

文章编号 1004-924X(2012)06-1166-09

中国部分典型地区气溶胶光学特性观测

李建玉^{1,2}, 魏合理^{1*}, 徐青山¹, 詹杰¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:利用 DTF 型太阳光度计在我国几个典型城市地区较长期观测得到的资料, 分析了不同地区气溶胶光学厚度日变化和季节变化特征, 得到了各地区观测期间日均值、月均值和季节值的变化。结果显示, 观测期间丽江地区气溶胶光学厚度最小, 大气较洁净, 大气中以细粒子为主; 其次是张北; 喀什和合肥地区气溶胶光学厚度都较大, 但喀什、张北多以粗粒子为主, 合肥多以细粒子为主。各地区都在春季气溶胶光学厚度较大, 冬季最小。喀什的气溶胶光学厚度值多集中在 0.15 到 0.7 之间, 张北多集中在 0.08 到 0.4 之间, 合肥多集中在 0.2 到 0.75 之间, 丽江多集中在 0.01 到 0.1 之间。各地区气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数频率分布基本呈高斯分布, 气溶胶光学厚度峰值分布由高到低依次为合肥、喀什、张北、丽江, Ångström 波长指数由高到低依次为丽江、合肥、张北、喀什。

关键词:气溶胶光学厚度; 太阳光度计; Ångström 波长指数; 典型区域

中图分类号: P407.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1166

Atmospheric aerosol optical characteristics measured at several typical zones in China

LI Jian-yu^{1,2}, WEI He-li^{1*}, XU Qing-shan¹, ZHAN Jie¹

(1. *Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn*

Abstract: The diurnal variation characteristics of Aerosol Optical Thickness(AOT) in different city regions and seasons were analyzed by using the long-term measurement data from a sun-photometer DTF in several typical regions of China. It indicates that the AOTs in Chinese different regions show complex and different diurnal variation characteristics and the diurnal variation trend is obviously different. The AOT variations of yearly-mean, monthly-mean, and seasonal-mean in each region were also presented. The results show that the AOT in Lijiang of Yunnan Province is the least, where the atmosphere is clean, and the small particles are dominant, and that in Zhangbei of Hebei Province is the second least one. The AOTs both in Kashi of Xinjiang province and Hefei of Anhui province are larger, and the bigger particles are dominant in Kashi while the smaller particles are dominant in Hefei.

收稿日期: 2011-12-06; 修订日期: 2012-02-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61077081); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目; 中国科学院特聘研究员计划项目(No. 2011T1J14)

In every region, the AOT is larger in spring, and the smallest in autumn. Moreover, the value of AOT is between 0.15 and 0.7 in Kashi, 0.08 and 0.4 in Zhangbei, 0.2 and 0.75 in Hefei, 0.01 and 0.1 in Lijiang, respectively. The frequency distributions of AOT and Ångström index are basically Gauss distribution. The peak value distribution of AOT from high to low is Hefei, Kashi, Zhangbei, and Lijiang in turn and that of the Ångström index from high to low is Lijiang, Hefei, Zhangbei, and Kashi in turn.

Key words: aerosol optical thickness; sun-photometer; Ångström index; representative region

1 引 言

大气气溶胶的光学性质在大气辐射、光学工程应用和气候变化研究中占有重要地位,其通过直接和间接效应影响大气中的能量平衡以及大气中空间目标物的探测。气溶胶光学性质具有复杂的时间地域变化特征,目前,人们对各地区气溶胶浓度和物理、光学性质的时空变化特征的了解非常有限,这已成为当前评估和预测全球气候变化以及空间目标物探测的最主要不确定性源。通过在典型地区进行长期观测,发现了我国不同地区气溶胶光学特性、Ångström 波长指数的差异,说明各地区气溶胶浓度、来源和成分的差异对有关气溶胶的气候效应及其时空分布研究以及光学工程应用具有重要的参考价值。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, AOT)是表征大气气溶胶光学特性的最基本参量,是评价大气环境污染,研究气溶胶辐射气候效应的一个关键因子和辐射传输计算中的一个重要参量。地基太阳光度计测量提供了最为精确可靠的大气气溶胶光学厚度测量,也可为卫星遥感气溶胶光学厚度提供检验的依据^[1],但到目前为止,世界上长期进行这类观测的台站还很少,气溶胶光学厚度的资料还十分缺乏,在中国尤其如此。鉴于全球积累有大量的宽带太阳辐射计观测资料,邱金桓等^[2-3]发展了宽带消光法来反演气溶胶光学厚度,取得了较好的精度。罗云峰等^[4-5]采用该方法分析了中国多个站点 1961~1990 三十年间大气气溶胶光学厚度的年、季空间分布特征及年际变化情况。宗雪梅等^[6]分析了中国 16 个站点 1993~2002 年气溶胶光学厚度的变化特征,发现气溶胶光学厚度整体呈增大趋势。刘玉杰等^[7]基于 CE-318 太阳光度计资料研究了银川地区气溶胶光学厚度日变化和季节分布特征。王跃

