

# 台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响分析

赵 强<sup>1</sup> 杨世植<sup>1</sup> 乔延利<sup>1</sup> 袁广宇<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; <sup>2</sup> 淮北煤炭师范学院物理系, 安徽 淮北 235000)

**摘要** 利用 CE317 太阳辐射计对 2005 年第 19 号台风登陆前后期间(9 月 29 日至 10 月 6 日)进行观测实验, 采用 Langley 法分析台风对中国大陆沿海地区气溶胶光学特性的影响。指出台风过后气溶胶光学特性明显发生改变, 气溶胶大粒子数增多, 小粒子数减小。气溶胶光学厚度、Ångström 波长指数  $\alpha$  和大气混浊度系数  $\beta$  为测量期间最低分别为 0.132(550 nm 处), 0.861 和 0.079。同时利用实验期间 APS3321 空气动力学粒度仪分析的气溶胶单位体积数粗细质粒所占比重、气溶胶粒子尺度谱分布和实测的日际气溶胶粒子数浓度对实验分析结果  $\alpha, \beta$  进行对比, 发现它们之间的一致性很好。

**关键词** 大气光学; 气溶胶光学特性; Langley 法; 台风

**中图分类号** TN201; P425.6

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS20082811.2046

## Analysis of the Optical Characteristic of Littoral Aerosol Influenced by Typhoon

Zhao Qiang<sup>1</sup> Yang Shizhi<sup>1</sup> Qiao Yanli<sup>1</sup> Yuan Guangyu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China*)  
(<sup>2</sup> *Department of Physics, Huaibei Coal Teachers College, Huaibei, Anhui 235000, China*)

**Abstract** The optical characteristic of littoral aerosol influenced by typhoon is analyzed, through measuring aerosol optical thickness with sunphotometer CE317 in a Langley method in the 19<sup>th</sup> typhoon period in 2005. Aerosol is changed obviously after typhoon, the thin particle amount decreases and thick particle amount increases. Aerosol optical thickness, Ångström parameter  $\alpha$  and atmosphere turbidity parameter  $\beta$  reach to the lowest value of 0.132(550 nm), 0.861 and 0.079 respectively. The percentage of thin particle and thick particle in a unit volume amount, the size distribution of aerosol and amount concentration of aerosol particle are measured by aerodynamic particle sizer spectrometer, which agree well with the above  $\alpha, \beta$  value.

**Key words** atmospheric optics; aerosol optical characteristic; Langley method; typhoon

## 1 引 言

气溶胶是指悬浮在大气中的微小颗粒物构成的多分散体, 其粒子的尺度和时空变换比较大<sup>[1]</sup>。它能以吸收和散射方式与辐射发生作用, 通过影响大气辐射传输影响到涉及大气的众多研究领域, 例如环境、气候、军事和遥感<sup>[2]</sup>。台风是发生在热带洋面上的一种强烈的气旋性风暴, 其活动范围很大, 通常从热带洋面侵入到中纬度地区并伴有狂风、暴雨、巨浪和海潮, 具有很大的破坏力。西北太平洋热带海区是全球台风发生频率最高、强度最大的海域。我

国是全世界少数几个受台风影响最严重的国家之一, 登陆的台风平均每年 8 个左右, 占西太平洋沿岸地区登陆台风数的 35%, 因此研究分析台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响, 对于气象环境监测, 大气科学研究等都有重要的现实意义。2006 年, Lau 等<sup>[3]</sup>对亚洲季风降雨和环流与气溶胶的关系进行了研究; 同年 Jacobson 等<sup>[4]</sup>指出气溶胶对风速的减小也有直接影响。2008 年, 孙家仁等<sup>[5]</sup>分析了中国区域硫酸盐气溶胶对东亚夏季风的可能影响。然而, 目前国内外尚没有开展研究、分析台风对于沿海地

收稿日期: 2008-02-25; 收到修改稿日期: 2008-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(40571106)资助项目。

