

王振海, 张武, 史晋森, 等. 半干旱地区气溶胶散射和吸收特性的观测研究[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1424-1431.

# 半干旱地区气溶胶散射和吸收特性的观测研究

王振海<sup>1-2</sup>, 张武<sup>1</sup>, 史晋森<sup>1</sup>, 黄建平<sup>1</sup>,  
陈艳<sup>1</sup>, 田磊<sup>1</sup>, 向涛<sup>1</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000;

2. 青海省玉树州气象局, 青海玉树州 815000)

**摘要:** 利用兰州大学半干旱气候和环境观测站 SACOL (Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University) 2007 年 11 月 1 日—2008 年 10 月 31 日 AE-31 黑碳仪和 2007 年 8 月 1 日—2008 年 7 月 31 日 M9003 积分浊度仪的连续观测资料, 对该地区气溶胶散射和吸收特性的变化特征进行了分析。结果表明, 该地区气溶胶年平均散射系数为  $158.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 吸收系数为  $14.11 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 520 nm 单次散射比为 0.83; 散射系数和吸收系数的年变化呈单峰型, 峰值分别出现在 12 月和 11 月; 采暖期内日变化呈双峰型, 非采暖期内近似表现为单峰型。在沙尘天气条件下, 散射系数和吸收系数分别增大了 103.8% 和 88.5%。结合同期 APS-3321 粒子谱仪的相关观测资料分析得出, 无论是粒子数浓度还是质量浓度, 与散射系数和吸收系数的相关系数均在 0.8 以上。

**关键词:** 散射系数; 吸收系数; 单次散射比;  $\text{PM}_{2.5}$

文章编号: 1000-0534(2012)05-1424-08 中图分类号: P401 文献标志码: A

## 1 引言

大气气溶胶是指大气作为气相载体与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系, 其粒子直径多在  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$  之间。由于大气气溶胶可以通过散射和吸收太阳短波辐射以及地球长波辐射, 从而影响地—气系统的辐射平衡(直接效应); 与此同时, 它们还可以作为凝结核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应的速度(间接效应)。因此, 大气气溶胶在大气辐射和气候变化的研究中占有重要地位<sup>[1]</sup>。

气溶胶散射系数和吸收系数是气溶胶光学特性的重要参数之一, 也是研究大气辐射过程和建立气溶胶模式所必须的参数。国外对气溶胶散射和吸收特性的观测研究起步较早。20 世纪 80 年代, NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) 在美国阿拉斯加、夏威夷莫纳罗亚山、萨摩亚群岛以及南极等大气监测基准站开始了气溶胶散射性质的观测研究<sup>[2-3]</sup>。从 1995 年开始至今国际大气化学研究计划 IGAC (International Global At-

mospheric Chemistry) 组织了多次气溶胶特性实验, 获得一些珍贵的气溶胶散射和吸收性质的资料<sup>[4-5]</sup>。相比较而言, 国内对气溶胶散射和吸收性质的观测研究起步较晚, 胡波等<sup>[6]</sup>利用积分浊度仪观测资料, 对兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子散射特征及其与空气污染的关系进行了研究, 结果表明, 该地区 550 nm 处的散射系数日变化呈双峰型, 且与  $\text{PM}_{10}$  的相关系数达到 0.8 以上。柯宗建等<sup>[7]</sup>对北京上甸子本底站冬季气溶胶散射特征及其影响因素进行了研究, 得出该地区秋、冬季气溶胶散射系数平均值和标准差分别为  $179.7 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $253.2 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 散射系数和  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度之间有较好的相关性。孟昭阳等<sup>[8]</sup>对太原市冬季大气气溶胶散射特征进行了分析, 结果表明, 太原市冬季气溶胶散射系数平均值为  $850.2 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 。章秋英等<sup>[9-10]</sup>对内蒙古锡林浩特地区的气溶胶散射和吸收特性进行了研究, 得到锡林浩特市 1—9 月平均日散射系数为  $127.12 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ 。该地区春季黑碳气溶胶质量浓度日平均值为  $2.052 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 12 月日平均值为  $6.228 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。潘小乐等<sup>[11]</sup>对 2006

收稿日期: 2011-05-09; 定稿日期: 2011-12-15

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955302)资助

(作者简介: 王振海(1978—), 男, 青海西宁人, 工程师, 主要从事大气辐射和遥感研究。E-mail: mydregonline@163.com www.cnki.net)

年春季北京城区大气气溶胶中沙尘和黑碳气溶胶吸收系数的波长指数及其对总吸收系数的贡献进行了估算,结果表明,在北京市区所观测到的春季浮沉过程中沙尘气溶胶对吸收消光的贡献为 20.7% ~ 43.7%,而黑碳的贡献一般在 60% 以上。