思等^[8]基于中国生态系统研究网络(CERN)的太阳分光观测数据,仔细分析了中国 19 个典型地区秋冬两季大气气溶胶的光学性质及其成因。研究表明,气溶胶光学厚度具有明显的地域分布和季节变化特征。

新疆喀什、河北张北、安徽合肥、云南丽江分别位于中国西部、北部、中部、南部地区,属于我国部分典型城市地区。太阳光度计测的虽是一个点,由于实验选点都处于这些城市的郊区或下面县城,仍可认为是典型城市地区。本文采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 DTF 型太阳光度计资料对这四个典型区域进行了超过一年的观测,得到了这些地区气溶胶光学厚度的日变化特征、日均值变化、月和季节变化特性的一些规律。

2 仪器和资料简介

中科院安徽光学精密机械研究所自主研发的 DTF 型太阳光度计目前采用的型号为 DTF-6,有 8 个波段,中心波长分别位于 1 050, 940, 860, 780, 670, 610, 520, 400 nm,除 940 nm 波段用于整层大气可降水量测量外,其它波段都用于气溶胶测量。光谱带宽 10 nm,接收视场角约为 1°。新疆喀什地区测量时间段从 2008 年 9 月 26 日至 2009 年 10 月 2 日,共得到有效数据 87 天;河北张北(41.017N, 114.758E)测量时间段从 2008 年 11 月 21 日至 2009 年 6 月 30 日,共得到有效数据 86 天;安徽合肥(31.9037N, 117.1584E)测量时间段从 2008 年 10 月 23 日至 2009 年 9 月 6 日,共得到有效数据 61 天;云南丽江(26.70N, 100.03E)测量时间段从 2010 年 10 月 30 日至 2011 年 5 月 12 日,共得到有效数据 52 天。各地区各月天数列表如表 1。

表 1 各地区各月有效数据天数列表

Tab. 1 Available days of every month at four zones

喀什		张北		合肥		丽江	
月份	天数	月份	天数	月份	天数	月份	天数
08.09	3	08.11	6	08.10	2	10.10	1
08.10	17	08.12	19	08.11	16	10.11	4
08.11	13	09.01	3	08.12	10	10.12	23
08.12	6	09.02	1	09.01	8	11.01	10
09.01	5	09.03	16	09.02	3	11.03	1
09.02	7	09.04	15	09.03	5	11.04	7
09.03	11	09.05	11	09.04	4	11.05	6
09.04	4	09.06	15	09.05	6		
09.05	1			09.06	2		
09.06	2			09.07	4		
09.09	18			09.09	1		

取晴朗无云的观测数据,剔除有云污染的部分数据,得到上述 7 个波段的气溶胶光学厚度和水汽总量用于本文的分析,其中水汽总量的结果将另撰文分析。

3 太阳光度计测量气溶胶光学厚度原理

太阳光度计观测数据的处理采用“截距法”,对某时刻仪器测得的信号 $V(\lambda, t)$ 从以下公式获得大气柱总的厚度:

$$\tau(\lambda, t) = \frac{1}{m(\theta)} \ln \frac{V_0(\lambda)}{V(\lambda, t)/(d_0/d)^2}, \quad (1)$$

式中, $V_0(\lambda)$ 为采用 Langley 法获得的太阳光度计定标值,选择在晴朗无云、大气稳定且气溶胶较小的地方进行定标测量。大气气溶胶的光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 可由式(1)计算的总光学厚度扣除瑞利散射光学厚度 $\tau_r(\lambda)$ 和气体吸收光学厚度 $\tau_g(\lambda)$ 得到。

在大气气溶胶粒子谱分布符合 Junge 谱分布的条件下,不同波长的气溶胶光学厚度满足 Ångström 公式:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}. \quad (2)$$

式中 β 为大气浑浊度系数,其值为波长 $1 \mu\text{m}$ 处气溶胶的光学厚度; α 即为 Ångström 指数。已知两个以上波长上气溶胶光学厚度 τ_a , 对上式的对数采用最小二乘法即可求得 α 。文中后面所有气溶

胶的光学厚度用 550 nm 波段值,即通过该方法获得。Ångström 指数指示了粒子谱分布的平均情况, α 值越小,表示大粒子越多;反之越大,则表示小粒子越多,可以通过 α 的大小来大致了解气溶胶粒子大小的分布。

