

曹贤洁, 张镭, 李霞, 等. 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1246-1253

# 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析

曹贤洁, 张镭\*, 李霞, 史晋森,  
徐记亮, 黄建平, 张武

(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)

**摘要:** 兰州大学与中国科学院、中国气象局、美国马里兰大学、美国能源部等研究机构于 2008 年 4~6 月进行了中美沙尘暴联合观测试验, 观测点设在张掖国家气候观象台、兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)和 SACOL 景泰移动观测点。利用颗粒物烟尘吸收光度计和 TSI 积分浑浊度仪资料分析了张掖地区气溶胶吸收和散射特性。结果表明: 气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数日变化趋势一致, 基本呈双峰型, 峰值分别出现在 08:00 和 22:00, 夜间的值较白天偏大; 气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数的月平均值在 4 月最大、5 月次之、6 月最小; 450, 550 和 700 nm 波段的气溶胶单次散射反照率主要集中在 0.7~0.9。

**关键词:** 张掖地区; 气溶胶; 散射系数; 吸收系数; 单次散射反照率

**文章编号:** 1000-0534(2010)05-1246-08 **中图分类号:** P427.1+2 **文献标识码:** A

## 1 引言

气溶胶可通过散射和吸收太阳辐射以直接影响地气系统的辐射收支<sup>[1]</sup>, 又可作为云凝结核改变云微物理特性如增大云的反照率和抑制降水以间接影响地气能量平衡<sup>[2]</sup>, 气溶胶对辐射能量的直接吸收会使低层云蒸发<sup>[3]</sup>。2001 年 IPCC 报告认为气溶胶对地气辐射收支的影响与温室气体的效应在量级上相当, 但符号相反。气溶胶的存在可明显地改变地面辐射状况<sup>[4]</sup>。有研究表明, 低层大气对太阳直接辐射的削减主要是由气溶胶造成的, 其所占比例最大可达 94.7%<sup>[5]</sup>。气溶胶的辐射效应仍是气候研究中一个很重要的不确定因素, 但由于气溶胶时空分布变化很大且化学组成各异, 故造成深入研究气溶胶辐射效应的诸多困难。

各种观测试验是气溶胶辐射效应研究中不可或缺的基础性工作, 近年来国际上进行了大量的气溶胶观测试验, 如北美地区的 RACE、大洋洲地区的 ACE-I、欧洲和非洲地区的 ACE-II、亚洲地区的 ACE-Asia 计划和印度洋试验 INDOEX 等。目前国内也有很多这方面的工作, 并取得了很大的进展。如胡波等<sup>[6-7]</sup>利用积分浑浊度仪、多波段光度

计和 PM<sub>10</sub>资料, 研究了冬季兰州市气溶胶散射特征及其与空气污染的关系, 表明散射系数日变化呈双峰型, 且与 PM<sub>10</sub>浓度变化特征一致, 两者具有较好的相关性, 并进而得到后向散射比、不对称因子、单次散射反照率、波长指数等辐射特性参数。有关观测研究在太原市区<sup>[8]</sup>、北京上甸子本底站<sup>[9]</sup>、锡林浩特观象台<sup>[10]</sup>、张北和民勤<sup>[11]</sup>等地开展并取得重要结果。观测气溶胶吸收系数的方法主要有粒子采样法、间接测量法、直接测量法、光声测量法和遥感测量反演方法等<sup>[12]</sup>, 国内应用较普遍的是利用黑碳仪进行观测, 得到黑碳气溶胶质量浓度, 分析黑碳气溶胶的变化特征<sup>[13-15]</sup>, 进而反演获得气溶胶吸收系数, 同时可利用数值模式模拟黑碳气溶胶的空间分布和辐射强迫<sup>[16]</sup>以及黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响<sup>[17]</sup>等。

兰州大学与中国科学院、中国气象局、美国马里兰大学和美国能源部大气辐射观测(A RM)项目组于 2008 年 4~6 月进行了中美沙尘暴联合观测试验。观测点为张掖国家气候观象台(39.082°N, 100.276°E, 海拔高度 1461 m)、兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL, 35.95°N, 104.13°E, 海拔高度 1965.8 m)和 SACOL 景泰移动观测点

收稿日期: 2009-09-15; 改回日期: 2010-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40675078); 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400501)共同资助

作者简介: 曹贤洁(1982-), 男, 浙江金华人, 讲师, 主要从事气溶胶辐射特性与辐射强迫研究, E-mail: caoxj@lzu.edu.cn

\*通信作者: 张镭, E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

(37.35°N, 104.01°E, 海拔高度 1604 m)。张掖观测点由 ARM 负责, 仪器为 SMART-COMMIT (详见 <http://smart-commit.gsfc.nasa.gov/index.html>), SACOL 和景泰观测点由兰州大学大气科学学院负责。此次联合观测试验设置于河西走廊内, 汇集了目前国际上最先进的观测仪器, 选取的 3 个观测点分别代表沙尘暴传输路径的上游和下游地区, 构建沙尘暴监测网络, 以进一步了解沙尘暴的形成机制、传输特征及其对气候系统的影响。

张掖观测点在此次联合观测试验中代表沙尘暴传输路径的上游地区, 其下垫面为砾质戈壁, 部分为人工种植的白杨树等。观测试验位于空旷的戈壁上, 人为活动极少。研究张掖地区气溶胶的吸收和散射特征对深入认识气溶胶的辐射特性及其对气候的影响具有重要意义。

