

卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化

李晓静, 高玲, 张兴赢, 张鹏

中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 全球大气气溶胶类型和含量变化与气候变化和大气环境污染密切相关,是气象学、环境学和医学研究关注的热点问题。为认识全球气溶胶分布基本特征,发现和跟踪全球气溶胶显著变化地区,本文利用美国NASA发布的C6版MODIS气溶胶光学厚度产品分析全球大气气溶胶光学厚度时空年变化特征及其影响因素;分析气溶胶光学厚度分布与中国霾区的关系,提出霾区治理的气溶胶光学厚度年平均参考标准。分析2003—2014年卫星监测的气溶胶光学厚度(AOD)空间分布特征显示,全球气溶胶光学厚度稳定高值区位于亚洲东部及其邻近太平洋海区、印度半岛及其邻近印度洋海区、非洲北部和中部及其邻近大西洋海区;重点变化关注区为俄罗斯西伯利亚东部增量区和南美洲亚马逊平原热带雨林减量区。气溶胶光学厚度高值地区的形成与沙尘暴、火山喷发、生物质燃烧、工业排放等自然源,以及工业污染物排放、交通运输、秸秆焚烧等人类活动造成的人为源气溶胶排放直接相关,并受气象因素和山脉等地形阻挡因素影响,这些因素的稳定性与季节变化最终形成全球气溶胶的时空分布特征。中国东部气溶胶光学厚度年平均大于0.5的区域为主要霾天气区,其中华北南部、黄淮、江淮、江汉地区和四川盆地为全球气溶胶光学厚度极端高值区,年平均极端高值达到0.8~1.0,为霾天气常态化发生区;通过全球气溶胶光学厚度量值分析认为,气溶胶光学厚度年平均0.5可作为中国大气环境最大承载量,中国东部地区高于此值的区域为主要大气污染控制区,大范围工业生产污染物减排可带来整体环境改善,通过产业结构调整有望降低的气溶胶污染中位比率为33%,平均比率为26.5%。

关键词 大气气溶胶;气溶胶光学厚度;霾;MODIS

中图分类号 P407

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.003

Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data

LI Xiaojing, GAO Ling, ZHANG Xingying, ZHANG Peng

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The aerosol type and the concentration variation are the hotspots related to the climate change, the environment and the human-health. The AQUA/MODIS aerosol optical depth (AOD) product issued by NASA is used to analyze the temporal and spatial changes of the multi-yearly and annual mean AODs in the whole world and in China for diagnosing the aerosol events that directly emitted or affected, such as the haze, the dust storm or the volcano eruption. The results show that the eastern Asia, the Indian peninsula, the northern and central Africa and their adjacent ocean areas have relatively high AODs. The significantly changing areas include the east area of Siberia due to the smoke by fire and the Amazon rainforest for bioaerosols by vegetation emissions. These high and sensitive AOD regions are closely related with the aerosol emission by natural and human activities, and they are also influenced by weather and terrain. In China, the regions in the eastern China with the yearly mean AOD higher than 0.5 are the haze weather areas. In particular, the Huanghe-Huaihe River basin, the Yangtze-Huaihe River basin and the central part of China have the highest mean AODs of 0.8-1.0, where serious haze weather often occurs. The highest AOD is caused by the highest emission from the industrial and agricultural productions, constructions, and heavy transportations. So, based on the reference the AOD (background 0.2, natural events impact 0.15, human living impact 0.15) obtained from the aerosol distinctive area, the annual mean AOD of 0.5 is

收稿日期:2015-06-18;修回日期:2015-07-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB403401);国家科技支撑计划项目(2014BAC16B01)

作者简介:李晓静,副研究员,研究方向为卫星气溶胶参数反演算法及产品应用,电子邮箱:lixiaoj@cma.gov.cn

引用格式:李晓静,高玲,张兴赢,等.卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化[J].科技导报,2015,33(17):30-40.

defined as a threshold for delimiting the haze area and the pollution control district. In China, the environmental improvement depends on the cutting back the industrial emissions in the regions with annual mean AOD higher than 0.5, and the middle cutting ratio is 33% and the averaged cutting ratio is 26.5%.

Keywords atmospheric aerosol; AOD; haze; MODIS

气溶胶是大气成分重要的组成部分,其来源复杂,既有尘土、扬沙、火山灰、烟尘、植被排放等自然原因形成的一次和二次大气气溶胶颗粒物,也有农林开发、建筑扬尘、汽车尾气、工业生产等人类活动排放的一次大气气溶胶颗粒和SO₂、NO₂等气体经过均相和非均相化学反应形成的二次大气气溶胶颗粒。近半个世纪以来,全球人类活动通过直接和间接方式对绝大部分地区大气气溶胶强迫出明显增量,卫星遥感监测气溶胶的科学目标是为了降低气溶胶在全球气候变化评估中的不确定性,而随着人类活动形成的大气气溶胶含量增加,极端含量高值区威胁人类健康,使得大气气溶胶造成的环境危害成为公众直接关注的问题,卫星气溶胶监测数据也被广泛用于环境及健康影响评估。沙尘暴、霾这两种极端的大气环境类天气现象均由大气中高浓度的气溶胶造成;气溶胶间接与干旱和暴雨等极端天气事件相关联^[1];因为不同类型气溶胶的辐射特性差异,通过直接和间接辐射强迫造成大气降温和增温这两种截然相反的影响,成为气候变化研究最大的不确定性^[2,3]。大气气溶胶在气象学中从短期的环境天气预报到长期的气候变化研究均占有重要位置。环境学关心大气气溶胶,因为全球经济布局不断变化,人为气溶胶在工业集中地区成为严重的大气污染成分,环境研究需要了解大气污染水平的动态变化,加强大气环境保护、提高污染治理能力^[4-6]。近年来,医学研究对大气气溶胶的关注增强,因为历史上有美国洛杉矶烟雾和德国鲁尔工业区污染的教训,近10多年来,中国东部地区因工业排放对大气造成严重污染,PM_{2.5}细粒子的大量存在造成呼吸科疾病、肺癌发生率剧增,已对污染地区居民形成严重健康影响^[7]。卫星遥感监测的气溶胶反演产品为气象学、环境学和医学等学科了解气溶胶自然源和人为源时空分布特征提供全球分布信息^[8-10]。

目前,美国、欧洲和中国卫星均有业务运行的气溶胶产品^[11-16],通过主、被动观测方式,以多光谱、多角度、偏振观测模式获取气溶胶信息,主要提供气溶胶光学厚度、粒子尺度等参数。气溶胶光学厚度是卫星反演获取的最为重要的参数,主要体现气溶胶垂直柱总量信息。中国多部门合作建立了美国EOS系统TERRA和AQUA星MODIS数据接收共享系统,气象部门利用此系统数据建立了业务软件,实现实时气溶胶产品处理^[17],曾实时业务运行获取东亚地区产品结果,并与FY-3A卫星气溶胶产品一同服务于2008年北京奥运会。从时间分辨率、空间覆盖度、气溶胶光学厚度参数反演质量、产品数据集时序长度等方面综合评价,NASA发布的MODIS气溶胶光学厚度产品具有明显优势,在应用领域广为采用。

为认识全球气溶胶分布的基本特征,发现、跟踪全球气溶胶显著变化地区,本文选取美国NASA发布的C6版AQUA/

MODIS气溶胶光学厚度产品,采用多算法融合数据集分析全球和中国区域气溶胶分布特征,重点高值区和变化区的形成原因;针对重点关注区,利用时间序列变化特征说明2003—2014年近12年的气溶胶年变化特征;分析说明中国大范围霾区与气溶胶分布特征之间的相互关系,提出霾区治理的气溶胶光学厚度年平均值参考标准。