4 多个典型区域 AOT 特征分析

4.1 各地区 AOT 日变化特征分析

4.1.1 新疆喀什地区

实验观测期间喀什多有浮尘或霾,由图 1 可以看出,10 月 21 日起该地区开始扬尘,持续 4 天后浮尘退去。冬季有霾期间 AOT 日变化趋势多样(1/22、1/8、12/6、12/4),波动较大,晴朗日日变化同样有不同变化趋势(11/27、11/24、11/4、11/10、11/26),但波动相对较小。春季该地区出现两次较严重的浮尘天气,多日无数据(3/22~3/27)或数据不连贯(3/12、3/13),春季晴朗日日变化平缓(2/28、3/31)。夏季日变化缓慢增长(6/20),到了秋季日变化趋势多样。通过仔细分析,可得出喀什地区秋冬春浮尘或有霾期间 AOT 日变化特征:(1)整体呈上升或下降趋势;(2)早晚小中午大;(3)早晚大中午小;(4)一日中出现多个起伏波动;(5)日变化波动较大。晴朗日 AOT 日变化特征:(1)整体呈上升或下降趋势;(2)正弦或余弦变化(即一峰一谷变化);(3)上午、中午或下午

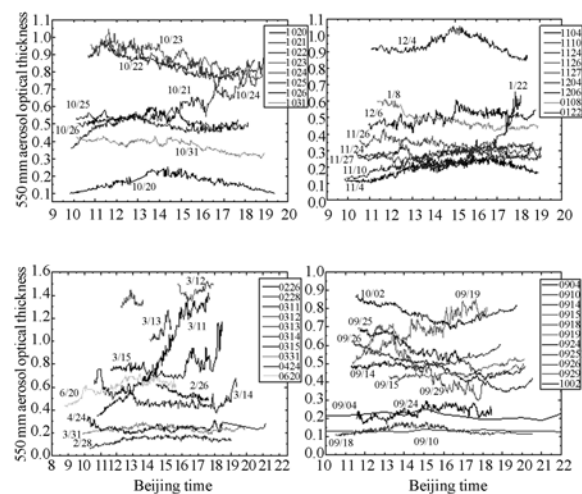


图 1 喀什浮尘或有霾日及其全天晴朗日 550 nm AOT 日变化

Fig. 1 Diurnal variation of 550 nm AOT over Kashi

出现峰值(即一峰变化);(4)早晚小中午大或早晚大中午小;(5)日变化平缓。但喀什地区在秋冬也有非常好的天气,550 nm 大气气溶胶光学厚度仅在 0.1 左右,如 9 月 10 日和 2 月 28 日,这种天气在内陆城市地区是很难观测到的。

4.1.2 河北张北地区

12 月该地区出现 3 次短暂浮尘,持续时间较短,由图 2 可以看出浮尘日 AOT 变化剧烈,波动大;3 月份连续 3 天出现霾,由于受天气影响,无测量数据或数据短暂,从 16、17 日变化来看有整体呈上升的趋势;4 月有霾天气出现两天,AOT 日变化同 3 月。5 月 26 日气溶胶光学厚度很大,该天较异常,比浮尘日 AOT 大的多且波动很大。同样可逐月分析全天晴朗日日变化,最后可总结出张北 AOT 日变化特征:(1)浮尘日日变化较剧烈,不连贯;(2)有霾日波动大,整体呈上升趋势;(3)晴朗日日变化平缓,日变化早晚小中午大或整体呈上升趋势或一峰一谷或一日中多个小幅波动。

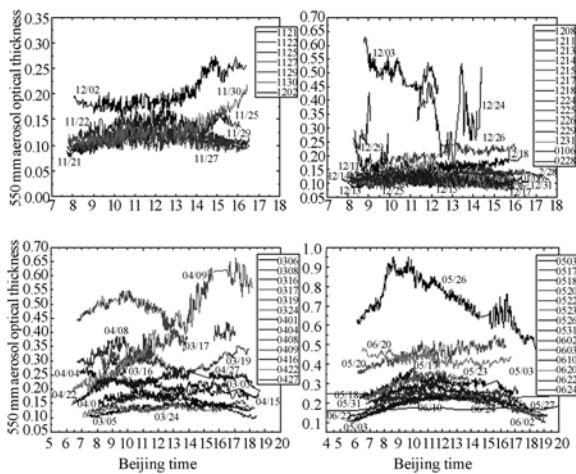


图 2 张北地区浮尘日及全天晴朗日 550 nm AOT 日变化
Fig. 2 Diurnal variation of 550 nm AOT over Zhangbei

