由美国 NASA 与法国国

家空间研究中心(CNES)联合研制的主动式卫星,上面搭载的云和气溶胶激光雷达(CALIOP)可提供

532 nm 和 1064 nm 两个波长的数据,共监测三个通道的回波信息,包括一个通道为 1064 nm 的后向散射信号,另外两个通道测量 532 nm 后向散射信号的正交极化分量。本研究使用的是 CALIPSO 卫星 2009—2018 年 Level 2 版本 5 km aerosol layer 产品,在研究 AOD 时空分布时,采用的是 532 nm 波长数据。

由于 Level 2 产品是由 Level 1 产品用相关算法得到的,其产品数据具有很大的不确定性。为提高数据精度,需结合 CAD_SCORE(s)对 Level 2 气溶胶层产品进行质量筛选。本文所采用的数据质量控制方法的条件:1)消光系数 $C_e \neq -9999$,消光系数不确定度 $P_e \leq 10$;2) $-100 \leq s \leq -50$ 。CAD_SCORE 是 CALIPSO 分类算法中区分云和气溶胶的可信度参数,当 $s < 0$ 时,表明获取数据为气溶胶的信息,且绝对值越大,可信度越高。为排除白天太阳光背景光照干扰,此处采用夜间数据。所有的卫星数据插值到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间网格上,然后对格点数据进行统计分析;同时采用线性倾向估计法对长时间序列典型区域气溶胶的光学特性时间变化趋势进行分析。此方法中 X_i 表示样本量为 N 的某一时间序列光学特性参数的变化量,通过建立一元线性回归方程进行趋势估计。其中,趋势系数定义为 N 年的要素时间序列与时间序数的相关关系^[9],计算公式为

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(i - \bar{t}), \quad (1)$$

$$S_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}, \quad (2)$$

$$r_{xt} = \frac{S_{xx}}{S_{xy}}, \quad (3)$$

式中: \bar{t} 为时间序数的均值; \bar{X} 为要素时间序列 X_i 的均值; n 为时间序列长度。若 r_{xt} 大于 0,则要素时间序列 X_i 表现为随着时间增加呈上升趋势,反之则为下降趋势。

3 气溶胶光学厚度时空分布

3.1 全球范围 AOD 时空分布

根据全球范围内 2009—2013 年和 2009—2018 年的气溶胶时空分布特征,可以分析出全球 AOD 空间分布地域性差异明显,从时间尺度上表现出相似的空间分布特征。AOD 高值区域主要分布在亚洲、非洲以及南美洲部分区域。亚洲区域主要以中国境内的华东南地区、西北地区及京津冀地区,印

度,沙特阿拉伯等地区污染程度严重,整体 AOD 值在 0.8 以上,这是由于印度和中国地区人口密度较大,且中国西北部存在气候环境恶劣的塔克拉玛干沙漠,其沙尘粒子的传输运动更强;非洲区域的 AOD 高值中心集中在非洲中西部,AOD 均值为 0.65~0.7;南美洲污染程度严重的区域主要集中在巴西。

3.2 研究区域 AOD 均值变化

图 1 为不同季度 AOD 均值序列图,由于全球气候四季划分存在差异,将全球划分为四个季度,DJF 时期(12 月到 2 月)、MAM 时期(3 月到 5 月)、JJA 时期(6 月到 8 月)、SON 时期(9 月到 11 月)。总体而言,中国地区的逐年 AOD 均值表现为下降的趋势,巴西地区 AOD 均值呈现小幅度上升。DJF 时期,以沙特、印度及非洲中部的波动幅度最大;JJA 时期,以印度尼西亚和沙特地区波动最为明显,中国、沙特以及印度尼西亚地区 AOD 值均表现为下降趋势;MAM 时期,沙特地区的 AOD 值最高,其中以沙特和印度地区的波动程度最大,这是因为对流层在 MAM 时期存在强烈的气溶胶粒子运输。Mehta 等^[5]结合 MODIS 卫星数据,JJA 和 DJF 时期中国和印度地区 AOD 的观测结果同样显示出显著的下降趋势,这个可能与人为排放的减少有关。对于巴西地区,AOD 最小值和最大值出现在 MAM 和 SON 时期,CALIPSO 卫星的监测结果与 MODIS 卫星的观测结果基本相符。SON 时期各个研究区域的 AOD 值差异性不大,非洲中部地区的 AOD 均值远远高于其他典型地区。

