

文章编号: 1007-4619(2006)05-0762-08

江西千烟洲气溶胶光学厚度的反演与分析

袁海军^{1, 2, 3}, 顾行发^{1, 2, 3}, 陈良富^{2, 3, 4}, 余涛^{2, 3}, 刘强¹, 李小文^{2, 5}

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054; 2. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;
3. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 江西师范大学 地理学院, 江西 南昌 330027;
5. 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要: 2005 年 10—11 月份, 中国科学院遥感应用研究所联合北京师范大学遥感中心等几家单位在江西千烟洲地区进行了为期 30 天的遥感实验, 在实验期间, 采用法国 CEMEL 公司研制的太阳分光光度计 CE318 进行了连续测量, 得到了大量的大气光学数据。利用这些数据, 反演了气溶胶光学厚度和相应的 Angstrom 参数, 分析了光学厚度和 Angstrom 参数的日变化和逐日变化, 并讨论了这些变化的原因。本文还讨论了在反演气溶胶光学厚度过程中可能的误差源。

关键词: CE318; 气溶胶光学厚度

中图分类号: P407/TP79 **文献标识码:** A

Retrieval and Analysis of Aerosol Optical Thickness over Qianyanzhou Region

YUAN Hai-jun^{1, 2, 3}, GU Xing-fa^{1, 2, 3}, CHEN Liang-fu^{2, 3, 4}, YU Tao^{2, 3}, LIU Qiang¹, LI XIAO-wen^{2, 5}

(1. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China;
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;
3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;
4. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330027, China;
5. State Key Laboratory of Remote Sciences, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China)

Abstract From October to November, RSA of CAS in cooperation with Beijing Normal University Remote Sensing Center and some other research institutes carried out a Remote Sensing experiment in Qianyanzhou Region, Jiangxi Province. During the experiment period, automatic sun tracking photometer CE318 produced by France CEMEL company was used to measure the sun direct irradiance, and a large amount of data was obtained. Based on these data, AOT (aerosol optical thickness) and Angstrom parameters were retrieved. Through analyzing the variation of AOT and Angstrom parameters, the reason which cause the variation was discussed. In this paper, some factors which could introduce error into the retrieval result were also discussed.
Key words CE318; aerosol optical thickness

1 引 言

大气气溶胶是指悬浮在地球大气中的具有一定

稳定性, 沉降速度小, 尺度范围在 10^{-3} — $10\mu\text{m}$ 之间的分子团、液态或固态粒子所组成的混合物^[1]。

大气气溶胶通过直接和间接两种途径影响着地球表层系统的辐射收支平衡, 进而影响着全球气候。

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目“地球表面时空多要素的定量遥感理论及应用”(编号: G2000077900) 资助, 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 袁海军 (1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶参数反演和遥感图像应用方面的研究。E-mail: kumuyh@tom.com。

一般来说,气溶胶粒子能吸收、散射太阳辐射和地一气长波辐射,但对太阳辐射的影响较大,因而气溶胶对气候的影响主要表现为使地表降温,气溶胶粒子对水循环的影响,一般表现为使云滴数量增加,其气候效应是使地表降温^[2]。为了更好的预测全球气候的变化,研究气溶胶是十分重要的。

气溶胶产生的原因千差万别,所以其组成成分、粒子形状、尺度谱以及数密度随高度的分布等物理特性随时空变化极大。气溶胶的物理特性又决定着气溶胶的光学特性,所以光学厚度、单次散射反照率、复折射率、散射相函数以及极化相函数等气溶胶光学特性随时空变化极大。为了更好的了解气溶胶的特性,同时开展点上和面上的研究是有益的。具体而言,点上的研究就是指采用诸如太阳分光光度计等仪器在某个点进行长期观测,根据观测数据反演气溶胶的光学特性和物理特性;面上的研究是指采用遥感卫星进行观测,根据遥感图像反演某个范围的气溶胶的光学特性和物理特性。点上的研究精度较高,而面上的研究则能够更好的反映某个范围的气溶胶的特性,用点上的研究结果对面上的研究结果进行验证和修正。近年来国内外许多研究者在许多地区进行了点上的相关研究,诸如章文星等从 1998 年就开始使用中分辨率太阳天光光谱观测系统监测北京上空大气气溶胶光学特性及长期变化^[3],赵巍等于 2003 年使用手持式太阳辐射计对黄海东海海区上空的大气气溶胶光学特性进行了观测^[4],李霞等则根据 CE318 太阳光度计从 2002 年 4 月 23 日到 2003 年 3 月 15 日在乌鲁木齐地区观测的资料反演了当地的气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数^[5]。此外,国内的厦门海域^[6]和宁夏银川^[7],国外的意大利东南部^[8],南极东部^[9]等地都有研究

