

上海地区大气气溶胶光学特性的初步研究

宋磊^{1,2} 吕达仁¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 上海是东亚重要的沿海城市之一, 其上空大气气溶胶光学特性的研究对了解上海及我国东部沿海地区的环境和气候影响等方面都具有重要性, 至今尚无这方面的实际观测分析。本工作利用 2000 年 6 月到 2002 年 12 月之间测得的上海地区太阳直接辐照度数据, 分析之后得出大气气溶胶光学厚度值, 并统计分析大气气溶胶光学厚度的季节变化及其与地面能见度的关系, 最后给出了气溶胶消光谱。通过上述工作, 发现上海地区大气气溶胶光学厚度具有夏季最大, 春季次之, 冬季最小的相对稳定的特点。此外, 地面能见度及其倒数作为一个相对容易获得的参数, 与大气气溶胶的光学厚度具有较好的相关性, 可以考虑将其倒数作为一个约束气溶胶光学厚度分布的物理参数, 这对今后的观测和研究都具有一定的实际意义。

关键词 气溶胶光学厚度 地面能见度 大气消光

文章编号 1006-9585 (2006) 02-0203-06 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Investigating of Atmospheric Optical Characteristics Over Shanghai Region

SONG Lei^{1,2} and LÜ Da-Ren¹

1 *Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract Shanghai is one of the important coastal city in East Asia, the study of atmosphere aerosol optical characteristics over this region is important for understanding the environment and the climate simulation in Shanghai and East China. This work used the observation data of the direct solar irradiance from June 2000 to December 2002 to obtain the aerosol optical depths (AOD). Then we analyzed the statistical characteristics of AOD, such as seasonal variation, correlation with surface visibility, etc. At last, we drew the spectral distribution of AOD. The results show that the AOD in Shanghai is largest in summer, then less in spring, and smallest in winter. In addition, the surface visibility and its reciprocal has nice correlation with the AOD, it can be used as a parameter to restrict the AOD distribution.

Key words aerosol optical depths, surface visibility, atmospheric extinction

1 引言

大气气溶胶分布与变化, 包括其成分、光学特征、粒谱分布与时空分布是当前全球和区域性

大气环境与气候变化所关注的焦点内容之一。地表沙尘、海洋飞沫、工业烟尘等多种自然过程和人类活动都会产生大气气溶胶粒子。此外, 大气中的光化学反应也会有气溶胶粒子生成^[1]。在气候模拟和环境遥感的辐射传输计算中, 大气气溶

收稿日期 2004-09-15 收到, 2006-01-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333034 和 40027002

作者简介 宋磊, 男, 1981 年生, 在读博士, 主要从事大气气溶胶的观测研究。E-mail: rocksong@ustc.edu

胶是重要影响因子之一。气溶胶的增加关系到地气系统的热平衡,甚至可能影响全球长期的气候变化,其浓度还与生态环境及人类健康息息相关^[2]。但是由于气溶胶本身的形成和各种特性以及对大气辐射的影响过程十分复杂,人们对它的了解至今尚不全面。

对大气气溶胶的研究,除了直接采集近地面的样本进行物理化学分析之外,还可以通过推测垂直大气柱的光学厚度来实现。近年来,这方面已经做了大量的观测和研究工作^[3~8]。上海作为重要的城市之一,人类活动对大气的的影响比较明显。此外,上海位于华东沿海一带,受大气输送等的影响,其上空大气气溶胶的特性一定程度上代表了华东以及沿海地区的气溶胶特性。在我国的已有工作大多集中在北方,并与沙尘气溶胶以及大城市污染密切相关。相比而言,华东、华南沿海一带大气气溶胶光学特征的观测较为薄弱。近几年来,气溶胶区域气候效应已引起了较大的关注,新一轮在我国研究气溶胶光学特征的工作正在展开。针对我国的观测现状,我们在2000年前后已开始了在上海的气溶胶观测,在上海徐汇区利用多波长光度计进行了2年以上的准连续观测。本工作通过分析由太阳直接辐照度得出的大气气溶胶光学厚度(AOD),试图了解上海地区大气气溶胶光学特性的气候特征。