图 2 为研究区域 AOD 月均值图,可以看出:中国地区的 AOD 月均值低谷主要出现在 12 月至次年 1 月,表现为双峰型,第一峰值出现在 4 月,第二峰值出现在 6 月,峰值均出现在 MAM 时期,是由于在该时段存在大量的来自蒙古地区及中国西北部地区的沙尘粒子^[10];印度地区 AOD 低谷期集中在 12 月至次年 1 月,AOD 值为 0.1~0.9,整体变化为双峰型,高峰值出现在 6 月,由于气候差异,在该时期,印度地区的高温和高风速会带来大量的沙尘粒子,颗粒物的浓度相比前期骤然上升;沙特地区在 6 月到 7 月由于降雨较少,内部沙漠地区的沙尘暴和沙漠扬尘事件严重,导致 AOD 迅速上升,8 月到 9 月 AOD 均值下降,整体的波动范围较大;非洲中部地区总体的波动差异性不大,表现为双峰双谷的波动趋势,在 6 月出现第一高峰,在 12 月出现次高峰。

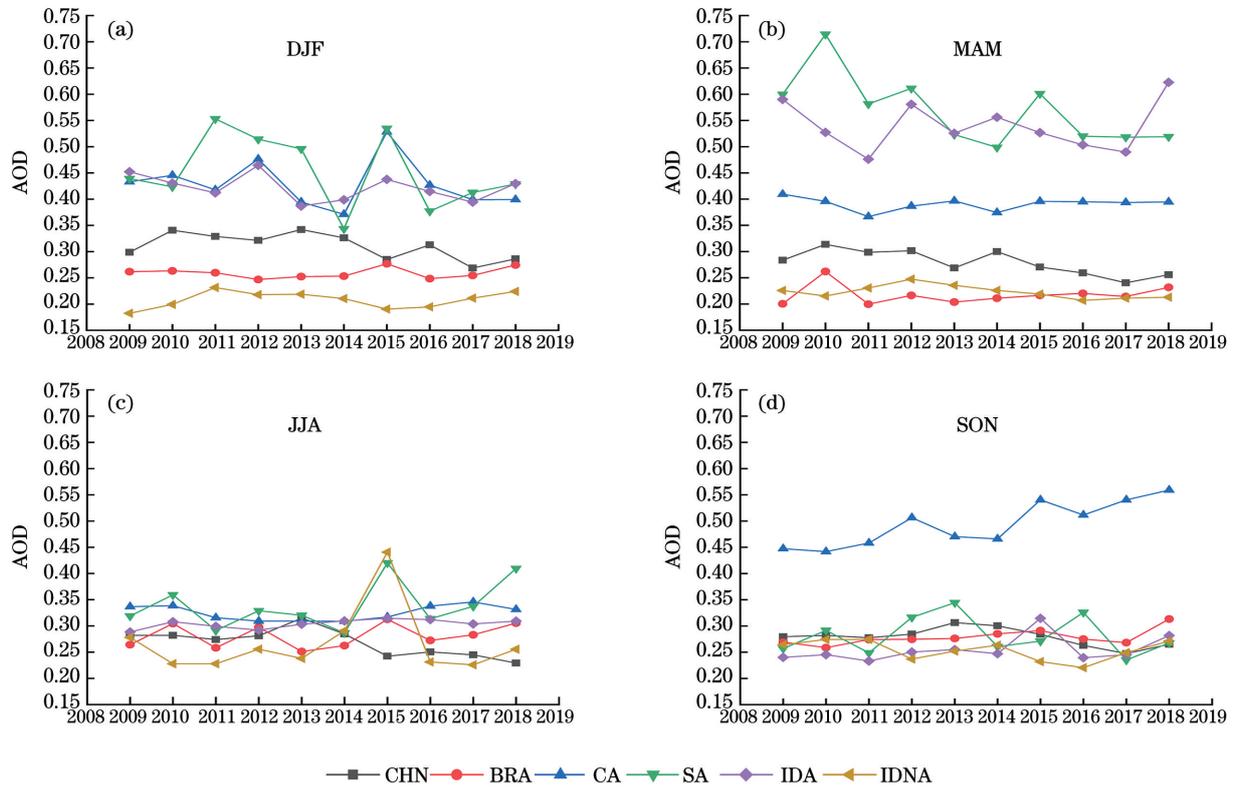