4.1.3 安徽合肥地区

图 3 是合肥秋冬春夏四季全天晴朗日 550 nm 处 AOT 日变化,从图中可以看出该地区 AOT 日变化十分复杂,几乎无规律可寻。11 月和 12 月,合肥晴朗日较多,其 AOT 也表现出较复杂的日变化:(1)早晚大中午小;(2)半晌午出现较大波峰;(3)日变化十分平缓;(4)一日中出现多个起伏波动,有的起伏较大,有的起伏较小;(5)上午大下午小中午出现拐点;(6)日变化整体呈上升趋势。从 1 月到 4 月,AOT 除了具有以上日变化

特征,还有日变化整体呈下降趋势(3/9)。5,6 月份合肥进入梅雨时节,晴朗日很少,日变化波动较大,夏季更是阴雨天气较多,日变化波动同样很大。

分析合肥地区 AOT 日变化复杂的原因,主要与合肥地区天气状况以及外界环境因素密切相关。实验观测期间,合肥早晨多大雾或薄雾,多数天全天有雾,部分天在太阳出来时逐渐散去;即使在晴朗日,合肥天空中时常会有些许丝状或片状薄云飘过,使得合肥 AOT 值偏大且变化趋势复杂;实验观测点西南方向有工厂,当工厂大量排放烟雾加之刮西南风时会对 AOT 值产生很大影响,11 月 12 日、12 月 31 日半晌午出现较大波峰即与此有关。

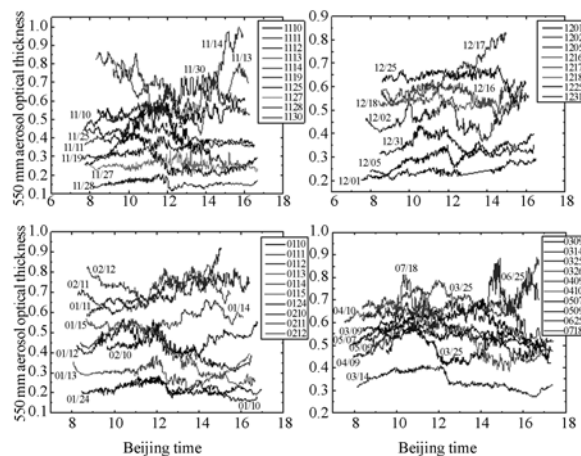


图 3 合肥地区 550 nm 气溶胶光学厚度日变化
Fig. 3 Diurnal variation of 550 nm AOT over Hefei

4.1.4 云南丽江地区

影响气溶胶日变化的因素很多,辐射加热、局地湍流、风场、人类活动等所有直接或间接引起气溶胶源释放、传输、扩散及清除的自然和人为因素都会引起大气气溶胶的变化。这使得气溶胶日变化过程非常复杂。分析实验期间有完整观测(日有效数据 7 h 以上)34 天的观测结果,将丽江地区气溶胶光学厚度日变化大体分为以下 4 种类型:

- (1)气溶胶光学厚度日变化平缓。这样的天气有 10 天,多发生在冬春季的雨后或冷锋过境时的前两天。这种天气一般天空碧蓝,晴朗无云,有很好的能见度。这时大气中气溶胶含量很少,是非常清洁的天气,可认为是该地的大气背景气溶胶。
- (2)气溶胶光学厚度从早到晚整体呈上升趋势

势。这样的天气有 9 天。这类天气中 AOT 通常在线性增长的基础上,在 13:00 以后上升幅度较大,如图 4 中 12/12 至 12/14、12/19 和 12/20、1/5 等。将这种类型天气的 AOT 变化趋势与从同一观测资料中(940 nm 波段的资料)反演出的整层大气可降水量进行对比,发现除个别天外,这一时刻后大气可降水量也呈同样的趋势增长。这说明这种气溶胶日变化类型产生主要有两方面原因:一方面是由于随太阳辐射增强,大气层结变得不稳定,中午到下午有粒子从地面被输送入大气;另一方面是因为辐射增强,大气中气-粒转换增强及气溶胶颗粒吸湿增强造成的。

(3)气溶胶光学厚度早晚大、中午小。这种日变化类型仅有 2 天,且分别出现在秋冬两季,11 月 1 日和 12 月 1 日。秋冬季的雾天,日出后 AOT 一般会逐渐减小,这是因为随着阳光照射,水汽蒸发,雾气消散,气溶胶消光作用变弱,进入下午后光学厚度增大,其原因同第二种类型。

(4)气溶胶光学厚度上午变化平缓下午出现一个或多个波峰。这种日变化类型出现天数最多,有 12 天。AOT 的峰值多出现在 15:00 前后。在晴朗的白天,随着太阳对地面的不断加热,大气层结逐渐变得不稳定,气溶胶垂直向上输送^[9],中午过后,大气层结不稳定造成的局地湍流使向上输送的气溶胶粒子达到一天中最大值,再加上人们日常活动的展开,15:00 后,AOT 达到另一个峰值。其它的如人类活动、生物燃烧等任何短时间内向大气注入大量颗粒物的事件,都会造成气溶胶光学厚度的峰出现。

