DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2015.12.2015042701

任团伟, 郭照冰, 刘唯佳.2009—2011 年北京地区大气气溶胶光学特性季节变化规律研究[J].环境化学,2015,34(12):2239-2247 REN Tuanwei, GUO Zhaobing, LIU Weijia. Seasonal variation of atmospheric aerosol optical properties in Beijing during 2009—2011[J]. Environmental Chemistry,2015,34(12):2239-2247

2009—2011 年北京地区大气气溶胶光学特性 季节变化规律研究*

任团伟^{1,2,3} 郭照冰^{1**} 刘唯佳^{2,3}

(1.南京信息工程大学环境科学与工程学院,南京,210044; 2.南京信息工程大学大气物理学院,南京,210044;3.中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京,210044)

摘 要利用 AERONET 北京站 2009—2011 年气溶胶地基反演资料,分析了该地区气溶胶光学特性的季节 变化特征.结果表明,不同季节大气气溶胶光学厚度(AOT)、Angstrom 波长指数(α)具有不同的日变化规律, AOT 的变化受当地气溶胶人为排放、大气稳定度条件、大气辐射等因素的影响较大,因太阳辐射的影响,α 在 午后存在高值或有略微增加的趋势.AOT 具有明显的季节变化特征,主要表现为春、夏季大,秋、冬季小,与北 京地区温带季风气候特点有关.AOT 年均值为 0.63.α 在四季中均表现为单峰型结构,春季受沙尘粒子不连续 性导入的影响,α概率分布最宽,值最小,标准差最大,α<0.5 的概率超过 10%,粗粒子在四季中占比最多.夏、秋两个季节 α 均值>1.1,属于典型的城市-工业气溶胶粒子.4 个季节 α 值均大于 0.9,年均值为 1.07,表明北京 地区以气溶胶细粒子为主.水汽柱含量具有明显的季节变化,与降水量具有相同的变化规律,夏季最多达 2.33 cm,冬季最少仅有 0.3 cm,春、秋季次之.

关键词 AERONET, 大气气溶胶光学厚度(AOT), Angstrom 波长指数, 光学特性, 北京地区.

Seasonal variation of atmospheric aerosol optical properties in Beijing during 2009—2011

REN Tuanwei^{1,2,3} GUO Zhaobing^{1**} LIU Weijia^{2,3}

School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China;
 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China;
 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing, 210044, China)

Abstract: Using on the ground-based aerosol retrieval data of AERONET from 2009 to 2011, the seasonal properties of aerosol optical properties in Beijing were analyzed. Our study indicates that the aerosol optical thickness (AOT) and Angstrom exponent (α) had quite different daily variations in different seasons. Daily average AOT is mainly affected by local aerosol emission, atmospheric stability condition as well as solar radiation. α had a maximum value or exhibited a slight increasing trend after mid-day. The AOT showed significant seasonal variation, and increased in spring and summer while declined in autumn and winter with an annual average of 0.63. The seasonal variations are related to the typical characteristics of the monsoonal climate in Beijing. The α displayed a single peak in all seasons. Because of the discontinuous emission of dust aerosol in spring, α had widest probability distribution with maximum standard deviation and minimum value. The probability of α > 0.5 exceeded 10%, which indicates that coarse particles accounted for the largest fraction during the

²⁰¹⁵年4月27日收稿.

^{*}国家自然科学基金(41373023);江苏省环保科研课题(2014t016)资助.

^{**}通讯联系人, E-mail:guozbnuist@163.com

whole year. α became greater than 1.1 in summer and autumn, due to the typical urban-industrial aerosols during these two seasons. Furthermore, both seasonal average (greater than 0.9) and annual average (1.07) of α indicate that aerosols in Beijing are dominated by fine particles throughout the whole year. Column content of water vapor showed clear seasonal variation, which is the same as that of the precipitation. It increased to a maximum value of 2.33 cm in summer and decreased to a minimum value of 0.30 cm in winter, the values of spring and autumn varied between the two. **Keywords**: AERONET, aerosol optical thickness (AOT), Angstrom wavelength exponent, optical properties, Beijing.