者在进行大气气溶胶方面的研究,美国 NASA 主持的全球气溶胶观测网 AERONET 则将点上的气溶胶研究应用到了更广的范围。面上的研究则有以 MODIS 为代表的全球气溶胶遥感^[10,11]。对气溶胶的研究不仅是气溶胶光学厚度的反演,还有气溶胶粒子谱分布、单次散射反照率、散射相函数等方面的研究,诸如李正强等利用地基太阳光度计测量的数据反演了 2003 年北京地区的气溶胶光学厚度、极化相函数和单次散射反照率^[12]。

大量的研究表明,在反演气溶胶的光学和物理特性过程中,气溶胶光学厚度都是一个十分重要的参数,该参数反演的准确性和精度对反演气溶胶的其他光学和物理特性参数有着直接和间接的影响,因此本文继续了这方面的研究。在江西千烟洲地区用自动跟踪太阳光度计 CE318 从 2005 年 10 月中旬到 11 月上旬进行了连续的观测和研究,以了解当地大气气溶胶的光学特性,给同时期进行的卫星过顶实验提供支持。

2 实验概况

本次实验中采用的仪器是由法国 CMEL 公司研制的自动跟踪太阳光度计 CE318。CE318 在地面测量直射太阳辐射和天空辐射,在可见光和近红外的独立通道上进行测量,来确定大气透过率和散射特性。通过两个量的测量来推算反演大气气溶胶的光学辐射特性(光学厚度、粒子谱分布、单次散射反照率、相函数和折射指数)。该仪器能经受恶劣天气考验,并在多种天气条件下只需很少的维护,它仅在白天进行测量。CE318 的波段配置如表 1 所示。其中 936 nm 波段位于强水汽吸收带,其余波段都位于大气窗口。

表 1 CE318 波段配置
Table 1 CE318's band setting

波段配置	1	2	3	4	5	6	7	8
中心波长 /nm	1020	1640	870	670	440	500	936	340
波段宽度 /nm	10	60	10	10	10	10	10	2

江西千烟洲地区是一个综合遥感实验站,本次实验中仪器就架设在实验站的二层小楼的楼顶上,仪器架设地点的经纬度为 E115° 04.010', N26°44.870',海拔约为 105m。在观测期间,晴好天气为 7 天,每天观测时间为 8 点半左右到 16 点半左右。

3 气溶胶光学厚度反演算法

由于所使用的自动跟踪太阳光度计 CE318 的波段配置是从 340—1640 nm,在该波段内,来自地球—大气系统的发射辐射的贡献可以略去,而且不

考虑由于多次散射产生的漫射辐射,根据 Beer-Bouguer-Lambert 定理,穿过地球大气到达地面的太阳单色直射辐照度 $E(\lambda)$ 可以表示为:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) d_s \exp(-m \tau_{am}(\lambda)) t_g(\lambda) \quad (1)$$

式中, $E_0(\lambda)$ 为日地平均距离处地球大气顶层的太阳单色直射辐照度。 d_s 为日地距离修正因子。 m 为大气质量数。 $\tau_{am}(\lambda)$ 为不包括吸收气体影响的大气光学厚度,主要是大气分子瑞利散射光学厚度和气溶胶光学厚度。 $t_g(\lambda)$ 为吸收气体透过率。

日地距离修正因子采用如下经验公式^[13]计算:

$$d_s = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \approx \sum_{n=0}^2 (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (2)$$

式中, r_0 为日地平均距离。 r 为观测日期日地距离。 a_n, b_n 为计算系数,如表 2 所示。

表 2 计算日地距离修正因子的系数

Table 2 Coefficients of calculating the Sun-Earth distance amendment factor

n	a_n	b_n
0	1.000110	0
1	0.034221	0.001280
2	0.0000719	0.000077

$$t = \frac{2\pi d}{365}, \quad d \text{ 为年中天数, } d=0 \text{ 代表 1 月 1 日, } d=364 \text{ 代表 12 月 31 日。}$$

