

文章编号 1004-924X(2015)10-2768-10

## 秸秆燃烧和沙尘对气溶胶光学特性的影响

官纯文<sup>1,2</sup>, 李建玉<sup>1</sup>, 李学彬<sup>1\*</sup>, 刘庆<sup>1</sup>, 魏合理<sup>1,3</sup>

(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辐射重点实验室, 安徽合肥 230031;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学技术大学环境光学学院, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 利用多年积累的我国几个典型地区的太阳辐射计观测数据, 反演了秸秆燃烧和沙尘日及其前后晴朗日的气溶胶光学厚度(AOD)和表征粒子尺度的 Ångström 指数( $\alpha$ ), 并运用观测结果和反演数据对已知气溶胶源予以验证。对比分析了多个典型地区源自秸秆燃烧和沙尘的气溶胶光学特性, 结果显示, 秸秆燃烧和扬尘时 AOD 都大幅增加, 而  $\alpha$  在秸秆燃烧时比通常晴朗日增大, 取值大于 1.3; 在扬尘时比通常晴朗日明显减小, 取值小于 0.5。另外, 不同地区不同气溶胶源的 AOD 与  $\alpha$  的关系明显不同。分析结果表明,  $\alpha$  可作为秸秆燃烧和沙尘天气的一个标志参数, 为生物燃烧性有机碳黑气溶胶光学特性的检测方法提供依据, 也可为分析我国西北城市地区受周边沙漠的影响程度提供有益参考。

**关键词:** 气溶胶; 光学厚度; 太阳辐射计; 秸秆燃烧; 沙尘; Ångström 参数

**中图分类号:** P407.4; X831 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2768

## Influence of straw burning and dust on aerosol optical properties

GONG Chun-wen<sup>1,2</sup>, LI Jian-yu<sup>1</sup>, LI Xue-bin<sup>1\*</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>, WEI He-li<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Environmental Optics, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: xbli@aiofm.ac.cn

**Abstract:** The Aerosol Optical Depth (AOD) and Ångström indexes ( $\alpha$ ) influenced by straw burning, dust, and some sunny days were inverted by using the long-term measurement data from a sun-photometer in several typical regions of China. Then, the given aerosol sources were verified by the observed data and retrieved results. The optical characteristics of aerosols influenced by straw burning and dust were analyzed in several typical regions of China. The results show that the AOD obviously increases for the cases with straw burning and dust in the city. The  $\alpha$  is larger in the periods of straw burning than that in clear days, the values during straw burning days usually are greater than 1.3. However, the  $\alpha$  is smaller during dust days than that during clear days, which is usually less than 0.5. The relationship between the AOD and the  $\alpha$  influenced by different aerosols in different zones is evidently different. The results indicate that the  $\alpha$  can be a benchmark parameter of straw burning and

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-06-05.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41475024); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

dust to lay a basis for detection methods of organic black carbon aerosol optical properties and also to provide a reference for research of the effect degrees of urban areas of northwest China by surrounding deserts .

**Key words:** aerosol; optical depth; sun-photometer; straw burning; dust; Ångström parameter

## 1 引 言

气溶胶是指悬浮在大气中各种尺度的固态和液态颗粒物。它通过散射和吸收作用改变大气的辐射特性,影响地气系统的辐射收支平衡,以直接和间接强迫的形式影响气候。大气气溶胶有着众多的自然源(火山喷发、海水溅沫、地面扬尘等)和人为源(生物体燃烧、人类活动、燃料使用等)。农作物秸秆的焚烧、森林火灾、草原火灾等生物质燃烧过程产生的细粒子在可见光波段有着强烈的消光效应,导致大气能见度降低,尤其在亚洲棕色云团及其演化生成的大气棕色云团被发现之后,生物质燃烧导致的细粒子污染及它引发的相关问题已受到世界的关注。中国是一个农业大国,年均秸秆产量约为 6 亿吨,农作物秸秆的露天焚烧会产生大量危害人体呼吸道健康的污染物,已严重影响区域环境的空气质量,甚至成为全球范围内重要的空气污染源之一。我国北方和西北及西部地区由于受到沙漠的影响,多个城市地区在秋冬春出现沙尘天气<sup>[1]</sup>,沙尘等较大颗粒物同样危害人体呼吸道健康,并严重影响城市和区域环境的空气质量。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)与 Ångström 指数(Ångström index,  $\alpha$ )是表征大气气溶胶光学特征的最基本参量。它们可以用来推算大气气溶胶含量,确定气溶胶的模式特征与粒子尺度,检验校对卫星反演资料,是研究气溶胶辐射气候效应的关键因子和辐射传输计算中的重要参量。世界气象组织建议根据 Ångström 公式来评价世界各地的大气浑浊度<sup>[2]</sup>。因此,利用有效的观测手段同时获取我国多个典型地区不同气溶胶源下的 AOD 和  $\alpha$ ,对它们进行研究、分析、总结规律并获取两者的关系,对于生物碳物质的燃烧和沙漠化的监测具有重要意义。

近年来,我国不少学者利用卫星和地面遥感等方法针对局部地区秸秆燃烧和沙尘天气背景下气溶胶的光学特性进行了研究<sup>[3-8]</sup>,但这些研究的测量分析区域多为单一地区,且数据短缺,对我国

