

新疆博斯腾湖地区气溶胶光学特性的观测分析

张玉平, 杨世植, 赵强, 张玉亮

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 于 2005 年 7 月底至 8 月中旬在新疆博斯腾湖地区进行了一次野外遥感试验, 其间利用法国 CIMEL 太阳辐射计对试验区的大气消光特性进行了测量. 介绍了利用太阳辐射计对试验区气溶胶光学厚度的测量和分析原理, 对测量数据进行处理研究, 结果显示观测期间新疆博斯腾湖地区大气洁净, 气溶胶光学厚度的日内和日间变化不大, 550 nm 处的气溶胶光学厚度一般为 0.17; Ångström 波长指数 α 一般为 1.19, 与 6S 常用气溶胶模式中的大陆型比较接近; 大气混浊度系数 β 一般为 0.08.

关键词: 大气光学; 气溶胶光学厚度; Ångström 参数; 气溶胶模式; 太阳辐射计

中图分类号: P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)01-0038-06

Observation and Analyse of Aerosol Optical Properties in
Bositeng Lake Area

ZHANG Yu-ping, YANG Shi-zhi, ZHAO Qiang, ZHANG Yu-liang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: From the end of July to the middle of August, 2005, a field remote sensing experiment was conducted in Bositeng Lake area, Xinjiang by Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS. During the experiment we measured the atmospheric extinction characteristics with CIMEL sunphotometers. The method for determining atmospheric aerosol optical character from the data of CIMEL sunphotometers is described. The results show that during the experiment the aerosol optical thickness at 550 nm is about 0.17 and aerosol optical thickness variations within a day and over days are also small. Ångström parameters α and β are about 1.19 and 0.08, and comparing with the 6S typical aerosol models, the aerosol model in the area is similar to the continent model.

Key words: atmospheric optics; aerosol optical thickness; Ångström parameters; aerosol model; sunphotometer

1 引言

气溶胶是悬浮在气体中的小粒子构成的弥散系, 其粒子的尺度和时空变化比较大. 气溶胶通过散射和吸收影响到涉及大气的众多研究领域, 如环境、气候、军事和遥感等. 就遥感领域来说, 它直

接干扰了光学遥感仪器接收的信号, 精确测量和分析气溶胶的光学特性对于去除遥感数据中的大气影响、提高遥感定量应用水平具有重要意义. 通过测量太阳直接辐射和天空漫辐射来研究气溶胶的光学特性被普遍认为是有效和可靠的. 2005 年 7 月底至 8 月中旬中科院安光所在新疆博斯腾湖地区进行

收稿日期: 2005-12-21; 修改日期: 2006-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (40571106)

E-mail: happy@aiofm.ac.cn

了一次野外遥感试验, 对该地区的气溶胶光学特性进行观测研究。

2 试验概况

2.1 测量仪器

我们利用法国 CIMEL 公司研制的多波段手动跟踪太阳辐射计 CE317 进行大气消光测量^[1], 其波段设置如表 1 所示, 其中 936 nm 和 940 nm 两个波段位于水汽吸收带上, 主要用于推算大气总水汽含量^[2], 我们利用其余四个位于大气窗区的光谱波段 (1020 nm、870 nm、670 nm 和 440 nm) 的数据进行分析研究。

2.2 观测过程

大气观测点设在博斯腾湖北岸的沙滩上 (42.0501 N, 87.1476 E, 海拔 1130 m), 测量时间为 2005 年 8 月 1~11 日, 观测期间大气状况如表 2 所示。