1 数据说明

1.1 数据源

NASA于1999年和2002年分别发射TERRA和AQUA卫星搭载中分辨率成像光谱仪MODIS,该传感器具有36个通道,覆盖紫外、可见光、近红外、红外等波段,波长范围0.4~14 μm,为反演气溶胶和地表特征提供了丰富的信息。MODIS的轨道高度为705 km,采用±55°天底扫描方式观测,扫描幅宽2330 km,每1~2 d覆盖全球1次。

MODIS气溶胶产品采用陆地植被暗像元方法、深蓝通道算法分别获取陆地植被、沙漠、干旱等区域的气溶胶信息,采用水体暗像元特性获取海洋区域的气溶胶信息^[13-16]。上述算法均为采用查找表方案解算可见光、近红外通道大气辐射传输过程的反演方法。反演获取的气溶胶参数主要为表达总量信息的气溶胶光学厚度(AOD)。NASA官方发布的MOD04和MYD04产品分别为TERRA和AQUA卫星气溶胶轨道反演产品,5 min轨道分幅存储、空间分辨率10 km;两颗星的气溶胶参数L3级产品信息分别归入MOD08-D3和MYD08-D3全球投影大气参数日产品,MOD08-M3和MYD08-M3全球投影大气参数月产品,投影方式为全球等经纬度投影,空间分辨率为1°×1°。目前,NASA共发布了3个版本的气溶胶再处理产品,分别为C4、C5、C6版。对产品用户来说,C4到C5版产品的主要变化为,通过改进植被暗像元算法地表处理方案、调整气溶胶光学参数设定等改进提升了反演质量,增加了深蓝通道算法反演结果;C5到C6版产品的变化为,通过产品算法细节修订和前端输入产品质量提升(将太阳天顶角限制提升到≤84°,帮助获取极地地区观测结果,并更新通道中心波长、瑞利散射光学厚度和气体吸收订正等设定;允许陆地浓烟条件下反演,修订海洋薄卷云检测;调整陆上气溶胶类型的季节地域方案;修订产品质量标识;前端输入数据反射率定标更新、海陆掩码更新、云检测产品改进)进一步整体提升气溶胶产品质量,针对大气环境应用需求增加了3 km空间分辨率反演结果,提供了植被暗背景算法、深蓝通道算法和海洋区域算法产品的融合数据^[13]。卫星观测反演的气溶胶光学厚度参数质量受辐射定标、云检测、产品算法、区域下垫面特征、季节等因素影响,所以针对C4、C5版产品全球用户已有

大量检验文章提供产品质量信息参考^[18-21]。结果证明,C5版数据质量已能很好地满足应用需求^[9,10]。C6版的3种算法融合产品在覆盖范围上为环境、气候分析提供了几乎全地表覆盖的大气气溶胶信息,为全球气溶胶研究提供了优质数据。

MODIS系列气溶胶产品应用领域广泛采用,首先基于其良好的数据质量,其次基于卫星观测大范围覆盖的优势,以及MODIS观测1~2 d的快速重访周期,MODIS C6版产品3种算法融合数据更加突出地表达了全地表覆盖优势。本文分析采用AQUA卫星的C6版MYD08-M3产品,提取“AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined_Mean_Mean”数据集开展分析,给出2003年以来全球和中国区域气溶胶光学厚度分布特征及重点区域的时间序列变化特征,并进一步说明中国霾天气高发区与气溶胶光学厚度分布特征的关系。

1.2 参数说明

气溶胶光学厚度产品为卫星观测定量遥感产品,采用MODIS可见光—短波红外通道观测反演,获取可见光、近红外多个波长处的气溶胶光学厚度数据。应用分析取反演得到的可见光波段中间波长处550 nm气溶胶光学厚度值。气溶胶大气垂直柱光学厚度定义为

$$\tau_{\lambda} = \int_0^H \delta_{\lambda} N(z) dz \quad (1)$$

式中, τ_{λ} 为光学厚度, λ 为波长, H 为大气标高, δ_{λ} 为粒子消光截面, $N(z)$ 为消光粒子数密度垂直分布。光学厚度参数无单位量纲。

气溶胶光学厚度本身由大气柱气溶胶总含量 $N(z)$ 和气溶胶消光特性 δ_{λ} 共同决定(式(1)),其中 δ_{λ} 由粒子类型和粒子尺度决定,所以AOD观测的变化量体现在气溶胶粒子类型、粒子尺度和数密度的变化上,其中以数密度的变化影响为最主导,其次为粒子尺度变化,类型参量对特定地区相对稳定且定量变幅较小,所以AOD变化主要体现由数密度和粒子尺度决定的气溶胶总量信息。上述AOD的物理参量在宏观解译中受气溶胶排放源和气象因素影响。自然源和人为源关注沙尘暴(扬沙、浮尘)、火山喷发、生物质燃烧、生物排放有机气溶胶、城市化和工业化活动(工农业生产排放、交通建筑扬尘、汽车尾气等)形成的一次和二次气溶胶,源排放强度越强、越持续,气溶胶光学厚度值会越高;气象因素中有传输因素,主要为天气系统(静稳天累积、降水天沉降)、季节盛行风

影响,会造成局地光学厚度高值或低值,如扩散使排放源地区AOD降低、而造成远距离大范围AOD升高;气象因素还有大气水汽含量,在亲水性的二次气溶胶含量高的地区水汽含量高低会对AOD造成显著影响。本文AOD的特征分析将主要涉及源排放和气象因素的分析。

2 全球气溶胶时空分布特征

采用MYD08-M3产品2003—2014年大气气溶胶光学厚度数据开展时空特征分析。以2003—2007年和2008—2012年数据建立前后2个5年时间AOD平均值全球分布,说明10年间全球气溶胶分布特征;以前后5年AOD差值分布提取AOD持续缓慢变化特征区,以2013年和2014年AOD年平均差值全球分布,说明气溶胶源排放事件对气溶胶分布特征的影响。

2.1 空间分布

2003—2007年和2008—2012年前后2个5年全球气溶胶光学厚度平均值分布(图1(a)、(b))对比分析说明,气溶胶光学厚度空间分布特征基本一致。首先,全球陆地区域气溶胶光学厚度高值区持续出现在中国东部地区,印度半岛北部喜马拉雅山脉南侧地区,非洲撒哈拉沙漠中南部((115°N,15°E)附近),这些区域AOD多年平均高值在0.8左右,为气溶胶持续严重影响地区;其次,非洲西部沙漠以及乍得盆地和刚果盆地、西亚阿拉伯半岛、印度半岛中南部、中南半岛和中国塔克拉玛干沙漠地区为气溶胶光学厚度次高值区,这些区域AOD 5年平均值为0.5左右,为气溶胶高影响地区;第三,南美洲亚马逊平原及安第斯山脉火山影响地区、东南亚马来群岛(苏门答腊岛、爪哇岛和加里曼丹岛等)、俄罗斯西伯利亚部分地区的5年气溶胶光学厚度平均值在0.3左右,为自然源、季节性或事件性气溶胶高值影响区。全球海洋地区气溶胶光学厚度高值区持续出现在接近亚洲地区的太平洋海区、接近印度半岛的印度洋海区、接近非洲大陆的大西洋海区。海洋AOD高值区显著的受陆地气溶胶扩散影响,随盛行风的传输会实现气溶胶越洋输送。卫星监测图上(图1(a)、(b))显现了非洲大陆气溶胶随东北信风向西传输,跨越大西洋到达南美洲地区;亚洲东部气溶胶随阿留申低压东侧西南气流向东北方向传输,影响太平洋北部海区,接近北美洲高纬度地区。对于重点高值区的形成原因分析如下。