黄土高原半干旱地区是半湿润气候向干旱气候区的过渡带<sup>[12]</sup>,生态环境脆弱,地表性质复杂,气溶胶来源丰富,成分较为复杂,是气候变化的敏感区域。对这一地区的气溶胶光学特性研究大部分集中在污染较严重的城市<sup>[6, 13-14]</sup>,对气溶胶散射系数、光学厚度和谱特征等参数的研究居多<sup>[15-25]</sup>,而对于背景条件下的气溶胶特性,尤其是对散射和吸收特性进行同时观测研究的较少。

本文采用兰州大学半干旱气候和环境观测站(SACOL)2007年11月1日-2008年10月31日 AE-31 黑碳仪和 2007年8月1日-2008年7月31日 M9003 积分浊度仪的连续观测资料,结合同期 APS-3321 粒子谱仪的气溶胶浓度观测资料,对半干旱地区气溶胶同期散射系数和吸收系数的变化特征进行较为详细的研究,分析二者和 PM<sub>2.5</sub> 浓度之间的关系,为深入研究半干旱地区气溶胶光学特征及其气候效应进行有益的探索。

## 2 观测站概况、仪器介绍及资料选取

### 2.1 观测站概况

兰州大学半干旱气候与环境观测站 SACOL 位于兰州市以东约 37 km 的兰州大学榆中校区的翠英山顶上(海拔 1965.8 m, 35.946°N, 104.137°E)。观测场占地约 8 hm<sup>2</sup>,下垫面属于典型的黄土高原塬面梁峁地貌,地表基本为原生植被,属温带半干旱气候。观测站建立在山顶,距宛川河盆地相对高度 200 m,受校区和周围人类活动的影响较小。

### 2.2 仪器介绍

对于气溶胶散射系数的测定采用目前使用比较广泛的澳大利亚 ECOTECH 公司的 M9003 积分浊度仪。M9003 型积分浊度仪属于单波长积分浊度仪,在采样泵的驱动下,空气通过进气管进入光学测量腔体,测量后通过排气口排出。在光学测量腔体内,空气样品对发光二极管发出的入射光产生散射,由光电倍增管对正比于入射光强的散射光信号进行检测。光学测量腔体内装有光学隔板,只允许一狭小锥体内的散射光可以到达光电倍增管,其散射角在 10°~170°之间,并且阻挡多次散射的杂散光进入光电倍增管。在这种条件下,光电倍增管产

生的信号正比于样气的散射系数  $\beta$ ,由此测量散射系数。仪器测量波长为 525 nm,采样频率为 5 min。

实验采用美国玛基公司(Magee Scientific CO. USA)的 AE-31 黑碳仪来测定气溶胶吸收系数。一般认为,除一些特殊天气状况(如沙尘、扬尘)外,黑碳气溶胶总的光吸收贡献在 90% ~ 95%<sup>[26-27]</sup>,因此对黑碳气溶胶的光吸收而言,气溶胶中其他成分对可见光的吸收可以忽略不计。AE-31 是利用黑碳对可见光的强烈吸收作用,基于 Beer-Lambert 定律,通过测定一定时间段内一定波长光强由黑碳浓度的累积而引起的衰减增量来确定黑碳浓度的黑碳气溶胶实时监测仪器。黑碳仪具有 7 个不同波长的测量通道(0.37, 0.47, 0.52, 0.59, 0.66, 0.88, 0.95  $\mu\text{m}$ ),其中 0.88  $\mu\text{m}$  是黑碳气溶胶测量标准通道。流量为 5 L · min<sup>-1</sup>,采样频率为 5 min。通过其测定的各物理量可以通过下式来计算吸收系数:

$$\beta_a = \frac{[A(\lambda, T + \Delta T) - A(\lambda, T)]A}{F \Delta T} \times \sigma_\lambda \times 1/\rho, \quad (1)$$

式中:  $A$  为滤膜上采集了颗粒物的滤膜点的面积;  $F$  为采样流量;  $A(\lambda, T)$  和  $A(\lambda, T + \Delta T)$  分别为  $T$  和  $T + \Delta T$  时刻透过采集滤膜的光强衰减(波长  $\lambda$  处);  $\Delta T$  为测量的时间间隔;  $\sigma_\lambda$  为吸收常数(由厂家给出),其值随波长的改变而改变,在 880 nm 标准通道处取 16.6, 520 nm 通道取 28.1;  $\rho$  为校准常数,用于滤除气溶胶在石英膜上对光的多次散射和吸收造成的影响。

气溶胶浓度和粒径谱仪的测定是采用美国 TSI 公司的 APS-3321 型空气动力学粒径谱仪。由于空气动力学直径决定了粒子在空气中的行为,因此它是气溶胶粒径测量的重要参数。