大气质量数采用如下经验公式^[14]计算:

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_s) + 0.15(93.885 - \theta_s)^{-1.253}} \cdot \frac{p}{1013.25} \quad (3)$$

式中, θ_s 为太阳天顶角(单位:度)。

对于水汽,只在 936nm 波段上考虑。对于 O_3 , 则在每个波段上在 340-1020nm 之间的波段都考虑,而其他一些吸收气体诸如 NO_2 和 CO_2 在太阳光度计所配置的波段上影响非常小,本文中忽略了相应的影响。

下面先讨论不考虑水汽影响的波段上的气溶胶光学厚度的反演方法。

于是, $t_g(\lambda)$ 就为臭氧的透过滤 $t_{oz}(\lambda)$, 根据 Beer 定律有:

$$t_{oz}(\lambda) = \exp(-m \tau_{oz}(\lambda)) \quad (4)$$

式中, τ_{oz} 为臭氧的光学厚度。

由方程 (1) 和方程 (4) 可得:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) d_s \exp(-m(\tau_{am}(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda))) \quad (5)$$

方程 (5) 两边取自然对数可得:

$$\ln E(\lambda) = \ln E_0(\lambda) + \ln d_s - m(\tau_{am}(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda)) \quad (6)$$

令

$$\tau_{total}(\lambda) = \tau_{am}(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda) = \tau_r(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda) \quad (7)$$

式中, $\tau_r(\lambda)$ 为大气分子瑞利散射光学厚度。 $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度。

由方程 (6) 和方程 (7) 可得:

$$\begin{aligned} \tau_{total}(\lambda) &= \frac{1}{m} (\ln E_0(\lambda) + \ln d_s - \ln E(\lambda)) \\ &= \frac{1}{m} \ln \frac{E_0(\lambda) d_s}{E(\lambda)} \end{aligned} \quad (8)$$

由于太阳分光光度计的探测元件是线性元件,仪器输出的 DN 值与太阳辐照度之间是线性关系,所以有:

$$\frac{E_0(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{DN_0(\lambda)}{DN(\lambda)} \quad (9)$$

$$\tau_{total}(\lambda) = \frac{1}{m} \ln \frac{DN_0(\lambda) d_s}{DN(\lambda)} \quad (10)$$

于是气溶胶的光学厚度为:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{total}(\lambda) - \tau_r(\lambda) - \tau_{oz}(\lambda) \quad (11)$$

大气分子瑞利散射光学厚度采用下面的经验公式^[14]计算:

$$\begin{aligned} \tau_r(\lambda) &= 0.008569 \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \lambda^{-2} + 0.00013 \lambda^{-4}) \\ &\quad \times \frac{p}{1013.25} e^{-0.125h} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, h 为观测点的海拔,单位为 km; λ 为波长,单位为 μm ; p 为观测点在观测期间的大气气压,单位为 HPa 。

臭氧的光学厚度采用如下公式计算:

$$\tau_{oz}(\lambda) = a_{oz}(\lambda) \frac{U}{1000} \quad (13)$$

式中, $a_{oz}(\lambda)$ 为臭氧吸收系数。 U 为臭氧含量(单位为 DU)。

臭氧含量从 NASA 网站提供的地球探测遥感器 TOMS 的遥感数据处获取(表 3)。

表 3 观测日期中各天的臭氧含量

Table 3 Ozone volume during the observation days

日期	10.23	10.24	10.26	10.27	10.30	10.31	11.01
臭氧含量(DU)	251	251	241	233	234	238	238

其中, 10 月 24 日和 10 月 26 日两天没有数据, 由于大气中的臭氧含量是比较稳定的, 所以 10 月 24 日的臭氧含量用 10 月 23 日的含量代替, 10 月 26

日的含量则用 10 月 27 日的臭氧含量代替。

臭氧吸收系数见表 4。

表 4 CE318 各个波段的臭氧吸收系数^[15]

Table 4 Ozone absorption coefficients on CE318's bands

波段 /nm	1020	1640	870	670	440	500	936	340
$a_{oz}(\lambda)$	0.0000491	0	0.00133	0.0445	0.0026	0.0315	0.000493	0.0307

当没有水汽影响的波段上的气溶胶光学厚度反演实现后, 在气溶胶粒子的谱分布满足 Junge 分布的情况下, Angstrom 指出气溶胶的光学厚度跟波长之间的关系可以用下面的公式表示:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (14)$$

