

高玮, 屈文军. 非洲地区大气气溶胶光学厚度时空变化及亚速尔高压对沙尘越大西洋传输的影响[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 81-92.

Gao Wei, Qu Wenjun. Spatial-temporal variation of aerosol optical depth over Africa and influence of the Azores High on the trans-Atlantic dust transport[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 81-92. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.009. (in Chinese)

## 非洲地区大气气溶胶光学厚度时空变化及 亚速尔高压对沙尘越大西洋传输的影响

高玮, 屈文军

(中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 研究了非洲地区大气气溶胶光学厚度(AOD)的时空变化及沙尘气溶胶越大西洋海区的传输。结果表明: 1) 源于撒哈拉沙漠的沙尘及其随赤道东风向西输送使得沙尘气溶胶成为非洲沙漠地区和紧邻的大西洋海区的主要气溶胶组分; AOD高值区和沙尘气溶胶光学厚度高值区在1—7月随赤道辐合带北移同步向北移动, 而在8—12月则向南回撤。2) 刚果盆地大气气溶胶主要为热带雨林和稀树草原排放的有机碳(OC)和黑碳(BC)气溶胶; 其中与生物质燃烧源排放有关的OC、BC高值主要集中在干季(6—9月)的后半段(8—9月); 而生物源OC排放全年连续, 其排放峰值出现于雨季开始时; 生物质燃烧排放高值期与生物源排放高值期前后相继, 形成干季(尤其是后半段)时期的OC、BC光学厚度高值。3) 亚马逊河入海口地区主要气溶胶组分为海盐气溶胶, 9—11月该区风力输送增强, 风向由东南风转变为东风, 海盐进入亚马逊河入海口处, 形成AOD和海盐气溶胶光学厚度高值区。4) 撒哈拉沙漠沙尘气溶胶向大西洋传输的偏北月份为7—9月、偏南月份为1—3月; 2000—2016年海区沙尘气溶胶的传输路径存在向南移动的变化趋势, 与同期亚速尔高压的增强和沙尘传输路径以西北风分量的增强以及赤道辐合带的移动一致。上述研究结果揭示了利用大气气溶胶时空变化特征反映区域大气环流和气候变化的可能性。

**关键词:** 大气气溶胶光学厚度; 时空变化; 非洲; 沙尘气溶胶; 越大西洋传输

中图分类号: X513; P422 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2018)04-0081-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.009

## Spatial-temporal variation of aerosol optical depth over Africa and influence of the Azores High on the trans-Atlantic dust transport

GAO Wei, QU Wenjun

(Department of Marine Meteorology in College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The spatial and temporal distribution of the atmospheric aerosol optical depth (AOD) over Africa and the trans-Atlantic transport of the dust aerosol are analyzed using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) AOD products and Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2 (MERRA-2) reanalysis data. The results are as follows. 1) Dust aerosol is the major aerosol component over the desert areas of Africa and the adjacent Atlantic Ocean due to the dust from the Sahara Desert and its trans-Atlantic transport. Accompanied with the northward shift of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) from January to July are the synchronous northward shift of the

收稿日期: 2018-05-16; 修订日期: 2018-07-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404200, 2017YFC1404100); 海洋公益性行业科研专项(201505007)

作者简介: 高玮, 男, 硕士研究生, 主要从事大气环境与大气气溶胶研究, 289921591@qq.com。

通信作者: 屈文军, 男, 博士, 讲师, 主要从事大气环境以及气候变化因素和气象条件对大气污染的作用研究, quwj@ouc.edu.cn。

high AOD area and the high dust aerosol optical depth (dust AOD) area; in contrast, the ITCZ, the high AOD, and the high dust AOD area retreat southward from August to December. 2) The atmospheric aerosols over the Congo Basin are mainly the organic carbon (OC) and black carbon (BC) originated from the tropical rainforest and the savanna. While the high OC and BC resulting from biomass burning are mainly concentrated in the later half stage (from August to September) of the dry season (from June to September), the biogenic OC emissions are continuous throughout the year with a peak appearing at the beginning of the rainy season. The emission from biomass burning and the emission from biogenic emission occur successively, resulting in a high OC AOD and high BC AOD period during the dry season (especially the latter half stage). 3) The sea salt aerosol is the major aerosol component over the estuary region of the Amazon River; the wind strengthens from September to November over there with a wind direction shift from southeasterly to easterly, which is more favorable for the westward transport of the sea salt aerosol into the estuary region of the Amazon River, resulting in a high AOD and high sea salt AOD region over the adjacent area. 4) The trans-Atlantic (westward) transport of dust aerosol from the Sahara Desert is located northmost from July to September but southmost from January to March. The transport pathways of the dust aerosol over the ocean show a southward shift from 2000 to 2016, which is consistent with the concurrent strengthening of the Azores High (reflected by a decrease of the Ertel's potential vorticity at 850 hPa and an increase of the geopotential height at 500 hPa) and the strengthening of the north wind to the north of the dust plumes as well as the concurrent shift of the ITCZ. These results suggest a possibility of evaluating the regional atmospheric circulation and climate change using signals from variation and characteristic of the spatial-temporal distribution of atmospheric aerosols.

**Key words** the atmospheric aerosol optical depth; spatial-temporal variations; Africa; dust aerosol; trans-Atlantic transport

## 引言

大气气溶胶是固态或液态微粒分散到空气中与空气形成的悬浮体系。大气气溶胶可以通过直接辐射强迫效应和间接辐射强迫效应(改变云的辐射特性和寿命等)影响辐射平衡,也可以通过改变大气化学过程等机制影响气候变化<sup>[1]</sup>。大气气溶胶的辐射效应可以改变区域大气环流<sup>[2]</sup>,并导致赤道辐合带变动及全球大气环流改变<sup>[3]</sup>,从而对气候产生深刻影响。大气气溶胶的气候效应是目前气候预测和研究中的最大不确定因素之一<sup>[1]</sup>,因而引起广泛关注。

研究和评价大气气溶胶的气候效应及其环境影响的前提之一是准确描述和刻画大气气溶胶的物理化学特征及其时空变化。大气气溶胶的地基采样和观测可以获得第一手的气溶胶物理化学特征资料,但站点运行耗费人力物力财力,而且观测资料的空间覆盖率及代表性较差。而卫星观测可以获得比较全面的全球大气气溶胶时空分布资料,因而具有重要意义。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于1999

年和2002年发射的Terra和Aqua两颗卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)获得了大量大气气溶胶和大气环境的监测产品,在相关研究领域得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是表征大气气溶胶消光特性的重要参数,它可用于估算大气中气溶胶的含量,评估大气污染程度及其时空变化,是研究气溶胶气候效应的重要基础数据<sup>[7-8]</sup>。非洲是全球重要的沙尘源区,全球约58%的沙尘排放来自非洲撒哈拉沙漠<sup>[9]</sup>。这些沙尘物质不仅对区域辐射收支有显著影响<sup>[10-12]</sup>,也是亚马逊热带雨林生态系统的重要营养来源<sup>[13]</sup>。沙尘气溶胶向海洋的输送与沉降可以对海洋生态系统产生影响,是以海-陆-气耦合为核心的全球气候系统变化中的重要环节<sup>[14]</sup>,已成为国际上层海洋-低层大气研究(Surface Ocean-Lower Atmosphere Study, SOLAS)的重要领域<sup>[15]</sup>。沙尘越海区的传输对海洋生态系统、海洋初级生产力和气候的影响已引起广泛关注<sup>[16-17]</sup>;已有研究分析了沙尘向大西洋传输的季节、年际变化特征,并探讨了北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)、厄尔尼诺-南方涛动