APS-3321 型粒径谱仪通过测量在加速气流中不同大小粒子经过检测区域的飞行时间来实时测量粒子的空气动力学粒径,其粒径测量范围为 0.5 ~ 20  $\mu\text{m}$ ,总共 52 个通道,采样流量为 5.0 L · min<sup>-1</sup>(其中样气为 1.0 L · min<sup>-1</sup>,鞘气为 4.0 L · min<sup>-1</sup>)。其测量基本原理是样本气体经过喷嘴加速后,不同粒径的粒子获得了不同的初速度。在经过监测区域时,不同大小的粒子对两束平行激光束产生不同的光学散射信号,通过将该信号转换成电子脉冲信号,脉冲信号波峰之间的时间(即粒子在两激光束间飞行的时间)提供了粒子空气动力学粒

径的信息。通过专用的 AIM(Aerosol Instrument Manager)软件对每个样本进行计算和分析,可以显示每个样本的气溶胶数浓度、质量浓度以及粒径谱分布,其中数浓度资料为原始资料,质量浓度和粒径谱是根据数浓度资料计算而得到。

### 2.3 资料选取和质量控制

M9003 浊度仪资料取自 2007 年 8 月 1 日—2008 年 7 月 31 日 5 min 连续观测数据,实有样本 99 360 个,有效样本 90 865 个。

AE-31 黑碳仪资料取自 2007 年 11 月 1 日—2008 年 10 月 31 日 5 min 连续观测数据,采用 880 nm 标准通道的数据来分析气溶胶吸收系数,单次散射比用 520 nm 通道数据,实有样本 90 087 个,实际有效样本为 87 848 个。

APS-3321 粒径谱仪资料样本取自 2007 年 11 月 1 日—2008 年 10 月 31 日,实有样本 79 941 个。

以上资料样本均剔除了一些不合理、不完整的野点资料样本。

## 3 结果分析

### 3.1 气溶胶散射系数和吸收系数的时间变化特征

气溶胶散射(吸收)系数是指在单位体积中一定粒径段内粒子散射(吸收)截面的积分,即:

$$\beta_s = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_s(r, \lambda, m) \cdot n(r) dr, \quad (2)$$

$$\beta_a = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_a(r, \lambda, m) \cdot n(r) dr, \quad (3)$$

其中:  $r_1, r_2$  为积分粒径范围;  $\sigma_s(\sigma_a)$  为相同粒径范围内气溶胶粒子的散射(吸收)截面,是散射(吸收)效率因子和粒子截面积的乘积;  $n(r)$  为粒子谱函数。

单次散射比  $\omega(\lambda)$  用来度量气溶胶粒子散射和吸收的相对重要性,即:

$$\omega(\lambda) = \frac{\beta_s(\lambda)}{\beta_s(\lambda) + \beta_a(\lambda)}, \quad (4)$$

其中:  $\omega(\lambda)$  为一无量纲量,取值在  $0 \sim 1$ ,  $\omega(\lambda) = 0$  为全吸收型,  $\omega(\lambda) = 1$  为无吸收型。

散射系数则由浊度仪直接测量得出,而吸收系数可由黑碳仪测得的黑碳浓度资料计算得到。

#### 3.1.1 年变化特征

对散射系数和吸收系数样本以及 520 nm 波段的单次散射比进行统计,做日平均散点图和月平均直方图(图 1)并得到年平均散射系数为  $158.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 吸收系数为  $14.11 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 11 月一次年 7 月 520 nm 的平均单次散射比为 0.83, 气溶胶散射

消光和吸收消光对气溶胶消光的贡献分别为 91.84% 和 8.16%。这与白建辉<sup>[28]</sup>对我国华北地区可见光传输的研究结果即大气中物质的散射和吸收对辐射衰减的贡献为 95% 和 5% 的表述基本一致。将散射系数、吸收系数和同期气溶胶质量浓度(由 APS-3321 粒子谱仪测得)相比,可得到质量散射系数和质量吸收系数,分别为  $1.22 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

从图 1 中可看出,散射系数和吸收系数的年变化均呈现出冬季大、其他季节小的单峰型,散射系数的年峰值出现在 12 月( $319.30 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ),吸收系数的年峰值出现在 11 月( $27.59 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ); 散射系数的年谷值出现在 6 月( $64.11 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ),吸收系数的年谷值出现在 9 月( $8.95 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )。总体而言,冬半年散射系数和吸收系数日平均值和波动幅度较夏半年的大。散射系数日平均最小值为  $16.61 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  (2008 年 2 月 15 日),最大值为  $691.25 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  (2007 年 12 月 8 日); 吸收系数日平均最小值为  $4.46 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  (2008 年 9 月 16 日),最大值为  $35.26 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  (2007 年 12 月 10 日)。520 nm 单次散射比各月都维持较高,但在 2008 年 2 月出现了 0.775 的低值,这可能是因为本月为农历春节期间,正月的祭祖活动(其中有个别活动在观测站附近进行)和爆竹燃放致使大气中黑碳气溶胶浓度增大,吸收系数也随之增大,达到了和散射系数相同的量级。