表 1 CE317 太阳辐射计的波段设置

Table 1 Band division of actinometer CE317

通道	中心波长 /nm	宽度 /nm
1	1020	10
2	870	10
3	670	10
4	440	10
5	936	10
6	940	50

3 处理方法

3.1 大气光学厚度的计算

大气光学厚度是与波长有关的量, 根据 Bouguer 定律^[3], 地面上的直接太阳辐照度 $E(\lambda)$

可以表示为

$$E(\lambda) = E_0(\lambda)R^{-2} \exp[-m\tau(\lambda)], \quad (1)$$

其中 $E_0(\lambda)$ 是太阳距离为 1 时地球大气层外的太阳辐照度 (单位: W/m^2), R 是测量时的日地距离 (单位: AU), m 是大气质量, $\tau(\lambda)$ 是大气总光学厚度。日地距离 R 采用近似公式^[4]

$$R^{-2} = 1 + 0.033 \cos(2\pi \cdot J/365), \quad (2)$$

其中 J 是一年中的天数。大气质量 m 修正后的表达式为

$$m = \frac{1}{\cos(\pi \cdot \theta_0/180) + 0.15 \times (93.885 - \theta_0)^{-1.253}} \times \frac{P}{1013}, \quad (3)$$

其中 θ_0 是太阳天顶角, P 是大气压强 (单位: hPa)。太阳辐射计输出的电压值 $V(\lambda)$ 正比于探测器接收到的太阳辐照度 $E(\lambda)$, 因此方程 (1) 可写为

$$V(\lambda) = V_0(\lambda)R^{-2} \exp[-m\tau(\lambda)], \quad (4)$$

两边取对数, 得

$$\ln[V(\lambda)R^2] = \ln V_0(\lambda) - m\tau(\lambda). \quad (5)$$

其中 $V_0(\lambda)$ 是定标常数。假设在测量过程中大气状况稳定, $\tau(\lambda)$ 基本不变, 我们采用 Langley 方法, 以大气质量 m 为自变量, 太阳辐射计测量值 $V(\lambda)$ 与 R^2 积的自然对数为因变量进行线性拟合, 得到一条直线, 其截距为 $\ln V_0(\lambda)$, 斜率的绝对值就是 $\tau(\lambda)$ 。

大气总光学厚度由分子 (瑞利) 衰减、气体吸收消光和气溶胶衰减三部分组成

表 2 CE317 太阳辐射计观测期间大气状况

Table 2 Atmospheric condition of actinometer CE317 during the measurements

日期	观测时间	地面气压 /hPa	天空状况
08/01	13:12~19:14	881	下午西南天空有混沌的薄云, 北边天边有少量团状白云
08/02	16:52~18:41	880	15:00 以后多云
08/04	16:25~19:16	878	多云
08/07	11:33~12:50	880	昨天刚下过雨, 多云
08/08	15:04~19:15	882	上午无云, 下午天边有白云, 但天顶无云, 湛蓝
08/10	10:24~19:06	881	上午无云, 中午北边天空有云, 下午天顶无云, 四周天边有云
08/11	16:55~19:28	880	上午无云, 中午有丝状絮云, 下午天顶无云, 远处天边有少量的云

$$\tau(\lambda) = \tau_r(\lambda) + \tau_g(\lambda) + \tau_a(\lambda). \quad (6)$$

其中 $\tau_r(\lambda)$ 是瑞利光学厚度, $\tau_g(\lambda)$ 是气体吸收光学厚度, $\tau_a(\lambda)$ 是气溶胶光学厚度。瑞利光学厚度 $\tau_r(\lambda)$ 可由以下公式算出 [5]

$$\tau_r(\lambda) = 0.008569\lambda^{-4} \cdot (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \times \frac{P}{1013.25} \cdot \exp(-0.125H). \quad (7)$$

其中 P 是大气压强 (单位: hPa), H 是海拔高度 (单位: km), λ 是波长 (单位: μm)。选用的四个波段 (670 nm 波段有微弱的臭氧吸收 [6], 这里忽略不计) 的大气总光学厚度主要由瑞利散射和气溶胶衰减组成, 即 $\tau_g(\lambda)$ 为零, 因此大气总光学厚度 $\tau(\lambda)$ 扣除由 (7) 式算出的瑞利光学厚度 $\tau_r(\lambda)$ 就得到气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 。