图 1 研究地区季节 AOD 均值序列图

Fig. 1 Seasonal AOD mean sequence diagrams in study regions

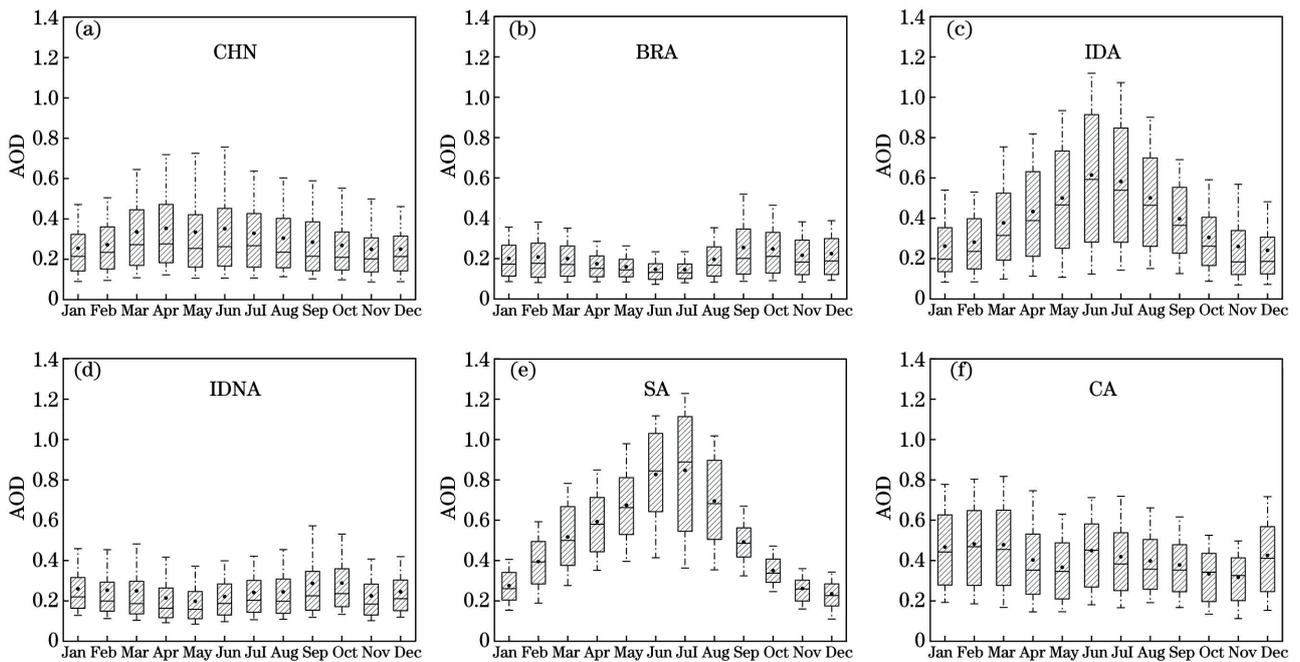


图 2 研究区域 AOD 月均值图

Fig. 2 Monthly average value of AOD in study areas

4 不同类型气溶胶时空变化

根据 CALIPSO 卫星的 Feature_Classification_Flags, 可将气溶胶分成 6 种主导类型, 清洁海洋

(CM)型、沙尘(DU)型、污染大陆(PC)型、清洁大陆(CC)型、污染沙尘(PD)型及烟尘(SM)型。图 3 为研究区域 10 年间 6 种气溶胶类型出现频数图, 可以看出, 中国地区主要以 PD 型、PC 型、DU 型气溶胶