式中, α 为反粒子大小, β 为大气浑浊度系数, 与气溶胶粒子总数、粒子谱分布和折射指数有关。

设波段 λ_1 和 λ_2 没有水汽影响, 则有:

$$\tau_a(\lambda_1) = \beta \lambda_1^{-\alpha} \quad (15)$$

$$\tau_a(\lambda_2) = \beta \lambda_2^{-\alpha} \quad (16)$$

由公式 (16) 和 (17) 可得:

$$\alpha = -\frac{\ln(\tau_a(\lambda_1) / \tau_a(\lambda_2))}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\tau_a(\lambda_1)}{\lambda_1^{-\alpha}} \quad (18)$$

从而得到 936nm 的气溶胶光学厚度。

4 气溶胶光学厚度反演结果及分析

这次实验中所使用的 CE318 自动跟踪太阳光度计刚刚从法国 CMEL 公司购得, CMEL 公司提供的定标数据, 也就是 $DN_0(\lambda)$, 见表 5。

表 5 CE318 的定标数据

Table 5 CE318's calibration coefficients

波段 /nm	1020	1640	870	670	440	500	936	340
$DN_0(\lambda)$	11143.31	26880.22	23135.95	27884.54	17565.90	24191.84	24850.52	26875.80

由于在实验期间, 没有满足进行野外定标的天气和环境, 并且仪器刚从法国 CMEL 公司购得, 所以处理数据时就直接使用了 CMEL 公司提供的定标数据。

(1) 依据公式 (12) 计算的瑞利散射光学厚度见表 6。

(2) 依据公式 (13) 计算的臭氧光学厚度见表 7。

表 6 CE318 各个波段对应的瑞利光学厚度

Table 6 Rayleigh optical thickness on CE318's bands

波段 /nm	1020	1640	870	670	440	500	936	340
$\tau_r(\lambda)$	0.0078006	0.0011594	0.014799	0.042516	0.23661	0.13995	0.011024	0.69216

表 7 观测期间 CE318 各个波段的臭氧光学厚度 ($\times 10^{-3}$)

Table 7 Ozone optical thickness on CE318's bands during the observation days

波段 /nm	1020	1640	870	670	440	500	936	340
10 月 23, 24 日	0.012324	0	0.33383	11.169	0.6526	7.9065	0.12374	7.7057
10 月 26, 27 日	0.011833	0	0.32053	10.724	0.6266	7.5915	0.11881	7.3987
10 月 30 日	0.01144	0	0.30989	10.368	0.6058	7.3395	0.11487	7.1531
10 月 31 日	0.011489	0	0.31122	10.413	0.6084	7.371	0.11536	7.1838
11 月 1 日	0.011686	0	0.31654	10.591	0.6188	7.497	0.11733	7.3055

(3)为了叙述方便,以 10 月 31 日的数据为例来具体展开反演过程。

①依据公式 (10)和 (11)得到除 936nm 波段外的其他波段的气溶胶光学厚度如图 1 所示。

②选取 870nm 和 1020nm 波段的气溶胶光学厚度,依据公式 (17)和 (18)计算得到 Angstrom 的参数

α 和 β 如图 2 所示。

③依据公式 (14)计算 936nm 波段的气溶胶光学厚度。为了将该波段的气溶胶光学厚度同其他波段的气溶胶光学厚度的相对关系反映出来,在图 3 中画出了 1020nm, 936nm 和 870nm 三个波段的气溶胶光学厚度。