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系,虽然在大气中含量很低,但气溶胶所产生的直接与间接气候效应会改变地球-大气系统的辐射平衡过程^[1-2];气溶胶还可以改变大气化学过程^[3-7],进而影响温室气体的浓度和分布^[8].研究表明,气溶胶作为地气系统中一个重要的辐射强迫因子,目前对其时间和空间变化情况以及宏、微观特性还缺乏充分了解^[9-10],使之成为当前气候模拟与预测中一个极不确定的因素,其产生的辐射强迫仍难以准确估计.因此,以理论研究和实验研究为基础,通过地基观测手段来获取大气气溶胶的信息仍然是十分必要的.

大气气溶胶光学厚度(AOT)和 Angstrom 波长指数(α)是描述大气气溶胶光学特性及评估气溶胶辐射强迫的两个最基本的参数,也是推算气溶胶含量、评估大气污染程度、研究气溶胶气候效应的关键因 子^[11-13].对气溶胶光学厚度、Angstrom 波长指数等光学特性参数的获取主要集中在以下 4 个方面:窄波 段太阳光度计、卫星测量技术、包括激光雷达在内的雷达技术、地表辐射资料与当地探空气象资料^[14-15].

迄今为止,在地基遥感方面较为先进的就是 AERONET(Aerosol Robotic Network)监测网,AERONET 通过在典型地区建立长期的地面监测站,利用法国 CIMEL 公司生产的 CE318 型太阳光度计来获取太阳 辐射资料,其丰富的信息含量,相对比较成熟的反演理论在建立符合局地情况的大气气溶胶动态模式、 分析具有区域代表性的大气气溶胶理化和光学特性等情况、为辐射传输模式提供更为准确的参量、为评 估气溶胶对气候的影响等方面提供了一个良好的契机,使其在气溶胶研究中具有不可替代的作用^[16]. 通过该观测网所提供的反演产品为分析区域大气成分的光学特性提供了便利.目前,利用地基遥感观测 方式对北京地区大气气溶胶光学厚度等光学特性参数的研究已取得了一些成果^[17-20],这些成果为研究 气溶胶光学特性的变化提供了思路,但对于气溶胶光学厚度、Angstrom 波长指数在不同季节的日变化研 究仍比较少,而它们的日变化对订正卫星观测的气溶胶数据及辐射强迫的计算具有重要意义^[21-22].

本文基于 AREONET 提供的北京地区 3 年(2009—2011)的气溶胶光学特性反演资料,分析了该地 区气溶胶光学厚度、Angstrom 波长指数等光学特性参数在不同季节的变化规律,这对今后研究中国北方 地区城市大气气溶胶的光学特性及其辐射效应具有一定的借鉴作用^[12,17];这些光学特性参量作为揭示 气溶胶尺度、模态及其理化特征的重要参量,对研究我国北京地区气溶胶的气候效应具有重要意义,同 时也为城市大气污染的监测及治理提供经济而便捷的参考依据^[23-25].

1 站点、仪器及数据介绍

北京属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,春季多风,夏季炎热潮湿,占约全年70%的降水量; 秋季晴朗温和,冬季干冷.AERONET 气溶胶监测网提供全球不同地域的气溶胶反演产品,本文选取的北 京站观测点(39.98°N,116.38°E,高度92m)位于中国科学院大气物理研究所楼顶,受周围人为排放污 染源(如汽车尾气等)的影响较大,该站获取的数据可代表北京城市地区光学特性的一般特征.

观测中主要使用的仪器为 CE318 型太阳光度计,为法国 CIMEL 公司制造的一种具有自动跟踪扫描 功能的太阳光度计,在可见光至近红外波段有 8 个光谱通道(1020、870、675、500、440、936、380、 340 nm)^[26],该光度计可在这些波段获取太阳直接辐射测量,利用宽带消光测量法等反演算法可计算晴 空大气少云条件下不同波长(440、675、870、1020 nm)处的 AOT^[24,27].Angstrom 波长指数(α)则通过 440、 670、870 nm 的 AOT 值反演得到,936 nm 波长通道则用来获取以厘米为单位的水汽柱含量^[15].此外,通 过该光度计获得的辐射信息及相应的反演算法还能计算如单次散射反照率、不对称因子、相函数等其他 光学特性参数^[14].