## 2 观测仪器和资料

### 2.1 颗粒物烟尘吸收光度计

颗粒物烟尘吸收光度计(Radiance Research 公司, 下称 PSAP)可实时观测气溶胶吸收系数。原理为测量颗粒物在滤膜上的累积导致滤膜透过率的变化, 而透过率的变化是与颗粒物的吸收系数相联系的。PSAP 的波长分别为 470, 522 和 660 nm。滤膜透过率过小时, 对气溶胶吸收系数的反演影响较大, 这是观测误差的主要来源。观测中更换滤膜的临界透过率为 0.6。PSAP 设置有一个参照滤膜, 采样气体先经过主滤膜后成为清洁气体再到达参照滤膜, 通过对比主滤膜和参照滤膜的透过率, 可确保观测到的主滤膜透过率的变化不是由于光源强度的变化引起的。PSAP 的订正主要有滤膜面积订正、气溶胶散射订正和气流流量订正。对于气溶胶散射订正, 一方面利用纤维滤膜的光学扩散特性, 其可使颗粒物部分或完全地嵌入在光学扩散环境, 进而减小气溶胶散射影响。若颗粒物为非吸收性的话, 将其散射作用作为独立变量利用多元线性回归予以考虑, 也可由观测硫酸铵或氯化钠等非吸收性颗粒物的散射作用得到。通过设定散射作用在仪器观测的吸收系数中的比例可进一步订正<sup>[18]</sup>。PSAP 观测数据的时间分辨率为 1 s。

### 2.2 TSI 积分浑浊度仪

TSI 积分浑浊度仪 3563 型(TSI 公司, 下称 TSINeph)可观测气溶胶总散射和后向散射系数, 用于气溶胶直接辐射强迫、大气能见度研究和空气质量监测等。TSINeph 具有蓝、绿和红 3 个波段,

波长分别为 450, 550 和 700 nm。观测原理基于 Beer-Lambert 定律, 可同时观测该 3 个波段 7°~170°的总散射和 90°~170°的后向散射。TSINeph 实时监测样气压强和温度并计算大气瑞利散射, 同时检测探测器的暗噪声, 然后将瑞利散射和暗噪声扣除, 即可得到气溶胶总散射和后向散射系数。因在理想状况下气溶胶总散射的角度范围为 0°~180°, 后向散射为 90°~180°, 因此 TSINeph 观测存在一定的角度截断误差<sup>[19-20]</sup>。截断误差订正一般利用米散射理论计算得到, 对于大粒子前端截断误差可通过几何光学和衍射理论, 对于 < 10°的截断角度仅应用衍射理论已足够<sup>[21]</sup>。TSINeph 观测数据的时间分辨率为 5 min。

观测试验前进行了仪器标定, TSINeph 的标定有低标和高标, 样气分别为干洁空气和 CO<sub>2</sub>。根据仪器精度范围并统计观测点气溶胶散射系数的变化范围进行去野点处理, 其主要剔除奇异值和每小时进行一次零标数据。

## 3 结果分析

### 3.1 气溶胶吸收系数日变化

联合观测试验期间, 张掖测点以晴天为主, 选取 2008 年 4 月 29 日、5 月 18 日和 6 月 3 日分析气溶胶吸收系数的日变化。由全天空成像仪观测分析可知, 这 3 天为晴天, 4 月 29 日清晨和傍晚有薄卷云, 5 月 18 日傍晚有薄卷云, 6 月 3 日全天无云, 能见度仪观测值可达 10 km。

如图 1 所示, 总的来看, 气溶胶吸收系数呈双峰型日变化特征, 峰值分别在 08:00(北京时, 下同)和 22:00 左右, 4 月 29 日气溶胶吸收系数变化趋势与 5 月 18 日和 6 月 3 日的稍有不同, 主要在 00:00~00:05 不一致。4 月 29 日 01:00 左右存在一个很大的峰值, 然后随时间减小, 而 5 月 18 日和 6 月 3 日则为逐渐增大并在 08:00 达到峰值。

08:00 峰值主要是因为工业生产、交通运输和居民生活排放等人为活动的增强, 而扩散条件不利, 导致污染物浓度增大; 之后气溶胶吸收系数随时间减小, 并在 12:00~20:00 处于低值区且变化幅度不大。其主要由于下午大气边界层发展比较旺盛, 对流活动较强, 扩散条件较好。20:00 之后气溶胶吸收系数随时间增大并在 22:00 左右达到第二峰值, 该峰值的形成可能和日落后到达地面的太阳辐射减少, 进而形成贴地辐射逆温层, 扩散条件不利有关。4 月 29 日 01:00 左右存在一个极值, 具