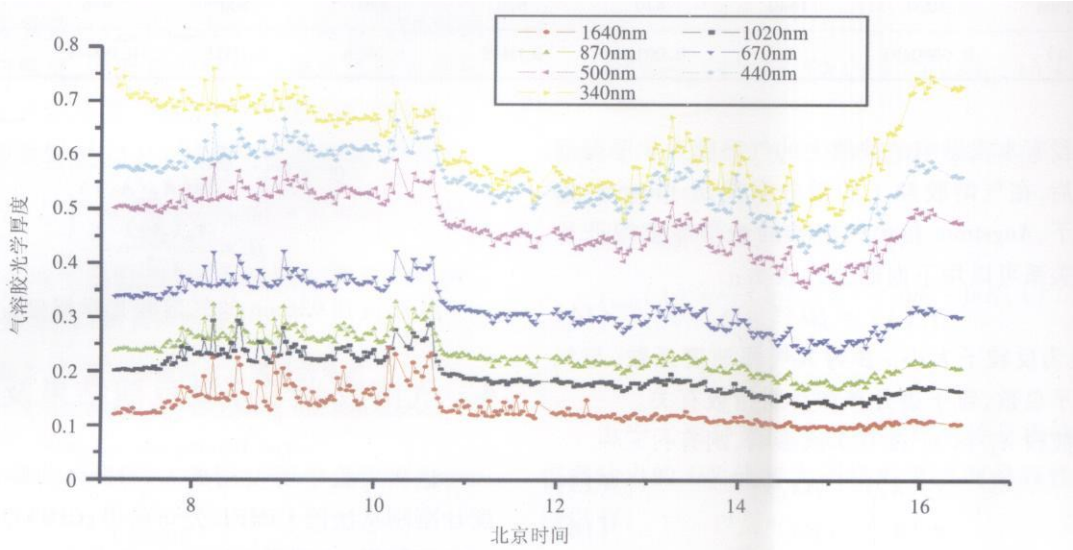


图 1 2005 年 10 月 31 日气溶胶光学厚度 (不包括 936nm 波段)

Fig. 1 Aerosol optical thickness' daily variation on Oct 31, 2005 (except band 936nm)