多个典型地区不同污染源条件下的大气气溶胶光学特性的对比研究目前鲜有报道。而我国气候条件的南北差异和东西差异都比较大,因此,有必要对我国多个典型地区进行气溶胶连续观测,分析不同污染源对其光学特性的影响,从而为进一步通过卫星遥感或其它方法反演气溶胶污染源的类型提供依据。利用太阳辐射计地基遥感监测大气气溶胶的光学厚度在国际上被认为是一种精确可靠的手段,无论国内还是国外不少研究者在利用卫星或是其它手段反演气溶胶光学厚度时都以太阳辐射计资料为参考依据<sup>[9]</sup>。

2008 年至今,本课题组利用自行研制的 DTF 型和其它类型太阳辐射计,对我国多个典型地区的气溶胶进行了连续观测,积累了大量气溶胶光学特性的数据。本文使用这些观测数据分别研究了安徽合肥、河南许昌、云南丽江近郊的秸秆燃烧和青海德令哈、新疆喀什、河北张北的沙尘天气对城市气溶胶光学特性的影响,并对这些典型气溶胶源的光学特性进行了定量分析。

## 2 仪器和数据资料简介

2008~2014 年,本实验室在全国多个地区利用太阳辐射计进行实验测量,积累了多个地区的气溶胶光学特性数据<sup>[1,10]</sup>。本文选取 6 个典型地区在已知气溶胶源(秸秆燃烧、沙尘)的基础上对其光学性质进行定量分析,所选地区、时间及气溶胶源如表 1 所示。

表 1 各地数据资料简介

Tab. 1 Data of aerosol and dates at different zones

地区	时间	气溶胶源	天 气
合肥	2014. 6. 11	秸秆燃烧	2014. 1~2014. 7 晴朗
丽江	2011. 3. 24	枯草燃烧	2011. 1~2011. 4 晴朗
许昌	2009. 10. 4	秸秆燃烧	2009. 9~2009. 11 晴朗
德令哈	2014. 4. 25	沙尘	2014. 3~2014. 5 晴朗
喀什	2009. 3. 12/3. 13 2008. 12. 4	沙尘	2008. 11~2009. 3 晴朗
张北	2008. 12. 8/12. 24	沙尘	2008. 11~2009. 1 晴朗

安徽合肥和河南许昌属于我国中部地区,海拔都在 100 m 以下,所选测量点处于城市近郊,每年忙农季节附近农民都会在田间燃烧秸秆,造成大气非常浑浊,能见度极低。云南丽江地处青藏高原与云贵高原的过渡区,海拔约为 2.4 km,属低纬度高原季风气候,该地区工业不多,自然环境很少受到污染,但也存在农民田间燃烧秸秆的现象。青海德令哈、新疆喀什和河北张北分别位于我国西南、西部和北部地区,秋、冬、春季都会出现不同程度的沙尘或灰霾天气。表 1 中除了给出秸秆燃烧和沙尘天气时间段的数据,还给出了其前后晴朗天气时间段的数据,用于比较。

实验采用的太阳辐射计有本实验室自行研制的 DTF-6 型自动跟踪太阳辐射计, Microtop II 型手持式太阳辐射计及 CE317 型手动跟踪太阳辐射计。特殊时间段采用 Microtop II 和 CE317 型太阳辐射计观测,其它时间都采用 DTF 型太阳辐射计进行观测。各仪器的波段带宽都是 10 nm,接收视场角为  $1^\circ$ ,波段设置如表 2 所示。近红外波段 936 nm 和 940 nm 是水汽吸收通道,用于反演大气水汽柱含量,其余都位于大气窗区。各仪器利用除水汽吸收通道以外的其它气溶胶通道来测量气溶胶的瞬时光学厚度。

表 2 太阳辐射计波段设置

Tab. 2 Waveband setting of sun-photometers

通道数	中心波长/nm		
	DTF 型	Microtop II 型	CE317 型
1	1050	1020	1020
2	940	936	936
3	860	870	870
4	780	500	670
5	670	400	440
6	610		
7	520		
8	400		

所有太阳辐射计都选择在晴朗无云、大气稳定且洁净的高山地区进行定标,当定标系数的相对误差小于  $+2\%$  时可以满足测量 AOD 的精度<sup>[11]</sup>。研究表明,DTF 型与 CE318 和 POM02 型太阳辐射计测量 AOD 的均方根误差都在  $8\%$  以内<sup>[12]</sup>,与激光雷达的测量结果一致性也较

好<sup>[13]</sup>。图 1 给出了 2014 年 10 月 15 日合肥地区 POM02 型太阳辐射计与激光雷达同时同地测量的实验结果对比,AOD 日变化趋势一致性非常好,对应时刻的均方根误差为  $3.7\%$ 。

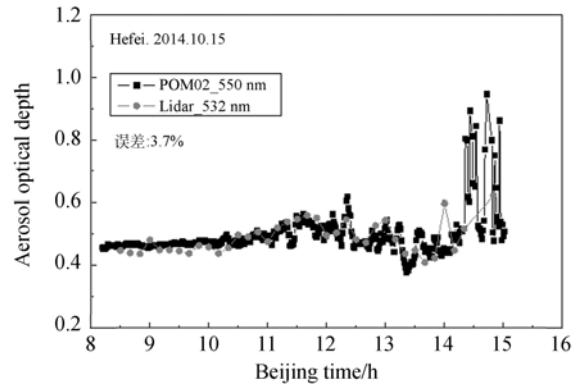


图 1 太阳辐射计与激光雷达测量的气溶胶光学厚度对比  
Fig. 1 Comparison of AOD measured by sun-photometer and lidar