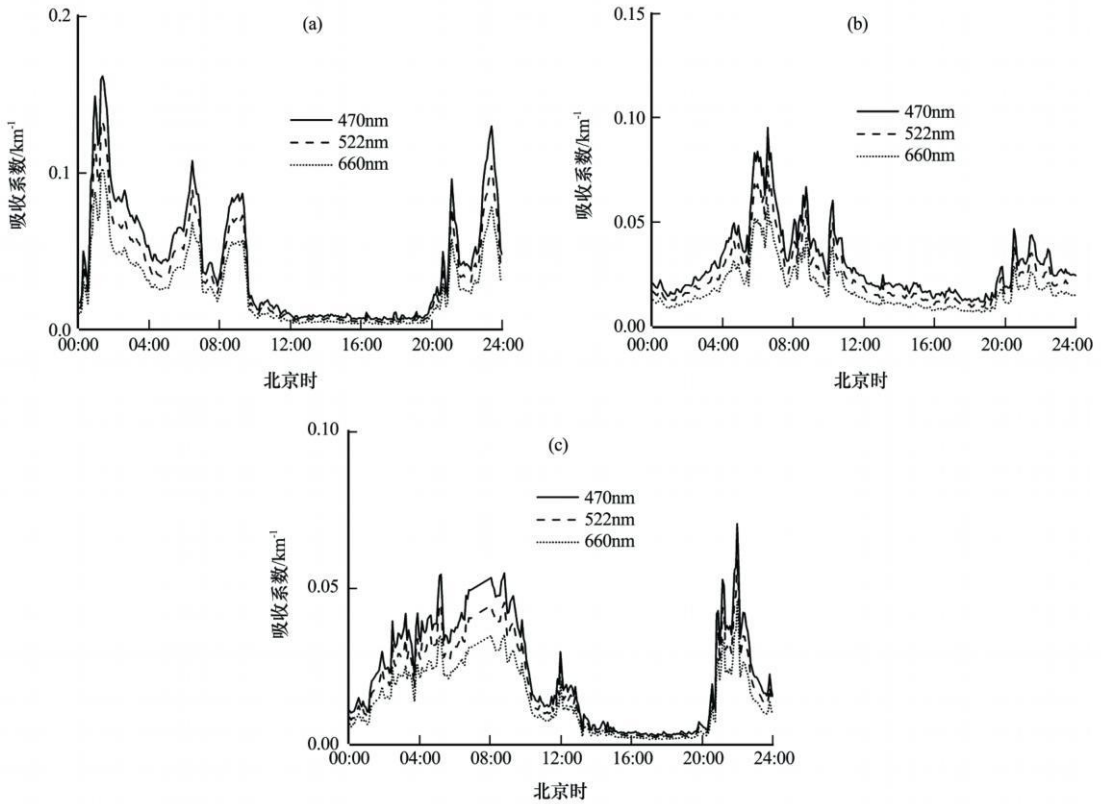


图 1 2008 年 4 月 29 日(a)、5 月 18 日(b) 和 6 月 3 日(c) 气溶胶吸收系数的日变化

Fig. 1 Diurnal changes of absorption coefficient for aerosol on 29 April (a), 18 May(b) and 3 June(c) 2008

体原因有待结合其它观测资料进一步研究。

### 3.2 气溶胶总散射和后向散射系数日变化

图 2 和图 3 分别表示 2008 年 4 月 29 日、5 月 18 日和 6 月 3 日 450, 550 和 700 nm 3 个波段气溶胶总散射和后向散射系数的日变化曲线。气溶胶总散射系数的日变化呈现明显的双峰型变化特征, 峰值分别出现在 08:00 和 22:00 左右, 4 月 29 日 01:00 左右存在一个峰值。比较图 2 和图 3 可知, 气溶胶总散射和后向散射系数的一致性很好, 具有相同的日变化趋势, 后向散射占总散射的比例较小, 约为 15%。综合图 1~3, PSAP 和 TSINeph 产品的日变化趋势一致, 峰值时刻对应很好, 也验证了由观测得到的气溶胶日变化趋势是合理的。

### 3.3 月平均气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数日变化

气溶胶吸收系数月平均状况如图 4 所示, 分别为 470, 522 和 660 nm 月平均气溶胶吸收系数的日变化。比较 3 个波段变化趋势可知, 三者的一致性很好, 总体上呈双峰型变化特征, 峰值分别出现在 08:00 和 22:00 左右, 与前面的分析结果一致。对

于 4 月, 其在 02:00 为另一个峰值, 该峰值和 4 月 29 日的变化特征基本吻合。对于 5 月, 另一个峰值出现在 04:00, 该时刻在 5 月 18 日的变化中表现为一个小峰值。对 6 月而言, 其呈现典型的双峰型变化特征。比较 4~6 月的平均状况, 3 个波段的气溶胶吸收系数在 06:00~24:00 的变化趋势一致, 而在 00:00~06:00 有所区别。

从月平均气溶胶吸收系数的数值来看, 对于 3 个波段均是 4 月最大、5 月次之、6 月最小。分时段来看, 月平均气溶胶吸收系数的差别在夜间较明显, 白天很小。这主要是由于污染物排放和扩散条件等因素引起的。4 月北方城市集中供热采暖已结束, 但居民生活采暖在一定程度上仍在继续, 主要是在夜间, 导致了 4 月夜间的污染物排放相对较高。白天污染物排放相对稳定, 且气象条件有利于污染物的扩散, 因此白天气溶胶吸收系数差别不大。比较而言, 6 月的污染物排放少, 同时气象条件更有利于扩散, 这是 6 月平均气溶胶吸收系数最小的可能原因。