(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 等对沙尘传输的影响<sup>[18-19]</sup>, 但结合详细源区分析的研究较为缺乏。

20世纪60年代以来, 非洲国家相继获得政治独立并开启了工业化进程<sup>[20]</sup>。2006年中国政府制订非洲政策文件<sup>[21]</sup>, 中非传统友好关系全面发展。在致力发展对非友好合作关系和深化经贸合作的新形势下, 中国对非洲政策提出了新理念、新主张与新举措, 以期进一步加强和深化中非各领域的交流与合作<sup>[22]</sup>。非洲工业化和农业现代化水平仍较为落后, 工业发展粗放、工艺水平低下; 在助推非洲工业化、农业现代化并深化资源能源合作的进程中, 大气污染与环境问题是需要认真应对和长远谋略的。

对于非洲大气污染和大气气溶胶效应, 以往的研究主要关注了南部非洲稀树草原火灾释放的PM<sub>2.5</sub>(粒径小于2.5 μm的大气颗粒物)导致的季节性大气污染<sup>[23]</sup>, 燃烧效率与PM<sub>2.5</sub>污染排放对当地生态系统的影响<sup>[24]</sup>, 燃煤对大气的污染<sup>[25]</sup>以及沙尘气溶胶对加那利群岛空气质量的影响<sup>[26]</sup>等。Prospero and Lamb<sup>[27]</sup>关注非洲干旱区与加勒比地区沙尘气溶胶, 指出未来气候变化可能导致非洲和其他干旱地区沙尘排放量大幅度变化, 进而对区域气候产生影响。Bryant et al.<sup>[28]</sup>发现风速变化是影响沙尘气溶胶排放量的主要因素, 并对非洲南部气候产生影响。Ridley et al.<sup>[29]</sup>对全球沙尘排放量季节变化和空间分布的研究表明非洲是主要的沙尘源区。Meng et al.<sup>[30]</sup>认为北非撒哈拉沙漠沙尘向大西洋传输的中心轴近年来有北移的趋势。

作为常年存在的沙尘气溶胶排放源区, 非洲撒哈拉沙漠的沙尘排放及其向紧邻的大西洋海区的传输与区域大气环流紧密相关。因此, 非洲地区沙尘气溶胶时空分布及其越大西洋海区传输有何特征, 其季节和长期变化趋势和特征能否反映区域气候变化, 这些都是相关研究领域非常重要的课题。基于此背景, 本文利用MODIS气溶胶光学厚度产品研究非洲地区大气气溶胶时空分布特征和季节变化规律, 分析自然和人为污染物排放、气象条件等因素的影响, 同时研究非洲沙尘气溶胶向大西洋海区传输的变化特征, 以期对上述问题获得比较完整可靠的分析结果和研究结论, 为非洲及邻近地区气溶胶气候效应及环境影响的研究提供基础资料。

## 1 数据说明

MODIS是搭载在Terra和Aqua太阳同步极轨

卫星平台上的中分辨率成像光学探测器, 该传感器具有36个通道(0.41~14.4 μm), 为反演大气气溶胶和地表特征提供了丰富信息<sup>[4]</sup>。Terra和Aqua两颗卫星分别在地方时上午和下午过境, 所获数据在时间更新频率上相配合, 加上晚间过境数据, 可得到每天最少2次白天、2次黑夜的数据更新, 因此对实时地球观测、森林草原火灾等灾害的应急监测和较高频率地球系统变化研究具有重要价值<sup>[4]</sup>, 并已获得广泛应用<sup>[5]</sup>。NASA戈达德地球科学数据和信息中心(Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center)地球观测系统(GEOS)的资料同化系统(DAS)提供了气象资料同化产品, MERRA-2(Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2)是其重要的产品之一<sup>[31-33]</sup>。MERRA-2同化了空基观测的大气气溶胶结果以及气溶胶与气候系统的相互作用(<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>)。MERRA-2再分析资料得到的AOD与独立的未同化的太阳光度计和飞机观测结果可比性好, 具有较高的相关和较低的偏差<sup>[31-32]</sup>。

由于MODIS观测和MERRA-2再分析资料算法、数据采样率对得到的AOD会有影响, 另外两种方法得到的数据产品空间分辨率不一致, 为保证MODIS AOD和MERRA-2 AOD的可比较性和文章分析结果和结论的可靠性, 首先对本文研究区两种方法得到的AOD进行了对比。对比结果表明对于非洲中北部和紧邻的大西洋海区, 两种方法得到的AOD相关系数 $R = 0.97$ ; 而对于非洲中北部,  $R = 0.93$ ; 两种方法得到的AOD的偏差对上述两个区域分别为18%和13%。在考虑上述偏差的基础上, MODIS与MERRA-2得到的AOD可以进行比较并计算各气溶胶组分对气溶胶总光学厚度的贡献率。

本文使用了2000—2016年MODIS大气3级标准数据产品MOD08的AOD数据(1°×1°), MERRA-2提供的降水量数据和沙尘(dust)、黑碳(BC)、有机碳(OC)、海盐(sea salt)气溶胶550 nm光学厚度数据(0.625°×0.5°), 以及美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)850 hPa风场和1000 hPa相对湿度再分析资料(1°×1°)。

## 2 气溶胶光学厚度时空分布特征

### 2.1 AOD及各气溶胶组分总体分布特征

非洲大陆及其邻近地区可划分为三个分区, 其

中  $AOD > 0.3$  的高值区(图 1a)分布于撒哈拉沙漠及其紧邻的大西洋海区(I区)和刚果盆地地区(II区),另外亚马逊河入海口处也存在一个  $AOD$  高值区(III区)。各分区主要气溶胶组分不同; I区( $60^{\circ}W \sim 20^{\circ}E, 0 \sim 30^{\circ}N$ )为沙尘气溶胶区,可以沿  $17^{\circ}W$  进一步分为两个区,撒哈拉沙漠地区  $I_1$ 区( $17^{\circ}W \sim 20^{\circ}E, 0 \sim 30^{\circ}N$ )和紧邻的大西洋海区  $I_2$ 区( $17^{\circ}W \sim 60^{\circ}W, 0 \sim 30^{\circ}N$ ); II区( $0 \sim 30^{\circ}E, 20^{\circ}S \sim 5^{\circ}N$ )为黑碳及有机碳气溶胶区,即刚果盆地地区; III区( $45^{\circ}W \sim 61^{\circ}W, 10^{\circ}S \sim 5^{\circ}N$ )为海盐气溶胶区,即亚马逊河入海口地区。

沙尘气溶胶光学厚度(Dust AOD)  $> 0.1$  的区域主要分布在非洲中部和北部撒哈拉沙漠地区及邻近的大西洋海区(图 1b); 黑碳气溶胶光学厚度

(BC AOD)  $> 0.01$  和有机碳气溶胶光学厚度(OC AOD)  $> 0.05$  的区域主要位于非洲中南部刚果盆地及邻近的大西洋海区(图 1d,e); 海盐气溶胶光学厚度(Sea salt AOD)  $> 0.05$  的区域主要为亚马逊河入海口及附近海域(图 1c)。

除自然排放外,在非洲大陆几内亚湾及刚果河流域沿岸人口最为密集,社会经济活动及能源消耗高度集中; 几内亚湾沿海地区是非洲石油勘探的新热点,当地的原油化工加工提炼可造成比较严重的大气污染<sup>[34]</sup>; 非洲中西部经济落后,石油、矿业为其支柱产业,低端产业结构及低效产能也可加剧大气污染。而非洲东南部印度洋沿岸地区以农业、旅游业等为主,较少的能源消耗和污染物排放可能导致  $AOD$  相对较低。

