

文章编号: 0253-2239(2008)01-0087-05

# 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计 辐射定标系统

王先华<sup>1</sup> 乔延利<sup>1</sup> Philippe Goloub<sup>2</sup> 李正强<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> 法国里尔科学技术大学大气光学实验室, 法国 里尔 59655)

**摘要** 依据全球气溶胶监测网对高精度辐射定标技术的需求,分析了太阳辐射计定标的特点与技术要求,通过国际合作建立了由野外场地和实验室内设备构成的太阳辐射计定标系统。基于该系统的太阳辐射计定标结果与国外定标结果的比对显示,所建立的系统在定标精度上达到了该类仪器辐射定标的国际水平,能够满足高性能气溶胶测量网络对太阳辐射计辐射定量精度的需求。

**关键词** 辐射定标; 定标系统; 高精度辐射标准传递; 太阳辐射计

**中图分类号** TP79 **文献标识码** A

## Radiometric Calibration of Sunphotometer System Applied to Aerosol Robotic Network

Wang Xianhua<sup>1</sup> Qiao Yanli<sup>1</sup> Philippe Goloub<sup>2</sup> Li Zhengqiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup>Laboratoire d'Optique Atmospherique, Université de Sciences et Technologies de Lille,  
59655 Villeneuve d'Ascq, France

**Abstract** The characteristics and technical requirement of a sunphotometer radiometric calibration system, including field and laboratory instruments, has been set up by the international cooperation for high-precision radiometric calibration on the sunphotometer in Aerosol Robotic Network (AERONET). Comparing the calibration results with foreign advanced calibration systems in the same sunphotometer, the accuracy of the proposed system is very high and it is able to calibrate the sunphotometer in AERONET.

**Key words** radiometric calibration; calibration system; high-precision radiometric transfer; sunphotometer

### 1 引 言

大气气溶胶由于其复杂的成因与时空分布上的不均匀性,造成了把握全球范围内气溶胶光学特性上的困难。地面测量虽然具有较高的精度,然而由于气溶胶分布时空上的不均匀性,难以通过少数几处的测量外推到全球其它地方;用卫星可以对全球范围进行测量,然而由于卫星获得的是地面反射辐射与大气散射辐射的混合信号,气溶胶特性提取在范围上和精度上均存在很大限制<sup>[1]</sup>。对全球气溶胶

光学特性认知上的不足,严重影响着卫星遥感数据的应用<sup>[2]</sup>和对全球气候特性的研究<sup>[3]</sup>。目前基于地面测量的全球气溶胶光学特性数据库成为理解气溶胶影响的基础<sup>[4]</sup>,这些数据缩小了对气溶胶模型假设与气溶胶实际特性上的差距,降低了不确定性程度<sup>[5]</sup>。然而目前这样的数据库在时间上和区域上都非常有限,为更好地掌握全球气溶胶的光学特性,以美国航空航天局(NASA)为首组建的全球气溶胶监测网(AERONET)正在不断扩大,全世界测量站点

收稿日期: 2007-01-25; 收到修改稿日期: 2007-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(40571105)资助课题。

作者简介: 王先华(1963—),男,安徽芜湖人,博士,副研究员,主要从事定量化遥感、遥感系统成像质量分析和遥感图像信息提取等方面的研究。E-mail: xhwang@aiofm.ac.cn

已经超过 130 多个<sup>[6]</sup>,而且还在不断地增加。目前,我国以及东南亚各国已有多家机构参与了全球气溶胶测量网,同时我国也有自己局域气溶胶测量网,如“中国沙尘暴预警服务系统”。