3.2 气溶胶 Ångström 参数的推导

假定气溶胶粒子谱遵循 Junge 分布, 通过查看 Ångström 波长指数 α 的变化可以获取粒子尺寸分布的一些信息。其定义如下

$$\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}. \quad (8)$$

两边取对数, 得

$$\ln((\tau_a(\lambda))) = \ln \beta - \alpha \ln \lambda. \quad (9)$$

Ångström 波长指数 α 反映了气溶胶组成中大小粒子的比例, 当大粒子增多时 α 减小, 当小粒子增多时 α 增大。 β 为大气混浊度系数, 它和气溶胶粒子总数、折射指数和谱分布等有关, 主要反映的是气溶胶浓度的大小, 其值越大气溶胶浓度越高。通过测量多个波段上的气溶胶光学厚度, 利用 (9) 式进行拟合就可以得到 α 和 β , 将 α 和 β 带入 (8) 式继而可以求出其它波长上的气溶胶光学厚度。

4 仪器定标与数据处理

4.1 仪器定标

对太阳辐射计的定标可分为实验室定标和野外定标两种 [7]: 前者是在实验室利用已知光谱特性的标准辐射源, 通过测量仪器的响应来进行的绝对定标, 后者是在海拔较高、大气状况稳定的野外利用太阳光, 采用 Langley 方法得到 $V_0(\lambda)$ 的绝对定标。实验之前我们在黄山对 CE317 进行了野外定标, 实验期间 8 月 11 日的下午大气状况稳定, 我们利用这段时间的测量数据对 CE317 又进行了现

场野外定标, 图 1 为现场寂静标曲线, 现场定标结果与黄山定标结果见表 3, 可以看出现场定标的拟合相关系数高, 定标结果与黄山定标结果基本一致 (1020 nm 不稳定, 后面有讨论)。本文采用现场定标结果进行数据处理。

表 3 CE317 现场定标与黄山定标结果

Table 3 Results of field and Huangshan calibrations of CE317

波长 (nm)	现场		黄山 $\ln V_0(\lambda)$
	$\ln V_0(\lambda)$	相关系数	
1020	7.603	0.9928	7.945
870	9.405	0.9942	9.379
670	9.554	0.9976	9.554
440	8.452	0.9994	8.411

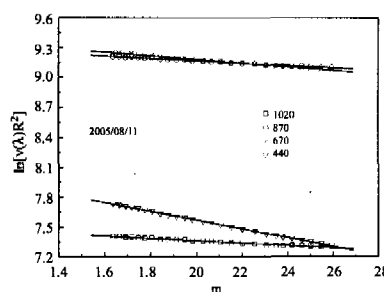


图 1 用 Langley 方法得到的 CE317 现场定标曲线
Fig.1 Langley-Plot for CE317 calibration on the spot

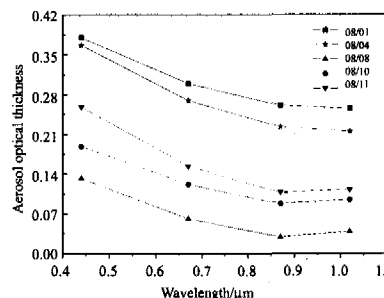


图 2 气溶胶光学厚度随波长的变化曲线
Fig.2 Aerosol optical thickness variations with the wavelength

4.2 光学厚度计算

首先对数据进行初步筛选, 从表 2 可以看出 8 月 1、4、8、10 和 11 日的大气状况比较稳定,

我们利用 CE317 在这五天的测量数据进行反演分析。表 4 给出了利用 Langley 方法得到的大气总光学厚度和根据 (6)、(7) 式得到的气溶胶光学厚度, 图 2 显示了气溶胶光学厚度随波长的变化曲线。

4.3 气溶胶 Ångström 参数计算

图 3 为气溶胶光学厚度与波长之间的对数关系曲线, 可以看出除 1020 nm 外 (此波段不稳定, 后面有讨论), 其余三个波段上存在一定的线性关系, 因此利用 (9) 式对 870 nm、670 nm 和 440 nm 三个波段上的气溶胶光学厚度进行拟合, 得出 Ångström