从季节来看,散射系数冬季( $236.22 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 秋季( $128.53 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 春季( $112.56 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 夏季( $99.26 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ),吸收系数是冬季( $22.87 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 春季( $10.70 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 夏季( $9.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ ) > 秋季( $9.68 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )。由于冬季采暖的影响,无论是散射系数还是吸收系数在冬季均较其他季节大的多,且波动较大,夏季由于湿沉降过程较多,使得散射系数和吸收系数均维持在一个较低的水平。春季吸收系数较高,这与春季沙尘天气较多,沙尘气溶胶对吸收系数的贡献增大有关。秋季的散射系数较大,但吸收系数却较小,具体原因有待于进一步研究。

对照中国北方其他地区(所用仪器均为 M9003)的观测结果<sup>[6-7, 9-10, 29-30]</sup>, SACOL 站的散射系数( $158.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )和这些地区的散射系数均为  $10^2 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  量级,较甘肃民勤( $116 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )、河北张北( $130 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )和内蒙古锡林浩特( $127.12 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )地区稍高,但低于北京上甸子( $179.7 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

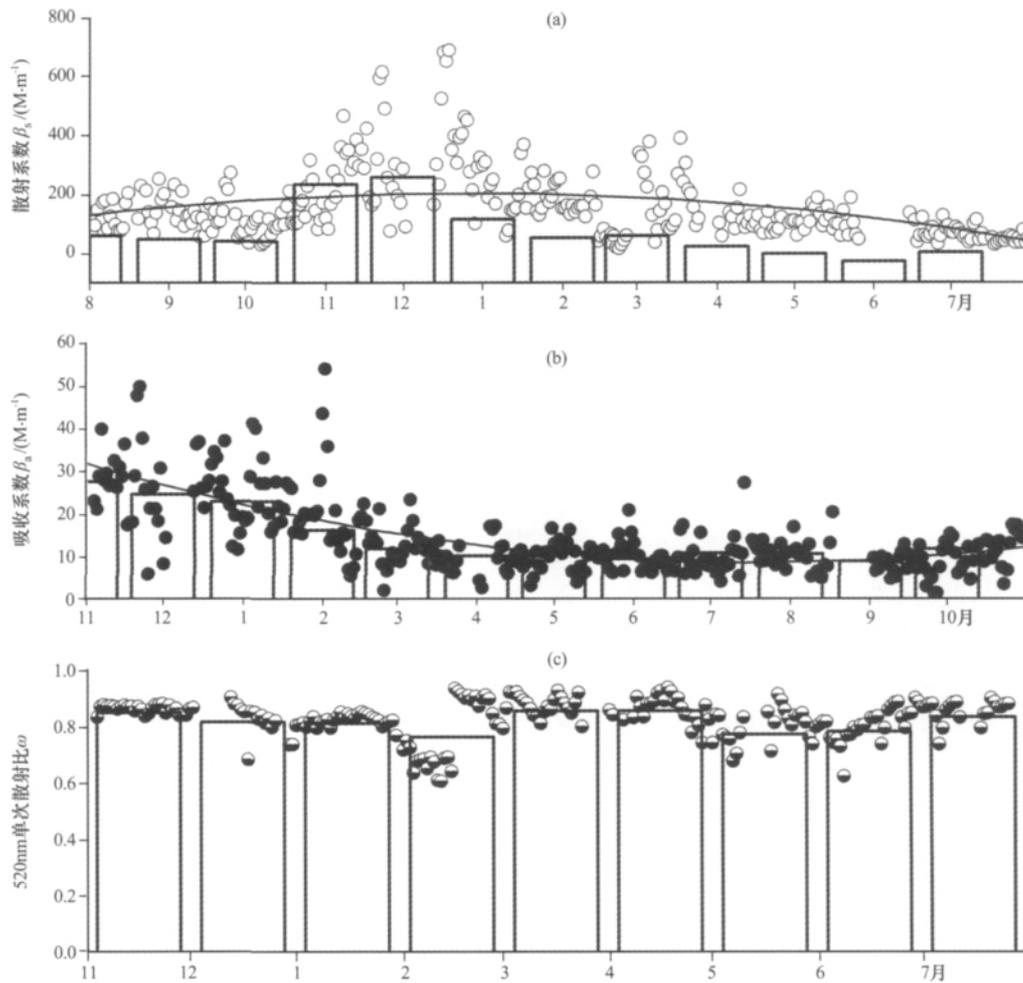


图 1 SACOL 站气溶胶光学特性的年变化

(a) 散射系数  $\beta_s$ , (b) 吸收系数  $\beta_a$ , (c) 520 nm 单次散射比  $\omega$

Fig. 1 The annual variation of aerosol optical characteristic at SACOL site. (a) scattering coefficient  $\beta_s$

(b) absorption coefficient  $\beta_a$ , (c) single scattering albedo of 520 nm  $\omega$

$\cdot m^{-1}$ )和兰州西固地区( $313 M \cdot m^{-1}$ ); 吸收系数观测资料较少, 根据已有的观测<sup>[10-11]</sup>进行对比, 发现其量级都在  $10^1 M \cdot m^{-1}$  左右。这说明中国北方地区的气溶胶消光作用中, 散射起主要作用。散射系数和吸收系数的量级分别为  $10^2 M \cdot m^{-1}$  和  $10^1 M \cdot m^{-1}$ 。