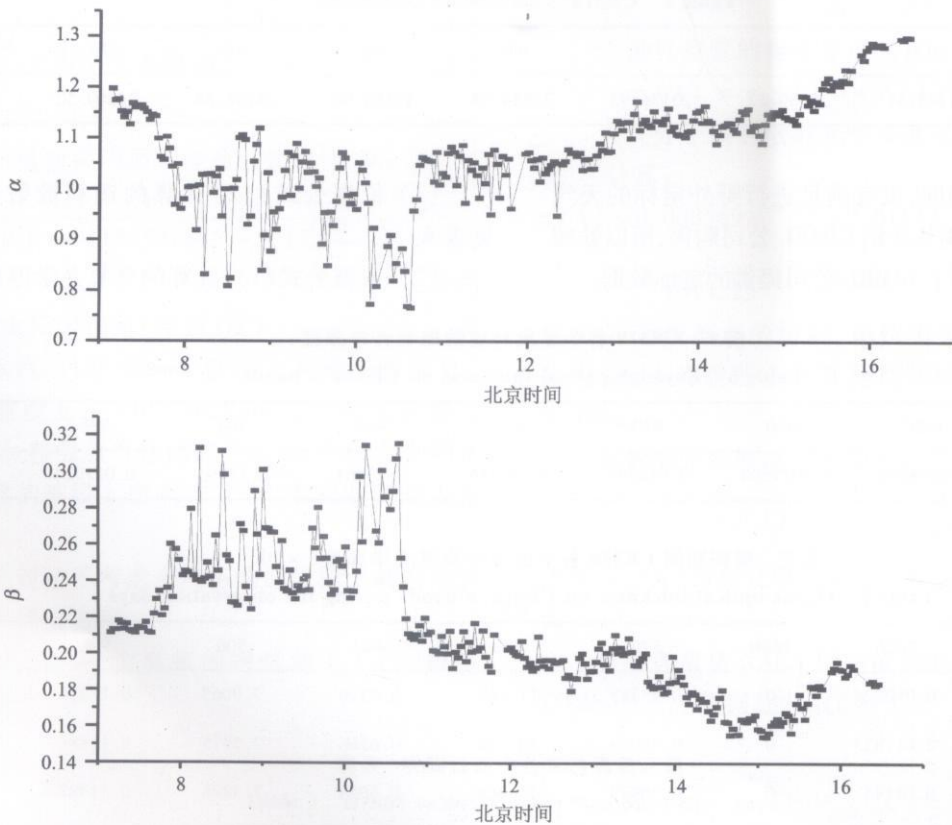


图 2 2005 年 10 月 31 日 Angstrom 日变化图

Fig. 2 Angstrom parameters' daily variation on Oct 31, 2005

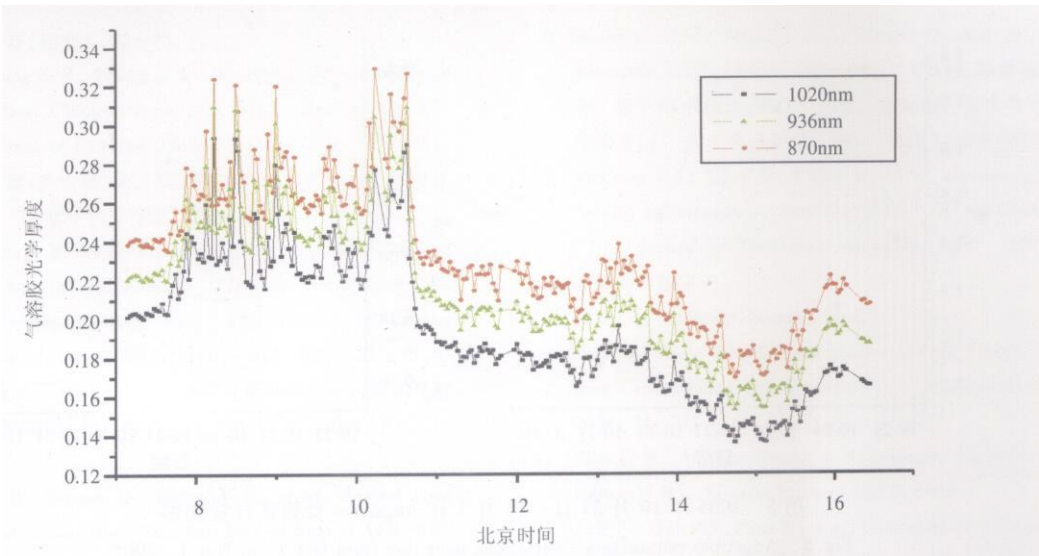


图 3 2005年 10月 31日气溶胶光学厚度 (1020nm, 936nm, 870nm 三个波段)

Fig 3 Aerosol optical thickness of band 1020nm, 936nm, 870nm on Oct 31, 2005

分析图 1和图 3可以看出,随着波长的变长,气溶胶光学厚度变小,这与已有的研究是一致的。各个波段的气溶胶光学厚度的变化趋势非常一致,都显示在当天 8点到 10点 40分左右,气溶胶光学厚度较大,相对变化比较大,而从 11点到 16点气溶胶光学厚度较小,相对变化也比较小。由图 2参数 α 的变化曲线可以得知,当天上午大气中的气溶胶粒子尺度相对较大,且变化相对较大,而下午大气中的

气溶胶粒子尺度相对较小,且比较稳定。可能原因是当地处于南方,且是秋季,上午逆温层尚未消失,气溶胶光学厚度受霾层影响较大,随着太阳升高,逆温层霾层消失,气溶胶光学厚度变小,且趋于稳定。

④按照反演 2005年 10月 31日气溶胶光学厚度的步骤反演各天的气溶胶光学厚度,Angstrom 参数 α 和 β ,对各天取平均值,有如图 4所示的逐日变化图。

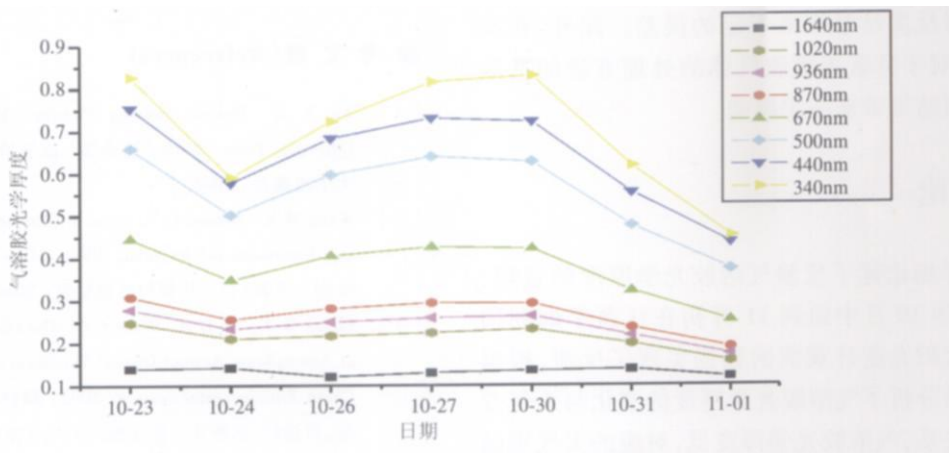


图 4 2005年 10月 23日—11月 1日气溶胶光学厚度逐日变化图

Fig 4 Aerosol optical thickness' variations over day from Oct 23 to Nov 1, 2005

从图 4可以看出,各个波段的气溶胶光学厚度逐日变化具有大致相同的趋势,波长越小,相应的气溶胶光学厚度的变化越明显。根据实验记录,在 10月 22日当地是阴雨天气,10月 23日放晴,接着 24日为晴天,25日又为阴雨天气,在图 4可以发现气溶胶光学厚度 23—24日有一个明显的下降,26日