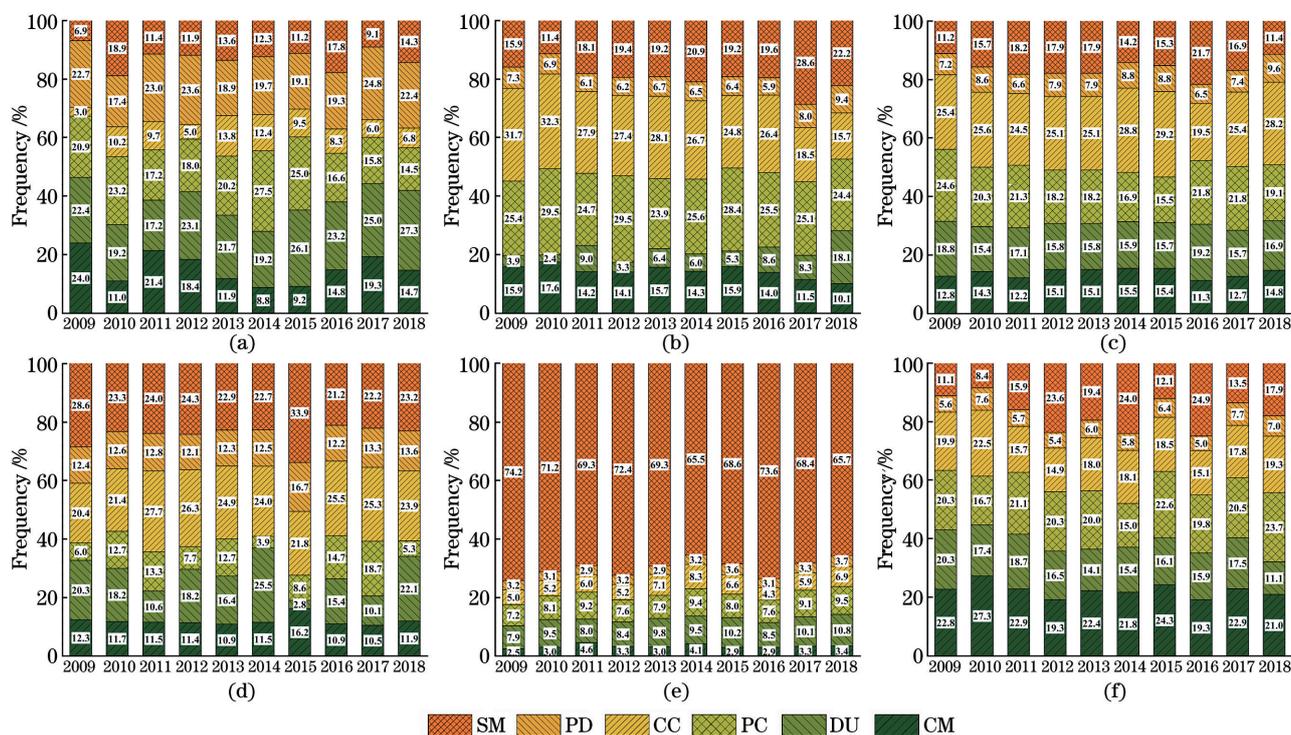


图 3 研究地区不同气溶胶类型出现频数图。(a)CHN;(b)BRA;(c)IDA;(d)IDNA;(e)SA;(f)CA

Fig. 3 Frequency maps of different aerosol types in study areas. (a) CHN; (b) BRA; (c) IDA; (d) IDNA; (e) SA; (f) CA

为主,其占比均达到了 15% 以上,中国西北部塔克拉玛干沙漠为沙尘气溶胶的高占比做出了主要贡献。同时,由于农耕和生产需求、地表土质松软,大量的沙尘粒子更易被卷起并带入到大气环境当中,与农作物燃烧形成的物质一起转化成 PC 型气溶胶^[11],PC 型气溶胶整体出现频数为 10%~20%,2009—2018 年逐年占比呈一个降低的趋势。巴西地区则以 CC 型和 DU 型气溶胶为主,出现频率均在 25% 以上,同时 CC 型气溶胶呈现逐年下降的趋势,DU 气溶胶逐年占比增大。印度则以人为气溶胶和 SM 气溶胶为主,这种现象出现的原因是工业化推进、汽车尾气排放加剧、印度地区人口密集等^[11]。印度尼西亚主要以 SM 型气溶胶和 CM 型气溶胶为主,由于四面环海,CM 型气溶胶的贡献率最大,其频率在 20% 以上。沙特地区 SM 型粒子占比最高,整体在 60% 以上。非洲中部出现高频率 SM 型气溶胶,主要是由于当地存在大量的农业火灾,农民通过焚烧来获取更多的耕种土地或者用于清除地表的农作物。同时 SM 气溶胶逐年的占比呈增大趋势,这与非洲中部地区 AOD 呈弱上升趋势的现象相互呼应。