### 3.1.2 日变化特征

根据 SACOL 站所在地区的气候特点和冬季采暖规律, 将观测时段内的数据分为采暖期(11 月—次年 3 月)和非采暖期(4—10 月)两个时间段来分析。按散射系数和吸收系数样本做逐时平均, 得到其日变化特征, 如图 2 所示。

由于两个时间段内的人类活动影响和气候特点不同, 采暖期内无论是散射系数还是吸收系数都较非采暖期高出一倍左右; 采暖期内散射系数和吸收系数的日较差也较非采暖期的大, 日变化均呈较为

明显的双峰型, 但在非采暖期内二者却近似表现为单峰型。

从散射系数来看, 采暖期主峰值出现在 12:00 (北京时, 下同)左右, 次峰值出现在 21:00 左右, 谷值出现在 17:00; 在非采暖期峰值出现在 10:00 左右, 谷值出现在 18:00 左右。这种采暖期双峰型的特征和其他测站的观测结果基本一致<sup>[7-9]</sup>。

从吸收系数来看, 采暖期主峰值出现在 10:00 左右, 次峰值出现在 21:00 左右, 谷值出现在 17:00 左右; 在非采暖期峰值出现在 09:00 左右, 谷值出现在 17:00 左右。

这种气溶胶消光特性的日变化特征主要与 SACOL 站所在的半干旱地区的气候特征以及不同时段内周围人类活动的影响不同有关。半干旱地区

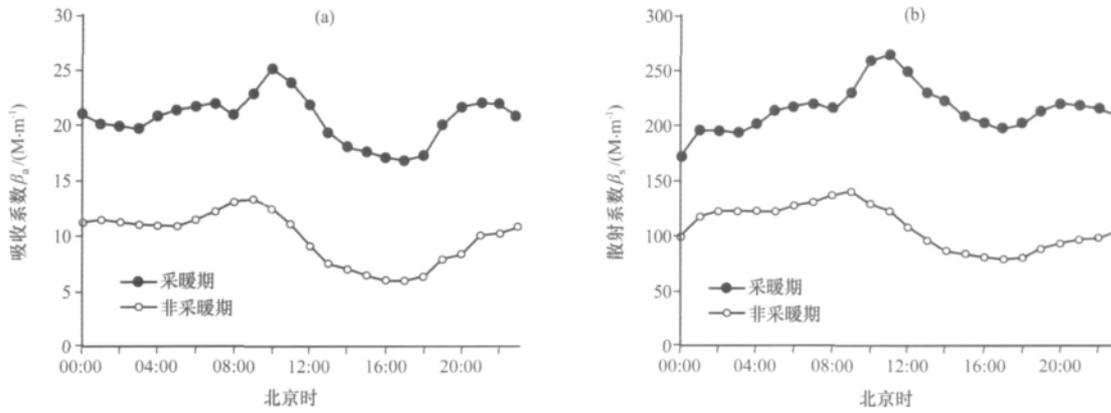


图 2 SACOL 站气溶胶吸收系数  $\beta_a$ (a)和散射系数  $\beta_s$ (b)的日变化  
 Fig. 2 The diurnal variations of absorption coefficient  $\beta_a$ (a) and scattering coefficient  $\beta_s$ (b) at SACOL site

地表干燥, 气温日较差大。地表由于植被覆盖度较低, 近地面层夜间降温和白天增温都较快, 凌晨至上午时段常有逆温层生成, 使得大气污染物的扩散受到抑制, 散射系数和吸收系数都较大。日出后, 地表增温较快, 逆温层在中午左右开始消散, 散射系数和吸收系数也随之降低。

采暖期内, 人类活动(主要是早晨和晚间的燃煤、秸秆燃烧以及交通高峰期的汽车尾气排放等)对散射系数和吸收系数的影响叠加在大气稳定度的日变化特征上, 使得采暖期内双峰型特征更为明显, 日较差更大, 傍晚的采暖燃烧排放导致在 21:00 左右出现了一个次峰值。而在非采暖期内, 一方面由于没有采暖燃烧导致的污染排放; 另一方面湿沉降相对采暖期较多, 所以散射系数和吸收系数均较采暖期小, 其日变化更多地依赖于大气稳定度的变化。非采暖期内凌晨至中午时段由于受逆温

层影响, 无论是散射系数还是吸收系数均维持相对较高值, 午后逆温层破坏, 湿沉降过程相对较多, 二者数值随之减小, 进入夜间后随着逆温层的建立其值又开始增大。

### 3.2 沙尘天气对气溶胶吸收、散射系数的影响

SACOL 站所在地区位于我国最大的强沙尘暴发生区域的下游, 春季沙尘天气频发。根据观测站天气现象记载, 在 2008 年春季观测期间(3-5 月)共发生沙尘天气 10 次, 均为浮尘或者扬沙天气。选取较典型的 5 月 29 日强浮尘天气来分析沙尘天气对气溶胶散射系数和吸收系数的影响(图 3)。