该观测网提供的数据分为3个级别:level 1.0 level 1.5和 level 2.0,分别代表了原始数据、经过云处 理数据、经过前后视场校准和云处理的人工检查保证质量的数据,本文对北京站2009—2011年 level 2.0 级别的气溶胶反演产品进行了分析,只选取1d中大于10次观测数据的日期,样本共计647d,春夏秋 冬4个季节选取的样本天数依次为195、127、125、200d.再分析资料来自美国国家海洋和大气管理局, 降水和温度资料来自国家气候中心.

2 结果与讨论

2.1 风场、气温及降水量季节变化

北京属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,不同季节风场、温度和降水有较大差异.表1给出 了 1961—2010 年北京地区月平均气温及降水量情况.从表1 中可以看出,温度和降水表现出明显的季 节变化特征:夏季最大,冬季最小,春、秋次之.利用 NOAA 提供的再分析风场资料计算了北京地区这 50 年850 hPa平均风场,北京地区 850 hPa平均风速约在 4—6 m·s⁻¹,春、秋季节盛行西风,春季我国西 北及内蒙中部地区沙暴活动较为频繁^[28-29],在沿途没有降水发生的情况下,沙漠源区的沙尘粒子则可以 通过西风的输送到达其下游的北京地区^[28],再加之北京地区春季降水偏少,季节均值仅为 22 mm,缺少 雨除机制,导致该地春季沙尘天气多发,并主要以扬沙和浮尘天气为主^[30-31].夏季盛行南风,为北京地区 带来了暖湿气流,提供了充沛的水汽,降水增多,7、8 月平均降水量在 150 mm 以上,空气湿度大且气温 高,空气中的部分气溶胶粒子在湿热的环境下容易吸湿增长.秋季经历了雨季后西北地区地表相对湿 润,在一定程度上抑制了沙尘天气的发生,因此秋季西北地区向北京输送沙尘粒子的能力被大大削 弱^[32],此时气溶胶粒子主要来自于局地排放.冬季则盛行西北风,气温低,月均值 0 ℃以下,常有冷空气 活动,但由于冬季供暖,本地人为排放的气溶胶粒子不能忽视,加之冬季在冷空气过境前大气层结多保 持稳定,大气中的气溶胶粒子不易扩散,因此北京地区冬季是雾霾高发的一个时期^[33].以上分析表明, 北京地区具有显著的半湿润大陆性季风气候的特点.

	Table 1	Monthly	average (or temper	ature and	precipit	ation in I	seijing ov	er 1901-	-2010		
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水/mm	2.84	5.36	9.50	24.32	32.46	71.7	168.20	155.16	48.04	23.32	7.78	2.38
温度/℃	-3.68	-0.78	5.92	14.09	20.36	24.53	26.34	25.09	20.16	13.14	4.63	-1.76

表1 1961—2010年北京月平均气温及降水量

1041

2.2 大气气溶胶光学厚度、Angstrom 指数日变化规律

大气气溶胶光学厚度(AOT)是描述气溶胶粒子对太阳光衰减程度的一个物理量,它能够表征大气的清洁程度,AOT 值越小,代表大气越清洁^[34].Angstrom 指数(α)是衡量粒子尺度的一个重要参数,表征 垂直气柱内气溶胶质粒的谱分布^[35],其值越大代表气溶胶粒子尺度越小.

北京地区不同季节的 AOT、α具有不同的日变化特征,本文对 2009—2011 年四季晴空少云天气条 件下 AOT 和 α 日变化情况进行了统计,为了清晰地描述 AOT、α 的日变化规律,现以小时平均为基础, 给出了 07:00 至 17:00 时段(冬季到 16:00)内 AOT 和 α 的日变化情况(图 1).研究表明,AOT 在不同波 段处的变化趋势大体一致,且 440 nm 波长处的变化最为显著^[34],故下文中均以 440 nm 处的 AOT 进行 讨论,Angstrom 波长指数则采用 440 nm 和 870 nm 的反演结果 α.