5 典型地区气溶胶粒子季节光学属性

5.1 典型区域气溶胶 PDR 与 CR 相关关系

图 4 为研究地区 PDR 和 CR 相关关系。中国地区的散点值集中分布在左下方,PDR 主要集中在 0.1~0.4,CR 值在 0.6~0.9,表明颗粒物较小且非球形趋势较弱,符合中国地区以人为污染型气溶胶为主导气溶胶的特征。印度地区 CR 值在 0.7~0.9,PDR 值在 0.1~0.2,以细模态球形粒子为主。印度尼西亚 PDR 值更集中于 0.05~0.15,这可能与该地区气溶胶混入大粒径的海盐气溶胶等因素有关。图 5 为研究地区 PDR 和 CR 季节均值图,可以看出,沙特地区 DJF 时期的 PDR 均值和 JJA 时期的 CR 值最大,这是由于沙特阿拉伯内部存在大量的沙漠,在 DJF 时期更易发生沙尘暴和沙漠扬尘事件,颗粒物粒径更大。中国地区 MAM 时期 PDR 偏小的原因主要是 MAM 时期降水较多,水汽充足使得气溶胶粒子表面形成水膜,同时降水对大粒径的气溶胶粒子存在一定的冲刷作用,因此 MAM 时期的 CR 值更小。巴西地区由于 MAM 和 JJA 时期存在较多植物秸秆等农作物燃烧现象,会产生球形度更好的烟尘气溶胶粒子,PDR 更小。