太阳辐射计是地面气溶胶测量的主要仪器。太阳辐射计只有经过绝对辐射定标,其测量数据才能够反演出气溶胶的光学厚度、粒子谱分布、相函数和单次散射反照率等重要光学参量。太阳辐射计的定标精度决定着气溶胶反演结果的精度,通过比对不同太阳辐射计测量数据反演的结果显示,定标精度不够的太阳辐射计,其数据反演出的气溶胶光学参量之间存在着很大的差异,而太阳辐射计的定标可以保证反演结果之间的可比性<sup>[6]</sup>,因此良好的气溶胶监测网络需要高精度的定标技术作为支撑。以 NASA 为中心的个别机构对所有站点太阳辐射计进行统一定标,因工作量巨大而难以有效开展工作。2005 年我们加入了 AERONET 网的子网 PHOTOS 网,该网由法国里尔(Lille)科技大学主持。在完成日常太阳辐射测量的同时,与法国里尔科技大学合作发展了针对太阳辐射计的定标技术,建立了由野外场地和实验室内设备构成的完整的太阳辐射计辐射定标系统,以期为中国乃至东南亚地区太阳辐射计定标服务,为该地区气溶胶测量与研

究提供定标方面的技术支持。

## 2 辐射定标系统

与其他辐射计不同,太阳辐射计的测量包括太阳直射测量和天空漫射测量,这两部分测量在辐射强度和光源特性上存在非常大的差异,目前国内的任何定标系统都难以对其进行有效定标。本文分别利用太阳光源和实验室标准光源,建立了能够对太阳直射和天空漫射通道进行全面辐射定标的完整系统。

### 2.1 直射通道定标分系统

太阳直射辐射的测量过程中,太阳光的辐射是稳定的,所得到的辐射强度变化是由大气中分子和气溶胶的散射、吸收等衰减作用产生的。在给定波长处,太阳辐射计测到的光谱辐照度与大气光学厚度的关系满足比尔-朗伯定律

$$E(\lambda) = \alpha E_0(\lambda) \exp[-m\tau(\lambda)], \quad (1)$$

式中  $E(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处地面光谱辐照度,  $E_0(\lambda)$  为地球大气上界的太阳直射辐照度;  $\alpha$  为日地距离校正因子,  $\alpha = (r_m/r)^2$ ,  $r_m$  为日地平均距离,  $r$  为观测时实际的日地距离;  $\tau(\lambda)$  为大气总光学厚度,包括分子、气溶胶的散射和吸收光学厚度;  $m$  为大气质量。大气质量( $m$ ) 是太阳天顶角( $\theta$ ) 的函数

$$m = \frac{1.002432 \cos^2 \theta + 0.148386 \cos \theta + 0.0096467}{\cos^3 \theta + 0.149864 \cos^2 \theta + 0.0102963 \cos \theta + 0.000303978}, \quad (2)$$

对(1)式取对数,得

$$\ln E(\lambda) = \ln[\alpha E_0(\lambda)] - m\tau(\lambda), \quad (3)$$

由于太阳辐射计输出的电压正比于太阳入射辐射强度,所以可以用太阳辐射计的实测电压值  $V(\lambda)$  替代  $E(\lambda)$ ,  $V_0(\lambda)$  替代  $E_0(\lambda)$ , 从而有

$$\ln V(\lambda) = \ln[\alpha V_0(\lambda)] - m\tau(\lambda). \quad (4)$$

太阳直射通道的辐射定标就是给出仪器对大气上界太阳辐射的响应值  $V_0$ 。利用(4)式,依据一组不同太阳天顶角条件下太阳直射辐射量对数之间的线性关系,通过线性拟合并外推到大气质量为 0 时的  $\ln V_0(\lambda)$ (或  $V_0$ ) 值,即可完成辐射定标,这种定标方法也叫兰利(Langley)法。

从(4)式可以看出,测量期间大气稳定(即大气光学厚度为常量)才能保证测量值的对数与大气质量间的线性关系,这是利用该方法进行高精度定标的基本条件。由于一个完整的定标测量过程需要半天,在这段时间内由于风和太阳对地面加热引起的