### 3 太阳辐射计获取气溶胶光学厚度和 Ångström 参数方法

依据 Langley 法<sup>[1]</sup>,由某时刻太阳辐射计测得的信号  $V(\lambda, t)$  算得大气总光学厚度为:

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

式中:  $m(\theta)$  为大气质量;  $V_0(\lambda)$  为采用 Langley 法获得的太阳辐射计定标值,选择在晴朗无云、大气稳定且洁净的环境下进行定标测量;  $d_0/d$  为目地距离修正因子。大气气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  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。由 1974 年 Hansen and Travis 提出的近似表达式得到瑞利散射光学厚度  $\tau_r(\lambda)$ , 气体吸收光学厚度  $\tau_g(\lambda)$  主要是臭氧吸收,使用臭氧吸收系数和吸收气体含量的乘积来计算。

对尺度分布于  $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$  的气溶胶,假定其粒子谱遵循 Junge 分布<sup>[14]</sup>:

$$\tau_a(\lambda) = k\lambda^{-\alpha} = k\lambda^{-v^*+2}, \quad (2)$$

其中:  $k$  为 Ångström 混浊度系数,用于表征大气中气溶胶粒子的浓度<sup>[15]</sup>; Ångström 指数  $\alpha = v^* - 2$ ,用于表征垂直气柱内气溶胶粒子尺度,表

示质粒的平均半径;  $v^*$  为 Junge 指数。一般来说,  $0 \leq \alpha < 2$ , 较小的  $\alpha$  代表粒径较大的气溶胶粒子为主控粒子; 较大的  $\alpha$  代表粒径较小的气溶胶粒子为主控粒子。将同一时刻多个通道观测的气溶胶光学厚度按式(2)的对数形式进行线性拟合, 可以得到 Ångström 参数  $k$  和  $\alpha$ <sup>[16]</sup>。文中所有气溶胶光学厚度用 550 nm 波段值通过式(2)获得。

### 4 结果与分析

#### 4.1 秸秆燃烧对城市气溶胶光学特性的影响

图 2 给出了合肥、丽江、许昌秸秆燃烧及其前后气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的变化。从图中可以明显看出, 秸秆燃烧时 550 nm 波段气

溶胶光学厚度明显比秸秆燃烧前后晴朗日的气溶胶光学厚度大很多, 且全天气溶胶光学厚度变化较明显, 波动较大。图 2 还给出了 6 月 11 日在合肥用太阳辐射计和激光雷达测得的气溶胶光学厚度 AOD 的对比, 可以看出两者的变化趋势基本一致, 虽然两者均方根误差达到 10.3%, 但雷达测得的 AOD 仍然比晴朗日大很多, 表明露天燃烧所产生的有机碳颗粒物对可见光的消光作用非常明显。由图还可以看出, 秸秆燃烧时与秸秆燃烧前后晴朗日的 Ångström 指数随时间的变化趋势较缓, 但大部分 Ångström 指数却比秸秆燃烧前后晴朗日大, 表明秸秆燃烧时大气中被注入了大量小的褐炭粒子, 使得表征气溶胶粒子尺度的 Ångström 指数增大。

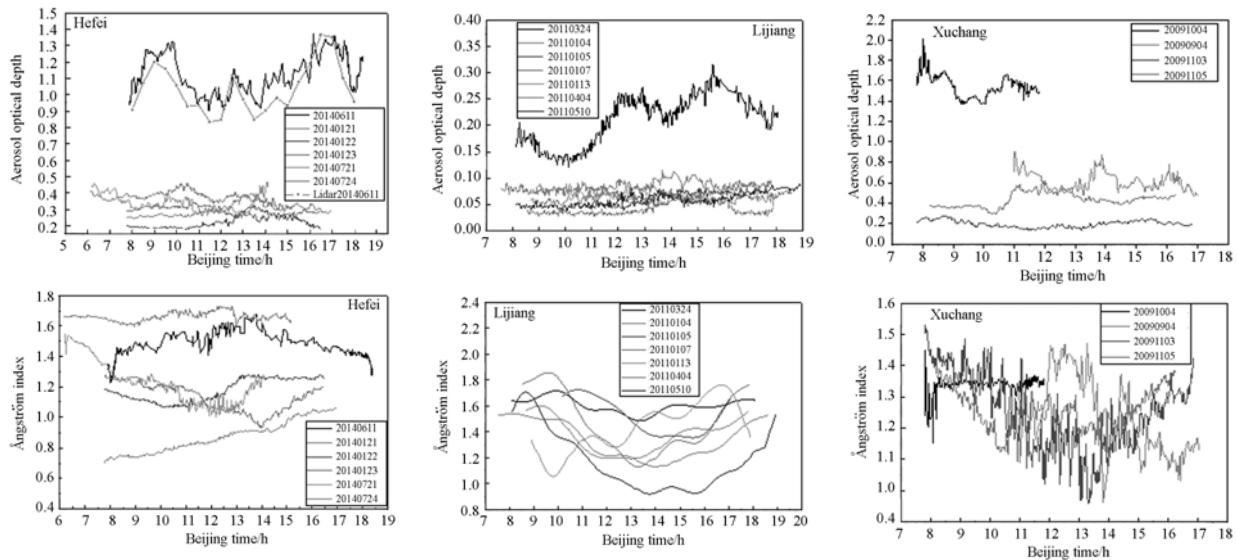


图 2 合肥、丽江和许昌地区秸秆燃烧及其前后晴朗日气溶胶光学厚度和 Ångström 指数变化

Fig. 2 Variation of AOD and Ångström index influenced by straw burning and sunny day over Hefei, Lijiang and Xuchang