2 观测与数据处理

2.1 仪器

本工作采用L97多波段光度计/辐射计,其为在450~900 nm波长范围内分成10个波段对测量目标进行非接触式相对测量的光辐射测量仪器。

2.2 观测时间与地点

根据原理要求,观测条件一般为晴天日面路径上无云大气。观测地点位于上海市徐汇区(海拔4 m, 31°22'N, 121°48'E)。大部分测量选择中午11:30~13:30(北京时,下同),这段时间通常为中等垂直输送阶段,接近日平均水平,且太阳天顶角小,基本可以反映观测点上空的大气特性,地域代表性较好。仪器定标采用长法,故在一些稳定的晴天进行了全天长时间观测,测量时间在7:30~16:30之间,这些数据主要用来作长法定

标。

2.3 数据处理

由仪器获得的直接太阳辐照度 $F(\lambda)$ 与大气垂直总光学厚度 $\tau(\lambda)$ 有如下关系^[8~10]:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda)R^2 \exp(-\tau(\lambda)\sec \theta),$$

式中, $F_0(\lambda)$ 为地外太阳辐照度(太阳常数); R 为日地距离订正量(平均距离比实际距离),该值由天文年历确定; θ 为太阳天顶角。

在大气相对稳定的条件下,将上式改写为

$$\ln F(\lambda) = \ln F_0(\lambda)R^2 - \tau(\lambda)\sec \theta,$$

可见 $\ln F(\lambda)$ 与 $\sec \theta$ 成线性关系。由不同太阳天顶角与测得的一组 $\ln F(\lambda)$ 做直线,外推到 $\sec \theta$ 为0时候的截距就是 $\ln F_0(\lambda)R^2$,斜率就是 $-\tau(\lambda)$,这种方法称为“兰利(Langley)法”,通常也称为“长法”,即

$$\tau(\lambda) = (\ln F_0(\lambda)R^2 - \ln F(\lambda))/\sec \theta.$$

得出的大气总光学厚度由Rayleigh散射厚度($\tau_R(\lambda)$)、气体分子吸收厚度($\tau_g(\lambda)$)和大气气溶胶厚度($\tau_a(\lambda)$)3部分组成。其中, Rayleigh散射厚度可通过地面气压值计算得出。大气分子吸收主要是水汽、臭氧和氧气的吸收。本工作中各波段基本位于大气窗区,气体分子的吸收可近似计为0^[9,10]。因此总光学厚度与Rayleigh散射厚度之差就是气溶胶光学厚度,即

$$\tau_a(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_R(\lambda).$$

2.4 定标值

实际工作中采用的数据全都是在晴朗无云条件下测得的。其中选取了不同季节稳定晴天的9组数据用来定标,在经过修正之后得到了各天的值,直接平均从而得到了450 nm到850 nm共9个通道最后使用的定标值。数据如表1所示。

表1 各通道定标值

Table 1 The $\ln F_0(\lambda)$ for each path

波长 Wavelength/nm	定标值 $\ln F_0(\lambda)$	方差 Variance
450	8.23328	0.05597
500	9.28602	0.05477
550	10.16448	0.05356
600	10.20717	0.05079
650	10.74803	0.04474
700	10.51696	0.05027
750	10.62995	0.03550
800	10.46772	0.02797
850	10.39519	0.03060

3 结果与分析

根据上面得出的定标值，我们对 2000 年 6 月到 2002 年 12 月的资料进行了处理和分析（其中 2001 年 3~5 月的资料短缺），全部选取观测时刻太阳附近完全无云，在扣除了 Rayleigh 散射之后，得到了大气气溶胶光学厚度值，并讨论其变化特征。

3.1 季节变化特征

考虑到上海地区的地域特点，以 2~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月为秋季，12~1 月为冬季分类；以 550 nm（通道 3）波段为例，对各个季节数据取平均值，得到的结果列于表 2 和图 1。