平均而言, 5 月 29 日沙尘天气下较 28 日非沙尘天气条件下平均散射系数和吸收系数都要高很多。散射系数 28 日为  $59.71 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 29 日为  $121.69 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 增大了 103.8%; 吸收系数 28 日为  $11.10 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 29 日为  $20.92 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 增大

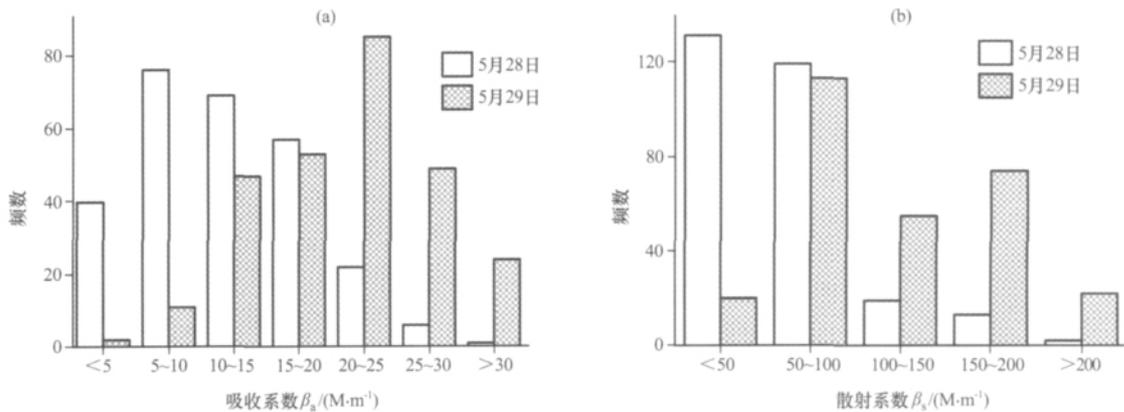


图 3 2008 年 5 月 29 日沙尘天气对吸收系数  $\beta_a$ (a)和散射系数  $\beta_s$ (b)的影响  
 Fig. 3 The influence of the dust weather on absorption coefficient  $\beta_a$  and scattering