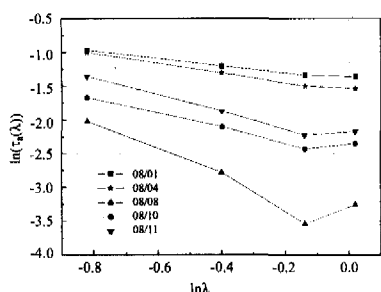


图 3 气溶胶光学厚度与波长之间的对数关系曲线

Fig.3 The logarithmic relationship between aerosol optical thickness and wavelength

参数 α 和 β 的值, 进一步推算出 550 nm 处的气溶胶光学厚度, 结果见表 5, 可以看出拟合的相关系数高, 若扣除 670nm 处的微弱臭氧吸收, 相关系数会更高。

5 结果分析与讨论

5.1 气溶胶光学厚度日内变化

由于客观原因我们只在 2005 年 8 月 10 日进行了较长时间的观测, 其它观测日只进行了下午较短时间段的观测, 图 4 显示了气溶胶光学厚度在一天内不同时刻的变化。图 4(a) 显示 2005 年 8 月 10 日中午以后光学厚度有所增大 (1020 nm 不稳定, 后面有讨论), 当天现场试验记录记载从中午开始四周天空有云生成; 其它观测日短时间内的数据均比较平直, 如图 4(b) 所示。由此得出新疆博斯腾湖地区气溶胶光学厚度短时间内变化小, 日内变化不大。

5.2 气溶胶光学厚度日间变化

由于 α 和 β 拟合的相关系数高, 因此利用 (9) 式推算出的 550 nm 处气溶胶光学厚度来进行分析。图 5 显示了气溶胶光学厚度的日间变化, 由图

表 4 CE317 得到的大气总光学厚度和气溶胶光学厚度

Table 1 Total and aerosol optical thickness measured by CE317

日期	时间	大气质量	大气总光学厚度				气溶胶光学厚度			
			1020 nm	870 nm	670 nm	440 nm	1020 nm	870 nm	670 nm	440 nm
08/01	18:23~19:11	1.589~2.112	0.261	0.272	0.332	0.563	0.255	0.261	0.299	0.380
08/04	16:25~19:16	1.087~2.243	0.221	0.234	0.303	0.550	0.215	0.222	0.270	0.366
08/08	17:45~19:15	1.389~2.298	0.044	0.041	0.095	0.316	0.038	0.029	0.062	0.133
08/10	17:33~19:06	1.342~2.183	0.101	0.099	0.155	0.371	0.095	0.088	0.122	0.188
08/11	18:18~19:26	1.636~2.595	0.120	0.119	0.186	0.441	0.114	0.108	0.154	0.258

表 5 Ångström 参数及 550 nm 处的气溶胶光学厚度

Table 5 Parameters of Ångström and aerosol optical thickness at 550 nm

日期	α	α 标准偏差	$\ln \beta$	$\ln \beta$ 标准偏差	总标准偏差	相关系数	550 nm
08/01	0.553	0.010	-1.423	0.005	0.005	0.9998	0.335
08/04	0.732	0.003	-1.604	0.002	0.001	0.9999	0.311
08/08	2.188	0.287	-3.774	0.153	0.140	0.9915	0.085
08/10	1.106	0.061	-2.570	0.033	0.030	0.9985	0.148
08/11	1.274	0.030	-2.396	0.016	0.015	0.9997	0.195