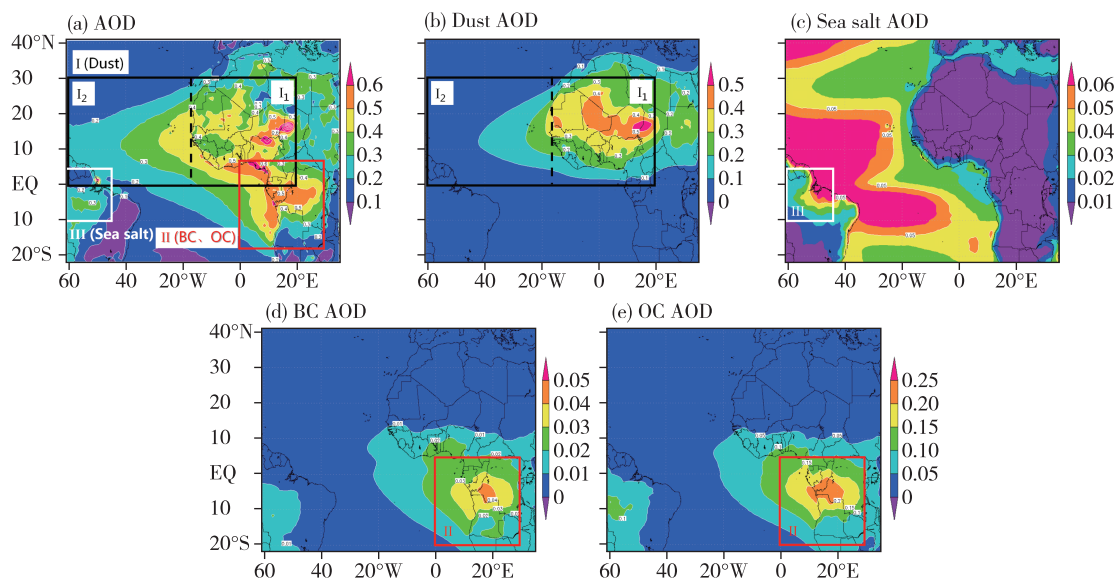


图 1 2000—2016 年平均  $AOD$ (a)、Dust  $AOD$ (b)、Sea salt  $AOD$ (c)、BC  $AOD$ (d)及 OC  $AOD$ (e)

Fig.1 Mean  $AOD$  (a), Dust  $AOD$  (b), Sea salt  $AOD$  (c), BC  $AOD$  (d), and OC  $AOD$  (e) from 2000 to 2016

## 2.2 各分区、各气溶胶组分时空分布

### 2.2.1 沙尘气溶胶

沙尘气溶胶对大气环境有显著影响,其所经过地区大气气溶胶光学厚度显著增加<sup>[35]</sup>,在合适的风场配合下还可造成沙尘的跨境输送。此外,沙尘气溶胶可以散射太阳辐射,导致地面和底层大气获得的太阳辐射减少,沙尘气溶胶通过改变辐射收支状况进而影响区域气候<sup>[36]</sup>。

撒哈拉沙漠地区( $I_1$ 区,以下简称陆区)及其邻近的大西洋海区( $I_2$ 区,以下简称海区)以沙尘气溶胶为大气气溶胶主要组分(图 1a,b); 沙尘气溶胶光学厚度高值区紧邻赤道辐合带以北分布。全年中 1—7 月为  $AOD$  高值月份,其中陆区和海区分别在 3

月和 6 月出现  $AOD$  最高值。取 3 月和 6 月进行比较,由图 2a、b 可见,3 月  $AOD$  及 Dust  $AOD$  高值更集中于陆区,且海区与陆区  $AOD$  和 Dust  $AOD$  高值区中轴线处于同一纬度( $8^{\circ}N$ ); 由图 2c 可知,  $AOD$  及 Dust  $AOD$  高值区中轴线以北在陆区为相对湿度(RH)  $< 30\%$  的撒哈拉沙漠干旱区,而中轴线以南为月降水量  $> 200$  mm 的强降雨带指示的赤道辐合带(图 2d); 由图 2e、f 可见,6 月  $AOD$  及 Dust  $AOD$  高值区比 3 月更偏北,且陆区  $AOD$  高值区较为分散,而在海区除  $AOD$  及 Dust  $AOD$  高值区比 3 月更为偏北外,海区  $AOD$  及 Dust  $AOD$  高值区中轴线( $13^{\circ}N$ )比陆区中轴线( $16^{\circ}N$ )位置更偏南,可能与亚速尔高压加强南进和海上北风加强有关; $AOD$  及 Dust  $AOD$



高值区分布仍然与  $RH < 30\%$  的撒哈拉沙漠干旱区一致,且位于强降雨带指示的赤道辐合带以北(图 2g、h)。从 3 月到 6 月,AOD 和 Dust AOD 高值区及其

中轴线均向北移动,与撒哈拉沙漠干旱区和赤道辐合带的纬向移动同步。

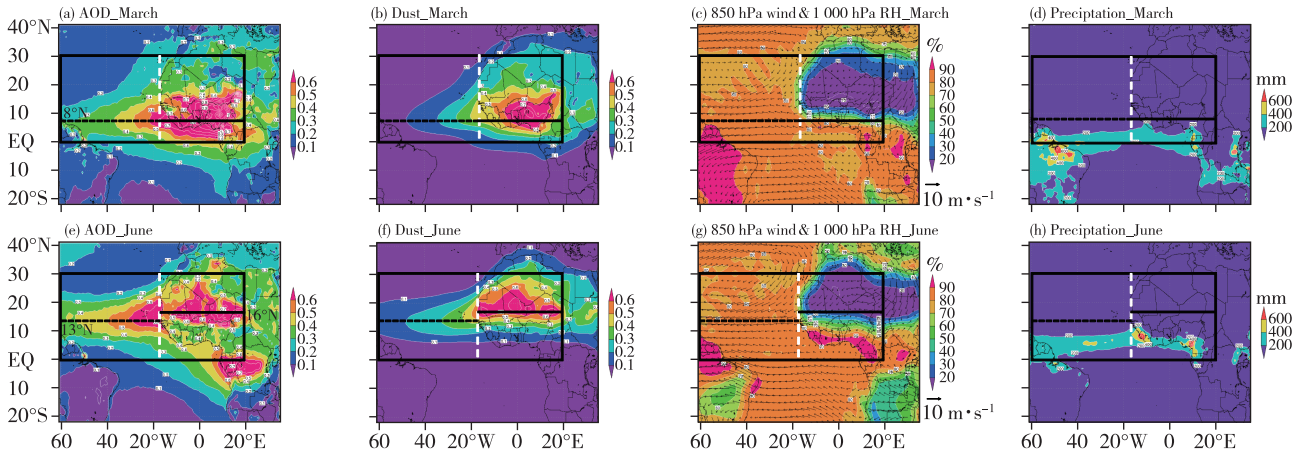


图 2 2000—2016 年 I 区 AOD(a,e)、Dust AOD(b,f)、850 hPa 风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )与 1 000 hPa 相对湿度(c,g;单位:%)及月平均降水量(d,h;单位:mm)(a、b、c、d. 3 月,e、f、g、h. 6 月)

Fig.2 AOD (a, e), Dust AOD (b, f), wind field at 850 hPa(units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and relative humidity at 1 000 hPa (c, g; units: %), and monthly mean precipitation (d, h; units: mm) over I area in March (a, b, c, d) or June (e, f, g, h) from 2000 to 2016