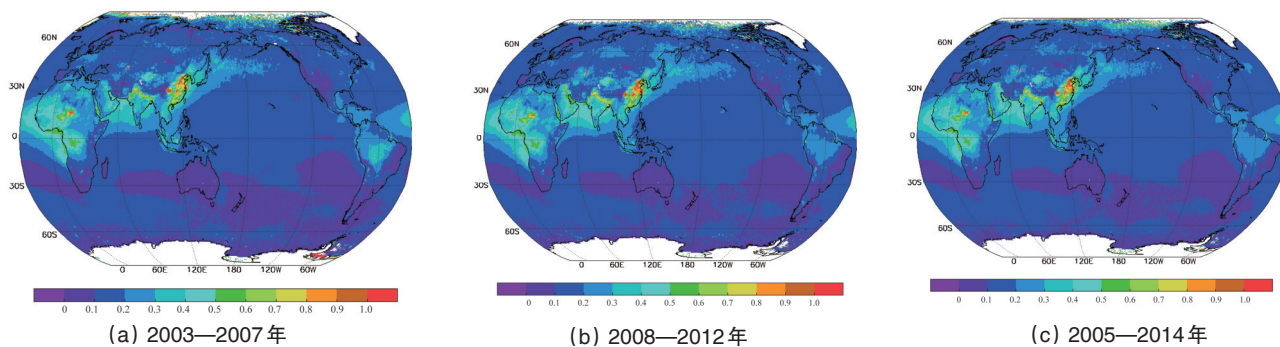


图1 AQUA/MODIS气溶胶光学厚度多年平均值分布

Fig. 1 Global map of the temporal averaged AOD from AQUA/MODIS

中国东部地区的气溶胶光学厚度大范围极端高值区主要因工农业生产、建筑、交通运输等人类活动产生的 NO_2 、 SO_2 、氨气等污染气体转化成细颗粒气溶胶,矿物扬尘、烟尘等直接排放一次气溶胶造成的气溶胶总含量在大气中过高,并叠合在气溶胶自然状态量值上而形成,AOD年平均值大于0.5的区域为明显气溶胶污染地区;极端高值达到0.8~1.0,是欧洲地区(AOD参考量0.2)的4~5倍。AOD高值分布特征与人口密度分布特征高度相关(<http://baike.baidu.com/picture>)。高度密集的人口,采用燃煤、燃油等不清洁能源生产生活^[22],成就了全球制作业、农业生产总量全球第一的成绩,但也形成了持续10年以上东部人口密集地区严重气溶胶污染分布的格局(图1)。

印度半岛的气溶胶光学厚度极端高值主要出现在印度半岛北部喜马拉雅山南侧地区,此区域有印度河—恒河平原地区,高度密集的人口生产生活排放大量气溶胶,例如在印度德里及其卫星城,汽车尾气、工业、废物燃烧和建筑活动造

成严重颗粒物污染^[23,24],排放源与中国东部类似,但其工业排放远低于中国东部地区;塔尔沙漠作为热带沙漠亦有沙尘暴发生贡献沙尘气溶胶。此区域形成明显的高值带还与西南气流向北输送气溶胶堆积在喜马拉雅山脉南侧不易扩散相关,排放因素、气象因素和地形因素共同作用。印度半岛中南部的德干高原及其东西两侧的海岸平原AOD高值也主要因人类活动造成的气溶胶排放而形成高值分布。

中南半岛的AOD高值由本地地区的生物质燃烧烟尘和人为生活、生产排放共同造成。中南半岛为传统季节性生物质燃烧严重地区,以农业秸秆焚烧为主。卫星火点监测显示每年1—3月为中南半岛生物质燃烧季,3月为火点最多的月份,生物质燃烧造成的气溶胶排放是1—3月中南半岛AOD高值的重要影响因素(图2(a));此外,夏季,AOD月平均在0.3,为人为生活和生产影响贡献;近几年亚洲工业布局调整,部分企业转到中南半岛及一些东南亚国家,此地区工业污染气溶胶的变化需关注监测。

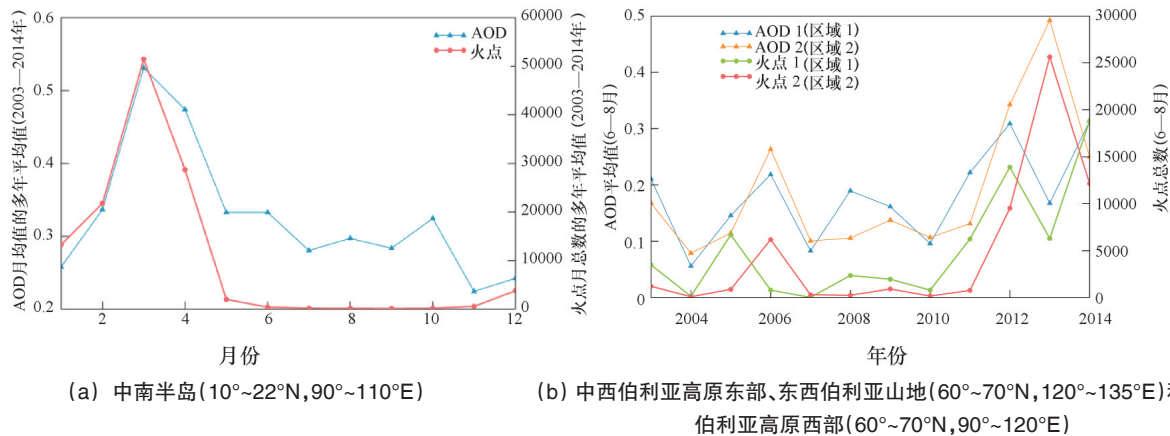


图2 季节性生物质燃烧区域火点总数与对应区域气溶胶光学厚度平均值的相互关系(采用AQUA/MODIS产品分析)

Fig. 2 Interrelationship between area total number of fire points caused by seasonal biomass burning and same area mean AOD from AQUA/MODIS products

非洲大陆及邻近大西洋海区的AOD高值主要由撒哈拉沙漠沙尘天气、生物质燃烧烟尘、热带雨林生物有机气溶胶形成^[27,28]。撒哈拉沙漠及其邻近地区(15°N附近地区)因热带、副热带天气系统扰动影响,易引起强沙尘天气,影响周边地区气溶胶分布;非洲乍得盆地的乍得湖水系流域地区位于撒哈拉沙漠南侧,为生物质燃烧高发地区;乍得湖与提贝斯提高原之间的博尔库地区是撒哈拉最干旱的地区,其南侧地势较低,受沙尘天气和烟尘扩散影响,形成非洲地区AOD大于0.8的局地极端高值区;刚果盆地为全球第二大热带雨林地区,存在稳定的生物有机气溶胶排放,同时也为非洲生物质燃烧高发地区,生物有机气溶胶和烟尘形成AOD区域高值;源于非洲大陆的沙尘气溶胶在大气中随东风带气流会向西传输影响邻近大西洋海区为AOD高值区。沙尘的影响在非洲北部、中部地区及邻近大西洋海区为主要影响因素;生物质燃烧在非洲中部、南部的干季影响大气气溶胶分布。

海洋的AOD高值可总结为4方面主要原因:1) 近岸地区

的AOD高值由大陆区域气溶胶扩散影响,如:近非洲海岸的大西洋海区,近亚洲海岸的太平洋海区,近印度半岛的印度洋海区;2) 在气溶胶越洋传输路径上,陆地气溶胶可传输影响到远洋地区,见前述赤道附近大西洋、北太平洋传输路径;3) 海底火山喷发释放火山灰;4) 如南半球广阔海洋上的气溶胶光学厚度高低值分布区,可由海浪形成的飞沫形成硫酸盐气溶胶高低差异解释,这是海洋气溶胶形成的主要机制。