作者简介: 赵 强(1981-), 男, 安徽人, 博士研究生, 主要从事大气光学方面的研究。E-mail: rommel99@163.com

导师简介: 杨世植(1963-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: szyang@aiofm.ac.cn

区气溶胶光学特性的影响。本文利用地基多波段太阳辐射计 CE317 和美国 TSI 公司的 Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer (APS 3321) 空气动力学粒度仪于 2005 年 9 月 29 日至 10 月 18 日对厦门沿海进行了系统的观测和研究。期间第 19 号台风“龙王”于 10 月 2 日 21:35 在福建晋江围头登陆,向西偏北方向移动,23 时中心位于北纬  $24.5^\circ$ ,东经  $118.3^\circ$ ,在金门岛附近。选取台风登陆前后期间(9 月 29 日至 10 月 6 日)的观测数据初步分析和研究台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响。

## 2 实验概况

测量点选在厦门海域附近的一个小岛上,测量时间从 9 月 29 日至 10 月 18 日。实验中使用的法国 CIMEL 公司的手动太阳辐射计 CE317 波段设置如表 1 所示,其中 936 nm,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,其余波段均位于大气窗区,利用余下的四个光谱波段(1020 nm,870 nm,670 nm 和 440 nm)的数据进行大气光学厚度和气溶胶光学特性研究<sup>[6]</sup>。APS 3321 型空气动力学粒度仪是美国 TSI 公司最新开发出的仪器,具有宽阔的动力学粒径范围和极高的分辨率,精确可靠,它将空气动力学粒径在  $0.5\sim 20\ \mu\text{m}$  范围内的粒子分成 52 档进行测定,是当今应用最为广泛的粒子分析仪器之一。

表 1 CE317 太阳辐射计的波段设置

Table 1 Channel wavelength of sunphotometer CE317

Channel	1	2	3	4	5	6
Wavelength/nm	1020	870	670	440	936	940
Band width/nm	10	10	10	10	10	50

## 3 实验方法

### 3.1 太阳辐射计反演气溶胶光学特性原理

根据 Bouguer 定律<sup>[7]</sup>,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,  $E_0(\lambda)$  为在一个天文单位(AU)距离上的大气外界的太阳辐照度,  $R$  为测量时的日地距离(AU),  $m$  为大气质量数,  $\tau$  为总的垂直光学厚度。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

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

其中,  $V_0(\lambda)$  为定标常数,日地修正因子采用近似公

式<sup>[8]</sup>

$$R^{-2} = 1 + 0.033\cos(2\pi \cdot J/365), \quad (3)$$

其中,  $J$  为一年中的天数,大气质量  $m$  修正后的表达式为

$$m = \frac{1}{\cos(\pi \cdot \theta_0/180^\circ) + 0.15 \times (93.885 - \theta_0)^{-1.253}} \times \frac{P}{1013}, \quad (4)$$

其中,  $\theta_0$  为太阳天顶角,  $P$  为大气压强。(2)式两边取对数为<sup>[9]</sup>

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

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  $\ln V_0(\lambda)$ 。得到  $\ln V_0(\lambda)$  后,再通过(5)式可计算大气光学厚度  $\tau(\lambda)$ 。其中,瑞利散射光学厚度为  $\tau_r(\lambda)$ 、气体吸收光学厚度为  $\tau_g(\lambda)$  和气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  三部分组成<sup>[10]</sup>:

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

利用大气总光学厚度  $\tau(\lambda)$  减去由瑞利散射理论和气体吸收理论计算得到的  $\tau_r(\lambda)$  和  $\tau_g(\lambda)$  就可得到气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$ 。对于气溶胶光学厚度,假定气溶胶粒子谱遵循 Junge 分布<sup>[11]</sup>,可以通过 Ångström 指数  $\alpha$  的变化来获取粒子尺寸分布的一些信息,其定义为<sup>[12]</sup>

$$\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (7)$$

两边取对数,得

$$\ln \tau_a(\lambda) = \ln \beta - \alpha \ln \lambda. \quad (8)$$

可以看出气溶胶光学厚度对数值与波长对数值之间存在线性关系。 $\alpha$  的起伏一定程度上反映了气溶胶粒子尺寸分布的变化; $\beta$  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。通过测量气溶胶光学厚度的谱分布,对(8)式进行拟合就可以得到  $\alpha$  和  $\beta$ ,将  $\alpha$  和  $\beta$  带入(8)式继而可以求出其它波长上的气溶胶光学厚度。