从图 1(a)可以看出,四季的 AOT 具有不同的日变化规律.除冬季外,其余三季都在 08:00—10:00时 保持上升趋势或存在一个高值,这与人类活动密切相关,该时间段为早班出行高峰期前后,因汽车尾气 等排放的污染颗粒物逐渐增多并快速累积,导致 AOT 增大^[14].春季 AOT 的日变化不大,各个时次 AOT 值均在 0.51—0.58 之间变化,在 16:00 时有一个高值出现,该高值可能与沙尘粒子的导入有关,研究表 明,华北地区沙尘活动初始时刻的峰值主要出现于当地午后 14:00—16:00^[36],结合春季 16:00 的α值 (最小),说明此时的气溶胶粒子尺度较大,也可佐证这一时次 AOT 的增大可能与沙尘粒子的导入有关. 夏季 AOT 在 09:00 左右达到高值后下降,这可能是因为太阳辐射的加热作用,夜间稳定边界层结构逐渐 被打破,气溶胶粒子得以扩散,大气中气溶胶粒子含量的降低使 AOT 下降^[37].在午后 AOT 呈波动式发 展,因太阳对地表和空气加热效率的不同,在午后边界层内形成了上冷下暖的结构,因湍流摩擦的输送 作用将地面的气溶胶粒子带入大气^[38],这种变化趋势在夏季午后较为常见.秋季 AOT 呈现单峰型结构, 在 11:00 时达到最大,达到高值的时间要比春、夏两季时间延后.冬季 AOT 的最大值出现在16:00时,这 与冬季的气象条件有关.研究表明,冬季太阳辐射的加热作用较弱,北京地区在没有冷空气活动时,边界 层内经常保持静稳状态,因供暖释放的气溶胶粒子尺度较小不易沉降且向上扩散,因此气溶胶粒子浓度 随时间逐渐累积,AOT 增大^[14].由此可见,AOT 的日变化受当地气溶胶人为排放、大气稳定度条件、大气 辐射等因素共同影响.



图 1 AOT(a)、α(b)日变化曲线(7:00—17:00) Fig.1 Daily variation of aerosol optical thickness (a) and Angstrom exponent (b)(7:00—17:00)

春季 α 大致呈下降趋势,表明粒子尺度随时间逐渐增大,夏季则刚好相反,α 随时间呈现递增的变 化趋势,说明粒子尺度随时间逐渐减小.冬季 α 粒子呈现减小-持平-增大的变化趋势,秋季则在午后达到 最大.4 个季节 α 在 13:00 左右都存在一个高值或保持上升的趋势,研究表明,这种变化规律与太阳辐射 有关,一般太阳辐射越强烈,伴随产生的新的气溶胶细粒子就越多,造成 α 的小幅上升,这种情况在中午 或午后表现得比较明显.Xia^[39]对北京地区 2001—2004 年的不同季节的 α 日变化规律进行了统计,同样 发现 α 在午后也有类似的变化规律.此外,本文还计算了 α 在各时次偏离日平均值的百分比,四季 α 偏 离平均值的范围均在±10%范围内,其中变化范围最大的是春季(-7.4%—4.8%),该结果与 Xia^[39]得出 的结论一致,银川地区 4 个季节 α 的变化范围在±30%之间,显然银川地区气溶胶粒子尺度的日变化要 比北京地区大得多,这主要与银川地区气溶胶的复杂成分及当地的气候条件相关^[38].

3.3 季节变化及概率分布规律

水汽柱含量代表大气中水汽的相对含量,揭示大气的湿润程度^[23,34],与降水量具有相同的变化趋势.表2给出了北京大气气溶胶光学厚度(AOT)、Angstrom 波长指数(α)及水汽柱含量(water)的季节平均值及标准差(σ).从表2中可以看出无论是气溶胶光学厚度、Angstrom 指数还是水汽柱含量都具有明显的季节差异,这与上文提到的北京地区温带季风气候特点有关.