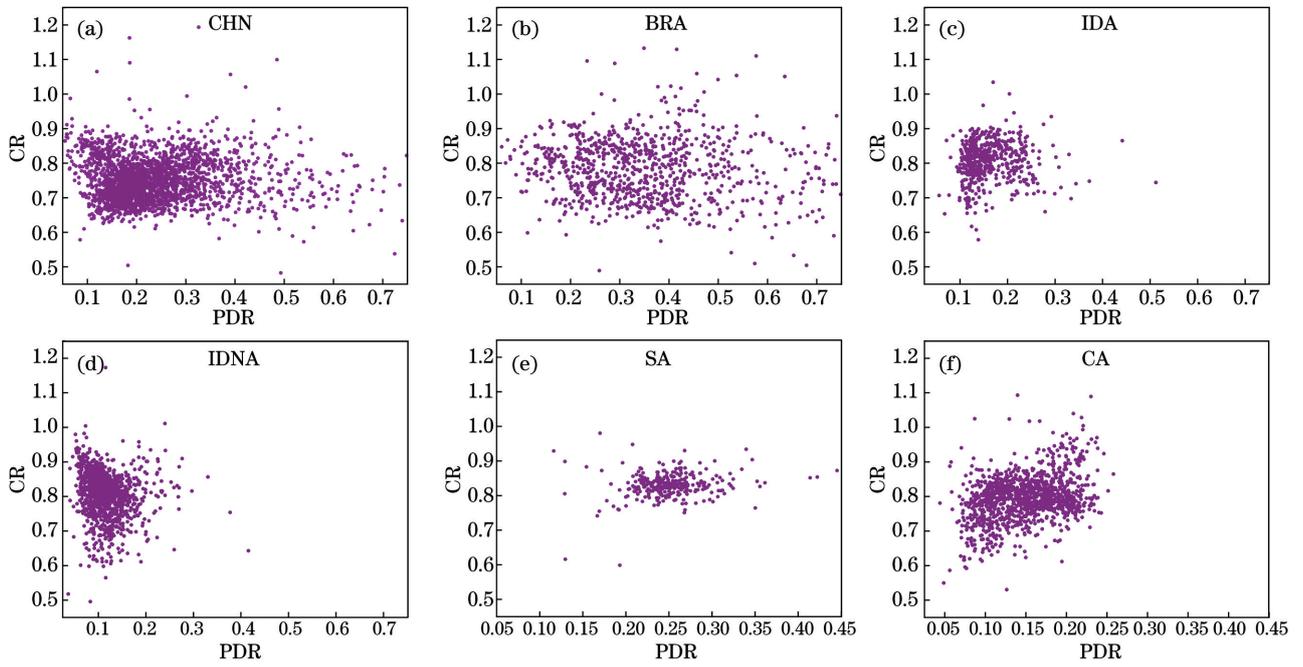


图 4 代表地区 PDR 和 CR 散点图

Fig. 4 PDR and CR scatter plots in representative regions

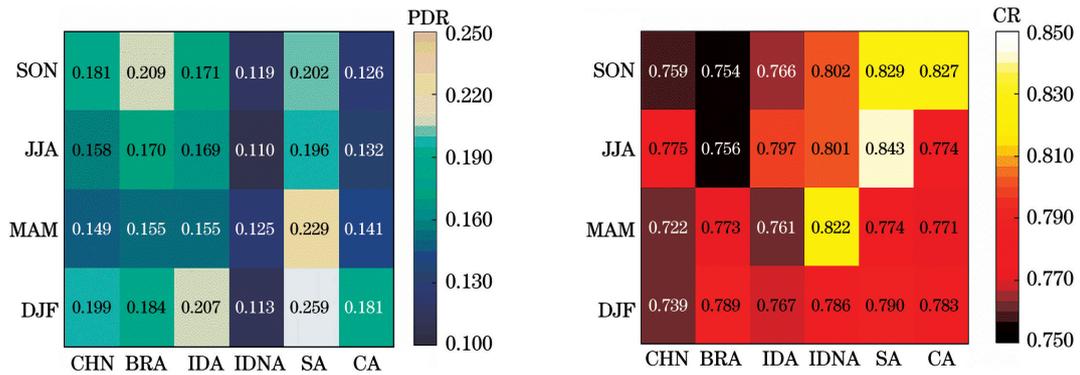


图 5 研究地区 PDR 和 CR 季节均值图

Fig. 5 PDR and CR seasonal averages in study areas

5.2 典型地区 PDR 和 CR 变化趋势

图6为研究地区近10年气溶胶CR变化趋势，

其中巴西 CR 值呈现明显的下降趋势，非洲中部和沙特地区表现为弱上升趋势。这是由于巴西地区当

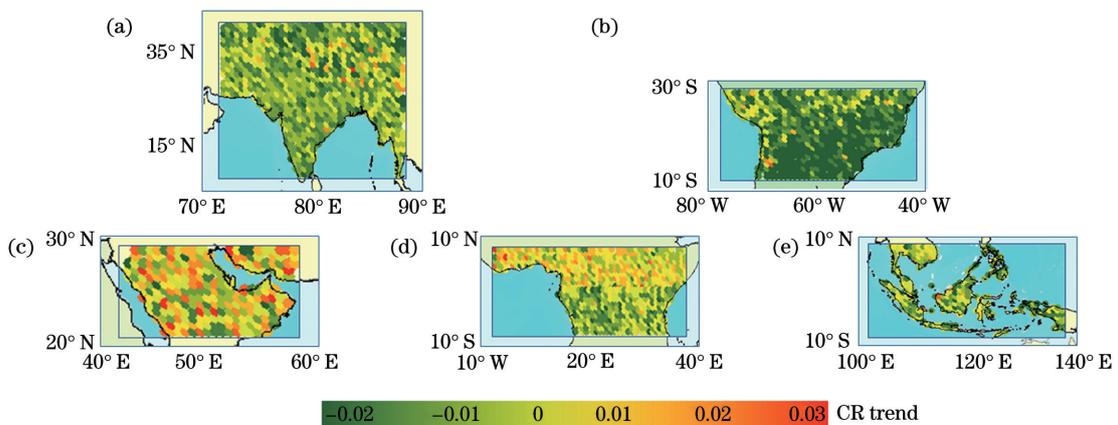


图 6 研究区域 CR 趋势。(a)IDA;(b)BRA;(c)SA;(d)CA;(e)IDNA

Fig. 6 CR trends in study regions. (a) IDA; (b) BRA; (c) SA; (d) CA; (e) IDNA

地发生大量的土地利用和开发及火灾排放现象,气溶胶颗粒物粒径增加了。沙特地区由于工业发达、汽车众多和人口密集等因素,大粒径颗粒物增多。印度尼西亚、印度 CR 趋势表现出相似的特性。图 7 为典型地区 PDR 趋势,可分析出各个地区气溶胶粒子非球形趋势系数为 0.01~0.025。印度和沙特阿拉伯地区 PDR 呈现弱下降趋势,巴西地区颗粒物非

球形趋势上升最明显。印度地区非球形趋势从东部到西部逐渐递减,由于印度主要以人为气溶胶为主,随着印度地区的整体人口增长速率得到控制,人为污染减少,气溶胶颗粒物非球形趋势更小。而沙特阿拉伯作为中东地区的石油王国,石油产量较大,存在大量的矿物质燃烧,会产生球形度更好的烟尘粒子。