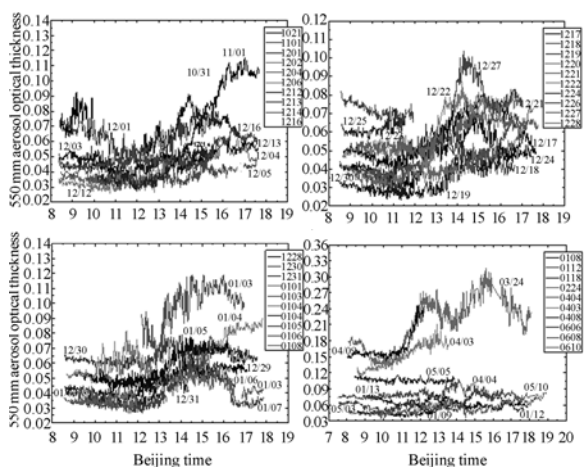


图 4 丽江地区 550 nm 气溶胶光学厚度日变化

Fig. 4 Diurnal variation of 550 nm AOT over Lijiang

4.1.5 各地区 AOT 日变化特征小结

综合分析 4 个典型地区的 AOT 日变化特征,在浮尘或有霾日,喀什和张北相似,但喀什日变化趋势比张北多样,张北由于常年刮大风,浮尘日日变化要比喀什剧烈。在晴朗日,各地区都有多种日变化特征,部分日变化趋势相似,但不同地区也有自己独特的特征。张北和丽江都无整体呈下降趋势的日变化;张北地区 AOT 呈早晚小中午大趋势,而合肥和丽江呈早晚大中午小趋势,喀什地区两种变化趋势都有;丽江 AOT 有上午变化平缓下午出现一个或多个波峰而其它地区都无;合肥 AOT 上午大下午小在中午出现拐点不同于其它各地区;喀什和丽江不像张北和合肥一日中出现多个起伏波动。整体来看,合肥地区日变化最复杂,在晴朗日一日中的波动要比其它各地区多,主要是因为合肥处于内陆城市地区,受周围环境及气候特征影响较大。丽江日变化特征最少,由于各种因素,该地区同样表现了较复杂的日变化趋势。张北日变化又比喀什复杂,且一日中的波动比喀什明显,因为张北常年刮大风,该地区风场的变化是影响该地区日变化波动的主要因素。

4.2 各地区全年日均值变化的特征分析

由图 5 可以看出喀什和合肥地区全年的 AOT 日均值普遍偏高,其次是张北,丽江地区最小,远小于其它 3 个地区。喀什和张北由于受沙尘天气的影响,出现几处峰值点,合肥由于受特殊天气和外界环境影响有个别峰值点,丽江全年 AOT 日均值变化相对较平缓。寻求合肥地区气溶胶光学厚度偏大的原因,一方面受云污染的影响,合肥地区一年中很少有非常湛蓝的天空,晴朗日时合肥天空仍然出现非常薄的肉眼不可见的卷云或是天空微微泛白,而且合肥终年能见度较低。另一方面是实验测量处于合肥偏远郊区,周围有大量农作物,进入春秋农忙季节的农民大量燃烧秸秆释放烟雾,大气中被注入大量的生物燃烧气溶胶;实验观测点西南方向有工厂,当工厂大量排放烟雾加之刮西南风时会对 AOT 值产生很大影响。丽江是个山清水秀的地方,常年能见度较高,晴朗日也较多,近些年的旅游发展也并未对其环境造成大的污染,其 AOT 值很小。

Ångström 波长指数是反映气溶胶粒子大小的一个参数^[10],当大粒子($>1.0 \mu\text{m}$)增多时该值

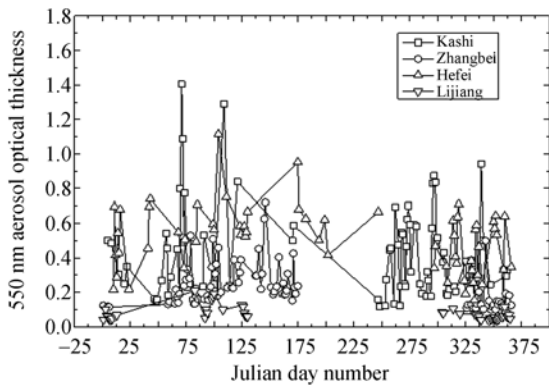


图 5 喀什、张北、合肥、丽江全年 550 nm AOT 日均值变化
Fig. 5 Daily average of AOT over Kashi, Zhangbei, Hefei and Lijiang