大气上下对流作用,要保持大气稳定相当困难,大量实验已经表明了这一点,解决测量期间大气光学厚度不变成为了保证定标精度的关键问题。

由 MODTRAN 大气模型的分析可知(图 1),大气中的气溶胶含量随着海拔高度的增加而快速减少,整层大气中的 90% 气溶胶在海拔 2 km 以下。气溶胶是大气光学厚度变化的主要因素,因此可以设想高海拔地区若没有局部气溶胶发生源,则可能有利于太阳直射通道定标的要求。我们选择的黄山光明顶海拔 1860 m,由于在此海拔高度以下,气溶胶含量占整层大气的 80% 以上,且黄山光明顶为群山环抱、周边植被覆盖率高,少有局部气溶胶发生源,因此较为适合太阳直射通道高精度定标的要求。

气溶胶是引起大气光学厚度变化的主要因素,大气中气溶胶含量很低时,利用(4)式即可进行定标处理,若气溶胶含量较大时,大气中主要衰减因素如气体散射、气溶胶散射、臭氧、二氧化氮吸收等应分

别考虑,宜采用改进的 Langley 定标法<sup>[7]</sup>。

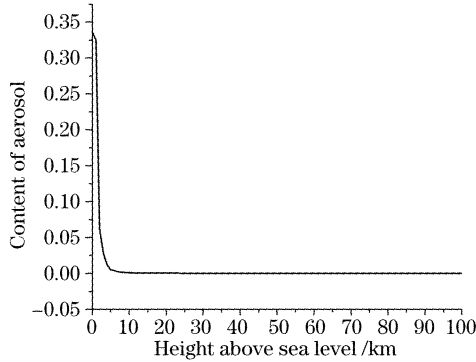


图 1 气溶胶随海拔高度的分布

Fig. 1 Content of aerosol corresponding to height above sea level

改进 Langley 法将(4)式中的  $m\tau(\lambda)$  分解

$$m\tau(\lambda) = m_R \tau_R(\lambda) + m_3 \tau_3(\lambda) + m_2 \tau_2(\lambda) + m_a \tau_a(\lambda), \quad (5)$$

式中下标 R、3、2 和 a 分别表示为瑞利散射、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 和气溶胶粒子。将(5)式代入(4)式,得

$$\ln[V(\lambda)\alpha^{-1}] + m_R \tau_R(\lambda) + m_3 \tau_3(\lambda) + m_2 \tau_2(\lambda) = \ln V_0(\lambda) - m_a \tau_a(\lambda), \quad (6)$$

在利用(6)式进行计算过程中,瑞利散射、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 的光学厚度可以利用 MODTRAN 等模型进行计算,衰减因子的大气质量应分别计算<sup>[8]</sup>:

$$m_i = [\cos \theta + a_{i1} \theta^{a_{i2}} (a_{i3} - \theta)^{a_{i4}}]^{-1}, \quad (7)$$

式中  $m_i$  分别表示  $m_R$ (瑞利散射)、 $m_o$ (O<sub>3</sub>)、 $m_n$ (NO<sub>2</sub>) 和  $m_a$ (气溶胶),系数  $a_{ij}$  值由表 1 给出。

表 1 瑞利散射、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 和气溶胶的系数

Table 1 Coefficient of Rayleigh scattering, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and aerosol

	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
Rayleigh scattering	$4.5665 \times 10^{-1}$	0.07	96.4836	-1.6970
O <sub>3</sub>	$2.6845 \times 10^2$	0.5	115.420	-3.2922
NO <sub>2</sub>	$6.0230 \times 10^2$	0.5	117.960	-3.4536
Aerosol	$3.1141 \times 10^{-2}$	0.1	92.4710	-1.3814

## 2.2 漫射通道定标分系统的建立

室内定标的关键是辐射标准源标准辐射值的高精度。通常初级标准如黑体、低温辐射计等具有较高的精度,然而由于其体积大、操作困难、维护不便、造价昂贵和不便使用等缺点,在实际定标过程中常常需要将高精度低级辐射标准传递到便于操作的工作标准器件上。具有大面积均匀面光源积分球的标准值通常通过低级标准传递过来。