### 3.2 空气动力学粒度仪反演气溶胶粒子数浓度原理

气溶胶粒子数浓度

$$N = \int_0^\infty \frac{dN}{d\lg D_p} \frac{dD_p}{D_p \ln 10} \quad (9)$$

其中,  $D_p$  为气溶胶粒子直径,  $\frac{dN}{d\lg D_p}$  为气溶胶粒子尺度谱。根据 APS3321 空气动力学粒度仪实测的气溶胶尺度谱分布,利用(9)式可求出气溶胶粒子数浓度,

绘出粒子数浓度随粒子直径的变化关系图<sup>[13]</sup>。

## 4 数据处理结果

第 19 号台风“龙王”于 10 月 2 日登陆厦门沿

海,受台风影响,3 日下暴雨。选取台风登陆前后期间的日期获得 9 月 29,30 日,10 月 1,4,5 日的各波段处气溶胶光学厚度以及 Ångström 参数如表 2 所示。

表 2 日际气溶胶光学厚度以及 Ångström 参数

Table 2 Aerosol optical thickness and Ångström parameter in the day time

Date	Atmospheric mass	Aerosol optical thickness					Ångström parameter	
		1020 nm	870 nm	670 nm	550 nm	440nm	$\alpha$	$\beta$
9.29	1.114~7.170	0.104	0.118	0.175	0.214	0.278	1.199	0.105
9.30	1.118~7.889	0.164	0.203	0.312	0.387	0.513	1.367	0.171
10.1	1.146~4.400	0.134	0.166	0.254	0.316	0.419	1.370	0.139
10.4	1.133~6.349	0.0789	0.085	0.117	0.132	0.158	0.861	0.079
10.5	1.137~4.217	0.105	0.120	0.180	0.223	0.294	1.258	0.105
10.6	1.141~5.673	0.108	0.127	0.189	0.236	0.310	1.276	0.110

## 5 结果分析

气溶胶光学特性的一个重要指标为气溶胶光学厚度。根据表 2,图 1 给出了气溶胶光学厚度随波长的变化曲线图,可以看出 9 月 30 日气溶胶光学厚度最大,10 月 1 日次之,10 月 4 日气溶胶光学厚度最小。

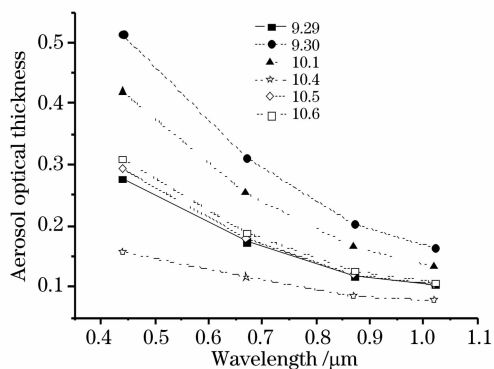


图 1 日际气溶胶光学厚度随 CE317 4 个波段变化  
Fig. 1 Daily change of aerosol optical thickness for 4 CE317 aerosol bands

图 2 为 870 nm 处测量期间气溶胶光学厚度的逐日变化图,可以看出每日的大气光学厚度不同。对测量期间通过计算得 550 nm 的气溶胶光学厚度的逐日变化如图 3 所示,台风对气溶胶光学厚度的改变是非常明显的,10 月 2,3 日台风登陆过境,期间受台风影响,3 日下暴雨,这个过程将气溶胶光学厚度从 10 月 1 日的 0.3158 降至 10 月 4 日的 0.1320,而 5,6 日的气溶胶光学厚度逐日增大。