图 5 为 450, 550 和 700 nm 月平均气溶胶总散

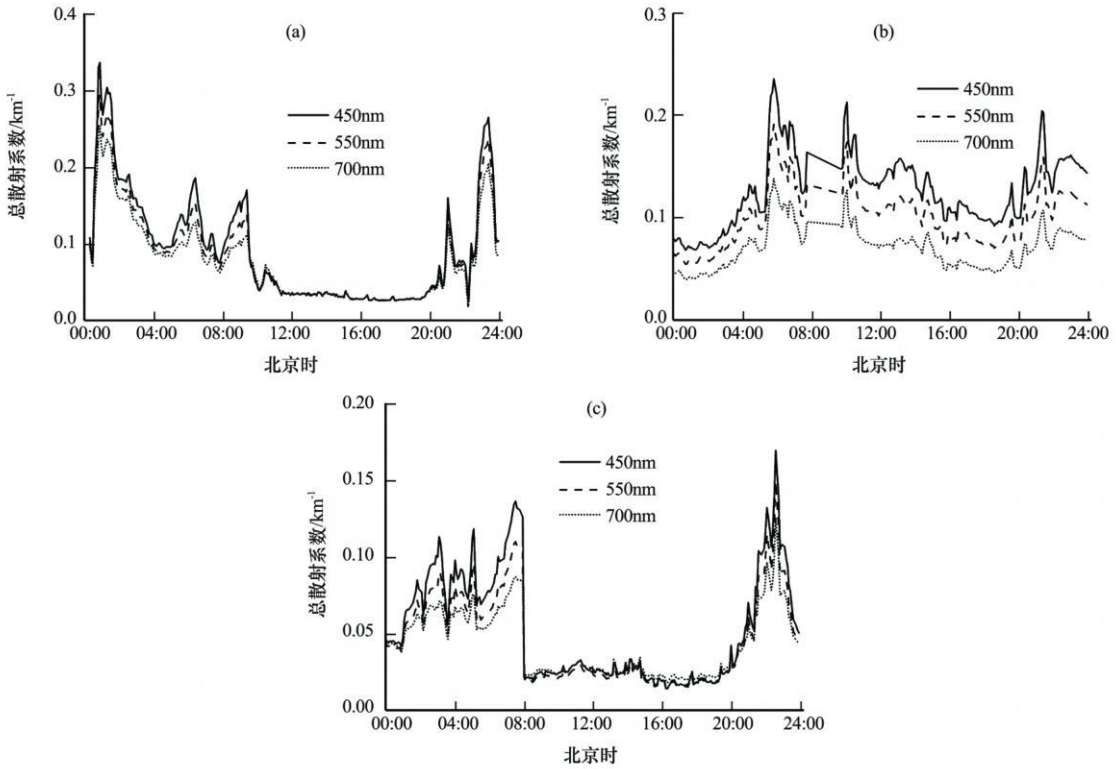


图2 2008年4月29日(a)、5月18日(b)和6月3日(c)气溶胶总散射系数的日变化

Fig. 2 Diurnal changes of total scattering coefficient for aerosol on 29 April (a), 18 May (b) and 3 June (c) 2008

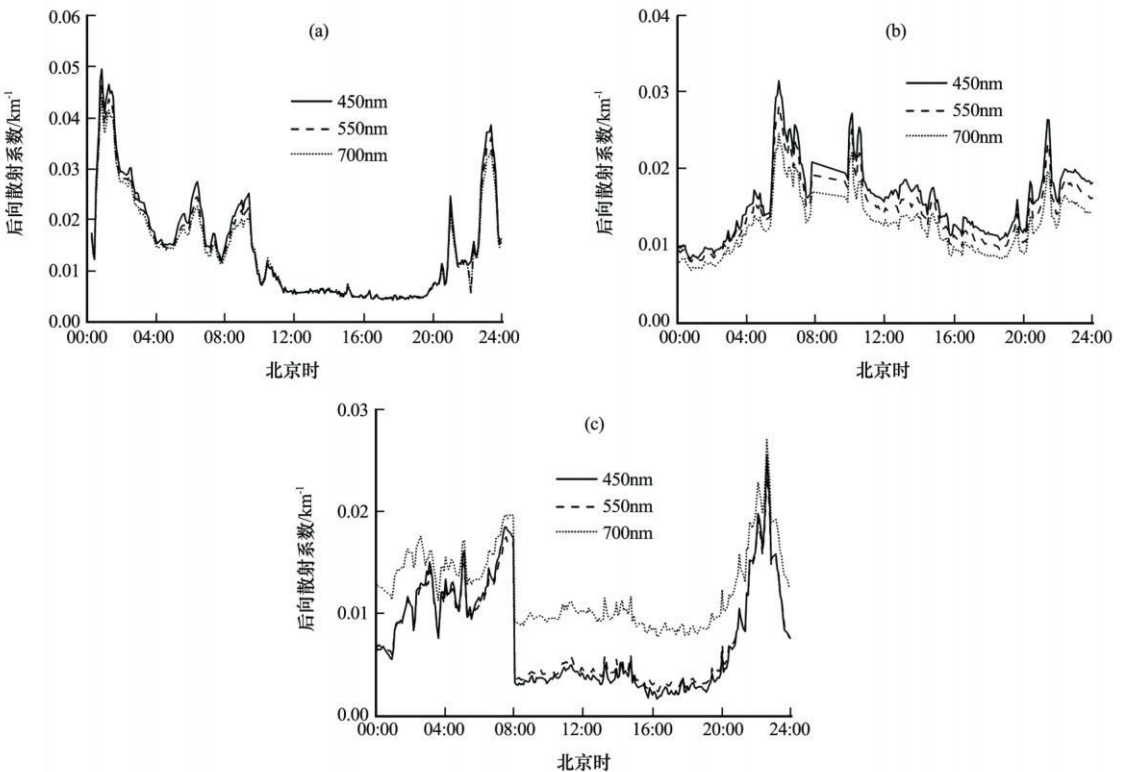


图3 2008年4月29日(a)、5月18日(b)和6月3日(c)气溶胶后向散射系数的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of backscattering coefficient for aerosol on 29 April (a), 18 May (b) and 3 June (c) 2008