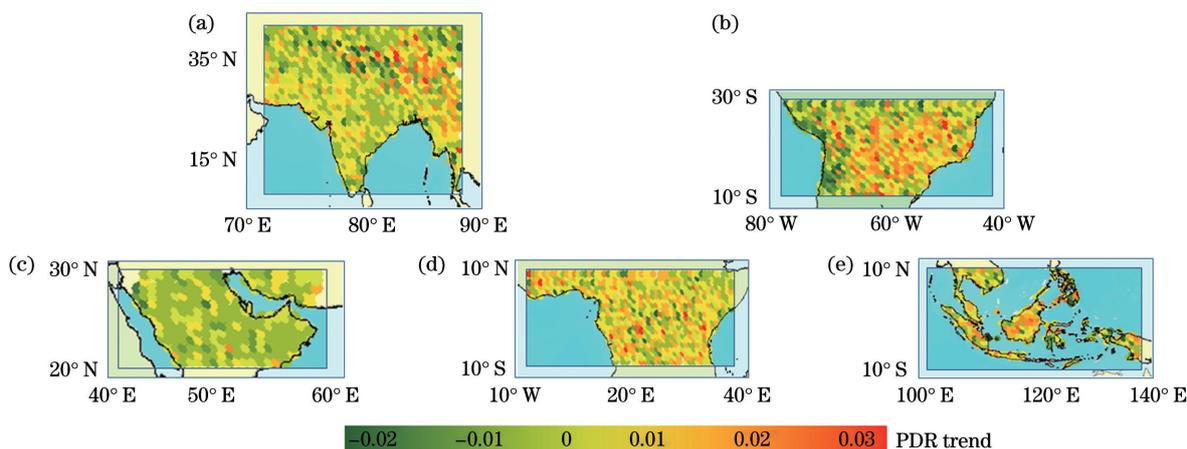


图 7 典型地区 PDR 趋势。(a)IDA;(b)BRA;(c)SA;(d)CA;(e)IDNA

Fig. 7 PDR trends in typical regions. (a) IDA; (b) BRA; (c) SA; (d) CA; (e) IDNA

6 结 论

全球尺度典型区域 AOD 空间分布特征表现出明显的时空差异性和季节差异性。DJF 时期和 MAM 时期各区域 AOD 均值差异最大;印度和沙特阿拉伯地区月均值 AOD 波动呈单峰型,均在 6 月到 7 月达到最值;中国和非洲中部 AOD 月均变化呈双峰型。研究区域整体 CR 值为 0.6~0.9, PDR 值为 0.1~0.4。中国、印度和印度尼西亚等地主要以细模态粒子为主。季节性差异可总结为,在 DJF 和 MAM 时期以沙特地区颗粒物不规则度最强,印度地区的 CR 值最大,在 JJA 和 SON 时期沙特和非洲中部的粒子粒径最大,污染程度最严重。沙特阿拉伯和非洲中部地区 CR 值呈明显的上升趋势,各个地区颗粒物非球形趋势增强,其中巴西地区非球形趋势上升最明显。

致谢 美国宇航局兰利大气数据中心(NASA Langley Atmosphere Science Data Center)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] Gao J N, Li L P, Cui T W, et al. Retrieval of fine mode aerosol optical depth based on satellite polarization remote sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030101. 高迦南, 李丽萍, 崔廷伟, 等. 基于卫星偏振遥感的细粒子气溶胶光学厚度反演[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030101.

[3] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240101. 庄全风, 王一萌, 王章军, 等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240101.

[4] Ma X, Bartlett K, Harmon K, et al. Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS: significant differences over major dust and biomass burning regions[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(9): 2391-2401.

[5] 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.

- [6] 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.
- [7] Shen J, Cao N W. Characteristics of aerosol vertical distribution over the Yangtze River Delta region of China in 2018[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 4743-4754.
沈吉, 曹念文. 2018 年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4743-4754.
- [8] Shen X X, Liu C S, Shi R H, et al. Vertical distribution of aerosols during different air pollution periods around Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 582-591.
沈仙霞, 刘朝顺, 施润和, 等. 上海不同污染等级下气溶胶光学特性垂直分布特征[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 582-591.
- [9] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987[J]. *Journal of Climate*, 1988, 1(6): 654-660.
- [10] Pozzer A, de Meij A, Yoon J, et al. AOD trends from observations and model AOD trends during 2001-2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(19): 26619-26653.
- [11] 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, 葛颢铭, 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.