又开始放晴,30日—11月 1日天气晴好,在图 4上可以发现气溶胶光学厚度从 26—30日缓慢升高,然后一直下降。因此,从逐日光学厚度变化图上可以看出天气变化的情况。图 5中的 α 曲线反映了观测期间大气中气溶胶粒子组成的变化,当 α 增大时,表明小粒子增多,当 α 减小时,表明大粒子增多。 β

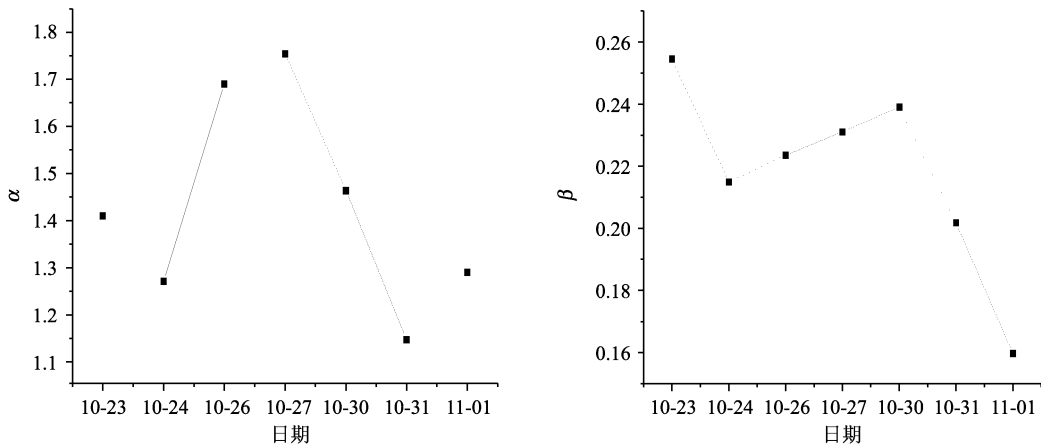


图 5 2005年 10月 23日—11月 1日 Angstrom 参数逐日变化图

Fig 5 Angstrom parameters' variations over day from Oct 23 to Nov 1, 2005

曲线则反映了大气浑浊的情况， β 越小表明能见度越好，大气越清洁，天气也越晴朗。 β 曲线的变化趋势与气溶胶光学厚度的变化趋势吻合得非常好。

⑤在反演气溶胶光学厚度的过程中，很多因素都可能给反演的精度带来误差。在测量时选择架设仪器的地点要求比周围高，如果周围有比仪器架设点高的地方，则不仅会影响测量的数据的多少，而且测量得到的数据的准确度也会受到影响。在对测量得到的数据作预处理时，对于受到污染的数据必须尽可能的去掉，否则那些没有被去掉的受到污染的数据将会对反演结果带来一定的误差。此外，在反演过程中，对于臭氧等吸收气体的处理方法的选取也会对反演结果带来一定影响。

5 结 论

本文详细论述了反演气溶胶光学厚度的过程，并用 2005年 10月中旬到 11月初在江西千烟洲用自动跟踪太阳光度计观测的数据实现了反演，根据反演的结果分析了气溶胶光学厚度的变化与天气变化之间的关系，气溶胶光学厚度低，对应的天气则晴朗。气溶胶粒子的 Angstrom 参数 β 反映了大气的浑浊情况，与气溶胶光学厚度之间存在一定正关系，大气浑浊情况可以用大气能见度来表示，从而在大气能见度与大气光学厚度之间存在一定关系，已经有很多研究者研究了这一关系，相应的结论在很多方面都有应用，比如在 6S 模型中，给用户提供了大气状况时既可以提供气溶胶光学厚度，也可以提供能见度。在分析中，还可以发现，在一定波长范围内，波长越小的波段对气溶胶光学厚度的变化越敏感，