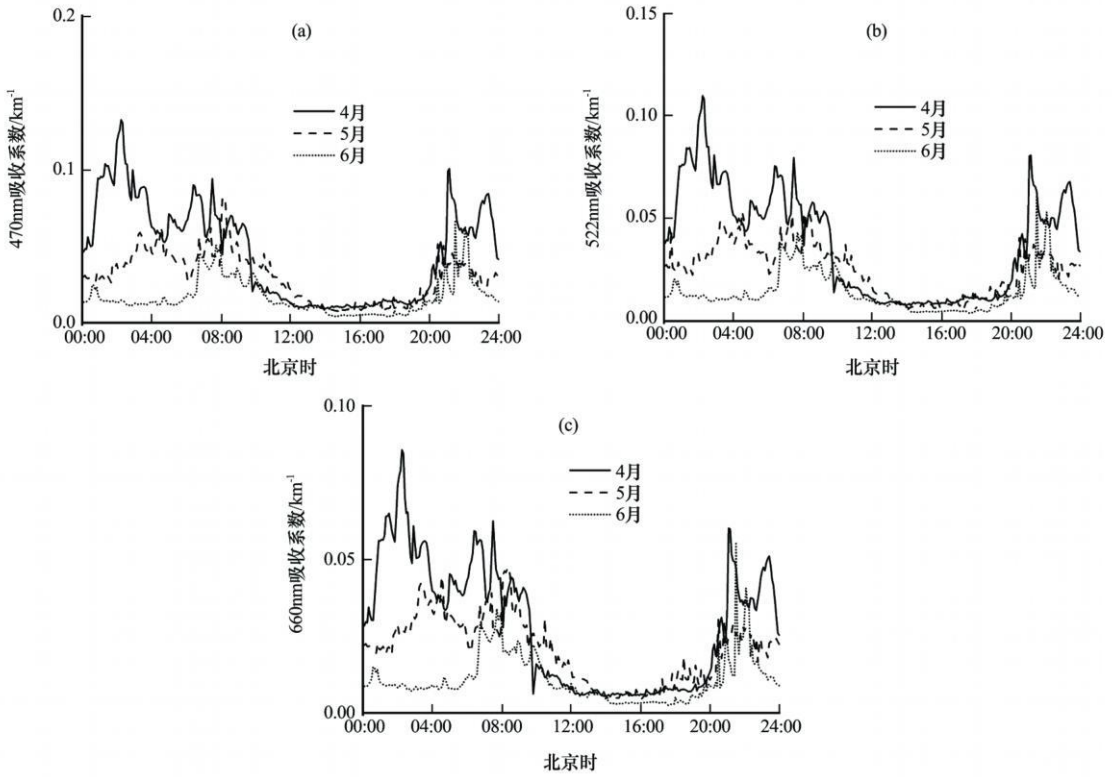


图 4 470(a)、522(b)和660 nm(c)月平均气溶胶吸收系数的日变化

Fig. 4 Diurnal changes of monthly average absorption coefficient for aerosol at 470 (a), 522 (b) and 660 nm (c) wavelengths