表 3 列出了合肥、丽江、许昌 3 个地区各天气下溶胶光学厚度和 Ångström 指数的均值。由表可以看出, 各地秸秆燃烧日的气溶胶光学厚度基本是晴朗日的 3 到 4 倍, 表明秸秆燃烧会导致大气较浑浊, 尤其合肥和许昌的气溶胶光学厚度都在 1.0 以上, 大气已经被污染。表 3 中合肥和许昌晴朗日的气溶胶光学厚度一般在 0.2~0.6, 从文献[1]也可看出合肥全年各晴朗日的气溶胶光学厚度也基本都在 0.8 以下。而文献[9]中丽江全年各晴朗日的气溶胶光学厚度基本都在 0.13

以下, 即使在秸秆燃烧日, 丽江的气溶胶光学厚度也只有 0.209, 表明丽江大气很清洁, 而合肥和许昌的大气相对较浑浊。

根据表 3 的统计结果, 合肥、丽江、许昌 3 个地区秸秆燃烧日的 Ångström 指数均值分别为 1.468, 1.603, 1.336, 除了许昌的结果与文献[17]的平均值较接近, 其它都比该平均值大。我国幅员辽阔, 地形复杂, 不同地区大气中气溶胶的光学特性明显不同<sup>[1]</sup>。表 3 还给出了 3 个地区秸秆燃烧前后各晴朗日的 Ångström 指数的平均值, 可

以看出只有合肥在 1 月 21 日的  $\alpha$  值偏小,其它基本都在 1.1~1.7 之间;除了合肥 7 月 24 日的  $\alpha$  值偏大外,各地区秸秆燃烧日的  $\alpha$  均值都大于晴朗日,表明秸秆燃烧时大气中被注入了大量小的褐炭粒子,使得  $\alpha$  值增大。鉴于 2014 年 2~5 月合肥无观测数据,1 月的数据并不具有可比性。参考文献[1]中合肥晴朗日的气溶胶光学厚度和 Ångström 指数在 5 月份的均值分别为 0.55 和 1.1,7 月份均值分别为 0.52 和 1.15,符合表 3 中晴朗日的取值范围。合肥、丽江、许昌 3 个地区晴朗日 Ångström 指数的取值范围符合城市工业气溶胶类型<sup>[18]</sup>。

表 3 合肥、丽江、许昌不同日期气溶胶光学厚度和 Ångström 指数均值

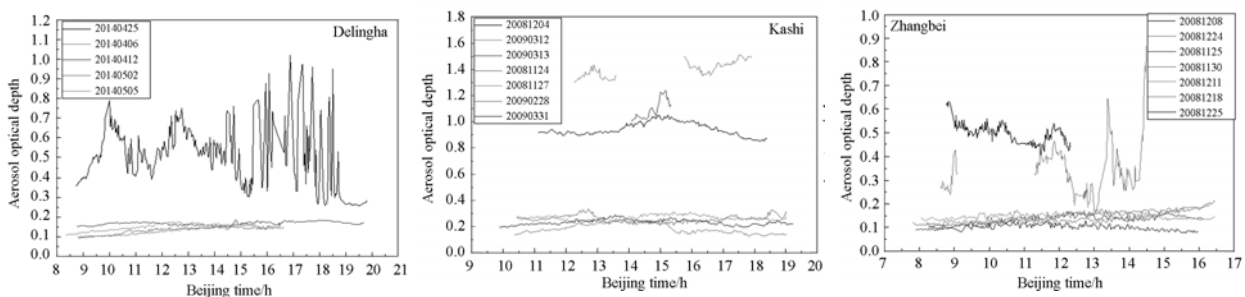
Tab. 3 Average of AOD and Ångström index on different dates over Hefei, Lijiang and Xuchang

地区	参数	秸秆燃烧日		晴朗日				
		6, 11	1. 21	1. 22	1. 23	7. 21	7. 24	
合 肥	AOD	1. 126±0. 121	0. 297±0. 039	0. 222±0. 041	0. 287±0. 028	0. 332±0. 051	0. 374±0. 033	
	$\alpha$	1. 468±0. 088	0. 870±0. 104	1. 173±0. 076	1. 121±0. 093	1. 201±0. 141	1. 664±0. 028	
地区	参数	秸秆燃烧日		晴朗日				
		3, 24	1. 4	1. 5	1. 7	1. 13	4. 4	5. 10
丽 江	AOD	0. 209±0. 046	0. 067±0. 013	0. 061±0. 011	0. 042±0. 012	0. 067±0. 009	0. 082±0. 010	0. 059±0. 012
	$\alpha$	1. 603±0. 060	1. 37±0. 136	1. 51±0. 137	1. 47±0. 233	1. 439±0. 196	1. 344±0. 142	1. 178±0. 239
地区	参数	秸秆燃烧日		晴朗日				
		10. 4	9. 4	11. 3	11. 5			
许 昌	AOD	1. 564±0. 109	0. 599±0. 091	0. 197±0. 034	0. 438±0. 073			
	$\alpha$	1. 336±0. 029	1. 244±0. 125	1. 248±0. 125	1. 257±0. 067			