减小,接近于 0 或为负;当小粒子($<1.0 \mu\text{m}$)增多时该值增大,通常大于 1.2,Ångström 值的大小与气溶胶粒子半径值成反比。图 6 展示了喀什、张北、合肥、丽江全年 Ångström 波长指数日均值变化。实验期间,喀什和张北在春秋都发生过几次浮尘或霾,图 5 几个高点基本都与浮尘日一一对应,从图 6 也可看出,两地区在浮尘日 Ångström 波长指数偏低,表明浮尘日主要为大粒子。合肥和丽江在实验期间都未出现浮尘,故两地区的 Ångström 波长指数都较大,都大于喀什和张北,这表明这两个地区主要以细粒子为主。

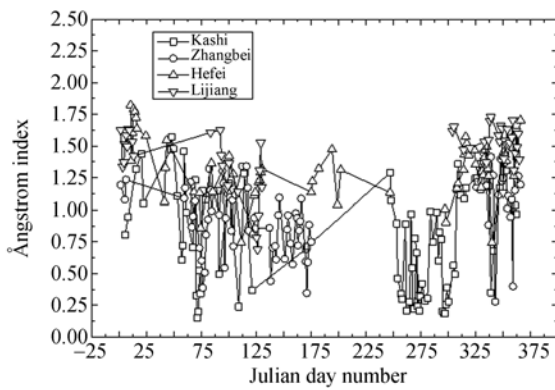


图 6 喀什、张北、合肥、丽江 Ångström 波长指数日均值变化
Fig. 6 Daily average of Ångström index over Kashi, Zhangbei, Hefei and Lijiang

4.3 各地区全年月季变化特征分析

从图 7 中可以看出,喀什和合肥全年 AOT 月变化波动较大且出现多个波动,张北和丽江相对波动较少。除了合肥其它各地区全年 AOT 最大值都出现在春季,喀什张北都在 5 月,丽江在 3

月,合肥在 6 月有些反常,主要是因为合肥 6 月进入梅雨时节,几乎无非常晴朗天气,该月实验期间仅获取 2 天数据。根据实验记录,6 月 24 日这天全天虽然晴朗但天空泛白,估计高空中存在均匀分布的卷云,使得这天光学厚度偏大,故可认为合肥全年 AOT 最大值在春季 4 月份。喀什、合肥全年 AOT 都远大于张北和丽江,丽江全年 AOT 最小,该地区大气最清洁。合肥 AOT 较大原因见上一节。而喀什 AOT 较大主要是受沙尘天气的影响。从图 8 的 Ångström 波长指数也可以看出,合肥 AOT 整体上虽然稍高于喀什,但其 Ångström 波长指数远大于喀什,表明该地区并未被注入大粒子,而喀什地区由于受沙尘的影响,Ångström 波长指数较小。

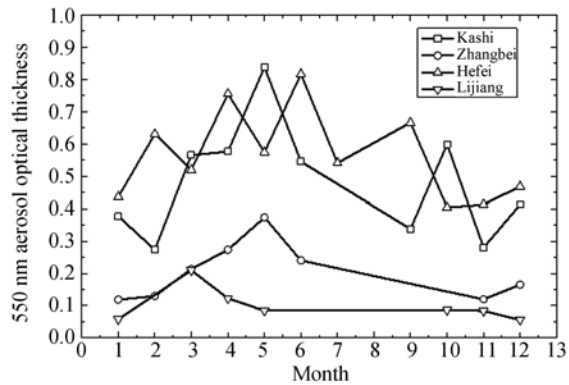


图 7 喀什、张北、合肥、丽江全年 550 nm AOT 月季统计特征
Fig. 7 Mean monthly values of 550 nm AOT over Kashi, Zhangbei, Hefei and Lijiang

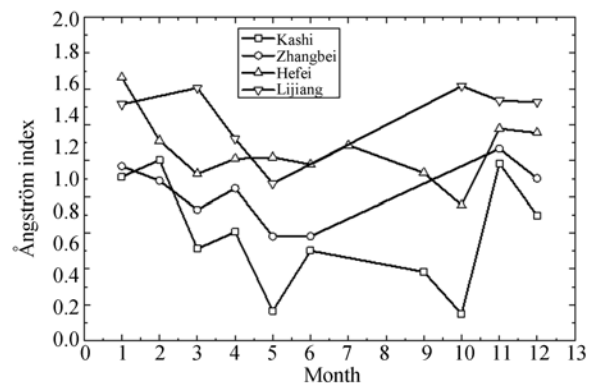


图 8 喀什、张北、合肥、丽江全年 Ångström 波长指数月季统计特征
Fig. 8 Mean monthly values of Ångström index over Kashi, Zhangbei, Hefei and Lijiang