从数据和图像上可以清楚看到，上海地区大气气溶胶光学厚度具有夏、春、秋、冬依次变小的特征。总体而言，平均值的季节变化不是很大。值得注意的是，其离散度也是夏、春、秋、冬依次变小。这种气溶胶光学厚度春夏较大、秋冬较

表 2 550 nm 通道各个季节 AOD 平均值

Table 2 The average AOD of 550 nm in different season

季节 Season	平均气溶胶光学厚度 Average AOD	方差 Variance	数据数目 Data number
春季 Spring	0.46954	0.20804	70
夏季 Summer	0.50931	0.35185	163
秋季 Autumn	0.40524	0.22816	159
冬季 Winter	0.39715	0.19099	141

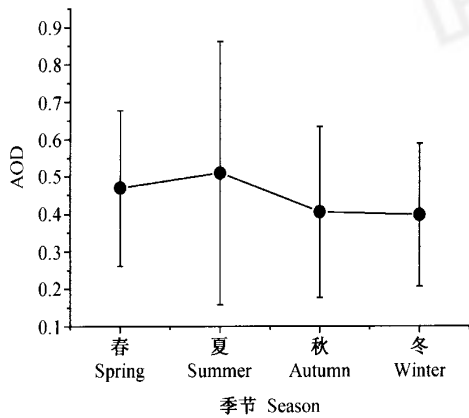


图 1 各季节平均 AOD 及方差

Fig.1 The average AOD and variance in different season

小的结果与一些利用 MODIS 资料得到的中国东部地区的结果一致^[11,12]。实际北京的观测也是夏季最大^[5,13,14]。这种季节差异可能有以下几个原因：

(1) 夏季大气相对湿度高，吸湿性气溶胶颗粒平均粒径增大，导致消光系数增加；而且夏季温度湿度的高值，有利于大气中气-粒转化的气相反应，也增强了形成气溶胶的能力。此外，我们使用的数据多数是中午测得，而夏季中午相对更容易产生对流，形成较强的气溶胶垂直输送，也可能使气柱气溶胶含量增加；

(2) 春季气溶胶值偏高的主要原因是频繁来自于北方的大风天气系统中含有大量的沙尘粒子，大量细沙尘粒子从北方高空输送过来使气柱总气溶胶含量增加。

(3) 秋冬月份，来自西北的相对干燥冷气团高压天气系统出现较多，空气相对比较洁净，也使得秋冬季节的气溶胶光学厚度和离散程度均小于春夏季节。

3.2 地面能见度与气溶胶光学厚度

根据上海龙华 2001 年到 2002 年的地面能见度观测数据，我们仍以 550 nm 通道为例分析了能见度与大气气溶胶的相关性。按照表 3 标准为能见度分级，并分别计算平均值和方差，得到的结果如表 4 和图 2 所示。

从数据和图可以看出，能见度级别越高，大气气溶胶光学厚度越小，且离散程度越小。地面的能见度与气溶胶光学厚度是负相关的。考虑到在实际大气中，能见度 10 km 和 15 km 的差别明显小于 5 km 和 10 km 的差别，为了消除这种现象

表 3 地面能见度的分级标准

Table 3 The level of surface visibility

	I	II	III	IV
视程范围 Visible distance/km	<5	5~10	10~15	>15

表 4 不同能见度级别下气溶胶光学厚度的平均值以及方差
Table 4 The average AOD and variance in different visibility level

能见度等级 Visibility level	平均气溶胶光学厚度 Average AOD	方差 Variance	数据数目 Data number
I	0.67138	0.28610	38
II	0.50412	0.24891	200
III	0.37207	0.19629	100
IV	0.23353	0.10779	56

在控制气溶胶光学厚度方面的影响,我们进一步对能见度取倒数,并分析了各个季节能见度倒数与气溶胶光学厚度之间的关系,得到了图3。为了从数值角度粗略说明他们之间的相关性,剔除能见度小于5 km的情况,采用线性拟合的方式,得到的数据列于表5。