#### 4.2 沙尘天气对气溶胶光学特性的影响

图 3 给出了德令哈、喀什、张北沙尘及其前后气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的变化。从图中可以明显看出,扬尘时 550 nm 波段气溶胶的光学厚度明显比沙尘前后晴朗日的气溶胶光学厚度大许多;且全天气溶胶光学厚度波动较大,变化

很明显,表明扬尘时所产生的沙尘粒子对可见光的消光作用非常明显。由图还可以看出,扬尘时 Ångström 指数明显比扬尘前后晴朗日的 Ångström 指数小,即扬尘所产生的沙尘粒子对表征气溶胶粒子谱分布的 Ångström 指数影响很大。



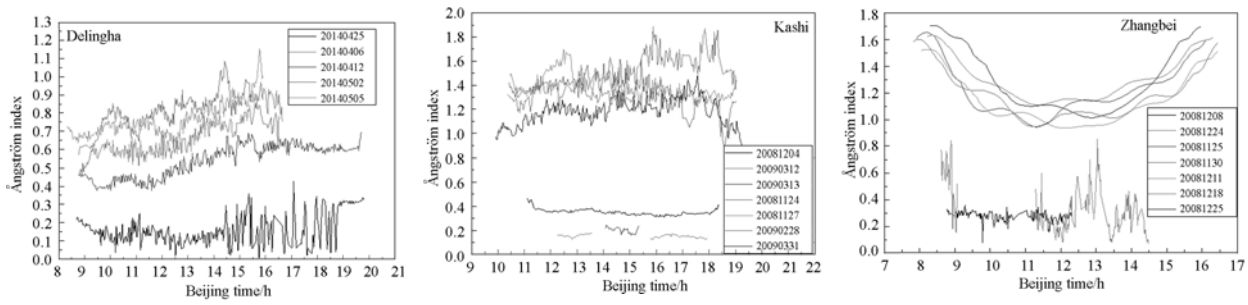


图 3 德令哈、喀什、张北地区沙尘及其前后晴朗日气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的变化

Fig. 3 Variation of AOD and Ångström index influenced by dust and sunny day over Delingha, Kashi and Zhangbei

表 4 列出了德令哈、喀什、张北 3 个地区各天 AOD 和 Ångström 指数的均值。由表可以看出,各地沙尘日的 AOD 基本是晴朗日的 3~7 倍,表明扬尘导致大气很浑浊,尤其喀什地区的扬尘较严重,AOD 达到 1.0 及以上,大气已经被污染;而德令哈在沙尘日 AOD 变化较剧烈,根据站点实验人员描述,起沙时伴随大风形成风沙,9 点到 15 点风沙过后地面留有沙尘,当出现阵风就会扬起地面沙尘,使得 AOD 在 15 点以后短时间内出现

剧烈变化。喀什地区大部分晴朗日 AOD 在 0.25 左右,德令哈和张北 AOD 都为 0.1~0.2。根据文献[1]可知,喀什全年浮尘日较多,多出现在春秋季节,使得春秋季节晴朗日 AOD 也偏高,达到 0.5 左右;张北浮尘日多出现在春冬季,晴朗日 AOD 在春季偏高,在 0.3 左右;而图 4 中德令哈全年晴朗日 AOD 基本都在 0.2 以下,可见 3 个地区中喀什晴朗日 AOD 偏大,而张北和德令哈相对较小,大气较清洁。

表 4 德令哈、喀什、张北不同日期气溶胶光学厚度和 Ångström 指数均值

Tab. 4 Average of AOD and Ångström index in every day over Delingha, Kashi, Zhangbei

地区	参数	沙尘日		晴朗日				
		4.25	4.6	4.12	5.2	5.5		
德令哈	AOD	0.497±0.154	0.133±0.020	0.167±0.009	0.132±0.017	0.15±0.017		
	$\alpha$	0.166±0.086	0.684±0.109	0.538±0.088	0.796±0.113	0.769±0.097		
地区	参数	沙尘日			晴朗日			
		12.4	3.12	3.13	11.24	11.27	2.28	3.31
喀什	AOD	0.943±0.052	1.404±0.054	1.09±0.071	0.255±0.026	0.267±0.018	0.183±0.038	0.233±0.021
	$\alpha$	0.35±0.024	0.152±0.012	0.203±0.023	1.362±0.123	1.383±0.098	1.457±0.178	1.176±0.107
地区	参数	沙尘日			晴朗日			
		12.8	12.24	11.25	11.30	12.11	12.18	12.25
张北	AOD	0.499±0.042	0.344±0.118	0.131±0.020	0.135±0.025	0.15±0.012	0.148±0.022	0.102±0.012
	$\alpha$	0.278±0.036	0.339±0.254	1.214±0.196	1.191±0.183	1.118±0.175	1.294±0.158	1.263±0.228

根据表 4 的统计结果,3 个地区沙尘日的 Ångström 指数均值分别为 0.166,0.235,0.309,取值都在 0.5 以下;Junge 指数的平均值分别为 2.166,2.235,2.309,介于 2~3 之间,因此这 3 个地区扬尘时大气中的主控粒子为较大粒径的沙尘粒子,完全属于沙尘气溶胶的光学特性。表 4 还

给出了扬尘前后各晴朗日的 Ångström 指数平均值,德令哈取值 0.5~0.8,喀什取值 1.1~1.5,张北取值 1.1~1.3,可见德令哈在春季 Ångström 指数偏小,即使在晴朗日,大气中也被注入了大粒子,应是受春季沙尘的影响。从文献[1]中喀什和张北全年晴朗日来看,喀什春秋季节与张北春季的