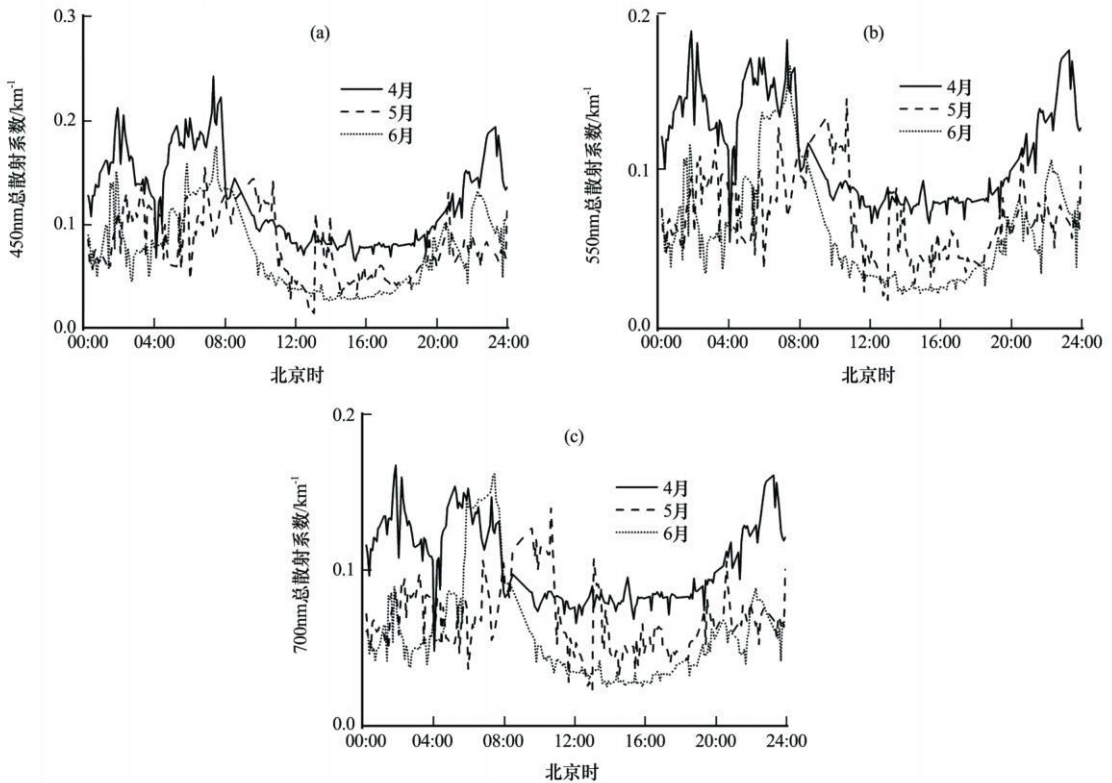


图 5 450(a)、550(b)和700 nm(c)月平均气溶胶总散射系数的日变化

Fig. 5 Diurnal changes of monthly average total scattering coefficient for aerosol at 450 (a), 550 (b) and 700 nm (c) wavelengths

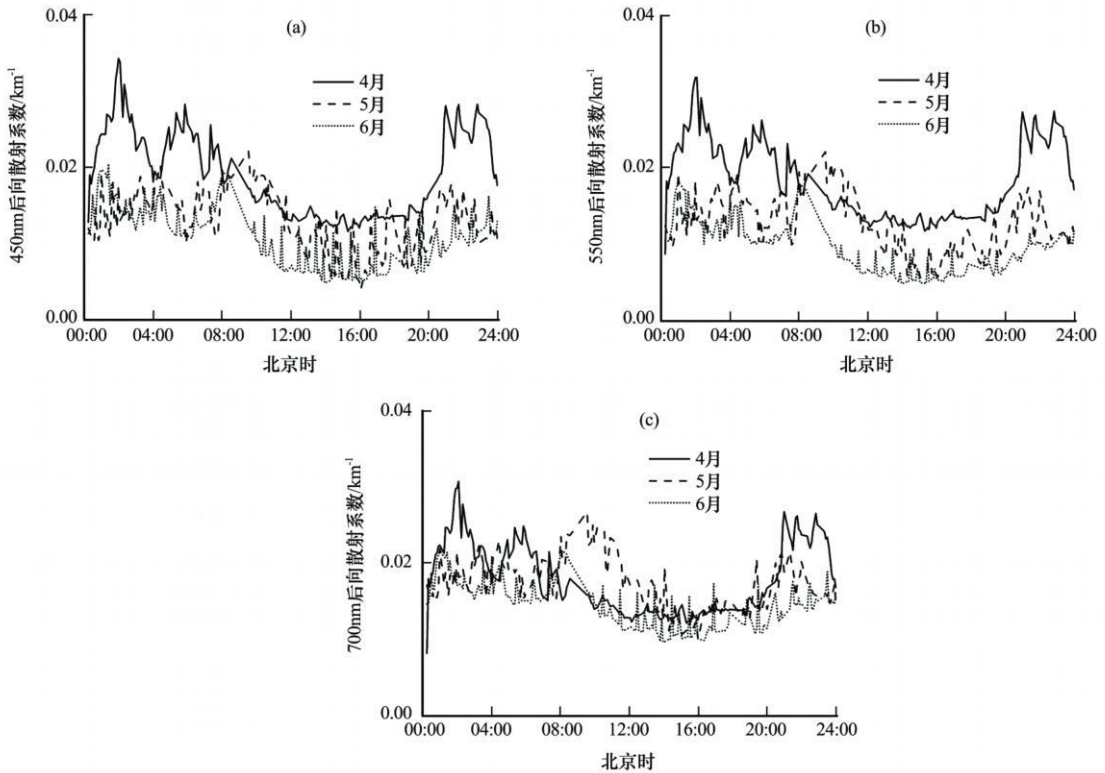


图 6 450 (a)、550 (b) 和 700 nm (c) 月平均气溶胶后向散射系数的日变化

Fig. 6 Diurnal changes of monthly average backscattering coefficient for aerosol at 450 (a), 550 (b) and 700 nm (c) wavelengths

射系数的日变化, 图 6 则为相应的月平均气溶胶后向散射系数日变化。3 个波段气溶胶总散射和后向散射系数的变化趋势一致, 基本呈双峰型变化特征, 峰值位于 08:00 和 22:00 左右。除以上 2 个共同的峰值之外, 4 月和 6 月在 02:00 亦是一个峰值, 对于 5 月则在 04:00 左右。比较气溶胶总散射和后向散射系数的变化趋势可知, 两者具有很好的一致性。

综合月平均气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数的日变化趋势来看, 三者也是相吻合的。另外, 白天的值明显比夜间的小, 主要由于白天扩散条件较好。

### 3.4 日平均气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数逐日变化

如图 7a 所示, 日平均气溶胶吸收系数逐日变化波动较大, 呈弱递减趋势, 与月平均气溶胶吸收系数在 4 月最大、5 月次之、6 月最小的结果相一致。总体而言, 观测期间 470, 522 和 660 nm 气溶胶吸收系数的平均值分别为 0.0605, 0.0379 和 0.0315  $\text{km}^{-1}$ 。