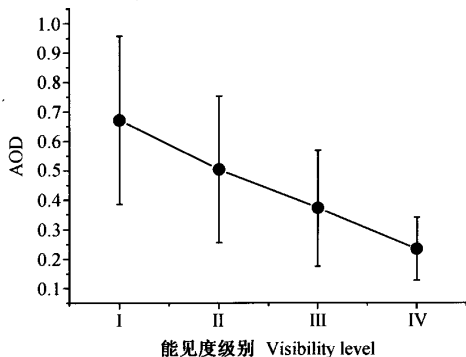


图2 不同能见度级别平均气溶胶光学厚度及方差

Fig. 2 The average AOD and variance in visibility level

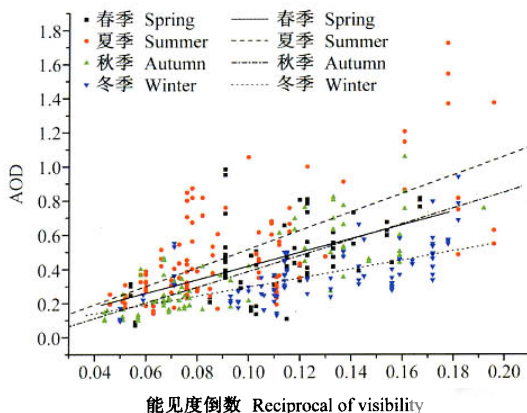


图3 不同季节气溶胶光学厚度与能见度倒数的相关(图中各条直线分别是各个季节的线性拟合结果)

Fig. 3 The correlation of AOD and the reciprocal of visibility in season (the lines are a linear fit result of different season)

表5 不同季节能见度倒数与气溶胶光学厚度相关性

Table 5 The correlation of AOD and the reciprocal of visibility in different season

季节 Season	R	方差 Variance
春季 Spring	0.50780	0.18366
夏季 Summer	0.66543	0.22514
秋季 Autumn	0.80400	0.13268
冬季 Winter	0.59994	0.12494

注: R—相关系数 Note: R—Correlation coefficient

可见,能见度倒数与气溶胶光学厚度之间具有较好的正相关性。从图3中还可以看到,就统计平均来看,同一能见度下上海地区夏季的气溶胶光学厚度最大,春秋次之,冬季最小。而且这种现象在低能见度情况下更加显著。出现上述现象的原因可能有以下几个方面:

(1) 地面能见度尽管只是近地面的大气混浊度指标,但是实际大气中近地面集中了大部分气溶胶,因此地面水平能见度(或其倒数)基本上控制了气溶胶光学厚度的变化;但是影响气溶胶气柱厚度的因素十分复杂,不同季节相关性并不相同,且不同季节气柱气溶胶光学厚度与能见度线性拟合的斜率亦不相同。

(2) 夏季中午由于垂直输送较秋冬季节强烈,造成高空大气的变化比较频繁和复杂,使得同一能见度下夏季的气溶胶光学厚度最大,春秋次之,冬季最小;此外,气溶胶中尺度较大的粒子,更容易接近地面,因此不同季节中大粒子所占比重的不同也可能导致这个结果。

(3) 不同季节气溶胶光学厚度与地面能见度倒数之间的相关系数表明了当地地表状况对大气气柱气溶胶光学厚度的代表性或控制程度。秋季相关系数最高是由于这时高空气溶胶所占比例很小,而春季相关系数低值则恰恰表明该季节与本地无关的高空气溶胶占有相当的比例。

3.3 大气气溶胶消光谱

利用450~850 nm通道共9个波段的大气气溶胶光学厚度资料,分别在季节和能见度约束下作出了消光谱,得到的结果如图4和图5所示(图5所示为500~850 nm共8个通道的图像);同时我们采用通用的 $\tau_a(\lambda)$ 的经验拟合公式^[4]

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

来拟合上图中的各条折线,得到的参数值列于表6。

尽管存在一定的波动,但是从总体趋势看消光比较正常。图4显示了上海地区大气气溶胶光学厚度春夏季节较大,秋冬季节较小的特点,且从 β 的值可以看到,春季大粒子比例最高,夏季次之,秋冬季大粒子比例最低。图5则可以清楚的看到能见度级别对气溶胶光学厚度的明显约束,能见度越高,气溶胶光学厚度越小;而反观 β 值则平均而言随能见度级别增大而逐渐减小,这表