纬向-时间分布图展示了同样的特征,陆区( $I_1$ 区)和海区( $I_2$ 区)AOD、Dust AOD 和月平均降水量高值从 1—7 月同步向北移动(图 3)。随着陆区以强降雨带表示的赤道辐合带从 1 月的  $0^\circ$  北移到 8 月的  $9^\circ N$ (图 3c),陆区气溶胶光学厚度(AOD)及沙尘气溶胶光学厚度(Dust AOD)的高值区从 1 月的  $4^\circ N$  北移至 6 月的  $16^\circ N$ (图 3a、b);而海区伴随着强降雨带表示的赤道辐合带从 3 月的  $0^\circ$  北移到 8 月的  $9^\circ N$ (图

3g),AOD 及 Dust AOD 高值区从 3 月的  $7^\circ N$  北移至 7 月的  $16^\circ N$ (图 3e、f),海区 AOD 在 6—7 月达到最高( $>0.5$ )。而 8—12 月伴随着赤道辐合带的南撤(图 3c、g),陆区 AOD 及 Dust AOD 高值区从 8 月的  $18^\circ N$  南移至 12 月的  $7^\circ N$  左右(图 3a、b),另外伴随着高值区的纬向移动 AOD 也发生降低(11 月 AOD 高值为 0.4);而海区 AOD 及 Dust AOD 的高值区也从 8 月的  $17^\circ N$  南撤至 12 月的  $9^\circ N$ (图 3e、f),同时 AOD 也迅速

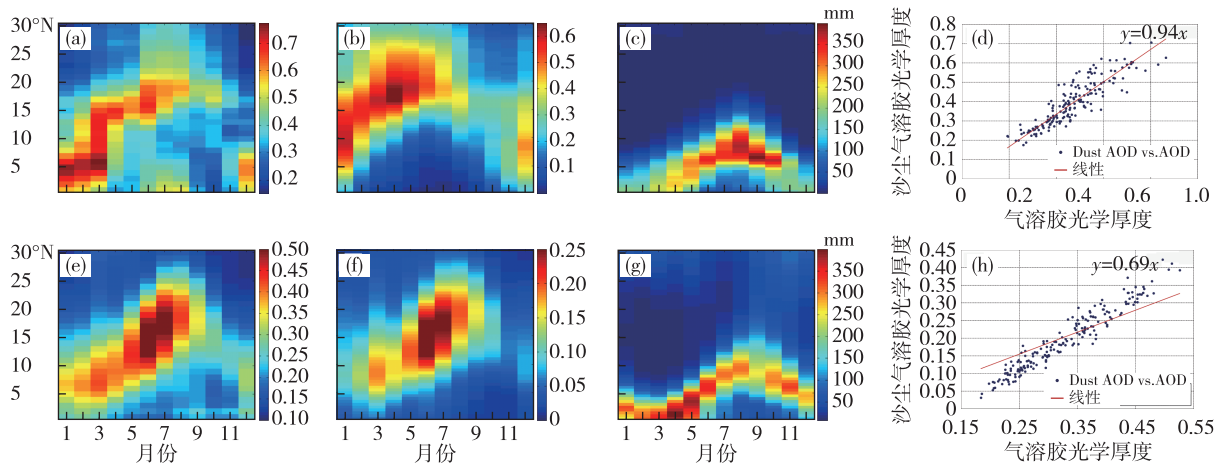


图 3 2000—2016 年 AOD(a,e)、Dust AOD(b,f)、月平均降水量(c,g;单位:mm)纬向-时间分布及主要气溶胶化学组分 Dust AOD-AOD 散点图(d,h;线性回归通过 0.05 显著性水平检验)(a、b、c、d.  $I_1$ 区,e、f、g、h.  $I_2$ 区)

Fig.3 Latitude-time cross files of AOD (a, e), Dust AOD (b, f), and monthly mean precipitation (c, g; units: mm) & AOD scatter plot of the major aerosol component Dust AOD (d, h; the linear regression passes the significance test at 0.05 level) over  $I_1$  area (a, b, c, d) or over  $I_2$  area (e, f, g, h) from 2000 to 2016

降低(11月 AOD 高值为 0.25)。沙尘气溶胶为上述区域大气气溶胶的主要组分, Dust AOD-AOD 散点图(图 3d,h)表明沙尘气溶胶光学厚度(Dust AOD)对气溶胶总光学厚度(AOD)的贡献率在陆区和海区分别可达 94%和 69%。

由经向风的纬度-时间分布(图 4)可以看出经向风输送对 AOD 及 Dust AOD 高值区移动的影响。

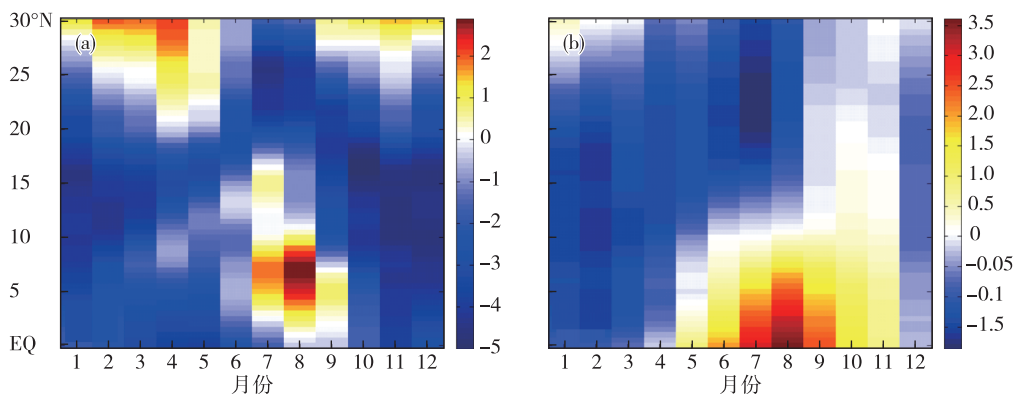


图 4 2000—2016 年陆区(a; I<sub>1</sub>区)与海区(b; I<sub>2</sub>区)850 hPa 月平均经向风(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )纬度-时间分布

Fig.4 Latitude-time cross profiles of monthly mean meridional wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa over the Sahara (a; I<sub>1</sub> area) and the Atlantic Ocean (b; I<sub>2</sub> area) from 2000 to 2016

### 2.2.2 黑碳及有机碳气溶胶

全球而言,热带雨林和热带稀树草原火灾是大气中碳气溶胶的重要来源;由于这些火灾集中在热带的干季(6—9月),较少的降雨导致大气中生物质燃烧污染物存留时间较长,碳气溶胶污染加剧<sup>[34]</sup>。另外,与热带雨林和草原生态系统生长周期紧密相关的生物源排放也是有机碳气溶胶的重要来源。由图 5a 可知,刚果盆地(II区)AOD 在 6—9月较高(> 0.5),8月达其最高值(0.75);与 AOD 变化一致,BC 和 OC 光学厚度高值也发生在 6—9月并在 8月达最高值(BC AOD 为 0.06, OC AOD 为 0.31);而 AOD、BC AOD 与 OC AOD 呈现高值的 6—9月对应该区降水量达最低的干季(其中 7月降水量达最