图 7b 和 c 分别为观测期间日平均气溶胶总散

射和后向散射系数的逐日变化。由图可见, 两者的逐日变化波动也较大, 总散射系数和后向散射系数的逐日变化趋势一致。观测期间 450, 550 和 700 nm 气溶胶总散射系数平均值分别为 0.1269, 0.1101 和 0.0971  $\text{km}^{-1}$ , 相对应的后向散射系数平均值分别为 0.0187, 0.0175 和 0.0184  $\text{km}^{-1}$ 。

### 3.5 单次散射反照率频数分析

PSAP 的波长分别为 470, 522 和 660 nm, TSINeph 的波长分别为 450, 550 和 700 nm, PSAP 和 TSINeph 数据的时间分辨率分别为 1 s 和 5 min, 计算单次散射反照率 (SSA) 时, 先将 PSAP 数据作 5 min 平均, 并利用 (1) 式和 (2) 式将 PSAP 波长订正到和 TSINeph 一致的波段。波长订正时, 假设无论是采用内插还是外插方法,  $\alpha_{12}$  均为常数。当吸收系数  $> 0.3 \text{ km}^{-1}$  时, 因波长订正而引入的误差约为 1.5%, 0.005 ~ 0.02  $\text{km}^{-1}$  时约为 6%,  $< 0.005$  时约为 20%<sup>[22]</sup>:

$$\alpha_x = \sigma_1 (\lambda_1 / \lambda_x)^{q_2}, \quad (1)$$

$$\alpha_{12} = -\log(\sigma_1 / \sigma_2) / \log(\lambda_1 / \lambda_2). \quad (2)$$

观测期间 450, 550 和 700 nm 波段的 SSA 频

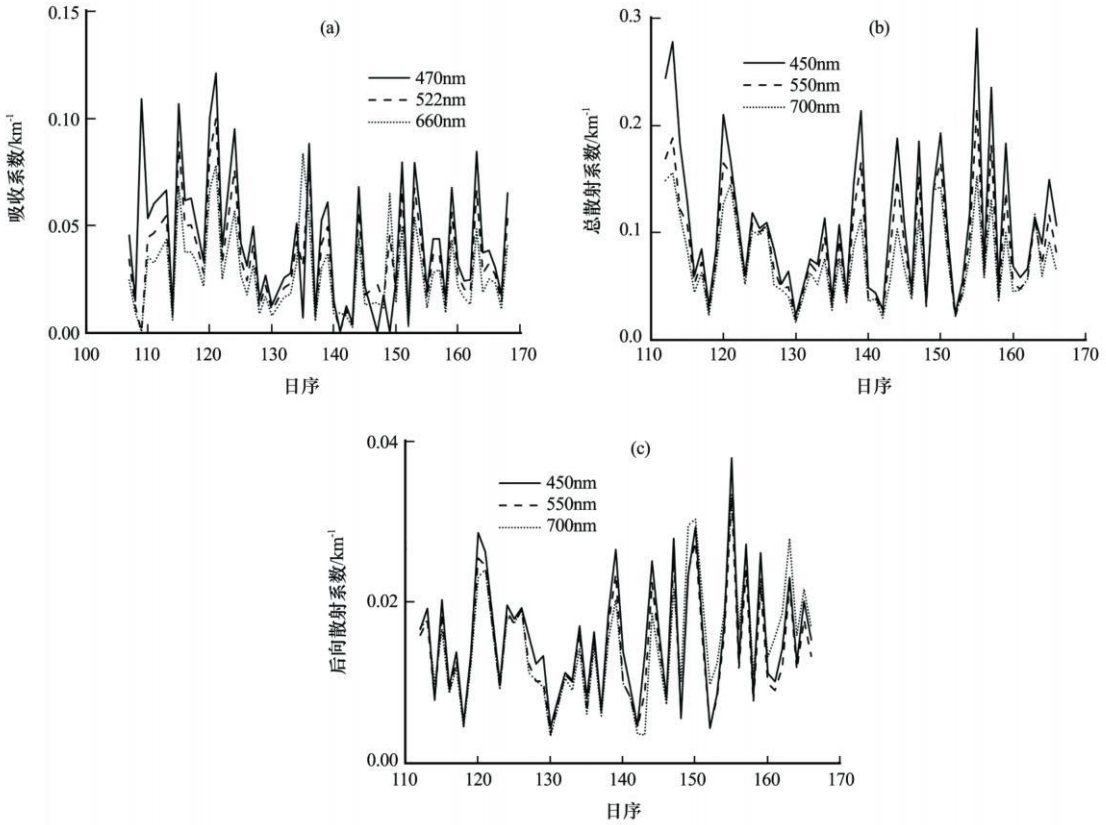


图 7 观测期间日平均气溶胶吸收系数(a)、总散射系数(b)和后向散射系数(c)的逐日变化

Fig. 7 Day-to-day changes of daily average aerosol absorption (a), total scattering (b) and backscattering (c) coefficients during the observation period

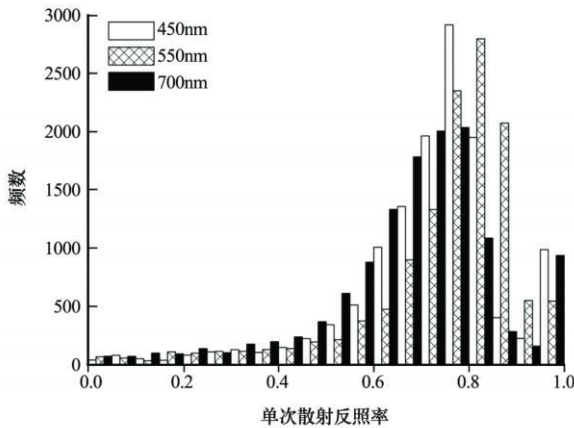


图 8 气溶胶单次散射反照率频数直方图

Fig. 8 Frequency histogram of single scattering albedo for aerosol

数分布如图8所示。由图8可见, 450, 550和700 nm的SSA在0.7~0.9频数最大, >0.9的也有一些分布, <0.5的相对很少。

### 4 结论

利用张掖观测点 PSAP 和 TSINeph 资料, 分析了气溶胶吸收和散射特性, 得到以下结论:

(1) 气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数的日变化趋势基本一致, 呈双峰型, 峰值分别在 08:00 和 22:00 左右。08:00 出现峰值的主要原因是, 早晨工业生产、交通运输和居民生活等污染排放增强, 而扩散条件不利, 导致污染物浓度增大。22:00 峰值与贴地辐射逆温层形成、扩散条件不利有关。

(2) 气溶胶吸收系数、总散射和后向散射系数月平均状况, 4月最大、5月次之、6月最小。

(3) 450, 550和700 nm波段的气溶胶单次散射反照率主要集中在0.7~0.9。

致谢: 中美沙尘暴联合观测试验为本文工作提供了观测数据, 在此对参与观测的各位工作人员一并谨致谢忱。

## 参考文献

- [1] McCormick RA, JH Ludwig. Climate modification by atmospheric aerosols[J]. *Science*, 1967, 156: 1358–1389.
- [2] Twomey S. Atmospheric aerosols [M]. New York: Elsevier, 1977: 279–287.
- [3] Grassl H. Albedo reduction and radiative heating of clouds by absorbing aerosol particles[J]. *Contrib Atmos Phys*, 1975, 48: 199–210.
- [4] 邵振艳, 周涛, 史培军, 等. 大气污染对中国重点城市地面总辐射影响的时空特征[J]. *高原气象*, 2009, 25(5): 1105–1114.
- [5] 奚晓霞, 权建农, 陈长和, 等. 兰州市城关区冬季 TSP 的监测分析及其与辐射的关系[J]. *高原气象*, 2002, 21(4): 427–431.
- [6] 胡波, 张武, 张镭, 等. 兰州市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] 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): 19–25.
- [8] 孟昭阳, 蒋晓明, 颜鹏, 等. 太原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] 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.
- [10] 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): 755–761.
- [11] 延昊, 矫海燕, 赵琳娜, 等. 中国北方气溶胶散射和  $PM_{10}$  浓度特征[J]. *高原气象*, 2008, 27(4): 852–858.
- [12] 黄世鸿, 李子华, 杨军. 中国地区边界层大气气溶胶辐射吸收特性[J]. *高原气象*, 2000, 19(4): 487–494.
- [13] 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): 183–188.
- [14] 陶俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 广州城区冬季黑碳气溶胶污染特征及其来源初探[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(2): 53–56.
- [15] 高枞亭, 张仁建, 苏丽欣. 长春秋冬季大气黑碳气溶胶的特征分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(4): 803–807.
- [16] 庄炳亮, 王体健, 李树. 中国地区黑碳气溶胶的第一间接辐射强迫与气候效应[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 1095–1104.
- [17] 王志立, 张华, 郭品文. 南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 419–424.
- [18] Bond T C, T L Anderson, D Campbell. Calibration and inter-comparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols[J]. *Aerosol Sci Tech*, 1999, 30: 582–600.
- [19] Anderson T L, D S Covert, S F Marshall, et al. Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength total scatter/backscatter Nephelometer[J]. *J Atmos Ocean Tech*, 1996, 13: 967–986.
- [20] Anderson T L, J A Ogren. Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating Nephelometer[J]. *Aerosol Sci Tech*, 1998, 29: 57–69.
- [21] Moosmüller H, W P Arnott. Angular truncation errors in integrating nephelometry[J]. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74(7): 3492–3501.
- [22] Virkkula A, N C Ahlquist, D S Covert, et al. Modification, calibration and a field test of an instrument for measuring light absorption by particles[J]. *Aerosol Sci Tech*, 2005, 39: 68–83.

## Analyses on Aerosol Absorption and Scattering Properties in Zhangye Region

CAO Xian-jie, ZHANG Lei, LI Xia, SHI Jin-sen, XU Ji-liang, HUANG Jian-ping, ZHANG Wu

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education/ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The first China-US joint dust field observation was carried out by Lanzhou University, Chinese Academy of Sciences, China Meteorological Administration, University of Maryland and the Department of Energy, USA during the period of April and June 2008. The observation sites are located respectively at Zhangye National Climatological Observatory, Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), and Jingtai with the Mobile Facilities of SACOL. The measurements of Particle/Soot Absorption Photometer and TSI Integrating Nephelometer are used to analyze the aerosol absorption and scattering properties in Zhangye. The analysis shows that the diurnal coefficient evolutions in aerosol absorption, total scattering and backscattering present the same trends with their bi-peaks, respectively at 08:00 and 22:00, which are generally higher at nighttime than in daytime. The monthly average coefficient is the highest in April and low in succession in May and June. The frequency analysis of the aerosol single scattering albedo (SSA) shows that the magnitudes of SSA at 450, 550 and 700 nm wavelengths are mainly within 0.7~0.9.

**Key words:** Zhangye region; Aerosol; Scattering coefficient; Absorption coefficient; SSA