从表 2 中可以看出,北京地区光学特性主要有以下特点:(1) AOT 季节均值表现出春、夏季增大, 秋、冬季减小的特点,春、秋两季节相差不大,夏季最大(0.87),冬季最小(0.51).这与章文星^[40]研究的 1999 年北京地区 AOT 的季节变化规律相同;北京地区 2001—2004 年 AOT 春、夏、秋、冬的均值分别约 为 0.86、0.92、0.67、0.50,也表现出了类似的变化规律,但本文计算的结果与之比较整体略低一些^[39].此 外,四季 AOT 的σ均比较大,说明 AOT 的日均值差异较大.(2) Angstrom 波长指数则表现为冬、春季节 小,而夏、秋季节大,其中夏季最大,春季最小数值不足 1.α 在 0.98—1.21 之间变化,这与 Fan^[16]等计算 的 2001—2005 年北京地区 α季节均值(0.99—1.3)的结果十分接近且变化规律保持一致.α 的标准差在 春季最大,其原因将在下文中讨论.(3)水汽柱含量在夏季最大,达到 2.33 cm,冬季最小,仅有0.30 cm, 且水汽柱含量越大的季节,其σ也越大,这可能与北京地区的气候特点有关.

							•
季节	日均值样本数	AOT	$\sigma_{ m AOT}$	α	σ_{lpha}	水汽柱含量/cm	$\sigma_{ m km{ imes}tm{ imes}}$
春	195	0.63	0.51	0.98	0.35	0.77	0.47
夏	127	0.87	0.76	1.21	0.27	2.33	0.68
秋	125	0.61	0.71	1.15	0.27	1.02	0.58
冬	200	0.51	0.57	1.02	0.29	0.30	0.15

表 2 大气气溶胶光学厚度、Angstrom 波长指数 (α)、水汽柱含量季节平均值及标准差(σ) Table 2 Seasonal average and the associated standard deviation of AOT, Angstrom exponent(α), water vapor content

AOT 季节均值的次大值出现在春季,而春季 α 在所有季节中最小,但其 σ 却最大,达到 0.35,表明 北京地区春季气溶胶粒子消光性较强且尺度变化很大.春季来自沙尘源区的沙尘粒子会在盛行西风的 输送作用下到达其下游的北京地区,使粗粒子在大气中所占的比重较其他季节大幅增加, α 值下降,因 此春季 α 最小.但这些沙尘粗粒子并非是连续导入的,只有在沙尘活动明显或者在沙尘暴发生期间 α 值 才会显著下降^[41],且持续时间一般不会太久.研究表明,沙尘粒子的 α <0.5^[42],而文中计算的春季 α 均 值接近 1,表明春季大部分 α >0.5,因此,粗粒子的"间歇性"导入,使 α 在所有季节中变化(σ)最大.沙尘 粒子的消光性很强,使 AOT 值维持在一个高值^[41].春季水汽柱含量仅为 0.77 cm,不足夏季的 1/3,则气 溶胶细粒子仅靠吸湿作用是很难增长成大粒子的.AOT、 α 、水汽柱含量季节均值的最大值都出现在夏 季,分别 0.87、1.21、2.33 cm.研究表明,当 α >0.9 时,气溶胶的主控粒子是细粒子^[34],由此可见北京地区 夏季以气溶胶细粒子为主,而城市、工业气溶胶 1.1 $\leq \alpha \leq 2.4^{[24]}$,夏祥鳌等^[9]指出北京地区人为排放的 气溶胶粒子是导致气溶胶光学厚度偏高的一个重要原因.这些在城区因工业、交通等排放的细粒子中含 有较多的硫氧化物和氮氧化物,夏季水汽柱含量达 2.33 cm,大气中水汽充沛,加上较强的太阳辐射,这 些吸湿性粒子经气粒转化过程变成硫酸盐和硝酸盐的速率加快^[43],这些二次气溶胶粒子具有很强的消 光性,同时,吸湿性粒子在湿热的条件下也易吸湿增长粒径增大^[12,19],消光能力进一步增强,使得夏季 气溶胶粒子的消光现象明显,AOT 增大.

秋季北京地区逐渐受来自西北相对干冷的高压天气系统影响,晴好天气较多,加之水汽含量较低, 这种特殊的天气条件导致气溶胶光学厚度要小于夏季^[12].冬季大气气溶胶光学厚度、水汽柱含量的季 节平均值最低,但是 Angstrom 波长指数仍在1以上,说明北京地区冬季以细粒子为主,这可能与北京地 区冬季供暖化石燃料的燃烧,会向大气中释放大量烟尘细粒子有关^[44].