Ångström 指数多数天在 0.5~1.0, 对应的 AOD 也偏大, 表明喀什春秋两季与张北的春季也受沙尘影响较大, 大气中被注入了大粒子。为了了解德令哈其它季节是否受到沙尘的影响, 图 4 给出了德令哈全年 AOD 和 Ångström 指数的均值变化。由图可见, 德令哈全年晴朗日 AOD 均值基本都在 0.2 以下, 仅春季出现 0.3 左右, 春季 Ångström 指数都在 1.0 以下, 表明该地区春季受沙尘的影响很大, 而其它季节并未受影响, 但这些季节的 Ångström 指数都在 1.0~2.5, 符合城市工业气溶胶类型。

综上分析, 扬尘时 AOD 大幅增大, 是晴朗日的数倍, 与秸秆燃烧时的情况相同; 但 Ångström 指数却明显减小, 取值都在 0.5 以下, 明显区别于秸秆燃烧。即使在晴朗日, 3 个地区在不同季节受到的沙尘影响程度也不同, 这表明 Ångström 指数可作为区别秸秆燃烧和沙尘天气的气溶胶光学特性参数。由本文分析及文献[1]可知, 德令哈、喀什和张北属于沙尘气溶胶和城市工业气溶胶类型。通过  $\alpha$  和 AOD 的取值可以判断当地城市上空主要受什么类型气溶胶的影响。

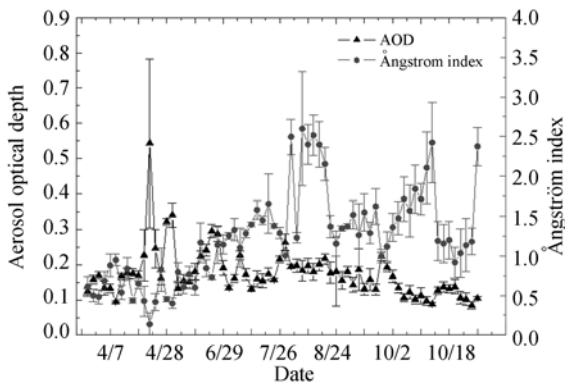


图 4 德令哈气溶胶光学厚度和 Ångström 指数日均值变化

Fig. 4 Daily average of AOD and Ångström index over Delingha

### 4.3 气溶胶光学厚度与 Ångström 指数的关系

图 5 和图 6 分别给出了 6 个典型地区秸秆燃烧和沙尘及其前后气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的变化关系, 各地不同气溶胶源下气溶胶的 AOD 和 Ångström 指数如表 5 所示。

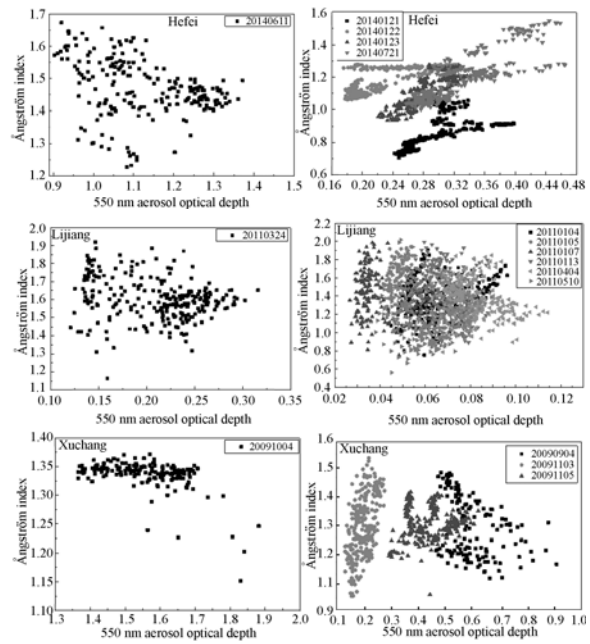


图 5 合肥、丽江、许昌秸秆燃烧及其前后气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的关系

Fig. 5 Relation of AOD and Ångström indexes influenced by dust and sunny day over Delingha, Kashi and Zhangbei

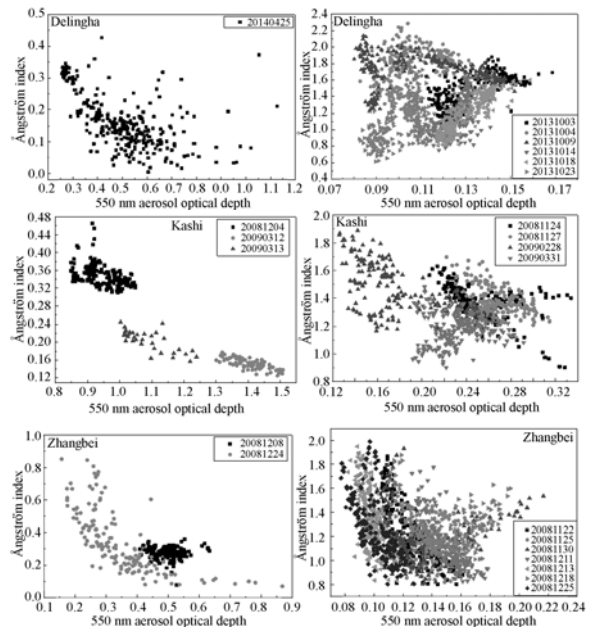


图 6 德令哈、喀什、张北沙尘及其前后气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的关系

Fig. 6 Relation of AOD and Ångström indexes influenced by dust and sunny day over Delingha, Kashi and Zhangbei