目前辐射传递技术常以标准灯和标准反射板为

基准,用辐射计将辐亮度值传递到积分球上。在传递过程中,标准板通常作朗伯体简化处理<sup>[9]</sup>,而实际的标准板与理想朗伯体存在一定的差异<sup>[10]</sup>。在辐亮度传递过程中,由于辐射计只能进行一定角度的辐射测量而无法进行半球测量,因此对标准板方向反射特性的深入研究,是提高传递结果精度的重要保证。

反射率因子是指在相同辐照度和观测条件下物体表面辐射通量与完全反射朗伯体的辐射通量之比<sup>[11]</sup>,而标准板的半球反射率  $R_s$  因子等于方向反射率因子的积分:

$$R_s = \frac{\int_0^{\pi/2} 2\pi R_a(0^\circ, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} 2\pi \cos \theta \sin \theta d\theta}, \quad (8)$$

式中  $R_a(0^\circ, \theta)$  为光源垂直入射、不同方向的反射率因子。(8)式除以  $R_a(0^\circ, 45^\circ)$  可得

$$\frac{R_s}{R_a(0^\circ, 45^\circ)} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{R_a(0^\circ, \theta)}{R_a(0^\circ, 45^\circ)} \sin \theta \cos \theta d\theta, \quad (9)$$

(9)式可以写成

$$\frac{R_s}{R_a(0^\circ, 45^\circ)} = 2 \int_0^{\pi/2} B(0^\circ, \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta, \quad (10)$$

式中

$$B(0^\circ, \theta) = \frac{\Phi(0^\circ, \theta) / \cos \theta}{\Phi(0^\circ, 45^\circ) / \cos 45^\circ}, \quad (11)$$

式中  $\Phi$  为测得的光通量。 $B(0^\circ, \theta)$  可以近似表示为  $\theta$  的五次多项式<sup>[11]</sup>:

$$B(0^\circ, \theta) = \sum_{i=0}^5 b_i \theta^i, \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式,可以得到

$$\frac{R_s}{R_a(0^\circ, 45^\circ)} = 2 \sum_{i=0}^5 b_i I_i, \quad (13)$$

式中

$$I_i = \int_0^{\pi/2} \theta^i \sin \theta \cos \theta d\theta. \quad (14)$$

实验中,从与参考板轴线夹角的  $0^\circ$  到  $75^\circ$ ,每隔  $5^\circ$  进行一次测量,并进行五次项式拟合,得到图 2 所示的  $B$  因子曲线分布。

解(14)式,即可得到  $R_a(0^\circ, 45^\circ)$  的值。对于朗伯体存在

$$I = R_a \cdot E / \pi,$$

式中  $I$  为辐亮度,  $E$  为辐照度,  $R_a$  为任意方向的反射率因子。故对于标准板有

$$I(0^\circ, 45^\circ) = R_a(0^\circ, 45^\circ)E/\pi,$$

在辐射标准传递过程中,将辐射计与标准板法线夹角  $45^\circ$  进行测量与传递,得到积分球系统的标准辐射亮度值。

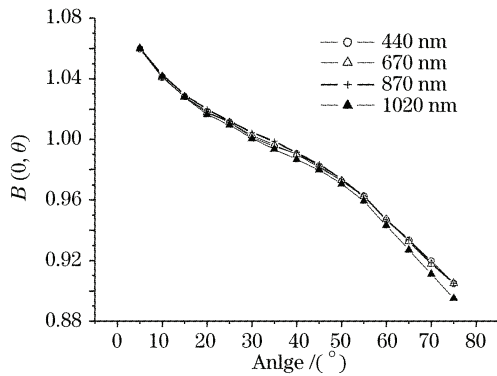
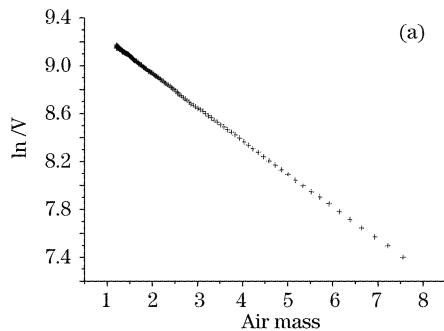