气溶胶的特征尺度范围可分为两大类:细质粒(粒子半径小于 1  $\mu\text{m}$ )和粗质粒(粒子半径大于

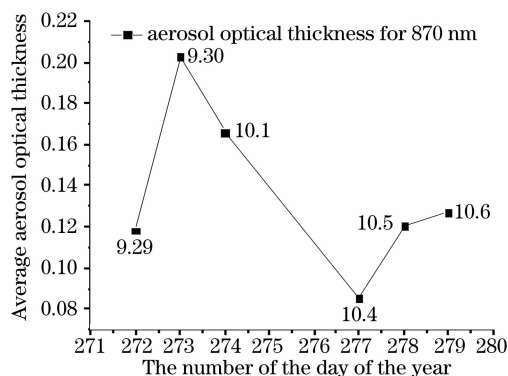


图 2 870 nm 处气溶胶光学厚度逐日变化  
Fig. 2 Daily variations of aerosol optical thickness for 870 nm wavelength

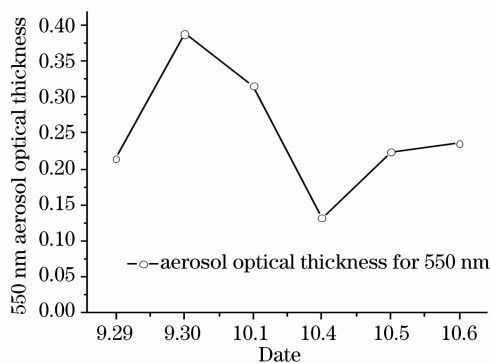


图 3 550 nm 处气溶胶光学厚度逐日变化  
Fig. 3 Daily variations of aerosol optical thickness for 550 nm wavelength

1  $\mu\text{m}$ )。Ångström 波长指数  $\alpha$  表征垂直气柱内气溶胶质粒的谱分布,反映气溶胶组成中大小粒子的比例,当大粒子增多时  $\alpha$  减小,当小粒子增多时  $\alpha$  增大。从图 4 可以看出,厦门海域大气气溶胶

Ångström 波长指数  $\alpha$  在 1.30 附近, 当有粒子注入时, 产生较大波动。测量期间的台风暴雨天气使得 10 月 4 日的 Ångström 波长指数  $\alpha$  明显减小, 大粒子增多。图 5 给出了台风过境前后日际大气气溶胶粒子尺度谱分布变化, 1, 4 日的尺度谱分布变化非常明显, 台风过境带来的强降雨(2, 3 日)使得气溶胶粒子得以较好地清除, 尤其是细质粒数目的减少更加明显, 同时台风带来了海洋上的粗质粒(大粒子), 使得大粒子增多。根据 APS3321 空气动力学粒度仪实测的气溶胶粒子谱分布可反演出气溶胶粒子数浓度随粒子直径变化图(如图 6 所示), 气溶胶粒子细质粒数浓度在 4 日最低, 1 日最高; 粗质粒的数浓度在台风过后 4 日明显增大, 随后在 5 日有所

下降。图 7 给出了 10 月 1, 4, 5 日单位体积气溶胶粒子数粗细质粒所占的比重; 1, 4, 5 日粗质粒所占的比重分别为 1.61%, 10.0%, 3.98%, 可以看出台风过境后 4 日粗质粒即大粒子所占比重明显增大,  $\alpha$  减小, 这与利用 CE317 反演的  $\alpha$  变化结果相吻合。另外根据福建省气象局对第 19 号台风“龙王”的实时预报, 2, 3 日厦门沿海偏东风, 4 日全省沿海东北风。由于海洋上的气溶胶尺度粗模态占很大比重, 大粒子数多。台风登陆过境期间从海洋上吹来的风, 带来了海洋上的气溶胶, 使得沿海地区原有的气溶胶模式发生改变, 大粒子数增多, 造成 Ångström 波长指数  $\alpha$  减小, 这个物理过程与实验分析的结果相吻合。