低,85 mm)。此外 1月 AOD、BC AOD 和 OC AOD 也呈现一个较低的峰值(AOD 为 0.44, BC AOD 为 0.04, OC AOD 为 0.19),并与 1月较小的降水量(147 mm)对应。OC AOD-AOD 散点图(图 5b)表明有机碳气溶胶对大气总气溶胶有重要贡献, OC AOD 对 AOD 的贡献率可达 41%。刚果盆地生物质燃烧源排放主要集中在干季后半段(8—9月),此外生物源 OC 排放全年连续并在雨季最强时段(4月和 11月)达到峰值。生物源 OC 排放高值与生物质燃烧源排放高值时段前后相继,造成整个干季 BC、OC 光学厚度的高值<sup>[37]</sup>。

综上所述,非洲中南部刚果盆地地区大气气溶胶以生物质燃烧源排放与生物源 OC 排放为主要来

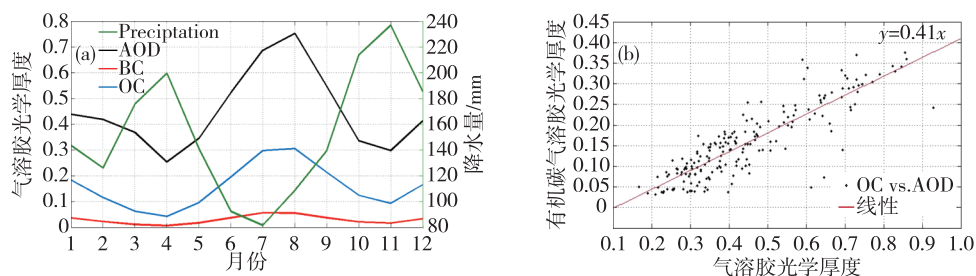


图 5 2000—2016 年刚果盆地(II区)月平均 AOD、BC AOD、OC AOD 和降水量图(a)及主要气溶胶化学组分 OC AOD-AOD 散点图(b;线性回归通过 0.05 显著性水平检验)

Fig.5 Monthly mean AOD, BC AOD, OC AOD and precipitation (a) and AOD scatter plot of the major aerosol component OC AOD (b; the linear regression passes the significance test at 0.05 level) over Congo Basin (II area) from 2000 to 2016

源。干季(6—9月)时生物质燃烧源排放增强,AOD显著增大。刚果盆地位于该区域北部,是全球第二大热带雨林,该区域南部是热带稀树草原,两种植被覆盖类型均可产生较强的生物源排放。作为重要的排放源,植被排放贡献了全球大气中所有非甲烷源碳氢化合物(NMHCs)的90%<sup>[38]</sup>。因而稳定的生物源有机碳气溶胶排放也是刚果盆地地区大气气溶胶的重要来源。

将干季开始前的5月与AOD达最高值的8月进行比较,干季开始前Ⅱ区(图6中红框所示)刚果

盆地大部特别是北半部相对湿度较高(>60%,图6d),对应中等强度的BC、OC排放(图6b、c)且该区AOD小于0.5(图6a)。而在干季末期(8月)该区AOD、BC AOD和OC AOD均达最高值,并伴随较强的BC、OC气溶胶向西输送进入大西洋海区(图6e、f、g);此时为该区森林与草原火灾高发期,除北部热带雨林还保持较高相对湿度(>80%,图6h)外,AOD、BC AOD和OC AOD高值中心RH已显著降低(<50%)。

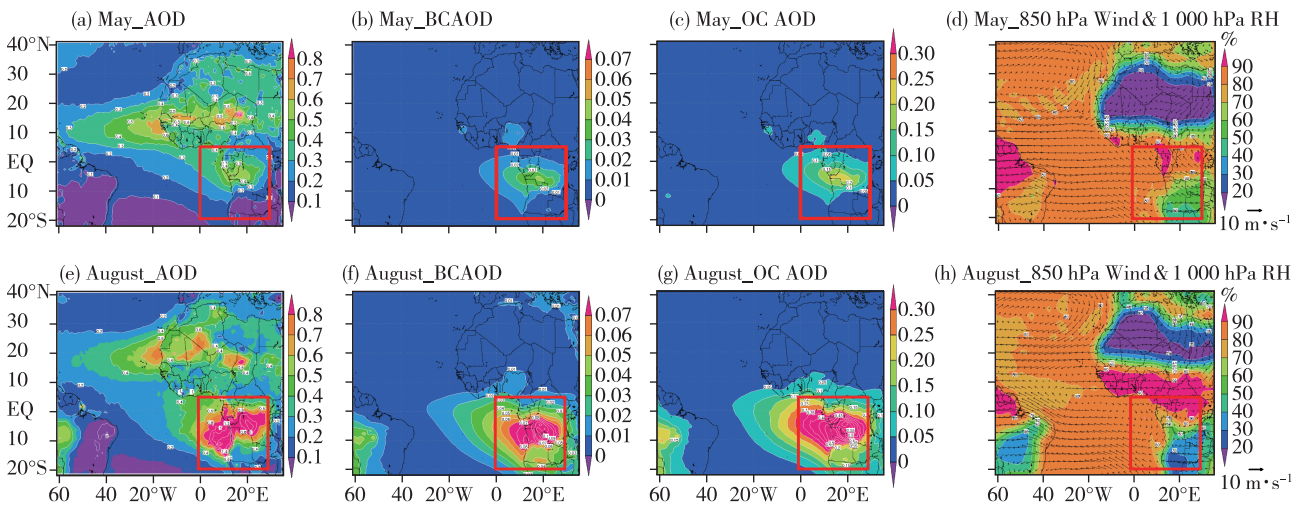


图 6 2000—2016 年刚果盆地(Ⅱ区)AOD(a,e)、BC AOD(b,f)、OC AOD(c,g)及 850 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$ )与 1 000 hPa 相对湿度(d,h;单位:%)(a,b,c,d. 5月,e,f,g,h. 8月)

Fig.6 AOD (a, e), BC AOD (b, f), OC AOD (c, g), and wind field at 850 hPa (units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and relative humidity at 1 000 hPa(d, h; units:%) over Congo Basin in May (a, b, c, d) or August (e, f, g, h) from 2000 to 2016

### 2.2.3 海盐气溶胶

在海区和沿海地区,海盐是大气中重要的自然源气溶胶<sup>[39]</sup>。大气气溶胶的辐射效应是气溶胶影响气候的主要途径<sup>[40]</sup>;海盐气溶胶直接辐射强迫在能量收支平衡上起重要作用,并可导致相对洁净的海洋-大气边界层能见度降低<sup>[41]</sup>。

亚马逊河入海口地区 AOD 与 Sea salt AOD 变化特征类似(图 7a),AOD 与 Sea salt AOD 均在 6 月达到最低值(0.12 与 0.02),而在 11 月达到最高值(0.39 与 0.09);Sea salt AOD 对 AOD 的贡献率为 15%(图 7b)。

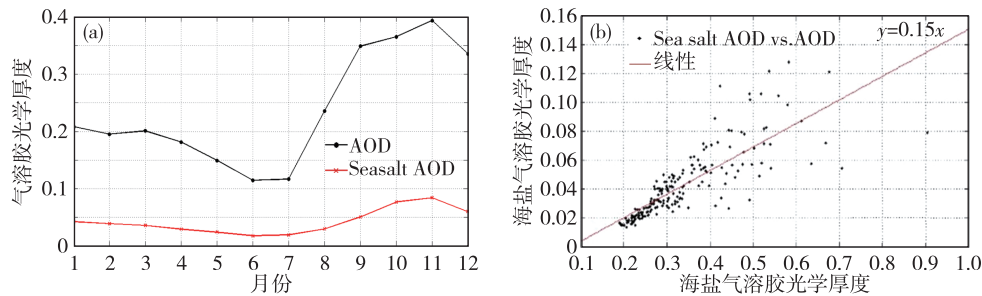


图 7 2000—2016 年Ⅲ区月平均 AOD 与 Sea salt AOD(a)及 Sea salt AOD-AOD 散点图(b;线性回归已通过 0.05 显著性水平检验)