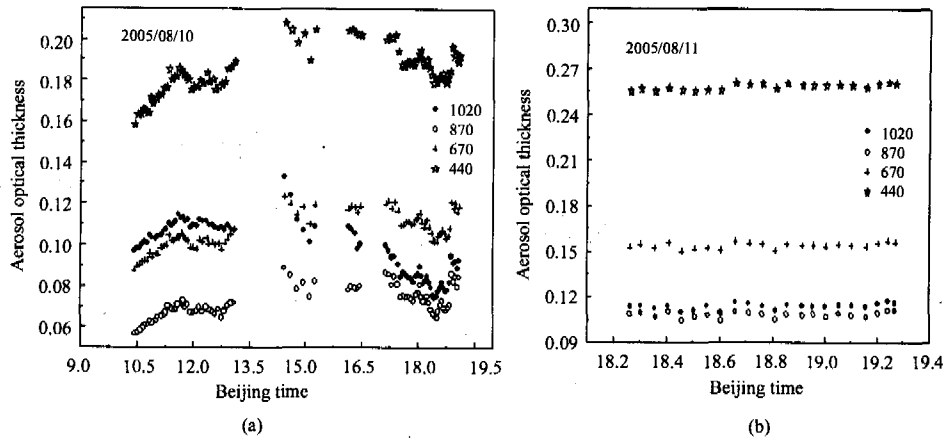


图 4 气溶胶光学厚度在一天不同时刻的变化

Fig.4 Aerosol optical thickness daily variations

可见 8 日的气溶胶光学厚度最低, 这是因为 5 日和 6 日连续降雨, 过后气溶胶光学厚度逐日增大, 两三天后恢复到一般值。整体来说新疆地区全年降水少, 除降水过程前后几天光学厚度有较大变化外, 其它天气晴朗时气溶胶光学厚度日间变化不大, 550 nm 处的气溶胶光学厚度平均为 0.17(例如 10 日和 11 日)。胡秀清等计算出作为中国遥感卫星辐射校正场的敦煌和青海湖场区 550 nm 处的气溶胶光学厚度分别为 0.12 和 0.18^[8], 与之相比可见新疆博斯腾湖地区大气洁净, 大气透明度好。

图 6 显示了 Ångström 参数 α 和 β 的变化。5 日和 6 日的降雨过程在图 6(a) 中表现为 α 值的明显增大, 说明降雨过程对气溶胶中大粒子的清除作