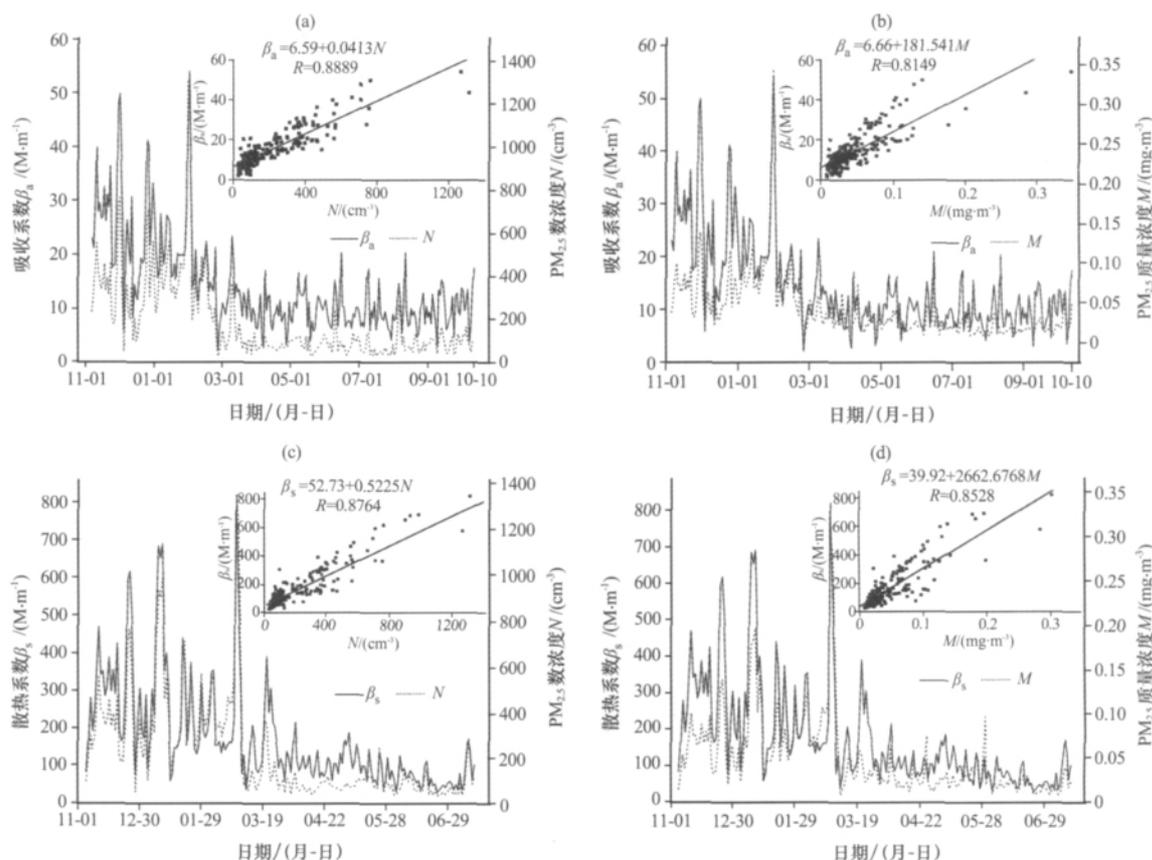


图 4 散射系数  $\beta_s$ 、吸收系数  $\beta_a$  和  $\text{PM}_{2.5}$  数浓度  $N$ 、质量浓度  $M$  的关系

(a)  $\beta_a$  和  $N$ , (b)  $\beta_a$  和  $M$ , (c)  $\beta_s$  和  $N$ , (d)  $\beta_s$  和  $M$

Fig. 4 The correlation among scattering  $\beta_s$ , absorption  $\beta_a$  coefficients and number  $N$ , mass  $M$  concentration of  $\text{PM}_{2.5}$ . (a)  $\beta_a$  and  $N$ , (b)  $\beta_a$  and  $M$ , (c)  $\beta_s$  and  $N$ , (d)  $\beta_s$  and  $M$

了 88.4%。从出现频数来看, 29 日沙尘天气条件下, 散射系数在  $>100 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  频段内增大最多, 而吸收系数在  $>20 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  频段增大最多。

### 3.3 散射、吸收系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的关系

气溶胶散射系数和吸收系数与  $\text{PM}_{2.5}$  均有较好的相关关系。本文利用 2007 年 11 月 1 日—2008 年 10 月 31 日 APS-3321 粒径谱仪观测到的气溶胶数浓度和质量浓度分析相应时段内与气溶胶散射系数和吸收系数之间的关系。因为 3 台仪器的样本观测时间不是严格对应的, 所以采用逐时平均值进行相关分析(图 4)。

总体而言, 无论是数浓度还是质量浓度, 均表现出与散射系数和吸收系数较好的相关性, 相关系数都在 0.8 以上(通过了 0.0001 显著性水平检验)。数浓度和质量浓度日平均值大的日期, 对应散射系数和吸收系数的日平均值较大值; 相反, 在数浓度和质量浓度较小的日期, 对应散射系数和吸收系数的日平均值较小值。

$\text{PM}_{2.5}$  与散射系数的关系较吸收系数更密切, 相对于  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度, 数浓度与散射系数、吸收系数的相关更大。这种相关性在采暖期表现的较非采暖期更密切。在非采暖期, 相对于数浓度, 质量浓度与散射系数、吸收系数的关系更密切。

就吸收系数来看, 其与  $\text{PM}_{2.5}$  数浓度 ( $R = 0.8889$ ) 的相关性要大于与质量浓度 ( $R = 0.8149$ ) 的相关性, 也就是说, 数浓度对吸收系数的影响更大; 从散射系数来看, 数浓度 ( $R = 0.8754$ ) 同样对其的影响较质量浓度 ( $R = 0.8528$ ) 大, 而相对于对吸收系数的影响, 质量浓度对散射系数的影响 ( $R = 0.8528$ ) 大于对吸收系数的影响 ( $R = 0.8149$ )。

## 4 结论

通过上述分析, 得到以下结论:

(1) SACOL 站所在的黄土高原半干旱地区气溶胶年平均散射系数为  $158.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 吸收系数为  $14.11 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , 11 月一次年 7 月 520 nm 的

平均单次散射比为 0.83, 气溶胶散射消光和吸收消光对气溶胶消光的贡献分别为 91.84% 和 8.16%, 质量散射系数和质量吸收系数分别为  $1.22 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(2) 采暖期内散射系数和吸收系数的日变化均呈较为明显的双峰型, 但在非采暖期内二者却近似表现为单峰型。峰值和谷值分别出现在 11:00 和 17:00 左右。

(3) 沙尘天气条件下, 散射系数和吸收系数分别增大了 103.8% 和 88.5%。散射系数在  $>100 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  频段内增大最多, 而吸收系数在  $>20 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  频段增大最多。

(4) 无论是数浓度还是质量浓度均表现出与散射系数和吸收系数较好的相关性, 相关系数都在 0.8 以上。 $\text{PM}_{2.5}$  与散射系数的相关要比与吸收系数的相关大; 相对于  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度, 数浓度与散射系数和吸收系数的相关更大。

致谢: 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 提供的积分浊度仪、黑碳仪及粒子谱仪的观测资料。

## 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] Bod Haines B A. Aerosol at four background sites [J]. *Geo Phys Res*, 1983, 88: 10753-10768.