图 7、图 8 整体来看,各地区 AOT 与 Ångström 波长指数大致呈反相关的关系。图 8 中合肥和丽江全年 Ångström 波长指数较大,大于喀什和张北,表明这两个地区大气中积聚的主要为细粒子,像人类活动造成化石燃料燃烧和生物燃烧排放的烟雾。张北在春季 Ångström 波长指数偏低主要受沙尘影响,大气中注入了粗粒子,喀什在春秋 Ångström 波长指数最低,表明该地区在春秋受沙尘影响较大,大气中积聚的大粒子较多。综合分析,喀什、张北气溶胶类型是沙尘气溶胶为主;合肥气溶胶类型是城市-工业污染型为主,丽江是生物质、烟煤等燃烧气溶胶为主。

4.4 各地区 AOT 和 Ångström 波长指数频率分布

为了更为详细地了解实验期间各地区获取的所有数据中 AOT 和 Ångström 波长指数在量值上的直观分布,图 9 和图 10 分别给出了各地区 AOT 和 Ångström 波长指数的频率分布图。由图 9 可以看出喀什 AOT 值多集中在 0.15~0.7,张北多集中在 0.08~0.4,合肥多集中在 0.2~0.75,丽江多集中在 0.01~0.1。从图中还可看出各地区 AOT 频率分布基本呈高斯分布,各地区的 Ångström 波长指数分布也基本呈高斯分布。整体来看,4 个地区气溶胶光学厚度峰值分布由高到低依次为合肥、喀什、张北、丽江,总平均值分别为 0.508, 0.418, 0.228, 0.074。而 Ångström 波长指数由高到低依次为丽江、合肥、张北、喀什,总平均值分别为 1.449, 1.331, 0.978, 0.772。

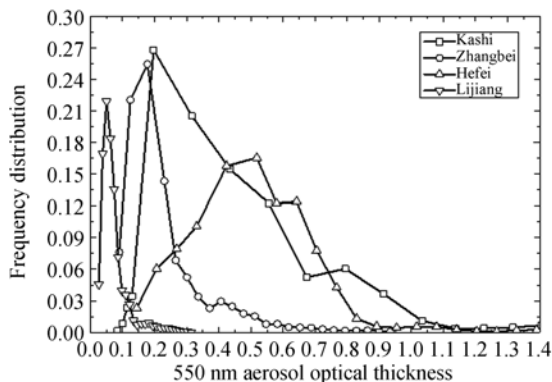


图 9 各地区 550 nm 气溶胶光学厚度频率分布

Fig. 9 Frequency distribution of 550 nm AOT at each zone

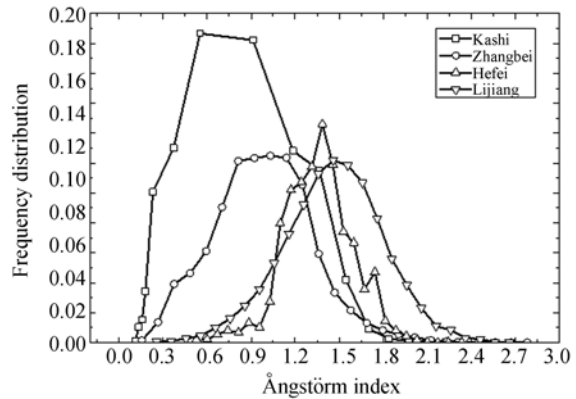


图 10 各地区 Ångström 波长指数频率分布

Fig. 10 Frequency distribution of Ångström index at each zone

5 结 论

通过对喀什、张北、合肥、丽江地区全年气溶胶光学特性日变化和季节变化特征的分析,得到以下结论:

(1)喀什、张北受沙尘影响较大,无论浮尘日还是晴朗日都有多种日变化类型;合肥和丽江虽不受沙尘影响,但晴朗日仍有多种日变化类型,且合肥日变化特征比丽江复杂的多。

(2)各地区全年 AOT 日均值变化明显不同,喀什、张北由于受沙尘影响,春秋出现多个峰值点,合肥虽不受沙尘影响,但由于合肥受天气和实验环境及季节原因,使得合肥的 AOT 在全年尤其春季偏高;丽江除了春季受农作物燃烧的影响偏大,全年变化平缓且值很小,大气最清洁;喀什张北全年大气中被注入的大粒子较多,而合肥和丽江多以细粒子为主。