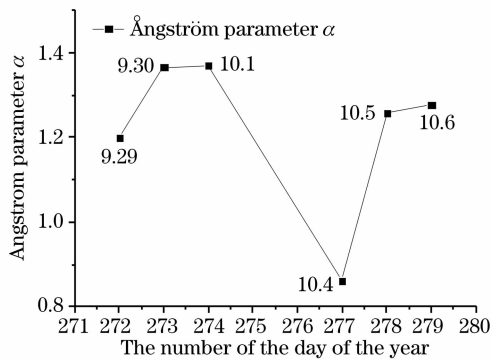


图 4 日际 Ångström 波长指数  $\alpha$  变化  
Fig. 4 Daily variations Ångström parameter  $\alpha$

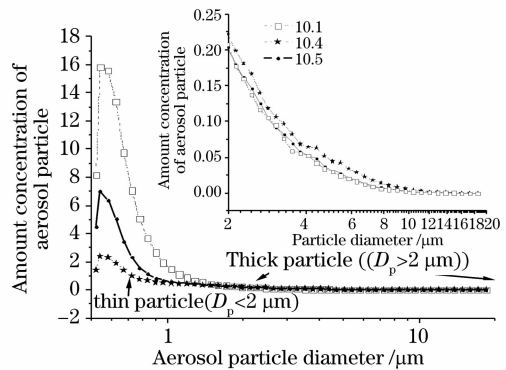


图 6 气溶胶粒子数浓度随粒子直径变化  
Fig. 6 Amount concentration of aerosol particle variations versus particle diameter

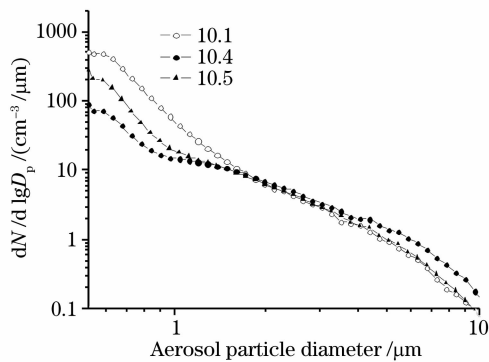


图 5 日际大气气溶胶粒子尺度谱分布  
Fig. 5 Daily size distribution of atmospheric aerosols

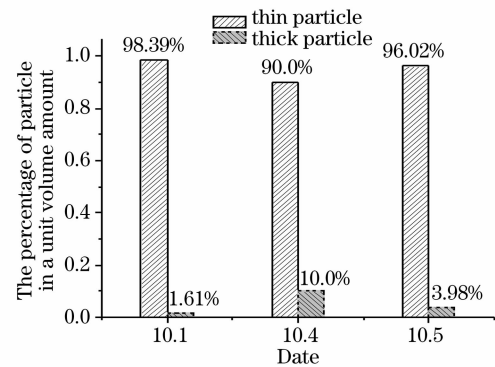


图 7 单位体积气溶胶粒子数粗细质粒所占的比重  
Fig. 7 Percentage of thin particle and thick particle in a unit volume amount

Ångström 大气混浊度系数  $\beta$  逐日变化如图 8 所示, 大气混浊度系数平均值为 0.118, 变化规律和 870 nm 气溶胶光学厚度的变化规律相似。  $\beta$  在数值上等于 1  $\mu\text{m}$  处的光学厚度, 它与测站上空垂直气柱内气溶胶质粒总数有关。结合 APS 3321 型空气

动力学粒度仪测得的气溶胶粒子数密度, 如图 9 所示, 观察发现台风过境前后测得的日际平均粒子数浓度变化与反演得到的日际平均大气混浊度系数  $\beta$  变化呈很好的一致性。