2.2 时间变化分析

2003—2007年、2008—2012年前后2个5年全球气溶胶光学厚度空间分布特征相似(图1(a)、(b)),其差值(图3(a))体现的长期变化区域为:AOD增加的区域主要在阿拉伯半岛、咸海及其周边区域、印度半岛及其邻近的印度洋地区(孟加拉湾、阿拉伯海海区)、俄罗斯西伯利亚地区及其邻近鄂霍次克海海区、南美洲安第斯山脉南部点状增量区,增量超过0.1;气溶胶光学厚度降低的区域主要是南美洲北部亚马逊平原热带雨林地区,减量超过-0.1。

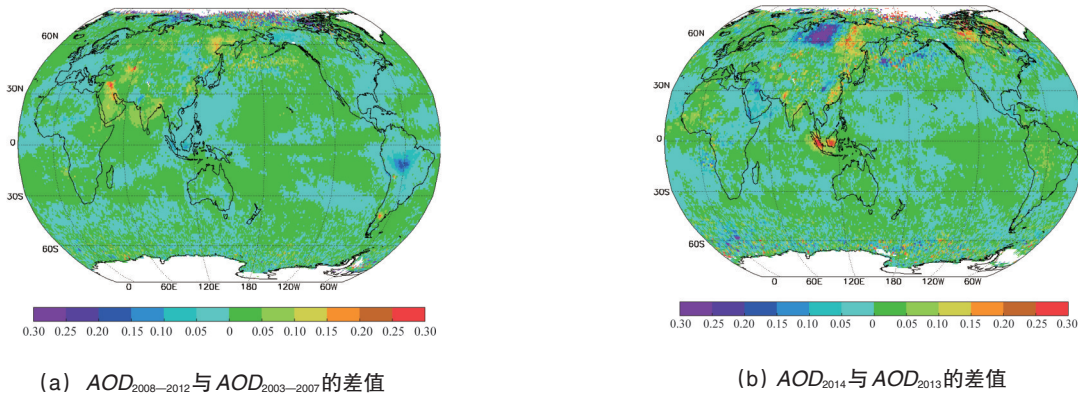


图3 AQUA/MODIS 气溶胶光学厚度(5年和1年)年平均值差值分布
Fig. 3 Difference of 5-year and yearly mean AODs from AQUA/MODIS

2014年与2013年AOD年平均差值体现的短期变化区域为(图3(b)):俄罗斯西伯利亚地区,显著的增量和减量区同时存在,均有超过 ± 0.15 的变化量;爪哇海及其邻近岛屿为显著增量区,增量在 $0.1\sim 0.3$;加拿大东北部努勒维特地区,位于北极区,增量超过 0.1 ;阿拉伯半岛为主要减量区,减量在 $-0.1\sim -0.3$ 。中国区域的变化主要为:四川盆地为明显减量区,东北地区、江南和华南地区有明显增量区。

统一长期变化和短期变化关注的重点区域:阿拉伯半岛沙尘,俄罗斯西伯利亚地区生物质燃烧,东南亚马来群岛火山活动,南美洲亚马逊热带雨林地区植被排放有机气溶胶。

阿拉伯半岛5年平均AOD长期对比为增量区(图3(a))、1年平均AOD短期对比为减量区(图3(b)),分析认为,此区域南部为热带沙漠地区,北部为亚热带沙漠和草原地区,大气气溶胶以沙尘气溶胶影响为主,沙尘暴等沙尘事件的年变化决定此区域AOD的变化特征。伊拉克和叙利亚为此地区AOD绝对量高值且变幅最大区域,AOD年平均 0.55 左右,变化幅度超过 ± 0.25 ,这一结果的形成与地形明显相关。伊拉克和叙利亚位于美索不达米亚平原及其西北部地势较低的地区,东北偏东部有伊朗高原、北部有安纳托利亚高原(小亚细亚半岛)、西南偏西部有阿拉伯高原三面环绕,易于气溶胶累积形成AOD高值(沙尘与人为气溶胶),在天气系统扰动起沙机制或扩散机制作用下,也就会形成较大变幅。

西伯利亚等北半球高纬度地区的气溶胶光学厚度观测数据分布在2—10月。2013年与2014年对比AOD显著减量区(图3(b))位于中西伯利亚高原西部地区,显著增量区位于中西伯利亚高原东部地区;前后5年AOD平均值对比(图3(a))显著增量区位于中西伯利亚高原东部地区和东西伯利亚山地,体现此地区AOD有增加趋势。西伯利亚地区7月左右为生物质燃烧集中期,6—7月区域AOD平均值变化与火点总量变化规律一致(图2(b)),2013年和2014年西伯利亚地区的AOD增、减区域与火点增、减区域对应;2010年后西伯利亚地区生物质燃烧造成AOD增加,中西伯利亚高原东部地区

和东西伯利亚山地区域由2010年前的平均 0.15 显著增加至2010年后的平均 0.25 。西伯利亚东部地区的AOD增加趋势与生物质燃烧相关。

东南亚马来群岛的火山活动是全球最活跃的区域,此处位于环太平洋火山地震带和地中海—喜马拉雅火山地震带的会合处,印度尼西亚苏门答腊岛、爪哇岛、加里曼丹岛及其间爪哇海区域(爪哇诸岛构成的弧—海沟系)火山近400座,129座是活火山。2014年全球火山频发,在爪哇诸岛,1月7日和10月13日有印度尼西亚苏门答腊北部的锡纳朋火山(Mount Sinabung)喷发,2月14日有印度尼西亚东爪哇的克卢德火山(Mount Kelud)喷发,5月30日印度尼西亚桑吉昂(Sangeang Api)火山喷发。此地区5年AOD长期对比为气溶胶光学厚度小幅减量区(图3(a)),而2013与2014年短期对比为全球最大增量区(图3(b)),增量在 0.25 左右,根据10年AOD平均值分布(图1(c))取 0.4 作为火山源区域背景值,此增量的增幅为 62.5% 。火山喷发类的突发极端气溶胶排放事件对区域气溶胶光学厚度的时空分布特性起到决定性作用。爪哇诸岛火山灰覆盖、土壤肥沃,农林生产活跃,森林弃物和农业秸秆焚烧较为普遍,生物质燃烧在火山平静期为AOD明显影响因素^[29,30]。

南美洲北部亚马逊河流域热带雨林地区2003—2012年前后5年长期对比为全球显著减量区(图3(a)),2013与2014年短期对比无明显变化。热带雨林地区为全球植被有机物质气溶胶产生的主要地区,此地区AOD稳定减少,间接说明热带雨林生长状态的变化。研究证明,亚马逊河流域热带雨林是世界上人口密度最低的地区,主要为热带雨林生态系统排放或生成的气溶胶,有机化合物主导大气气溶胶形成,并与云和降水之间存在密切关联^[23];2000年以来,亚马逊热带雨林地区植被长势衰退,大范围区域降水量减少^[24]。此地区气溶胶的同步减少,印证了亚马逊地区生态系统、大气气溶胶和降水机制之间的高度关联性。

中亚咸海地区因始于20世纪60年代的农业水资源利用

不当,造成曾为全球第4大湖咸海的湖水减少,在长期的环境演变中,大范围湖区逐步退化为裸露的滩涂,盐尘和沙尘暴天气随之稳步增加^[31],从而强迫出咸海及周边地区气溶胶稳定增量(图3(a))。加拿大东北部北极区的气溶胶短期增量(图3(b))与此地及邻近地区的夏季生物质燃烧年度变化特征相关度大;此外,2014年冰岛火山多处喷发,冰岛火山灰也可能随大气环流向西远距离传输影响到加拿大北极地区^[32]。印度沿海区域长期对比气溶胶AOD增量(图3(a))与经济发展人为活动有关。

以上分析表明,上述非洲、中国东部和印度半岛,以及阿拉伯地区、马来群岛、西伯利亚地区、亚马逊地区、咸海等地区的气溶胶时空分布及变化的显著特点是气溶胶光学厚度分布特征与源排放强度、稳定性等特性密切相关,同时受到地形和远距离传输影响。