为了更加清晰地描述北京地区四季气溶胶质粒的变化情况,图 2 分析了 AOT、α 的日均值概率分布 情况.从图 2 中可知,四季 AOT 值主要集中在 1.6 以下,春季有 6%的 AOT>1.6,沙尘粒子的消光对光学 厚度的贡献明显.春季 AOT 日均值有近 50%集中在 0.2—0.6 范围内,与春季季节均值有很好的对应关 系.夏季相对于其他季节而言,光学厚度的分布较宽,分布在 0—3.6 之间,夏季 AOT 超过 15%的值高于 1.6,在四季中所占的比重最大,这与文中提到夏季高温、高湿的条件易使粒子吸湿增长,导致 AOT 维持 在高值有关.秋、冬季节 AOT 的分布较窄,且主要集中在小值区域,分别有 69.3%和 75.5%的值介于 0— 0.6 范围内,但与 2001—2005 年秋、冬两季 AOT 几乎没有极大值的结果不同^[16],本文秋、冬季节偶尔也 会出现 AOT 的极高值,有时甚至在 3 以上,研究表明,近几年来北京面临着日益严峻的雾霾问题,因城 市供暖及交通运输,向大气中排放大量的气溶胶粒子,加之这两季节较容易出现静稳天气,尤其是冬季 夜间辐射降温明显,形成逆温层结,不利于污染物的扩散,污染浓度的累积易使 AOT 偶尔出现极端高值 的状况^[45],但当有冷空气活动时大气中的气溶胶粒子得以快速扩散、清除,AOT 又恢复到小值状态.

α指数频率分布呈现明显的单峰型特征,且四季的α值大部分集中在1.2—2.0之间,春季α小值(<0.5)所占的比重最大,约占10.3%,该范围内α所对应的粒子通常为沙尘粒子^[41],夏、秋、冬季分布在该范围的概率分别为3.2%、3.2%、6.5%.与沙源附近的敦煌地区相比^[38],无论哪个季节,敦煌α<0.5的概率均在70%左右,表明在沙源区附近地域全年受沙尘粒子的影响较大,而较远的北京地区只有在春季受到沙尘粒子影响的作用才较为明显.四季中α出现频率最高均在1.2—1.4之间,分别占总数的12.3%、

21.3%、22.4%、19.5%.这与杭州地区的 α 最高频率出现的范围基本吻合^[46].经计算年平均 α 值维持在 1.1—1.7 之间的概率约为 67.1%,α 主要集中在该范围内,说明北京气溶胶粒子主要为城市-工业气溶胶 细粒子,这个值要低于上海浦东(79%)α 在该范围内的概率^[47],但与太湖(70%)接近^[48],表明气溶胶 光学特性具有局地性.







3.4 日均值年变化情况分析

图 3 分别绘制了从 2009 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日 440 nm 波长处的 AOT、Angstrom 指数 (α)、水汽柱含量日均值的年变化,图 3 中的水平方向虚线代表 2009—2011 年平均值.从图中可以看出,

北京地区光学特性参数日均值年变化主要表现为以下几个特点:(1)图 3(a)中 AOT 的年平均值为 0.63,小于 2011—2012 年杭州市 AOT 年均值^[46],约有 70%的 AOT 的日均值都在年平均值以下,AOT 的 高值(AOT>1.6)在全年中出现的概率约占 7.3%,春、夏、秋、冬季分别出现的概率为 6.2%、18.9%、8%、 3%,可见北京地区在全年均有一定比例的 AOT 高值出现,这与大多数 AERONET 欧美站点观测到的 AOT 高值往往只在特定的季节出现有很大不同,比如,巴西和南非地区 8、9 月份因生物质燃烧、美国夏 威夷海岸春季因亚洲气溶胶粒子的远程输送引起 AOT 高值^[49].通过前文分析可知,一般来说,北京地区 AOT 高值出现表明该观测时段内可能有沙尘、雾霾天气发生.(2)α的年平均值为 1.07,α 的小值(<0.5) 在一年中所占的比例不足 7%,表明北京地区全年气溶胶粒子仍以细粒子为主.因春季受沙尘粒子输送 的影响,α 的小值多集中在春季,α<0.5 的概率在该季节约占 10%左右.(3)水汽柱含量年均值为 0.98 cm,它表现出明显的季节变化,水汽柱含量日均值在一年内先增加后减小,与一年中降水的分布情 况类似,水汽柱含量最大值出现在夏季雨季,为气溶胶粒子吸湿增长提供了可能,而在其他季节水汽柱 含量均偏低,因此很难以这种途径使粒子粒径增大.