Fig.7 Monthly mean AOD and Sea salt AOD (a) and AOD scatter plot of Sea salt AOD (b, the linear regression passes the significance test at 0.05 level) over Ⅲ area from 2000 to 2016



将 AOD 和 Sea salt AOD 上升前的 7 月与二者均呈现最高值的 11 月进行比较, 亚马逊河入海口地区(Ⅲ区, 图 8 中白框所示)的 Sea salt AOD 从 7 月的 0.05 增加至 11 月的 0.14, 且高值区分布范围由亚马逊河入海口处的沿岸陆地扩大至入海口西南部的内陆地区(图 8b、e), AOD 也从 7 月的 0.15 升到 11 月高值区中心的 0.7 以上(图 8a、d)。非洲南

部邻近的大西洋海域向亚马逊河入海口全年平均风速  $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 有利于海盐从附近海域输送到亚马逊河入海口处, 是Ⅲ区大气气溶胶的重要来源(图 8c、f); 尤其到 9—11 月时风速  $> 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且风向由东南风逐渐转变为东风(图 8f), 更有利于海盐气溶胶在Ⅲ区聚集, 形成亚马逊河入海口处及其西南部陆地地区的 AOD 和 Sea salt AOD 高值区。

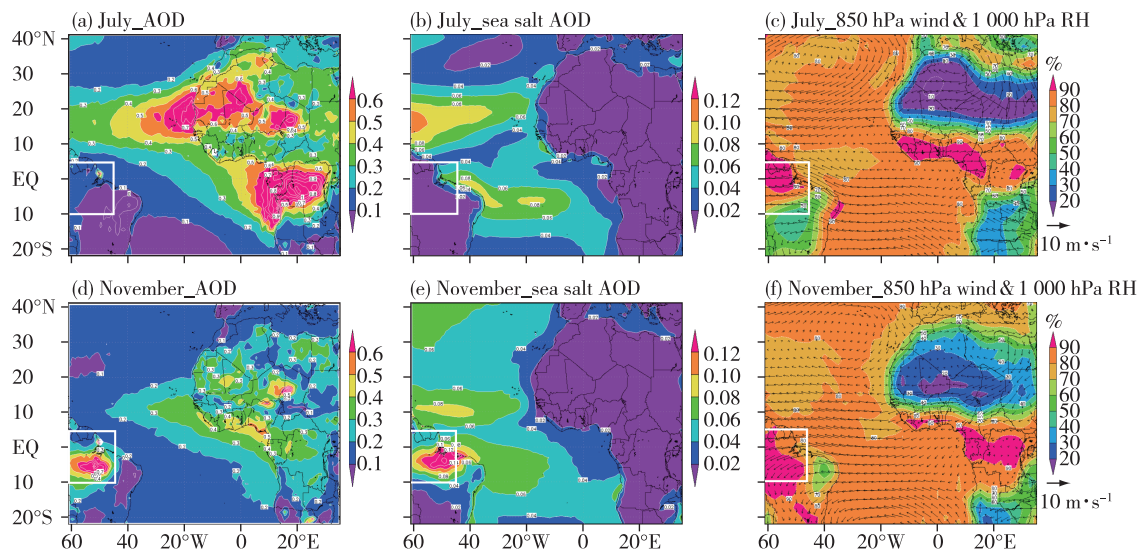


图 8 2000—2016 年Ⅲ区 AOD(a、d)、Sea salt AOD(b、e)、850 hPa 风场(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 与 1000 hPa 相对湿度(c、f; 单位: %) (a、b、c. 7 月, d、e、f. 11 月)

Fig.8 AOD (a, d), Sea salt AOD (b, e), and wind field at 850 hPa (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and relative humidity at 1000 hPa (c, f; units: %) over Ⅲ area in July (a, b, c) or November (d, e, f) from 2000 to 2016

### 3 沙尘气溶胶越大西洋传输变化特征

撒哈拉沙漠源区的沙尘气溶胶向邻近的大西洋海域的输送有重要的气候环境意义, 非洲沙尘气溶胶越大西洋海域传输的变化特征是重要的研究课题。为研究沙尘传输路径的空间分布变化, 此处计算 AOD 质心进行分析; 因为沙尘气溶胶是撒哈拉沙漠和邻近的大西洋海域最重要的气溶胶组分, 因而 AOD 质心的分析可以代表沙尘气溶胶的空间分布及其越大西洋传输路径。AOD 质心纬度位置分析计算气溶胶分布区以 AOD 为权重的各格点经纬度坐标的加权平均值作为 AOD 质心的经纬度坐标; 利用 AOD 质心纬度的变化反映沙尘气溶胶跨洋传输路径的变化趋势。

AOD 质心分布最偏北的三月份在 I<sub>1</sub> 区(陆区)为 8 月、9 月和 10 月(图 9a), 而在 I<sub>2</sub> 区(海区)为 7 月、8 月和 9 月(图 9d); AOD 质心最偏南的三月份在陆区为 12 月、1 月和 2 月(图 9a), 在海区为 1 月、2 月和 3 月(图 9d)。取上述月份分析陆区

和海区北部、南部传输月份 AOD 质心分布纬度的时间变化序列, 可以看出陆区(I<sub>1</sub>区)沙尘气溶胶分布最偏北(图 9b)和最偏南(图 9c)的月份 AOD 质心分布纬度的变化趋势均不明显; 仅从陆区(I<sub>1</sub>区)来看, 非洲撒哈拉沙漠沙尘气溶胶的源区和空间分布范围并未发生显著的变动和纬向移动。对于海区(I<sub>2</sub>区)而言, 沙尘气溶胶向大西洋海域传输偏北的月份(北部传输路径, 图 9e)和传输偏南的月份(南部传输路径, 图 9f) AOD 质心分布纬度分别有  $0.4^\circ$  和  $0.15^\circ$  的向南变动; 表明沙尘气溶胶向大西洋海域的传输路径确实存在向南移动的变化趋势。陆地上沙尘气溶胶光学厚度空间分布的分析发现撒哈拉沙漠沙尘源区并未发生明显的变动和纬向移动, 为什么海区(I<sub>2</sub>区)沙尘气溶胶向大西洋的传输路径却发生了向南移动(图 9e、f)? 对海区沙尘气溶胶向大西洋北部传输对应的 7 月、8 月和 9 月的分析发现传输路径以北北风分量从 2000 年至 2016 年有增强的趋势(图 10a), 这与沙尘传输路径向南移动的现象一致。非洲撒哈拉沙漠沙尘向大西洋

海区传输路径以北为亚速尔高压分布区域;进一步分析发现,2000—2016年7月、8月和9月亚速尔高压区850 hPa位势涡度(Ertels potential vorticity, MERRA-2)呈现显著降低趋势(图10b),而500 hPa位势高度(geopotential height, MERRA-2)呈现增加趋势(图10c),反映了研究时间段亚速尔高压的显著增强,这可能导致了海区(I<sub>2</sub>区)沙尘传输路径以北北风增强和沙尘传输路径向南移动;亚速尔高压变化和高压区北风变化的气候因素与赤道辐合带和沙尘传输路径的变化密切相关。上述结果表明大气气溶胶时空分布特征受全球和区域大气环流变化和调整的影响,可以反映气候变化等原因造成的大气环流变化。