3 中国气溶胶分布特征

中国东部为全球气溶胶光学厚度极端高值区,其形成的主要原因见2.1节,本节讨论各地区气溶胶分布格局及其变化特征。

3.1 空间分布

就中国区域AOD多年及年平均值分布(图4(a)、(b),图5(a)、(b))分析,年尺度气溶胶总量分布格局基本一致。AOD年平均值大于0.5的区域连续分布于华北南部、黄淮、江淮、江汉、江南北部和华南中部,向外延展的区域还有陕西关中地区、华北东北部至东北沈阳地区、渤海和黄海近岸海区;上述区域中有3个大于0.8的独立高值中心区,分别为华北南部和黄淮地区(河北、河南、山东3省交界区域)、长三角地区、江汉地区,3个高值中心区会因气溶胶排放因素和天气因素影响聚合或离散。四川盆地为AOD大于0.5且高值中心超过0.8的独立地区。塔克拉玛干沙漠地区是中国沙尘自然源影响最大的地区,常年有沙尘天气发生,大部分区域AOD年平均值在0.4~0.5,偏东若羌及周边地区高值超过0.5,此高值分布与沙漠下垫面热力作用和沙漠东侧窄地形造成的东风急流起沙机制有关。中国大气气溶胶处于自然背景状态的区域(AOD年平均值小于0.2)主要分布于青藏高原中部和南部、东北至西北边境地区和西北中部地区。其他AOD年平均值在0.2~0.5的地区为气溶胶自然源和人为源弱到中等强度影响区域,这些地区只有存在强的外源输送或两类因素叠合影响的时候,才会出现高气溶胶光学厚度值。

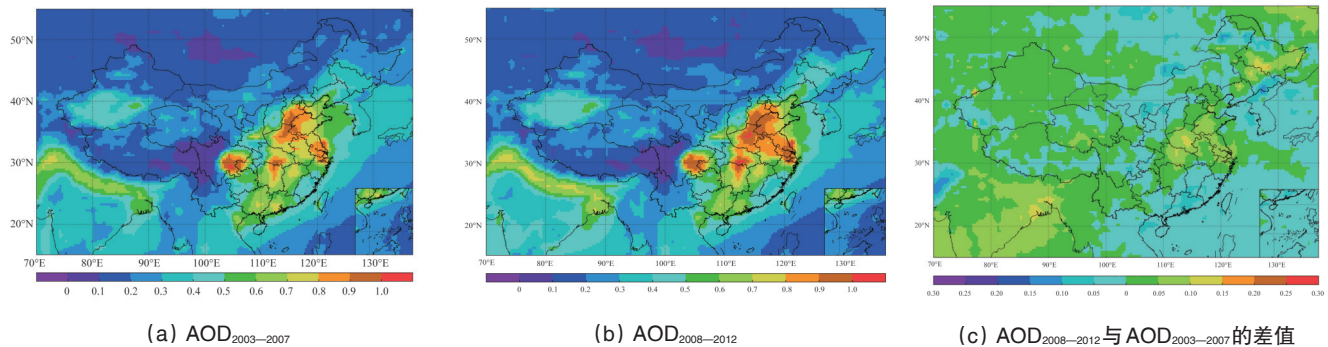


图4 中国区域2003—2007年(前5年)和2008—2012年(后5年)AQUA/MODIS 550 nm AOD 5年平均值全国分布及其差值

Fig. 4 Distribution and the difference pattern of 2003—2007 and 2008—2012 yearly averaged AOD over China

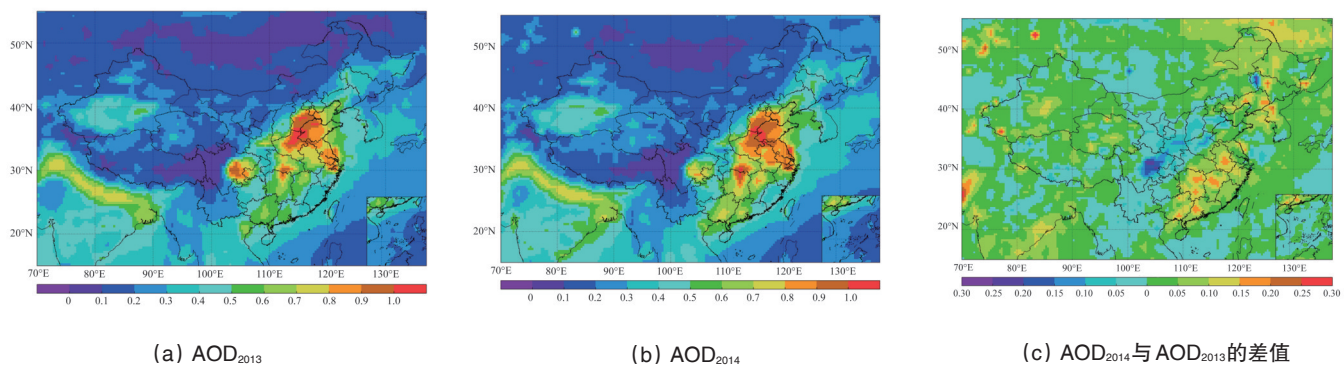


图5 中国区域2013和2014年AQUA/MODIS 550 nm AOD年平均值全国分布及其差值

Fig. 5 Distribution and the difference pattern of 2013 and 2014 annual mean AOD over China

从前后2个5年AOD差值图(图4(c))上可以看出:AOD年平均值少有降低区域,减量在-0.05~-0.1的区域主要位于华南地区,其中珠三角地区为其中心区,珠三角地区的污染控制措施已经显现成效。AOD年平均值增量在0.5~0.15的区域有黄淮、江汉和江淮东部地区,其中增量在0.1~0.15的区域仅见河南中东部,此区域为河南传统农业区,秸秆焚烧烟尘影响造成比邻近地区AOD明显增量的可能性较大;东北黑龙江南部地区增量在0.15左右,此区域增量明显,与人为气溶胶污染、生物质燃烧烟尘相关。

2013和2014年,中国AOD年均值对比变化有3类关键区(图5(c))。1)内蒙古东部和黑龙江西部地区为显著增量区,此增量区增量值分布均匀变化,影响因素主要关注生物质燃烧烟尘扩散和春季沙尘传输。2)东南南部和华北东北部地区增量区,江汉、江南和华南中部的增量区,其增量在0.1~0.2,增量分布带有明显的不均匀性,这2个区域的AOD年变化特征(变幅较大且量值分布不均匀)体现天气因素影响为主;同时,AOD变化通过二次气溶胶吸湿增长的机理揭示了主要污染源的位置,增量超过0.2的增量高值点为二次气溶胶细颗粒污染较高的区域。3)四川盆地在两年AOD对比中为显著减量区,减量在-0.2左右,也因天气因素影响。2014年和2013年显著的天气特征差异是:2013年夏季副热带高压势力较强,长时间控制长江以南地区并造成干旱,副高控制区有良好的扩散条件、水汽含量也低,不利于二次气溶胶累积和吸湿增长,从而形成较常年偏低且相对均匀的AOD分布,最终对比常年形成不连续增量区;2014年,四川盆地夏秋季多雨,常出现连阴雨天气,降雨量较大,湿沉降作用会降低气溶胶在大气中含量,与2013年对比出现显著减量区。AOD短期变化受极端排放事件或天气气候因素影响显著^[33,34]。