表 5 各地不同气溶胶源下气溶胶光学厚度和 Ångström 指数的取值关系

Tab. 5 Relation of AOD and Ångström indexes influenced by different aerosols in each zone

地区	秸秆燃烧	晴朗日
合肥	$AOD > 0.9, 1.2 < \alpha < 1.7$	$AOD < 0.5, 0.7 < \alpha < 1.6$
丽江	$AOD > 0.12, 1.3 < \alpha < 2.0$	$AOD < 0.12, 0.6 < \alpha < 2.0$
许昌	$AOD > 1.35, 1.25 < \alpha < 1.4$	$AOD < 0.9, 0.9 < \alpha < 1.5$
地区	沙尘日	晴朗日
德令哈	$AOD > 0.2, \alpha < 0.4$	$AOD < 0.16, 0.6 < \alpha < 2.2$
喀什	$AOD > 0.8, \alpha < 0.48$	$AOD < 0.34, 0.8 < \alpha < 2.0$
张北	$AOD > 0.15, \alpha < 0.8$	$AOD < 0.2, 0.8 < \alpha < 2.0$

由表 5 可以看出,秸秆燃烧时,各地 AOD 的最小值总是大于晴朗日 AOD 的最大值,  $\alpha$  最小值总是大于晴朗日  $\alpha$  最小值,从而进一步证明了秸秆燃烧时大气被注入了大量的细粒子,使得  $\alpha$  最小值增大,同时也改变了 AOD 与  $\alpha$  的关系。在晴朗日合肥的  $\alpha$  取值基本随 AOD 的增大而增大,而秸秆燃烧时这种关系被破坏,AOD 与  $\alpha$  的关系较分散。晴朗日合肥的 AOD 与  $\alpha$  的关系类似于文献[3]中雾霾天气时的关系,这表明合肥即使在晴朗天气条件下,大气中也被注入了大量雾霾粒子,即细粒子,故 4.1 节中合肥 7 月 24 日这天  $\alpha$  值偏大,AOD 也比其它晴朗日大。由文献[1]可知,合肥全年 AOD 普遍比其它地区大,应与近些年合肥城市大建设带来的空气污染而引起的雾霾天气有关。许昌地区秸秆燃烧时 AOD 与  $\alpha$  的关系虽不同于合肥,但同样破坏了晴朗天气下两者的关系。丽江大气一直处于较干净状态,偶尔的秸秆燃烧并未影响到 AOD 与  $\alpha$  之间的变化状态。综上所述,通过表 5 和图 6 中给出的 AOD 和  $\alpha$  的关系,可以判断出合肥、丽江、许昌城市上空的主控气溶胶源是生物质燃烧气溶胶还是城市工业气溶胶。

由表 5 还可以看出,扬尘时除了张北 AOD 有部分交集,其它地区 AOD 最小值大于晴朗日 AOD 的最大值,  $\alpha$  最大值总是小于晴朗日  $\alpha$  的最小值,这 3 个地区扬尘时 AOD 与  $\alpha$  的取值关系明

显与合肥、丽江和许昌秸秆燃烧时不同,表明扬尘时大气中被注入了大量的粗粒子,使得 AOD 急剧增大,  $\alpha$  接近于 0。由图 6 可以看出,扬尘时 3 个地区  $\alpha$  取值都随 AOD 的增大而减小,喀什和张北地区与晴朗日相比,扬尘时 AOD 与  $\alpha$  的关系并未受到影响,仅是 AOD 与  $\alpha$  各自的取值发生较大的变化;德令哈在晴朗日时 AOD 与  $\alpha$  的关系相对较复杂。

综合以上分析,得出秸秆燃烧和扬尘时 AOD 和  $\alpha$  的取值范围与晴朗日相比发生了较大的变化,合肥、许昌、德令哈地区 AOD 和  $\alpha$  的变化关系在秸秆燃烧和扬尘时受到较大影响,各地区的 AOD 和  $\alpha$  的变化关系明显不同;秸秆燃烧时 AOD 和  $\alpha$  的变化关系不同于扬尘时。

## 5 结 论

本文对秸秆燃烧和扬尘对气溶胶光学特性的影响展开了研究。研究表明,秸秆等生物质的露天燃烧和沙尘天气对邻近城市地区气溶胶光学特性的影响非常显著。城市上空由于受秸秆燃烧时产生的有机碳粒子等细质粒和扬尘时产生的大粒径的沙尘粒子的影响,AOD 在可见光波段大幅增加,从而对太阳直射有强烈的消光作用。表征粒子尺度的 Ångström 指数在秸秆燃烧时增大,一般都大于 1.3;而在沙尘天气时却明显减小,取值都小于 0.5,明显区别于生物质燃烧气溶胶和城市工业气溶胶。各地区的 AOD 和  $\alpha$  的变化关系明显不同,秸秆燃烧时 AOD 和  $\alpha$  的变化关系明显区别于扬尘时。综上所述,Ångström 指数是区别秸秆燃烧和沙尘天气的气溶胶光学特性参数。

本文的研究结果为我国由森林火灾、草原火灾以及燃料使用等生物质燃烧所产生的碳黑气溶胶光学特性的检测提供了研究参考,同时沙尘气溶胶光学特性的判断也为我国西北城市地区受周边沙漠的影响程度提供了有益参考,对城市地区的环境治理具有重要意义。

## 参考文献:

[1] 李建玉,魏合理,徐青山,等. 中国部分典型地区气溶胶光学特性观测[J]. 光学精密工程,2012, 10

(2):185-193.