本文结论与 Meng et al.<sup>[30]</sup> 提出的北非撒哈拉沙漠沙尘向大西洋传输中心轴近年来呈现北移的结论有所不符。1) 根据本文和 Meng et al.<sup>[30]</sup> 的分析可见沙尘向大西洋海区传输路径的分布纬度有显著的年际变化,因而本文选择的2000—2016年的分析结果与 Meng et al.<sup>[30]</sup> 2001—2015年的研究结

论可能会有不同。2) Meng et al.<sup>[30]</sup> 选取的沙尘北部传输路径是4—10月,南部传输路径选取的是11月—次年3月;由图9d可知 Meng et al.<sup>[30]</sup> 选取的上述两个时段沙尘传输路径分布纬度的变化范围很大,且两个时间段沙尘传输路径的月平均分布纬度有重叠,这可能导致 Meng et al.<sup>[30]</sup> 计算的北部和南部传输路径偏差和不确定性较大。而本文海区沙尘传输路径选取的是传输最偏北的7—9月分析北部传输路径变化趋势,传输最偏南的1—3月分析南部传输路径变化趋势(图9d);选取的沙尘传输路径最偏北和最偏南的三个月传输路径的纬度分布更为集中(图9d),因而计算结果更有利于精确描述沙尘气溶胶越大西洋传输路径的变化趋势。另外,有关沙尘气溶胶越大西洋传输路径纬向变化的结果与根据位势涡度和位势高度分析得到的沙尘传输路径以北亚速尔高压增强的结果一致,因而也支持本文的研究结论。有关上述问题还有必要进一步深入分析研究。

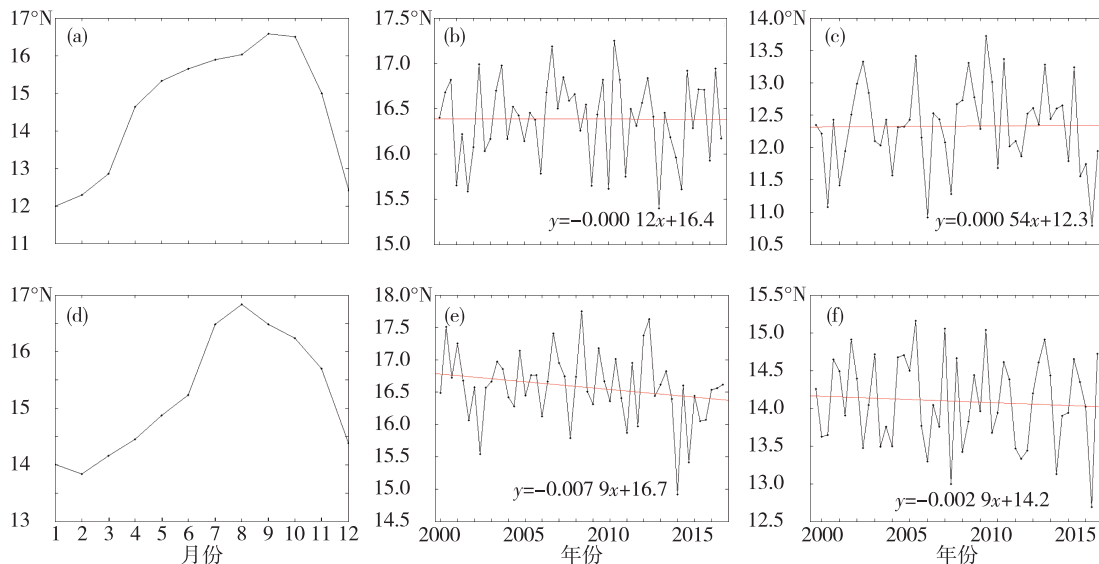


图9 2000—2016年多年月平均AOD质心分布纬度(a、d)、北部传输(b、e)和南部传输(c、f)的三个月的月平均AOD质心分布纬度变化时间序列(a、b、c. 陆区I<sub>1</sub>区, d、e、f. 海区I<sub>2</sub>区;仅图9e中线性回归通过0.05显著性水平检验)

Fig.9 Times series of the centroid latitudes of the multiyear monthly mean AOD (a, d) and the monthly mean AOD for the three months associated with northward transport (b, e) and southward transport (c, f) of the dust aerosol over the Sahara (a, b, c. I<sub>1</sub> area) or the Atlantic Ocean (d, e, f. I<sub>2</sub> area) from 2000 to 2016 (only the linear regression in e. passes the significance test at 0.05 level)

## 4 结论

1) 非洲中北部撒哈拉沙漠地区及邻近的大西洋海区主要为源于沙漠的沙尘气溶胶造成的光学厚度高值区,陆地和海洋上空的AOD高值区和沙尘

气溶胶光学厚度高值区在1—7月与赤道辐合带同步向北移动,并在8—12月向南回撤;海洋上空AOD高值区比陆地更偏南,主要是由于沙尘气溶胶传输区域海洋上的北风更强。

2) 非洲中南部刚果盆地及邻近的大西洋海区

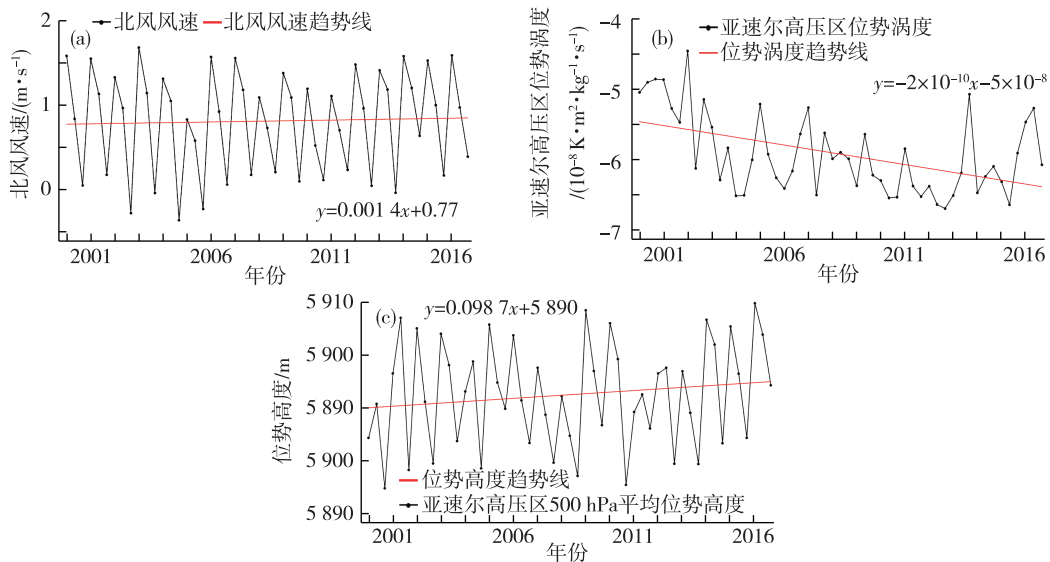


图 10 2000—2016 年非洲沙尘气溶胶越大西洋海区北部传输月份(7—9 月)传输路径以北风风速月平均时间序列(a)和亚速尔高压区(10~30°N,60~20°W)850 hPa 位势涡度(b)与 500 hPa 位势高度(c)月平均时间序列(线性回归通过 0.05 显著性水平检验)

Fig.10 Monthly mean wind speed (a) of the north wind to the north of the dust aerosol transport pathways and Ertel's potential vorticity at 850 hPa (b) and geopotential height at 500 hPa (c) over the Azores High region (10~30°N, 60~20°W) in the months associated with northward transport of the dust aerosol from Africa to the Atlantic Ocean (July, August, and September) from 2000 to 2016 (the linear regression passes the significance test at 0.05 level)