3.2 时间变化

提取中国大陆及主要地区AOD年平均值,形成2003—2014年AOD的12年时间序列(图6)。中国各地区12年AOD年平均值的变化幅度在0.25及以内;12年最大AOD变幅区在四川盆地(变幅0.2504),此地区是气溶胶极端高值区之一,人为气溶胶为主,大气湿度条件好;AOD最小变幅区为新疆(变幅0.0631),主要为稳定沙漠地,沙尘气溶胶为主,大气干燥(图6)。中国大陆地区AOD 12年变化曲线(图6、图7)最低波谷年为2004年,天气特征有大范围严重的高温、干旱出现,对应大气可降水低谷年;最高波峰年为2006年,天气特征对应沙尘天气高发年(图7)。分析认为,中国气溶胶光学厚度低值年的出现与大范围严重的高温、干旱年份同步出现,由大气中人为二次气溶胶含量过高造成,大气干燥时二次气溶胶吸湿增长作用减弱,气溶胶以粒子体积的降低影响AOD观测值降低,这一效应的显现同时证明存在高浓度的人为污染二次气溶胶;沙尘天气高发年,沙尘的扩散传输直接推高大气气溶胶总量,AOD出现高值。上述特征应用到分区特征分析上与区域天气特征对应(图6),如华中地区和华南

地区2013年夏季高温干旱带来12年此地区的AOD最低值;2009年全国各地此起彼伏的阶段性的干旱特点对应AOD年平均值的普遍降低现象;东北2004年春季至初夏严重干旱,AOD有最低值,相邻北京、华北等地区也出现12年间AOD最低值;北方沙尘影响区,新疆和东北地区的AOD峰值年对应2006、2010年沙尘天气高发年。

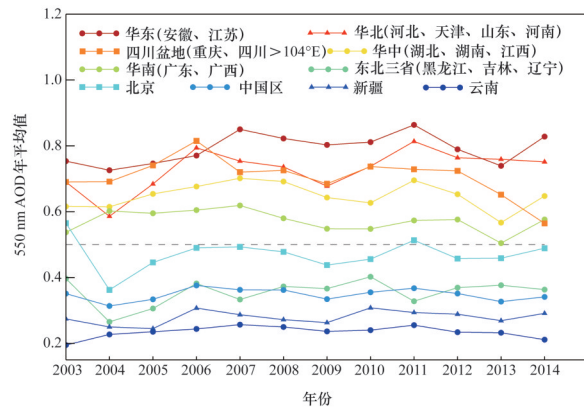


图6 AQUA/MODIS气溶胶AOD 2003—2014年变化
Fig. 6 Variation curves of the annual mean AOD from AQUA/MODIS (2003—2014) in ten regions

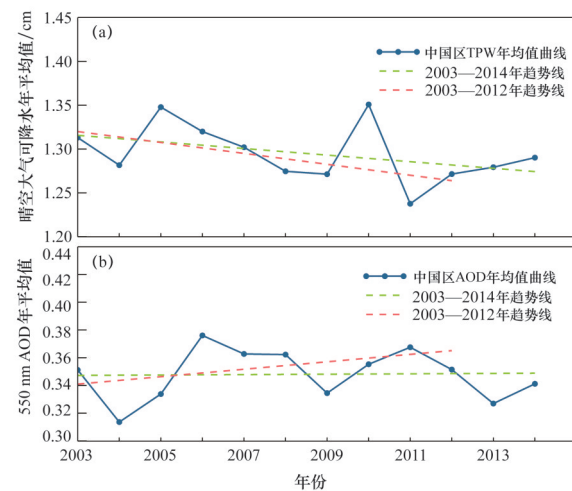


图7 中国大陆区域AQUA/MODIS气溶胶AOD和晴空大气可降水变化及统计回归趋势分析

Fig. 7 Variation curve of the annual mean AOD and TPW from AQUA/MODIS in Chinese mainland and its statistic trend lines

选取中国大陆区域2003—2014年共12年AOD平均值作统计回归的趋势分析(图7(b)),2003—2012年10年数据分析显示AOD有增加趋势;而2003—2014年12年数据分析,AOD显现稳定波动变化特点。原因分析提示,2003年开始中国经济以房地产业为主导,从而构成的产业链生产可影响各类大气气溶胶。由中国统计局国家数据网站(<http://data.stats.gov.cn>)公布的数据表明,12年间经济持续增量发展,国内生产总值(GDP)急剧增加(图8);GDP的增加,对比GDP同比增

长率(图8)、同期能源消费占比的波动变化,可基本表达人为AOD排放量的变化,AOD同比变化趋势(图9)与GDP同比增长率变化相似(图8),都有加强、减弱、加强、减弱的波动变化;2010和2011年能源消费和房地产生产增势与大气气溶胶同比增势的关系明显(图9),尽管2011年大气水汽条件(图7(a))最不利于AOD出现高值,但原始排放的污染物绝对增量促使气溶胶以数密度增加为主,AOD值出现峰值(图7(b)),空气污染加剧。中国大陆地区AOD值受上述人为排放源影响因素和天气不确定性因素共同影响,且因亲水性的二次气溶胶吸湿增长作用二者具有耦合影响作用,所以在无显著的主导因素影响下,统计AOD 12年变化没有一致增或减趋势。

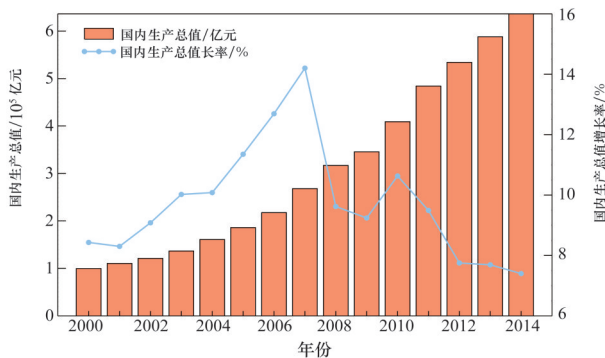


图8 中国国内生产总值及其同比增长率变化曲线

Fig. 8 Variation of gross domestic product of China and its year-on-year growth

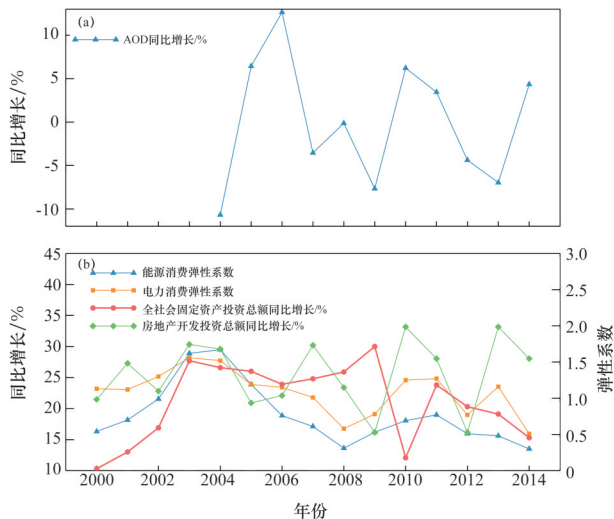


图9 中国大陆区域年平均AOD同比增长率与国内4种经济变化参数的曲线

Fig. 9 Variation curves of AOD growth rate, energy consumption elasticity coefficient, electricity consumption elasticity coefficient, total social fixed asset investment, real estate development and investment growth rate in Chinese mainland

总结经济发展人为排放、自然沙尘源因素和气象的扩散传输、水汽作用因素对区域和整体AOD值的影响特点认为,通过大范围工业生产污染物减排来降低大气中二次气溶胶含量,可显著降低AOD观测值,带来整体环境的改善。

3.3 气溶胶与霾的关系

在全球尺度上讨论气溶胶,气候问题是最为重要的研究内容^[35,36];但中国现实的问题是极端气溶胶高值引发严重的霾天气,对人体健康造成直接危害。这一系列的环境、短期天气、健康问题必须首先得到关注,并科学研究缓解对策。