用比较明显, 使得大小粒子的比例明显减小。新疆博斯腾湖地区 Ångström 波长指数 α 平均为 1.19,

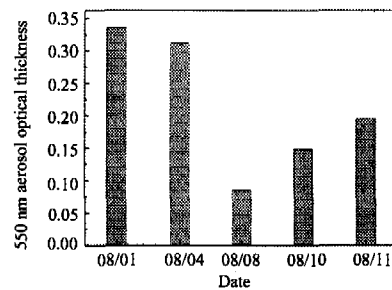


图 5 气溶胶光学厚度的日间变化

Fig.5 Aerosol optical thickness variations over days

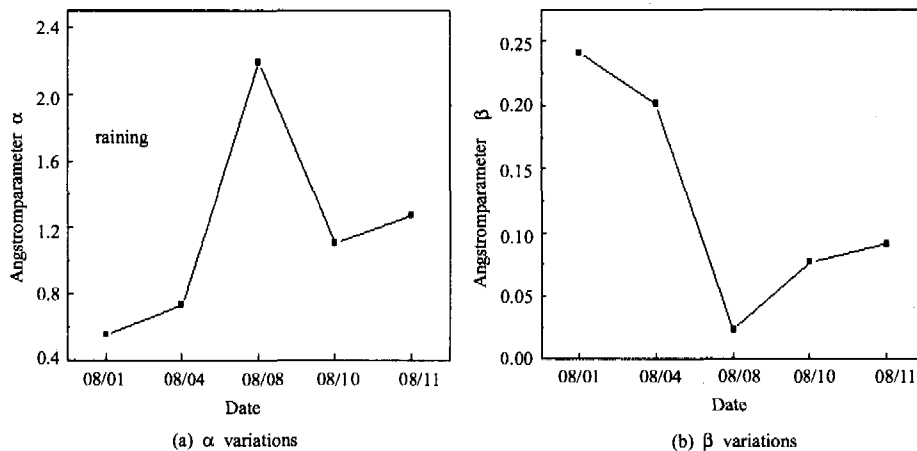


图 6 Ångström 参数的变化

Fig.6 Ångström parameters variations

5.3 Ångström 气溶胶参数变化

与 6S 常用气溶胶模式中的大陆型比较接近。表 6 给出了 6S 常用的几种典型气溶胶模式的 α 值。

比较图 6(b) 和图 5 可以看出大气混浊度系数 β 和气溶胶光学厚度的变化规律相似, β 的值大说明气溶胶浓度高, 进而气溶胶光学厚度就大。新疆博斯腾湖地区大气混浊度系数 β 平均为 0.08。

表 6 6S 常用的几种典型气溶胶模式的
Ångström 指数 α

Table 6 Ångström index α of several typical
aerosol patterns of 6S

气溶胶模式	大陆型	海洋型	城市型	沙漠型
α	1.20	0.22	1.35	0.38

5.4 讨论

在上面的计算处理中, 我们发现 1020 nm 波段有较大波动, 可能是由于硅探测器在此波段灵敏度低所致, 有待于进一步研究。

试验中从现场测量到数据处理主要有以下几个方面的误差来源: 大气状况不稳定; 仪器自身误差; 操作误差; 处理系统误差。其中大气状况不稳定带来的误差影响最大, 本次试验大气测量基本在目视无云, 大气状况较稳定的时间段内进行, Langley 拟合的相关系数都在 91% 以上; 利用 CE317 手动测量, 保证每点测量都对准太阳, 避免了利用 CE318 自动测量时因为风的影响使镜筒没有完全对准太阳所引起的操作误差; 处理系统利用 (7) 式计算瑞利光学厚度, 其不确定性来自气压的变化, Eck 等指出这种气压的不确定性造成的光学厚度不确定性约在 0.002~0.009 之间^[9]。因此本次试验的误差主要取决于仪器自身误差, 由于仪器测量的气溶胶光学厚度误差约为 0.01, 所以本次试验气溶胶光学厚度的误差也为 0.01。

6 结 语

通过此次野外试验数据的处理分析, 我们对新疆博斯腾湖地区的大气消光特性有了初步了解。该地区全年降水过程少, 降水前后的几天内气溶胶光学厚度有较大波动, 除此之外该地区在 7、8 月间大气洁净, 气溶胶光学厚度的日内和日间变化

不大, 550 nm 处的气溶胶光学厚度一般为 0.17; Ångström 波长指数 α 一般为 1.19, 与 6S 常用气溶胶模式中的大陆型比较接近; 大气混浊度系数 β 一般为 0.08。

参考文献:

- [1] Holben B N, Eck T F, et al. A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens. Environ*, 1998, 66: 1-16.
- [2] Thome K J, Herman B M, Reagan J A. Determination of precipitable water from solar transmission [J]. *J. Appl. Meteorol*, 1992, 31: 157-165.
- [3] Biggar S F, Gellman D I, et al. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data [J]. *Remote Sens. Environ*, 1990, 32: 91-101.
- [4] Duffie J A, Beckman W A. *Solar Engineering of the Thermal Processes* [M]. New York: Wiley, 1980.
- [5] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Sci. Rev.*, 1974, 16: 527-610.
- [6] Nicolet M. The solar spectral irradiance and its action in the atmospheric photodissociation process [J]. *Planet. Space Sci.*, 1981, 29: 951-974.
- [7] Schmid B, Spyak P R, et al. Evaluation of the applicability of solar and lamp radiometric calibrations of a precision sun photometer operating between 300 and 1025 nm [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(18): 3923-3941.
- [8] Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang. Measurements and study of aerosol optical characteristics in China radiometric calibration sites [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(3): 257-266 (in Chinese).
胡秀清, 张玉香. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究 [J], *应用气象学报*, 2001, 12(3): 257-266.
- [9] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. The wavelength dependence of the optical depth of biomass burning urban and desert dust aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 31, 331-31, 350.