图 2 标准板的 B 因子分布

Fig. 2 Fitted B factor for reflectance panels

### 3 实验结果分析

表2显示了2006年11月4日在黄山光明顶测



量数据的处理结果,数据显示大气中气溶胶含量很低,即使散射较强的 440 nm 波段的气溶胶光学厚度也小于 0.1;各光谱通道数据线性拟合的相关度在 0.996~0.999 范围内,表现出很高的相关性,反映了大气非常稳定的特点。各光谱通道数据拟合的高相关性可以从测量数据的分布直观地看出,图 3 给出 440 nm 和 670 nm 两个光学厚度相对较大通道的测量数据对数随大气质量变化的分布情况,显示出极好的线性分布。

表 2 2006 年 11 月 4 日上午数据的相关系数,标准偏差和气溶胶光学厚度

Table 2 Correlation coefficient, standard deviation and aerosol optical thickness on November 4th, 2006

Wavelength /nm	Correlation coefficient	Standard deviation	Aerosol optical thickness
1020	0.9958	0.00354	0.0169
870	0.9978	0.00267	0.0188
670	0.9996	0.0027	0.0387
440	0.9998	0.00598	0.084

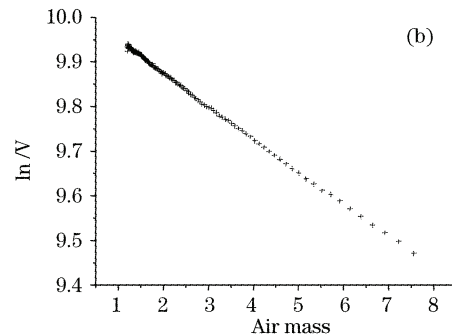


图 3 2006 年 11 月 4 日上午 CE318 测量数据分布

Fig. 3 Data measured by CE318 on November 4th, 2006

利用改进的 Langley 法进行计算得到的定标参量与普通的 Langley 法参量相对偏差小于 0.4% (表 3),这种误差可能是标准大气模式与实际大气特性上的偏差引起的。在改进的 Langley 法中,衰减组分光学厚度需要利用标准模式计算,而实际模式与标准模式之间必然存在一定的偏差,从而引起定标结果上的误差。在本系统建立过程中,以改进 Langley 法与普通 Langley 法比较表明,所选场地的气溶胶影响较小,可以采用普通 Langley 法进行定标,从而克服改进的 Langley 法需要模式所可能带来的误差,这也表明黄山光明顶较为适合太阳直射通道定标。

2%~5%,对太阳辐射退化速度的统计结果表明正是处于这一水平<sup>[4]</sup>。

表 3 两种 Langley 法计算结果的比对

Table 3 Comparison of calibration results from two Langley methods

Wavelength /nm	Langley ( $V_0$ value)	Refined Langley ( $V_0$ )	Relative difference /%
1020	12600	12649.13	0.39
870	22621	22558.75	-0.28
670	22552	22553.05	0.005
440	13304	13332.88	0.22

与 2005 年 10 月 18 日在法国里尔科技大学进行的定标结果比对显示(表 4),太阳辐射计在经过一年的测量使用后,太阳直射通道辐射响应退化了

为与 2005 年 10 月 18 日里尔科技大学定标结果的比对,分别于 2005 年 11 月 17 日和 2006 年 11 月 20 日在室内对漫射光通道进行了定标。2005 年 11 月 17 日是在 CE318 太阳辐射计仅在室外测量两天的条件下进行的,可以认为辐射计与在法国定标