明能见度倒数与大粒子有弱的负相关。这一特征与沙尘源区的中国北方有较大差别,说明上海低能见度情况下有更多的小粒子,即非沙尘源的气相反应生成的小粒子。

表 6 $\tau_a(\lambda)$ 拟合参数值

Table 6 The parameter of $\tau_a(\lambda)$ fit

			α	β
季节 Season	春季 Spring		0.34664	0.39562
	夏季 Summer		0.32340	0.57641
	秋季 Autumn		0.29221	0.62864
	冬季 Winter		0.27166	0.68241
能见度级别 Visibility level	I		0.44448	0.64524
	II		0.33838	0.58645
	III		0.26978	0.46753
	IV		0.16132	0.49712

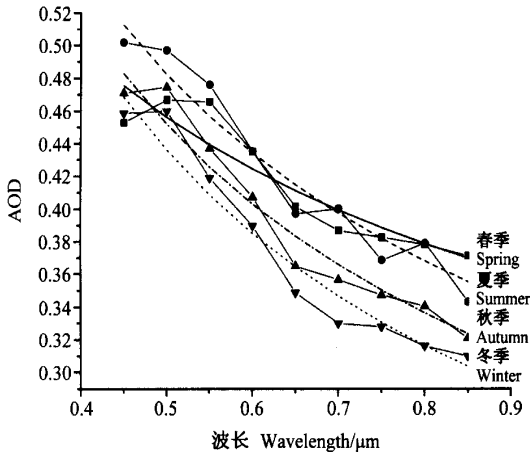


图 4 季节约束下的消光谱

Fig. 4 The spectral distribution of AOD in different season

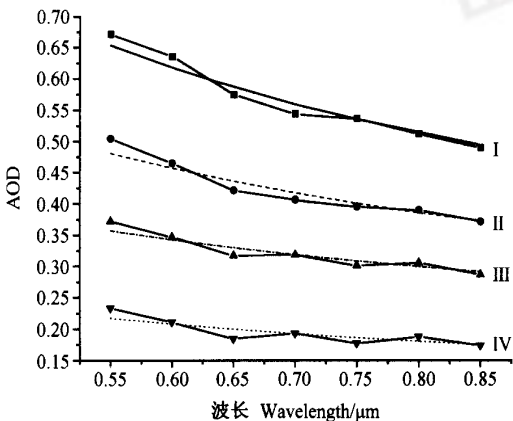


图 5 能见度约束下的消光谱

Fig. 5 The spectral distribution of AOD in visibility level

4 结论

本文利用多波段光度计于 2000 年 6 月到 2002 年 12 月在上海的观测数据,分析了大气气溶胶光学厚度的统计特性,初步结论如下:

(1) 上海地区的大气气溶胶光学厚度大小按季节来讲其顺序为:夏>春>秋>冬,且离散程度也是如此。其原因在于夏季相对湿度大,使气溶胶吸湿导致平均粒径增大,且夏季有利于大气中气-粒转化的气相反应。此外,还因夏季中午有相对较强的气溶胶垂直输送;而春季则有较多的来自北方的高空浮尘粒子。这一夏季气溶胶光学厚度最大的情况与 Kim 等^[15]在中国西北和东亚海上观测所得结论有所差异。这是由于西北一直处于干燥状态,而东亚海上气溶胶的局地源又不同于陆地。因此,对东亚沿海地区的气溶胶季节变化而言,上海的结果应有一定代表性。

(2) 气溶胶光学厚度与气象能见度的倒数有较好的正相关,说明地面情况在很大程度上代表了整层气溶胶光学厚度。不同季节相关性高低又有明显差异,其中春季最差。这主要是由于春季高空存在与本地地表状况无关的高空沙尘粒子,是春季北方沙尘活动远距离传输的结果。