讨论霾天气,需要区分与之关联的雾和沙尘天。它们的相同点是,同为视程能见度降低型天气现象,以大气粒子米散射消光作用为物理机制;不同之处是造成消光的粒子主要成份及来源不同,以消光参数量值差异表达。雾以自然气象因素形成为主,成份是大气中水的三相态形式之一,液态水滴。水汽、云、雾、降水主要归于气象学研究讨论。沙尘天气(沙尘暴、扬沙、浮尘)发生的自然原因和人为原因基本相当,近10多年中国沙尘天气频发与土地利用、荒漠化进程关系较大。同时,土地利用与工业化和城市化过程同步,也造成人为生产过程向大气排放超过承载自净能力的大量污染物,造成目前霾天气常态化发生,因此霾天气频发人为因素为主^[22,37-40]。沙尘暴、霾这两种极端的大气环境类天气现象特征更加接近,它们均由大气中高浓度的气溶胶造成;不同之处在于沙尘暴是由单一大粒子沙尘气溶胶主导形成,霾是由多源细粒子气溶胶(硫酸盐、硝酸盐、铵盐等)和含碳类吸收气溶胶主导形成。

卫星观测的气溶胶光学厚度主要体现气溶胶总量信息,并且同时反应气溶胶消光能力,所以此观测量与霾天气特征的对应更加直接。2003年以来10年间平均气溶胶光学厚度大于0.4的区域,叠加前后5年气溶胶光学厚度增加0.05以上的区域,主要指向中国东部长江以北地区(图4),包括江汉、江淮、黄淮、华北、西北地区东南部、东北三省,是2013年、2014年多发严重霾天气的区域。其中,AOD年平均值大于0.5的区域为主要霾天气区,AOD年平均值0.4~0.5的区域会因气溶胶传输、季节性、随机性排放源增加出现霾天气。气溶胶AOD高值地区因高耗能型生活和工农业生产带来大量污染物,其中PM_{2.5}细颗粒占比超过50%,在湿度较大的天气,会迅速吸收大气中的水汽而增长,并加剧对太阳光的削弱,从而形成霾天气^[22]。

下面以北京及周边地区为例,说明严重霾天气形成。北京地区的AOD年平均值在0.4左右,易在外源影响下造成轻度及以上霾天气;华北南部及黄淮地区的AOD年平均值超过0.8,为AOD极端高值区,造成中度霾天气常态化出现。当华北及黄淮地区处于天气形势演变期,存在高层天气形势相对稳定、低层大气水汽含量较高且有弱偏南气流将水汽合并工业气溶胶污染物向北输送的形势,太行山脉大地形稳定地阻挡了各类大气成分堆积于北京—石家庄一线地区,如果在夏、秋季的秸秆焚烧期累加随机增加的秸秆焚烧烟尘,将极

易形成石家庄—北京—一线地区的严重霾天气。总结霾天气形成条件为：霾天气是短期人为大气气溶胶含量高值条件下的环境天气事件，严重霾天气的形成以工业等人为排放气溶胶累积极端高值为必要条件，本地气溶胶的高强度排放、气溶胶的异地传输、湿度较大的天气、其他随机排放源的加入、山脉阻挡的堆积作用是形成AOD极端高值的有利条件。

减少霾天气的发生，根本途径是减少大气气溶胶含量。根据气溶胶AOD全球分布特征，分析中国大气气溶胶承载量。首先，提供AOD特征参考量值：以大洋洲、北美洲、欧洲等气溶胶低值区作为自然背景参考，AOD年平均参考值取0.2；附带沙尘等强自然源影响后，以中国西北地区、中亚、东南亚地区作为参考区，AOD年平均参考值取0.35；以中国东部地区人口密度一致、但污染工业较少、强自然源影响较少的中国福建省作为高密度人口生活气溶胶贡献参考区，AOD年平均参考值取0.35。第二，对比上述参考量可拆分出中国东部地区气溶胶来源在AOD年平均值上的基本贡献值，自然背景0.2，沙尘暴等气溶胶自然事件传输影响0.15，人口密度大带来的生产生活需求影响0.15；上述各项累加值为0.5，即为自身需求和自然环境影响叠合的AOD年平均影响量，对应于霾天气易发生区临界值，可作为中国大气环境以AOD年平均值表述的最大承载量。第三，把AOD年平均值超出0.5的部分作为外部需求附加影响量，即是通过工业结构调整来得到改善的部分。中国东部地区AOD年平均值大于0.5的区域中，极端高值参考量为1.0，中段高值参考量0.75，平均值为0.68(图1(c))；据此推算，中国东部过渡承担世界工厂名号以及污染型工业生产所带来的AOD增量占总量的比率，也即气溶胶污染可以通过经济结构调整得到改善的比率为：中位比率 $(0.75-0.5)/0.75$ ，即33%；高值达到 $(1.0-0.5)/1.0$ ，即50%；平均比率 $(0.68-0.5)/0.68$ ，即26.5%。2008年奥运会和2014年APEC会议期间华北地区的短期污染控制评估结果接近中位比率。

4 讨论

气溶胶光学厚度高值区主要代表大气中气溶胶总含量较高。全球大气气溶胶光学厚度主要高值区受稳定的工业排放和人类活动影响、沙漠等沙源地区受持续稳定的沙尘气溶胶影响形成AOD高值、沙尘暴传输影响地区为季节性沙尘影响AOD高值区、生物质燃烧主要为季节性高值影响因素、火山喷发为随机高值影响因素。所以全球大气气溶胶光学厚度分布及变化特征受不同类型气溶胶源单一影响或复合影响，其空间分布及时间变化局地特性明显，除较强的高值地区或单一源影响地区易于说明特征外，气溶胶光学厚度代表的总量分析适宜根据地气系统特点分区分析。以中国气溶胶高值特点分析说明，气溶胶高值的形成主要受以下条件影响：

1) 强或持续的气溶胶排放源(沙尘、工业排放等)。

2) 特定的天气气候背景条件(天气扰动起沙机制；静稳天气气溶胶累积；高湿度条件的二次气溶胶吸湿增长)。

3) 特定的地形条件(山脉等对气溶胶及其前体物扩散传输的阻挡堆积作用)。

上述特征条件在全球其他地区同样适用。中国霾天气的调控，首要控制工业排放的大气污染物，降低各类人为气溶胶在大气中的含量。

5 结论

采用AQUA/MODIS C6版产品序列分析全球及中国地区气溶胶光学厚度分布时空变化，结果表明：

1) 全球气溶胶光学厚度稳定高值区位于亚洲东部及其邻近太平洋海区、印度半岛及其邻近印度洋海区、非洲北部和中部及其邻近大西洋海区。2003—2014年12年间气溶胶光学厚度重点变化区为俄罗斯西伯利亚东部地区(增量区)，南美洲北部亚马逊平原热带雨林地区(减量区)。

2) 气溶胶光学厚度高值地区的形成与沙尘暴、火山喷发、生物质燃烧、工业排放等人类活动造成的自然源和人为源气溶胶排放直接相关，并受天气因素和山脉地形阻挡因素影响，这些因素的稳定性与季节变化最终形成气溶胶分布的时空分布特征。

3) 中国华北、黄淮、江淮、江汉地区和四川盆地为全球气溶胶光学厚度极端高值区，极端高值达到0.8~1.0，是欧洲等大气清洁地区的4~5倍。AOD年平均值大于0.5的区域为主要霾天气区。

4) 中国大气气溶胶变化受人为排放影响因素和天气不确定性因素共同影响，2003—2014年，各区域AOD年变化幅度在0.25以内总体显现稳定波动变化特征。大气中二次气溶胶细颗粒含量高的工业污染地区，因气溶胶吸湿增长作用影响，受天气条件的水汽因素影响显著，AOD变幅较大。因此，减少二次气溶胶细粒子成分在大气中的含量可显著降低AOD值、减少霾天气发生机率，带来整体环境改善。

5) AOD年平均值0.5为自身需求和自然环境影响叠合的最大影响量，也是严重霾天气易发生区临界值，可作为中国大气环境最大承载量的一种参考值，高于此值的区域(霾区)是污染控制的主要区域。在主要污染控制区中，可以通过工业结构调整来得到改善的气溶胶污染中位比率为33%，平均比率为26.5%。

致谢：MODIS气溶胶产品数据来自NASA官方发布<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>；世界地理背景信息部分参考百度百科。

参考文献(References)

- [1] 段婧, 毛节泰. 华北地区气溶胶对区域降水的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(23): 2947-2955.
Duan Jing, Mao Jietai. Influence of aerosol on regional precipitation in North China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(23): 2947-2955.