为黑碳及有机碳气溶胶光学厚度高值区;大气气溶胶以生物质燃烧为主要来源,主要集中在干季后半段;而生物源排放全年连续,排放峰值在雨季降水最多的 4 月以后发生,并与其后干季生物质燃烧源排放共同造成整个干季的 AOD 高值。

3) 亚马逊河口入海处及附近海域为海盐气溶胶光学厚度高值区;大西洋海域向该区全年平均风速  $>5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 有利于海盐气溶胶传输到该区成为大气气溶胶的重要来源。尤其是 9—11 月风速显著增大,且风向由东南风转为东风,更有利于海盐气溶胶进入亚马逊河口及其附近的沿海地区聚集,形成 AOD 和 Sea salt AOD 高值区。

4) 对 2000—2016 年撒哈拉沙漠沙尘向大西洋跨洋传输的偏北月份(陆区 8—10 月、海区 7—9 月)AOD 高值区所处纬度进行分析,发现沙尘气溶胶向海区的传输路径存在向南移动的变化趋势。陆地上沙尘气溶胶光学厚度的分析发现撒哈拉沙漠沙尘源区并未发生明显变动和纬向移动;而海区沙尘气溶胶向大西洋海区传输路径的向南移动伴随着传输路径以北 2000—2016 年亚速尔高压增强(对应亚速尔高压区位势涡度显著降低和位势高度增加)和北风分量的增强,上述气候因素与赤道辐合带和沙尘传输路径的变化密切相关。表明大气

气溶胶时空分布特征受全球和区域大气环流变化和调整的影响,可以反映气候变化等原因造成的大气环流变化。

### 参考文献:

- [1] IPCC. 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: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [3] Dagan G, Chemke R. The effect of subtropical aerosol loading on equatorial precipitation[J]. Geophys Res Lett, 2016, 43(20): 11048-11056.
- [4] 刘闯,葛成辉.美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J].遥感信息,2000,15(1):45-48.
- [5] Qu W, Wang J, Zhang X, et al. Opposite seasonality of the aerosol optical depth and the surface particulate matter concentration over the north China Plain [J]. Atmos Environ, 2016, 127: 90-99.
- [6] 刘闯,葛成辉.美国地球观测系统 AQUA 卫星数据政策、主要技术指标与数据本土化共享问题[J].遥感信息,2002,17(2):38-42.



- [7] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [8] Xia X, Chen H, Li Z, et al. Significant reduction of surface solar irradiance induced by aerosols in a suburban region in northeastern China [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S02.
- [9] Tanaka TY, Chiba M. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget [J]. *Glob Planet Change*, 2006, 52(1-4): 88-104.
- [10] Jankowiak I, Tanré D. Satellite climatology of Saharan dust outbreaks: Method and preliminary results [J]. *J Climate*, 1992, 5(6): 646-656.
- [11] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. *Nature*, 1996, 380(6573): 419-422.
- [12] Li X, Maring H, Savoie D, et al. Dominance of mineral dust in aerosol light-scattering in the North Atlantic trade winds [J]. *Nature*, 1996, 380(6573): 416-419.
- [13] Yu H, Chin M, Yuan T, et al. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite observations [J]. *Geophys Res Lett*, 2015, 42(6): 1984-1991.
- [14] 高会旺, 祁建华, 石金辉, 等. 亚洲沙尘的远距离输送及对海洋生态系统的影响 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 1-10.
- [15] 冯士筭. 上层海洋与低层大气研究的前沿科学问题 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability [J]. *Science*, 1980, 209(4464): 1522-1524.
- [17] Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1996, 383(6600): 495-501.
- [18] Moulin C, Lambert C E, Dulac F, et al. Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation [J]. *Nature*, 1997, 387(6634): 691-694.
- [19] DeFlorio M J, Goodwin I D, Cayan D R, et al. Interannual modulation of subtropical Atlantic boreal summer dust variability by ENSO [J]. *Climate Dyn*, 2016, 46(1-2): 585-599.
- [20] 姜忠尽, 尹春龄. 非洲工业化战略的选择与发展趋向 [J]. *西亚非洲*, 1991(6): 49-56, 80.
- [21] 中华人民共和国中央人民政府. 中国对非洲政策文件 [EB/OL]. (2006-01-12) [2018-05-16]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_212161.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_212161.htm)
- [22] 中华人民共和国中央人民政府. 中国对非洲政策文件 [EB/OL]. (2015-12-05) [2018-05-16]. <http://www.fmprc.gov.cn/web/zyxw/t1321556.shtml>.
- [23] Korontzi S, Ward D E, Susott R A, et al. Seasonal Variation and Ecosystem Dependence of Emission Factors for Selected Trace Gases and PM<sub>2.5</sub> for Southern African Savanna Fires [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D24): 4758.
- [24] Ward D E, Hao W M, Susott R A, et al. Effect of fuel composition on combustion efficiency and emission factors for African savanna ecosystems [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 1996, 101(D19): 23569-23576.
- [25] Engelbrecht J P, Swanepoel L, Chow J C, et al. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations from the Qalabotjha low-smoke fuels macro-scale experiment in South Africa [J]. *Environ Monit Assess*, 2001, 69(1): 1-15.
- [26] Viana M, Querol X, Alastuey A, et al. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network [J]. *Atmos Environ*, 2002, 36(38): 5861-5875.
- [27] Prospero J M, Lamb P J. African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications [J]. *Science*, 2003, 302(5647): 1024-1027.
- [28] Bryant R G, Bigg G R, Mahowald N M, et al. Dust emission response to climate in southern Africa [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D9): D06207.
- [29] Ridley D A, Heald C L, Pierce J R, et al. Toward resolution-independent dust emissions in global models: Impacts on the seasonal and spatial distribution of dust [J]. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(11): 2873-2877.
- [30] Meng L, Gao H W, Yu Y, et al. A new approach developed to study variability in North African dust transport routes over the Atlantic during 2001-2015 [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(19): 10026-10035.
- [31] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) [J]. *J Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [32] Randles C A, Silva AMD, Buchard V, et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation [J]. *J Climate*, 2017, 30(17): 6823-6850.
- [33] Rienecker M M, Suárez M J, Gelaro R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications [J]. *J Climate*, 2011, 24(14): 3624-3648.
- [34] 姜忠尽. 现代非洲人文地理(下册) [M]. 南京: 南京大

- 学出版社,2014.
- [35] 邱金桓,孙金辉.沙尘暴的光学遥感及分析[J].大气科学,1994,18(1):1-10.
- [36] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101 ( D14 ): 19237-19244.
- [37] Scholes M, Andreae M O.来自非洲的生物源和火源释放及其对全球大气的影响[J]. *AMBIO-人类环境杂志*,2000(1):23-29.
- [38] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. *J Geophys Res:Atmos*,1995,100( D5 ): 8873-8892.
- [39] Roth B, Okada K. On the modification of sea-salt particles in the coastal atmosphere-a TEM study [J]. *Atmos Environ*,1998,32(9):1555-1569.
- [40] 罗燕,吴润,王卫国.利用 MODIS-GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫[J].*热带气象学报*,2006,22(6):638-647.
- [41] Sievering H, Caine J, Harvey M, et al. Aerosol non-seasalt sulfate in the remote marine boundary layer under clear-sky and normal cloudiness conditions: Ocean-derived biogenic alkalinity enhances sea-salt sulfate production by ozone oxidation[J].*J Geophys Res:Atmos*, 2004,109( D19 ):47-53.