(3)各地区全年 AOT 的月和季节变化具有明显的特征,春季最大,冬季最小,都在春季出现峰值,但出现峰值月份不同。喀什和合肥 AOT 都高于张北和丽江,丽江最小,大气最清洁;合肥虽略高于喀什但大气中仍以细粒子为主;喀什和张北由于受沙尘的影响大气中积聚的多为大粒子,喀什大粒子积聚的最多。

(4)各地区 AOT 和 Ångström 波长指数的频率分布都基本呈高斯分布,整体来看,4 个地区 AOT 峰值分布由高到低依次为合肥、喀什、张北、丽江;而 Ångström 波长指数由高到低依次为丽江、合肥、张北、喀什。

参考文献:

- [1] 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及与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002,13(suppl.):721-531.
MAO J T, LI CH C, ZHANG J H, *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.):721-531. (in Chinese)
- [2] 邱金桓. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 I: 理论[J]. 大气科学, 1995,19(4):385-394.
QIU J H. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation. part I: theory[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995,19(4):385-394. (in Chinese)
- [3] 邱金桓. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度 II: 实验研究[J]. 大气科学, 1995, 19(5): 586-596.
QIU J H. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole spectral direct solar radiation. part II: experimental study[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(5): 586-596. (in Chinese)
- [4] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征[J]. 科学通报, 2000,45(5):549-554.
LUO Y F, LV D R, LI W L, *et al.*. The variable characteristics of atmospheric aerosol optical depth over China in recent 30 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000,45(5):549-554. (in Chinese)
- [5] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析[J]. 大气科学, 2002,26(6):721-730.
LUO Y F, LV D R, ZHOU X J, *et al.*. Analyses of the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(6): 721-730. (in Chinese)
- [6] 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2005,10(2):201-208.
ZONG X M, QIU J H, WANG P C. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005,10(2):201-208. (in Chinese)
- [7] 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]. 南京气象学院学报, 2004,27(5):615-622.
LIU Y J, NIU SH J, ZHENG Y F. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE-318 sun tracking spectrophotometer data[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004,27(5):615-622. (in Chinese)
- [8] 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.
WANG Y S, XIN J Y, LI ZH Q, *et al.*. AOD and angstrom parameters of aerosols observed by the chinese sun hazemeter network from August to December 2004[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9):1703-1711. (in Chinese)
- [9] ZHOU J. Infrared lidar measurements of crustal aerosol mixing in the troposphere[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27:2639-2640.
- [10] BEAT S, CHRISTIAN M, ALAIN H, *et al.*. Retrieval of optical depth and particle size distribution of tropospheric and stratospheric aerosols by means of sun photometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1):172-182.

作者简介:



李建玉(1983—),女,安徽霍邱人,博士研究生,2006年于安徽师范大学获得学士学位,2009年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事大气探测技术及辐射传输研究。
Email:yuzi83715@yahoo.com.cn



徐青山(1965—),男,安徽霍邱人,研究员,博士生导师,1986年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2004年,2007年于中科院安徽光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气探测、大气传输、卫星遥感反演与图像大气订正研究。
E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn



詹杰(1969—),男,湖北人,博士,研究员,硕士生导师,1992年于合肥工业大学获得学士学位,1995年、2007年于中科院安徽光机所分别获得硕士博士学位,主要从事太阳、恒星辐射测量技术、大气透过率实时测量技术、激光在大气中传输的测量技术、大气参数测量等方面的研究。Email: jzhan@aiofm.ac.cn

导师简介:



魏合理(1965—),男,安徽宁国人,研究员,博士生导师,1988年于安徽师范大学获得学士学位,1992年、2005年于中科院安徽光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事红外辐射大气传输、大气微量成分遥感、卷云红外辐射特性的研究工作。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

● 下期预告

离轴回转对称棱镜式头戴显示器目镜研制

王健^{1,2},刘英¹,郭帮辉^{1,2},孙强¹,卢振武¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为了克服大曲率自由曲面棱镜在加工中存在的表面粗糙度差的缺点,采用离轴非球面面型的形式研制了棱镜式虚拟显示目镜。目镜的三个光学表面都采用了回转对称的非球面面型,具有比自由曲面更高的加工精度并大大降低了加工难度。通过控制棱镜各表面的曲率、倾斜角度以实现短焦距、大视场的效果,配以高次非球面系数的优化实现对像差的校正。研制目镜的出瞳大小为 6 mm,视场大小 55°,在 30 lp/mm 处,轴上视场的 MTF 值高于 0.2,轴外视场 MTF 值高于 0.1,目镜的最大畸变量为 -5.37%。棱镜的检测和试验结果表明:与自由曲面棱镜相比,采用非球面面型能够显著降低棱镜表面的粗糙度,避免图像重影现象,成像更为清晰,其虚拟成像的目视效果得到了明显改善。