- [2] Lau K M, Ramanathan V, Wu G X, et al. The joint aerosol-hydrologic cycle interaction: A new challenge to monsoon climate research[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 369-383.
- [3] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297: 2250-2253.
- [4] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(增1): 177-186.
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. Application of aerosol products retrieved by satellite data on the air pollution in Beijing[J]. *Science in China, Series D*, 2007, 35(Suppl 1): 177-186.
- [5] 徐祥德, 丁国安, 卞林根. 北京城市大气环境污染机理与调控原理[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 815-828.
Xu Xiangde, Ding Guoan, Bian Lingen. Beijing air pollution observation experiment[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 815-828.
- [6] 丁国安, 郑向东, 马建中, 等. 近 30 年大气化学和大气环境研究回顾——纪念中国气象科学研究院成立 50 周年[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 796-814.
Ding Guoan, Zheng Xiangdong, Ma Jianzhong, et al. Review of atmospheric chemistry and environment research work in recent 30 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 796-814.
- [7] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, et al. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(6): 847-855.
- [8] 邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 近年来大气遥感研究进展[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 841-853.
Qiu Jinhuan, Wang Pucui, Xia Xiangao, et al. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 841-853.
- [9] Li B, Yuan H, Feng N, et al. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1801-1817.
- [10] 蔡惠文, 杨军, 李晓静, 等. 近 10 年全球气溶胶光学厚度变化特征及其可能原因[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(6): 961-966.
Cai Huiwen, Yang Jun, Li Xiaojing, et al. Characteristics and possible reasons of global trend in aerosol optical depth over the past decade[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(6): 961-966.
- [11] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Yang Jun, Dong Chaohua, Lu Naimeng, et al. Products and application of new serial FY polar orbit meteorological satellite[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [12] de Leeuw G, Holzer-Popp T, Bevan S, et al. Evaluation of seven European aerosol optical depth retrieval algorithms for climate analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 295-315.
- [13] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(1): 159-259.
- [14] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [15] Levy R C, Remer L A, Dubovik O. Global aerosol optical properties and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D13): doi: 10.1029/2006JD007815.
- [16] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance Retrieval of aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D13): doi: 10.1029/2006JD007811:1-21.
- [17] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 中国区域业务 MODIS 陆地区溶胶光学厚度产品质量检验[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 147-156.
Li Xiaojing, Zhang Peng, Zhang Xingying, et al. Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 147-156.
- [18] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度与地面光度计遥感对比[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(增1): 127-135.
Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua, et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(Suppl 1): 127-135.
- [19] 夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高[J]. *科学通报*, 2006, 51(19): 2297-2303.
Xia Xiangao. Aerosol optical depth over land from MODIS was significantly over-estimated[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(19): 2297-2303.
- [20] Li Z, Niu F, Lee K H, et al. Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld sun photometer network in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22): doi: 10.1029/2007JD008479.
- [21] Li B, Yuan H, Feng N, et al. Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth over China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(24): 6519-6529.
- [22] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.
Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [23] Ravindra K, Wauters E, Tyagi S K, et al. Assessment of air quality after the implementation of compressed natural gas (CNG) as fuel in public transport in Delhi, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 115(1-3): 405-417.
- [24] Guttikunda S K, Goel R. Health impacts of particulate pollution in a megacity—Delhi, India[J]. *Environmental Development*, 2013, 6: 8-20.
- [25] Prospero J M, Glaccum R A, Nees R T. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America[J]. *Nature*, 1981, 289: 570-572.
- [26] Barbosa P M, Stroppiana D, Gregoire J M. An assessment of vegetation fire in Africa (1981-1991): Burned areas, burned biomass, and atmospheric emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 933-950.
- [27] Hebrew University of Jerusalem. New model provides more effective basis for biodiversity conservation[N/OL]. *Science Daily*, [2010-09-12]. <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/09/100912084116.htm>.
- [28] Hilker T, Lyapustin A I, Tucker C J, et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(45):

- 16041-16046.
- [29] Voight B, Constantine E K, Siswoidjoyo S, et al. Historical eruptions of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia, 1768-1998[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, 100(1-4): 69-138.
- [30] Field R D, van der Werf G R, Shen S S P. Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(3): 185-188.
- [31] Micklin P. The aral sea disaster annual review of earth and planetary sciences[J]. Earth and Planetary Sciences, 2007, 35: 47-72.
- [32] Davies S M, Larsen G, Wastegård S, et al. Widespread dispersal of Icelandic tephra: How does the Eyjafjöll eruption of 2010 compare to past Icelandic events?[J]. Journal of Quaternary Science, 2010, 25(5): 605-611.
- [33] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 27-36.
Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(1): 27-36.
- [34] 穆穆, 张人禾. 应对雾霾天气: 气象科学与技术大有可为[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 1-2.
Mu Mu, Zhang Renhe. Addressing the issue of fog and haze: A promising way of meteorological science and technology[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(1): 1-2.
- [35] Stothers R B. The great tambora eruption in 1815 and its aftermath[J]. Science, 1984, 224(4654): 1191-1198.
- [36] Handler P. The effect of volcanic aerosols on global climate[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1989, 37(3-4): 233-249.
- [37] 王中挺, 厉青, 李莘莘, 等. 基于环境一号卫星的霾监测应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(32): 775-780.
Wang Zhongting, Li Qing, Li Shenshen, et al. The monitoring of haze from HJ-1[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis March, 2012, 32(32): 775-780.
- [38] 吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 327-330.
Wu Dui. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data[J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(3): 327-330.
- [39] 马国欣, 薛永祺, 李高丰. 珠江三角洲地区的灰霾监控与卫星遥感[J]. 科技导报, 2008, 26(16): 72-76.
Ma Guoxin, Xue Yongqi, Li Gaofeng. Satellite remote sensing for haze monitoring in Pearl River delta region[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(16): 72-76.
- [40] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 680-688.
Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. Temporal and special variation of haze during 1951-2005 in Chinese mainland[J]. Acta Meteorological Sinica, 2010, 68(5): 680-688.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·



尚勇到百度公司调研并出席“科普中国+百度”成果发布活动

2015年7月21日,中国科协党组书记、常务副主席、书记处第一书记尚勇前往百度公司调研,并出席“科普中国+百度”战略合作成果发布活动。

依托百度搜索大数据,通过获取和分析全国网民对科普相关内容的搜索行为,中国科协和百度公司共同发布首份《中国网民科普需求搜索行为报告》。报告显示,2011年到2015年第一季度,科普搜索指数由日均251万增长到700万,前沿技术和能源利用两大主题科普需求持续增长。

中国科协和百度公司共同发布了“智慧+科普”计划,并宣布科普中国百度科学院正式成立,计划通过互联网技术和百度平台,利用百度科学大脑,实现现有科普资源智能化,发展智慧科普,构建科普中国开源生态系统。科普中国百度科学院未来将进一步运用百度大数据、人工智能等领先技术优势,挖掘科普需求,支撑科普工作,以促进信息化与科普深度融合为主线,促进先进信息技术手段在科普中的运用,提升科普服务能力,促进全民科学素质的提高。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16545785.html>。