[3] Bod Haines B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole [J]. *Geo Phys Res*, 1995, 100(D5): 8967-8975.

[4] Carrco C M, Rood M J, Ogren JA. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE1) [J]. *Geo Phys Res*, 1998, 103(D13): 16565-16574.

[5] Anderson T L, Masonis S J, Covert D S, et al. Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during ACE-Asia[J]. *Geo Phys Res*, 2003, 108(D23): 1-19.

[6] 胡波, 张武, 张镭, 等. 兰州西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 354-360.

[7] 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 554-559.

[8] 孟昭阳, 蒋晓明, 颜朋, 等. 太原市冬季大气气溶胶的散射特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 255-259.

[9] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区气溶胶散射特性研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 755-760.

[10] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 183-187.

[11] 潘小乐, 颜鹏, 汤洁. 2006年北京春季气溶胶吸收系数的分离研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 249-254.

[12] 刘晓清, 赵景波, 于学峰. 黄土高原气候暖干化趋势及适应对策[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 627-631.

[13] 田文寿. 兰州市气溶胶的光学特征及其辐射效应对边界层发展的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 1994: 20-69.

[14] 赵秀娟, 陈长和, 袁铁, 等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 617-622.

[15] 常倬林. 黄土高原半干旱地区气溶胶地基和卫星遥感[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 12-18.

[16] 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, 2008, 27(6): 1416-1419.

[17] 黄艇, 陈长和, 陈勇航, 等. 利用 MODIS 卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 887-891.

[18] 牛生杰, 孙继明. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 298-301.

[19] 辛金元, 张文煜, 袁九毅, 等. 消光法反演腾格里沙漠地区沙尘气溶胶谱分布[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 654-659.

[20] 张文煜, 辛金元, 袁九毅, 等. 腾格里沙漠气溶胶光学厚度多波段遥感研究[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 613-617.

[21] 李韧, 季国良. 敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 84-87.

[22] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 185-190.

[23] 邓涛, 张镭, 吴兑, 等. 兰州地区高云和气溶胶光学特性及其辐射效应[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 230-235.

[24] 周碧, 张镭, 曹贤洁, 等. 利用激光雷达资料分析兰州远郊气溶胶光学特征[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1011-1017.

[25] 徐记亮, 张镭, 吕达仁. 太湖地区大气气溶胶光学及微物理特征分析[J]. 高原气象, 2011, 20(6): 1668-1675.

[26] Hansen A D A, Kapustin V N, Kopeikin V M, et al. Optical absorption by Aerosol black carbon and dust in desert region of central Asia[J]. *Atmos Environ*, 1993, 27(16): 2527-2531.

[27] Japer S M, Brachaczek W W, Gorse R A, et al. The contribution of elemental carbon to the optical properties of rural atmospheric aerosols[J]. *Atmos Environ*, 1986, 20(6): 1281-1289.

[28] 白建辉. 华北地区紫外与可见光辐射在大气中的传输[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 915-925.

[29] 延昊, 矫梅燕, 赵琳娜, 等. 中国北方气溶胶散射和  $\text{PM}_{10}$  浓度[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 852-857.

[30] 胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分浊度仪研究兰州城市冬季大气气溶胶[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(3): 354-359.

## Observational Studies on Characteristics of Aerosol Scattering and Absorption Coefficients over Semi-Arid Area of China

WANG Zhen-hai<sup>1-2</sup>, ZHANG Wu<sup>1</sup>, SHI Jin-sen<sup>1</sup>, HUANG Jian-ping<sup>1</sup>,  
CHEN Yan<sup>1</sup>, TIAN Lei<sup>1</sup>, XIANG Tao<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education/College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

2. *Yushu Meteorologic Bureau of Qinghai Province, Yushu 815000, China*)

**Abstract:** Based on the continuous observational data by AE-31 from 1 November 2007 to 31 October 2008 and M9003 from 1 August 2007 to 31 July 2008 at Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), the characteristics of aerosol scattering and absorption coefficients were studied over semi-arid area of China. The results show that the annual average scattering coefficient is  $158.86 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$ , the absorption coefficient is  $14.11 \text{ M} \cdot \text{m}^{-1}$  and the single scattering albedo at 520 nm is 0.83 over this region. The annual variations of scattering coefficient and the absorption coefficient are single-peak type. The peak values of scattering and absorption coefficients appear in December and November, respectively. The diurnal variations of both coefficients are double-peak during the heating period but single-peak type in the non-heating period. Under the dust weather condition, both the coefficients increase to 103.8% and 88.5%. Utilizing the data from APS-3321 at the same time, the correlation between scattering and absorption coefficients  $\text{PM}_{2.5}$  concentration, have been studied, the results show both the coefficients have good relationship with  $\text{PM}_{2.5}$  concentration and the correlation coefficients are more than 0.8.

**Key words:** Scattering coefficient; Absorption coefficient; Single scattering albedo;  $\text{PM}_{2.5}$