(3) 在建立气溶胶光学厚度与能见度倒数的线性最小二乘拟合中,同一能见度倒数对应的气溶胶光学厚度即斜率随季节而异,以夏季最大。这说明夏季的高相对湿度与中午的对流垂直输送使气溶胶光学厚度在同样地面状况下最大。

以上这些特征在东南沿海具有一定的代表性,我们正在做进一步工作,以了解其气候与环境的效应。

致谢 本文资料由何珍珍女士观测,在资料分析中得到了刘锦丽研究员的诸多帮助,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 章澄昌,周文贤. 大气气溶胶教程. 气象出版社, 1995. 32~35, 299~323
Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. The Tutorial of Atmospheric Aerosol (in Chinese). China Meteorological Press, 1995. 32~35, 299~323

- [2] 王明星. 气溶胶与气候. 气候与环境研究, 2000, **5** (1): 1~5
Wang Mingxing. Aerosol in relation to climate change. *Climatic and Environment research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 1~5
- [3] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述. 气象学报, 2002, **60** (5): 625~634
Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 625~634
- [4] 刘锦丽, 李放, 吕达仁. 长春静月潭遥感试验场大气光学特性研究. 环境遥感, 1994, **9** (3): 184~194
Liu Jinli, Li Fang, Lu Daren. Investigating of atmospheric optical characteristics over Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Site. *Remote Sensing of Environment* (in Chinese), 1994, **9** (3): 184~194
- [5] 李放, 吕达仁. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征. 大气科学, 1996, **20** (4): 385~394
Li Fang, Lu Daren. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing Area. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20** (4): 385~394
- [6] 李放, 吕达仁. 能见度分级约束下的大气气溶胶光学厚度特征. 中国环境监测, 1996, **12** (6): 6~9
Li Fang, Lu Daren. Features of the aerosol optical depth of Beijing under the classification of the surface visibility. *Environmental Monitoring in China* (in Chinese), 1996, **12** (6): 6~9
- [7] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. 大气科学, 2002, **26** (6): 721~730
Luo Yunfeng, Lu Daren, Zhou Xiuji, et al. Analysis on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (6): 721~730
- [8] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究. 应用气象学报, 2002, **13** (特刊): 136~143
Zhang Yuxiang, Hu Xiuqing, Liu Yujie, et al. Measurement of atmospheric aerosol optical characteristics in Beijing urban area. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 136~143
- [9] 张军华, 王美华, 毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正. 大气科学, 2000, **24** (6): 855~859
Zhang Junhua, Wang Meihua, Mao Jietai. Error analysis and correction for multi-wavelength Sun-Photometer aerosol remote sensing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (6): 855~859
- [10] 周秀骥. 高等大气物理学. 气象出版社, 1991. 85~96, 667~677, 1098~1106
Zhou Xiuji. *Advanced Atmospheric Physics*. China Meteorological Press, 1991. 85~96, 667~677, 1098~1106
- [11] 刘桂青, 李成才, 朱爱华, 等. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究. 环境保护, 2003, **8**: 50~54
Liu Guiqing, Li Chengcai, Zhu Aihua, et al. Optical depth research of atmospheric aerosol in the Yangtze River Delta Region. *Environment Protect* (in Chinese), 2003, **8**: 50~54
- [12] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. 科学通报, 2003, **48** (19): 2094~2100
Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, et al. Research on the distribution of AOD and the seasonal characteristics in Eastern China with MODIS. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48** (19): 2094~2100
- [13] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, et al. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D06202, doi: 10.1029/2004JD005274
- [14] 章文星, 吕达仁, 王普才. 北京地区大气光学厚度的观测与分析. 中国环境科学, 2002, **22** (6): 495~500
Zhang Wenxing, Lu Daren, Wang Pucui. The observation and analysis of atmospheric aerosol optical thickness over Beijing area. *China Environmental Science* (in Chinese), 2002, **22** (6): 495~500
- [15] Kim D H, Sohn B J, Nakajima T, et al. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.* 2004, **109**: D02209, doi: 10.1029/2003JD003387