LI J Y, WEI H L, XU Q SH, *et al.*. Atmospheric aerosol optical characteristics measured at several typical zones in China[J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2012, 10(2):185-193. (in Chinese)
- [2] 王庆辰. 大气气溶胶的光学厚度和 Ångström 指数公式的使用范围[J]. 大气科学, 1982, 6(1):52-57. WANG Q CH. Optical depth of atmospheric aerosols and the valid range of Ångström formula[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1982, 6(1):52-57. (in Chinese)
- [3] 牟福生, 李昂, 谢品华, 等. 基于光学遥测技术的合肥市气溶胶参数观测[J]. 中国环境监测, 2014, 30(6):133-137. MOU F SH, LI A, XIE P H, *et al.*. Aerosol properties by optical remote sensing techniques in Hefei city[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(6):133-137. (in Chinese)
- [4] 杨红龙, 李磊, 杨溯, 等. 深圳城市气溶胶物理光学特性的观测研究[J]. 光子学报, 2012, 41(12):1427-1434. YANG H L, LI L, YANG SH, *et al.*. The measurement of aerosol optical properties over Shenzhen [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12):1427-1434. (in Chinese)
- [5] 杨元建, 傅云飞, 吴必文, 等. 秸秆焚烧对中国东部气溶胶时空格局的影响[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(4):241-252. YANG Y J, FU Y F, WU B W, *et al.*. Impacts of agricultural fire on aerosol distribution over East China during summer harvest time[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(4):241-252. (in Chinese)
- [6] 蔡宏珂, 周任君, 傅云飞, 等. CALIOP 对一次秸秆焚烧后气溶胶光学特性的探测分析[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(4):469-477. CAI H K, ZHOU R J, FU Y F, *et al.*. Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization detection of aerosol optical properties after a crop burning case [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(4):469-477. (in Chinese)
- [7] 徐敬, 张小玲, 颜鹏, 等. 2006 年春季沙尘天气下背景地区大气气溶胶光学特性的观测研究[J]. 气象科技, 2008, 36(6):679-685. XU J, ZHANG X L, YAN P, *et al.*. Observational study of aerosol extinction property during dust weather in background area[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(6):679-685. (in Chinese)
- [8] 闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(2):153-160. MIN M, WANG P C, ZONG X M, *et al.*. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(2):153-160. (in Chinese)
- [9] 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.):721-731. 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.):721-731. (in Chinese)
- [10] 李建玉, 詹杰, 徐青山, 等. 丽江高美古大气透明度和可降水量[J]. 天文研究与技术, 2013, 20(6):1166-1174. LI J Y, ZHAN J, XU Q SH, *et al.*. Atmospheric transparency and precipitable water vapor at Gaomeigu in Lijiang County, Yunnan [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2013, 20(6):1166-1174. (in Chinese)
- [11] XU Q SH, QIE L L, ZHOU K B. Errors of aerosol thickness imposed by calibration coefficients of sun-photometer[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(1):47-50.
- [12] 李建玉, 伽丽丽, 徐文清, 等. DTF 型太阳光度计测量大气光学参数的对比验证及误差分析[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(2):89-94. LI J Y, QIE L L, XU W Q, *et al.*. Comparison certification and error analysis of atmospheric optical parameters measured by DTF sun-photometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(2):89-94. (in Chinese)
- [13] 胡顺星, 王珍珠, 徐青山, 等. 激光雷达测量大气气溶胶光学厚度方法研究[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3):307-310. HU SH X, WANG ZH ZH, XU Q SH, *et al.*. Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3):307-310. (in Chinese)
- [14] LIOU K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation*[M]. 2nd Ed. Academic Press, 2002.
- [15] CUOMO V, ESPOSITO F, PAVESE G, *et al.*. Determining Ångström's turbidity coefficients: An analysis with a wide-range grating spectrometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1993, 18:

- 59-69.
- [16] CACHORROR V E, de FRUTOS A M, CASANOVA J L. Determination of the Ångström turbidity parameters[J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26: 3069-3076.
- [17] UTRILLAS M P, PEDRÓS R, MARTINEZ-LOZANO J A, *et al.*. A new method for determining the Ångström turbidity coefficient from broadband filter measurements[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 863-874.
- [18] DUBOVİK 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: 590-608.
- [19] TANRÉ D, KAUFMAN Y J, HOLBEN B N, *et al.*. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(D16):205-217.
- [20] REMER L A, KAUFMAN Y J, HOLBEN B N. Interannual variation of ambient aerosol characteristics on the east coast of the United States[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D2): 2223-2231.

#### 作者简介:



**宫纯文**(1980—),男,安徽蒙城人,博士研究生,2002年于安徽师范大学获得学士学位,2009年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事大气气溶胶光学特性及其探测技术的研究。E-mail: cwgong@mail.ustc.edu.cn

#### 通讯作者:



**李学彬**(1980—),男,安徽太和人,副研究员,硕士生导师,2002年于安徽师范大学获得学士学位,2005年,2008年于中科院安徽光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气气溶胶光学特性及其探测技术的研究。E-mail: xbli@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。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)