图 3 大气气溶胶光学厚度(AOT)日平均值(a)、Angstrom 指数(α)日平均值(b)、水汽柱含量日平均序列(c)
 Fig.3 Daily average of AOT(a)、Angstrom exponent(α)(b)、water vapor content(c)

3 结论

(1)北京不同季节大气气溶胶光学厚度和 Angstrom 波长指数具有不同的日变化特征,气溶胶光学 厚度值的变化受当地气溶胶人为排放、大气稳定度条件、大气辐射等因素的影响.因太阳辐射作用,α在 午后存在高值或有略微增加的趋势.

(2) AOT 具有明显的季节变化特征,这与北京地区温带季风气候特点有关.主要表现为春、夏季大、秋、冬季小的特点.春季因受来自沙漠地区的沙尘气溶胶粒子的影响,AOT 值较大.夏季充沛的水汽令气 溶胶粒子易吸湿增长,AOT 值最高,概率分布最宽.秋、冬季 AOT 都较小,主要集中在小值区,但偶尔有 AOT 的大值出现,可能与雾霾天气的出现有关.AOT 含量年均值为 0.63.

(3)α在四季中均表现为单峰型结构,春季因沙尘粒子非连续性导入的影响,α概率分布最宽,值最小,标准差最大,α<0.5的概率超过10%,在四季中占比最多.夏、秋两季α均值>1.1,属于典型的城市-工业气溶胶粒子.4个季节α均值大于0.9,全年中α<0.5不足7%,α年均值为1.07,表明北京地区以气溶胶细粒子为主.

(4)水汽柱含量具有明显的季节变化特征,与降水量具有相同的变化规律,夏季最多达 2.33 cm,冬季最少仅有 0.30 cm,春、秋季次之,水汽柱含量的变化表明,只有在夏季丰富的含水量才能为粒子吸湿膨胀提供条件.