现在很多研究者希望用卫星遥感图像来研究气溶胶在一个大范围内的分布情况，据此他们可以选择波长较小的波段来反演气溶胶光学厚度。为了更加充分地了解气溶胶的光学和物理特性，一些研究者提出了用偏振信息来反演气溶胶的相关参数，作者所看到的方法都需要气溶胶光学厚度为前提条件，因此气溶胶光学厚度反演的准确与否，对整个反演过程都极为重要。提高气溶胶光学厚度的反演精度，并且实现面上的反演，无疑是一个有着重要意义的课题。

参 考 文 献 (References)

- [1] Xu X R. Remote Sensing Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2005. [徐希孺. 遥感物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.]
- [2] Wang M X. Aerosol in Relation to Climate Change [J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(1): 1-5. [王明星. 气溶胶与气候 [J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 1-5.]
- [3] Zhang W X, Lu D R, Wang P C. The Observation and Analysis of Atmospheric Aerosol Optical Thickness over Beijing Area [J]. China Environmental Science, 2002, 22(6): 495-500. [章文星, 吕达仁, 王普才. 北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 495-500.]
- [4] Zhao W, Tang J W, Gao F, et al. Measurement and Study of Aerosol Optical Properties over the Huanghai Sea and the East China Sea in the Spring [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 46-53. [赵巍, 唐军武, 高飞等. 黄海海面上空春季气溶胶光学特性观测分析 [J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 46-53.]
- [5] Li X, Chen Y H, Hu X Q, et al. Analysis of Atmospheric Aerosol Optical Properties over Urumqi [J]. China Environmental Science, 2005, 25(Suppl): 22-25. [李霞, 陈勇航, 胡秀清等. 乌鲁木齐大气气溶胶的光学特性分析 [J]. 中国环境科

- 学, 2005, **25**(增刊): 22—25.]
- [6] Ma J J Tang S Z Zhang Y P. Measurements and Study of Aerosol Optical Characterization over Xiamen Sea Region [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics 2005, **22**(3): 473—476 [麻金继,唐世植,张玉平. 厦门海域气溶胶光学特性的观测研究 [J]. 量子电子学报, 2005, **22**(3): 473—476.]
- [7] Liu Y J Niu S J Zheng Y F. Optical Depth Characteristics of Yinchuan Atmospheric Aerosols Based on the CE318 Sun Tracking Spectrophotometer Data [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2004, **27**(5): 615—622 [刘玉杰,牛生杰,郑有飞. 用 CE318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性 [J]. 南京气象学院学报, 2004, **27**(5): 615—622.]
- [8] Perrone M R, Santese M, Tafuro A M, et al. Aerosol Load Characterization over South East Italy for One Year of AERONET Sun-photometer Measurements [J]. Atmospheric Research, 2005, **75**: 111—133.
- [9] Delphine Six Michel Fily, Luc Blarel et al. First Aerosol Optical Thickness Measurements at Dome C (East Antarctica), Summer Season 2003—2004 [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**: 5041—5050.
- [10] Wang X Q, Yang S Z, Zhu Y H, et al. Aerosol Optical Thickness Retrieval over Land From MODIS Data Based on the Inversion of 6S Model [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, **20**(5): 629—634. [王新强,杨世植,朱永豪等. 基于 6S 模型从 MODIS 图像反演陆地上空大气气溶胶光学厚度 [J]. 量子电子学报, 2003, **20**(5): 629—634.]
- [11] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L, et al. Operational Remote Sensing of Tropospheric Aerosol over the Land from EOS/MODIS [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**(14): 17050—17068.
- [12] Li Z Q, Philippe Goloub, Claude Devaux, et al. Aerosol Polarized Phase Function and Single-scattering Albedo Retrieved from Ground-based Measurements [J]. Atmospheric Research, 2004, **71**: 233—241.
- [13] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition) [M]. Elsevier Science (USA), 2002.
- [14] Li Z Q, Zhao F S, Zhao W, et al. Ground Surface Observation of Aerosol Optical Thickness over Yellow Sea Region [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, **20**(5): 634—640. [李正强,赵凤生,赵巍等. 黄海海域气溶胶光学厚度测量研究 [J]. 量子电子学报, 2003, **20**(5): 634—640.]
- [15] Christian Gueymard. Simple Model for the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS2) Algorithms and Performance Assessment. A Research Institute of the University of Central Florida, 1995.