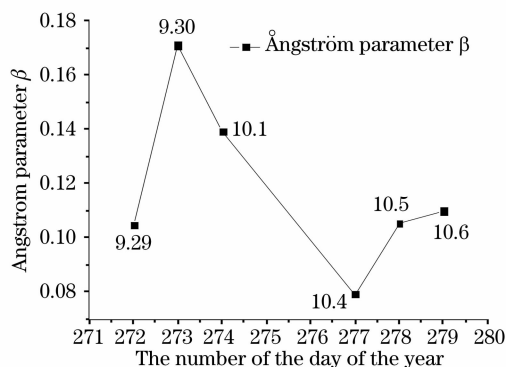


图 8 Ångström 大气混浊度系数  $\beta$  逐日变化  
Fig. 8 Daily Ångström parameter  $\beta$  variations

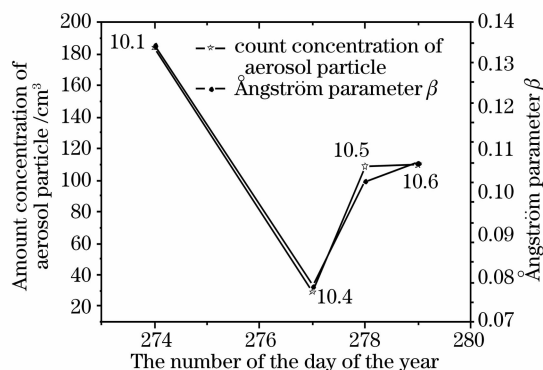


图 9 日际平均粒子数浓度和平均大气混浊度系数  $\beta$  变化  
Fig. 9 Daily average amount concentration of aerosol particle and average Ångström parameter  $\beta$  variations

## 6 结 论

台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响是非常明显的。台风过后,气溶胶光学厚度明显降低,Ångström 波长指数  $\alpha$ 、大气混浊度系数  $\beta$  也随之降低,气溶胶大粒子数增多,小粒子数减小。利用 APS3321 空气动力学粒度仪实测的气溶胶尺度谱分布和分析的气溶胶单位体积数粗细质粒所占比重以及日际气溶胶粒子数浓度变化对实验分析结果  $\alpha$ 、 $\beta$  进行比较,发现它们之间呈很好的一致性。

**致谢:**感谢中科院安徽光学精密机械研究所大气光学中心黄印博博士、黄红莲同学提供的 APS3321 测量数据。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Xianhui, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91  
王先华,乔延利,Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 2 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573  
韩道文,刘文清,刘建国 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1573
- 3 Lau K M, Kim K M. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall and circulation [J]. *Geophys Res Lett.*, 2006, **33**: L21810

- 4 Jacobson M Z, Kaufman Y J. Wind reduction by aerosol particles [J]. *Geophys Res. Lett.*, 2006, **33**: L24814
- 5 Sun J R, Liu Y. Possible effect of aerosols over china on east asian summer monsoon( I ): sulfate aerosols[J]. *Adv. in Climat Chan Res.*, 2008, **4**(002): 111~116  
孙家仁,刘焯. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响(I):硫酸盐气溶胶的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2008, **6**(002): 111~116
- 4 Holben B N, Eck T F, Slutsker I *et al.*. A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensor Environ.*, 1998, **66**: 1~16
- 7 Biggar S F, Gellman D I, Slater P N *et al.*. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data[J]. *Remote Sensor Environ.*, 1990, **32**: 91~101
- 8 Duffier J A, Beckman W A. Solar Engineering of the Thermal Processes[M]. New York: Wiley 1980. 18~21
- 9 Zhang Y P, Yang S Z, Zhao Q *et al.*. Observation and analyse of aerosol optical properties in Bositeng lake area [J]. *J. Atmos. Environ. Opt.*, 2007, **2**(1): 38~43  
张玉平,杨世植,赵强等. 新疆波斯腾湖地区气溶胶光学特性的观测分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(1): 38~43
- 10 Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Rev.*, 1974, **16**: 527~610
- 11 Zhang C C, Zhou W X. Atmospheric Aerosol Tutorial [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 21~23  
章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 21~23
- 12 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 aerosol[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 31331~31350
- 13 Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 855~859  
阎逢旗,胡欢陵,周军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射指数虚部的测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 855~859