参考文献

- [1] 石广玉, 王标, 张华,等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4):826-840
- [2] 罗云峰,周秀骥.大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状[J].地球科学进展,1998,(6):572-581
- [3] 郭照冰, 陈天蕾, 陈天, 等. 香河地区大气气溶胶中水溶性离子观测及分析[J]. 环境化学, 2010, 29(4): 764-765
- [4] 徐宏辉, 刘洁, 王跃思, 等. 临安本底站大气气溶胶水溶性离子浓度变化特征[J]. 环境化学, 2012, 31(6): 696-802
- [5] 陈永桥, 张逸, 王章玮, 等. 北京市不同区域大气气溶胶粒子中水溶性离子的特征[J]. 环境化学, 2004, 23(6): 674-680
- [6] 于国光,王铁冠,朱先磊,等.北京市西北郊大气气溶胶中多环芳烃的源解析[J].环境化学,2008,27(2):245-250
- [7] 王开燕,张仁健,王雪梅,等.北京市冬季气溶胶的污染特征及来源分析[J].环境化学,2007,25(6):776-780
- [8] 宋薇,张镭.大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J].干旱气象,2007,25(3):76-81
- [9] 夏祥鳌,王普才,陈洪滨,等.中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究[J].遥感学报,2006,9(4):429-437
- [10] 王静, 牛生杰, 许丹, 等. 南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性[J]. 中国环境科学, 2013 (2): 201-208
- [11] 张玉洁,张武,陈艳,等.黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析[J].高原气象,2009,27(6):1416-1422
- [12] 赵胡笳. 中国东北城市地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射效应研究[D]. 北京:中国气象科学研究院博士学位论文, 2014
- [13] 韦莲芳,杨复沫,谭吉华,等.大气气溶胶消光性质的研究进展[J].环境化学,2014,33(005):705-715
- [14] 刘玉杰,牛生杰,郑有飞.用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J].大气科学学报,2004,(5):615-622
- [15] 毛节泰, 王强, 赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测[J]. 气象学报, 1983, 41(3): 322-331
- [16] FAN X, CHEN H, GOLOUB P, et al. Analysis of column-integrated aerosol optical thickness in Beijing from AERONET observations [J].
 China Particuology, 2006, 4(6): 330-335
- [17] 车慧正,石广玉,张小曳.北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究[J].中国科学院研究生院学报,2007,24 (5):699-704
- [18] 李放, 吕达仁. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征[J]. 大气科学, 1996, 20(4): 385-394
- [19] 许万智.北京地区气溶胶光学特性与辐射效应的观测研究[D].北京:中国气象科学研究院博士学位论文, 2012
- [20] 张玉香, 胡秀清. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(U01): 136-143
- [21] SMIMOV A, HOLBEN B N, ECK T F, et al. Diurnal variability of aerosol optical depth observed at AERONET (Aerosol Robotic Network) sites[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(23): 301-304
- [22] SLUTSKER I, SMIMOV A. Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties? [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(23): 3861-3864
- [23] DUBOVIK O, HOLBEN B, ECK T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(3): 590-608
- [24] 王跃思,辛金元,李占清,等.中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测 (2004-08-2004-12) [J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1703-1711
- [25] YU X, ZHU B, FAN S, et al. Ground-based observation of aerosol optical properties in Lanzhou, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(11): 1519-1524
- [26] 杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. CE318 型太阳光度计标定方法初探[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 297-306
- [27] 黄红莲,易维宁,乔延利.基于太阳辐射计的气溶胶光学特性反演算法研究[J].大气与环境光学学报,2012,7(3):175-177
- [28] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106-111
- [29] 杨艳, 王杰, 田明中, 等. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 465-472
- [30] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴和扬沙天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 9-17
- [31] 张小玲, 王迎春. 北京地区沙尘暴天气分析及数值模拟[J]. 干旱气象, 2001 (2): 9-13
- [32] 陶健红. 西北地区沙尘天气的气候特征及其影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学博士学位论文, 2007
- [33] 周涛, 汝小龙. 北京市雾霾天气成因及治理措施研究 [J]. 华北电力大学学报: 社会科学版, 2012, 2: 12-16
- [34] 于兴娜, 李新妹, 袁帅. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1057-1062
- [35] 章澄昌,周文贤,大气科学.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995
- [36] 吴占华,任国玉.我国北方区域沙尘天气的时间特征分析[J].气象科技,2007,35(1):96-100

- [37] 齐冰. 杭州地区霾特征及气溶胶物理特性观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2008
- [38] 刘建军,郑有飞,吴荣军. 近沙尘源区气溶胶光学特性的季节变化及其统计学描述[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 174-182
- [39] Xia X A, CHEN H B, WANG P C, et al. Variation of column integrated aerosol properties in a Chinese urban region [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111, D05204
- [40] 章文星, 吕达仁. 北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 495-500
- [41] 于兴娜,张慧娟,康娜.沙尘源区与下游地区沙尘期间气溶胶光学特性分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1710-1715
- [42] TANRE D, KAUFMAN Y J, HOLBEN B B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum [J]. Geophys Res, 2001,106:18205-18217
- [43] WATSON J G, CHOW J C, LURMANN F W, et al. Ammonium nitrate, nitric acid, and ammonia equilibrium in wintertime Phoenix, Arizona[J]. Air & Waste, 1994, 44(4): 405-412
- [44] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 826-834
- [45] 曹伟华,李青春.北京地区雾霾气候特征及影响因子分析[C].中国灾害防御协会风险分析专业委员会.风险分析和危机反应的 创新理论和方法——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集,2012,7
- [46] 齐冰, 杜荣光, 于之锋, 等. 杭州市大气气溶胶光学厚度研究[J]. 中国环境科学, 2014 (3): 588-595
- [47] PAN L, CHE H, GENG F, et al. Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(21): 2587-2596
- [48] 饶加旺,马荣华,段洪涛,等.太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析[J].环境科学,2012,33(7):2158-2164
- [49] HOLBEN B N, SMIMOV A, ECK T F, et al. An emerging ground-based aerosol climatology- Aerosol optical depth from AERONET[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D11): 12067-12097.