时的条件是一致的,定标结果与法国的结果进行对比,误差均在 5%以内(表 5),而 AERONET 网内的定标偏差也正是这个水平<sup>[4]</sup>。

表 4 两年定标结果比对

Table 4 Comparison of calibration results between two years

Wavelength /nm	CE318 (2005) (V <sub>0</sub> )	CE318 (2006) (V <sub>0</sub> )	Response reduction /%
1020	13179.28	12600	-4.30
870	23138.91	22621	-2.24
670	23112.89	22552	-2.43
440	14148.06	13304	-5.97

表 5 天空漫射通道定标结果比较

Table 5 Comparison of calibration results of sky diffusion channels

	Calibration coefficient at Lille in 2005 /10 <sup>-5</sup>	Calibration coefficient at our system in 2005 /10 <sup>-5</sup>	Relative difference /%	Calibration coefficient at our system in 2006 /10 <sup>-5</sup>	Response reduction after a year /%
S1020	4.63	4.84	4.51	4.84	0
S870	4.92	4.98	1.30	5.11	2.53
S670	6.33	6.27	-1.02	6.20	-1.05
S440	10.5	10.0	-4.42	10.4	3.63
A1020	27.0	28.0	3.75	28.0	0
A870	21.0	21.1	0.69	21.6	2.15
A670	29.9	29.5	-1.31	29.1	-1.38
A440	79.1	75.4	-4.71	77.4	2.66

## 4 结 论

在分析太阳辐射计原理与相关定标技术要求的基础上,优选出黄山光明顶定标场地、建立了积分球标准辐射源,以此构成的太阳辐射计辐射定标系统,在功能上可以满足太阳辐射计全面辐射定标的需求。在精度上,通过与法国里尔科技大学定标结果的比对,偏差水平能够达到 AERONET 气溶胶测量网对太阳辐射计定标精度的要求,因而具备为气溶胶测量网的太阳辐射计定标提供技术支持的能力。

## 参 考 文 献

- 1 Jiakui Tang, Yong Xue, Tong Yu *et al.*. Aerosol optical thickness determination by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS (SYNTAM)[C]. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005)*, **7**. 4371~4374
- 2 Hassan Fallah-Adl, Joseph Jájá, Shunlin Liang *et al.*. Efficient algorithms for atmospheric correction of remotely sensed data [C]. *Proc. ACM/IEEE Supercomputing Conference*, 1995, **1**: 1~17
- 3 G. Wen, R. F. Cahalan, S.-C. Tsay *et al.*. Aerosol optical thickness retrieval from landsat TM image over SGP site of the ARM program[C]. *Ninth ARM Science Team Meeting Proc.*, San Antonio, Texas, March 22~26, 1999. 1~4
- 4 B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker *et al.*. AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1998, **66**: 1~16
- 5 Oleg Dubovik, Brent Holben, Thomas F. Eck *et al.*. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *J. Atmospheric Sciences*, 2002, **59**: 590~608
- 6 I. Sano, S. Mukai, M. Yamao *et al.*. Calibration and validation of retrieved aerosol properties based on AERONET and SKYNET[J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **32**(11): 2159~2164
- 7 Beat Schmid, Christoph Wehrli. Comparison of sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4500~4512
- 8 Christian A. Gueymard. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance [J]. *Solar Energy*, 2001, **71**(5): 325~346
- 9 G. Schaepman-Stub, M. E. Schaepman, T. H. Painter *et al.*. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2006, **103**: 27~42
- 10 Jia Hui, Li Futian. Analysis of factors affecting spectral radiance calibration by applying a diffuse plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 383~387
- 11 贾 辉,李福田. 影响光谱辐亮度标定因素的分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 383~387
- 11 S. F. Biggar, J. Labed, R. P. Santer *et al.*. Laboratory calibration of field reflectance panels[C]. *Proc. SPIE*, 1988, **924**: 232~240