

# CE318 型太阳光度计标定方法初探<sup>\* 1</sup>

杨志峰<sup>1)</sup> 张小曳<sup>1)</sup> 车慧正<sup>1)</sup> 张晓春<sup>1)</sup> 胡秀清<sup>2)</sup> 张立军<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院 中国气象局大气成分观测与服务中心 中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(国家卫星气象中心,北京 100081)

## 摘 要

初步探索了 CE318 型太阳光度计的室内和野外标定方法,并对两种方法的标定结果进行对比。基于积分球辐射源的辐亮度标定方法,对 CE318 型太阳光度计不同波段天空散射辐射通道进行标定实验;分别采用 Langley 标定法和标准仪器相对标定方法,对 CE318 型太阳光度计的不同波段太阳直接辐射通道进行了标定实验。实验结果显示:天空散射辐射通道的标定结果在 670 nm,870 nm 和 1020 nm 波段与仪器出厂时给定的标定结果偏差不超过 6%,而 440 nm 波段处得到的标定结果要高于出厂时给定的结果,偏离幅度约 18.9%。太阳直接辐射各通道的标定结果普遍大于出厂时给定的结果,说明滤光片老化较为严重,需要进行更换,以保证观测精度。由于标准仪器相对标定方法对太阳直接辐射通道的标定结果明显优于 Langley 法,因此利用标准仪器相对标定方法对中国气象局太阳光度计站网仪器进行定期标定更能够保证仪器观测数据的准确性。

**关键词:** 太阳光度计;积分球辐射源标定法;Langley 法;标准仪器相对标定法;大气气溶胶

## 引 言

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系<sup>[1]</sup>,大小通常在 0.01 ~ 100  $\mu\text{m}$  之间,能在大气中驻留几个小时至几天。近年来大气气溶胶对全球气候的影响已引起科学家们的广泛关注,这主要是因为大气气溶胶对地气系统的辐射收支有重要影响<sup>[2]</sup>。气溶胶的辐射效应目前还存在很大的不确定性,原因之一是对气溶胶的光学特性了解较少。在 20 世纪 30 年代 Angstrom 展开了对大气气溶胶光学厚度反演方法的研究<sup>[3-4]</sup>,我国科学家在大气气溶胶光学特性研究方面也做了大量的工作,主要涉及到地面观测、利用资料反演气溶胶光学厚度等光学特性、数值模拟气溶胶光学特性分布特征等<sup>[5-13]</sup>。近年来利用卫星资料来反演以及利用地基仪器观测气溶胶的光学特性是两种非常先进的研究手段,其中利用地基太阳光度计测得地面窄波段太阳辐射能反映出气溶胶对不同波段太阳辐射的影响,这为开展更细致的研究工作奠定了基础<sup>[14-16]</sup>。地面观

测可以分别在代表性较好的特征区域进行,并能够反映特征区域的气溶胶光学特性,但地面观测也有其局限性,主要是受观测仪器自身的影响,一方面各种仪器精度存在很大差异,另外其标校手段也不尽相同。必须建立统一的观测网络,统一标准,这样不同区域相同观测项目之间才具有可比性,才能够系统地研究区域乃至全球的气溶胶光学特性。

美国 NASA 利用法国 CIMEL 公司生产的 CE318 型窄波段太阳光度计在全球布设 AERONET(AEROSOL ROBOTIC NETWORK)气溶胶监测网,其目的是系统地观测全球主要区域的气溶胶光学特性<sup>[17]</sup>。日本、澳大利亚、法国、加拿大、韩国等也都建立自己观测网络以加强对气溶胶光学特性的研究了解<sup>[18-19]</sup>。目前国内缺乏较为长期、稳定、系统的气溶胶光学特性观测<sup>[11]</sup>。中国气象局根据这一现状,在全国范围内建设气溶胶光学特性监测网 CARSNET(China Aerosol Robot Sunphotometer NETWORK),监测网统一采用 CE318 型太阳光度计,目的就是为了系统观测和研究中国区域大气气溶胶光学特性,为气溶胶气候效应研究及卫星反演结果标定提供科学依据。

\* 国家重点基础研究发展计划项目“中国大气气溶胶及其气候效应”课题(2006CB403701 和 2006CB403702)资助。  
2007-09-12 收到,2008-01-31 收到再改稿。

CE318型太阳光度计的观测原理是通过测量窄波段的太阳辐射来反演大气气溶胶的光学特性。该仪器具有较好的性能,适宜野外长期观测,但由于长时间在野外观测,受到自然环境、仪器损耗等因素的影响,会使仪器的标准数值发生漂移,使得太阳光度计的相应精度不能满足实际测量的要求<sup>[20]</sup>。为了使反演得到的气溶胶光学特性具有较高的可信度,要求定期对仪器进行标定,以减少测量时由仪器自身引起的系统误差。目前,主要有3种方法可以用来评估太阳光度计的精度:①利用太阳光度计测得的积分球辐射源稳定的电信号数值,并确定天空散射辐射通道增益因子的大小;②检验黑电平值;③利用Langley法得到的辐射电信号值来评估太阳直接辐射通道<sup>[17]</sup>。CE318型太阳光度计的标定包括天空散射辐射通道标定和太阳直接辐射通道标定两个方面,天空散射辐射通道主要是通过积分球辐射源来进行标定,太阳直接辐射通道则通过Langley法和标准仪器相对标定法两种方法来进行标定。例如,法国PHOTONS气溶胶监测网的CE318型太阳光度计在里尔大学进行室内标定以后,然后在法国Carpentras和西班牙IZANA观测场进行野外标定。这两个野外标定场均设在高山上,这是因为在高山上大气清洁,气溶胶浓度很低,大气光学厚度很小而且较稳定。

在借鉴了AERONET,PHOTONS,SKYNET气溶胶监测网标定经验的基础上,分别在国家卫星气象中心、北京灵山风景区进行了太阳光度计天空散射辐射通道和太阳直接辐射通道的观测,目的是为今后中国气象局气溶胶光学特性观测网仪器标定,探索出一套行之有效的标定流程。

## 1 观测和标定仪器介绍

### 1.1 CE318型太阳光度计

#### 1.1.1 CE318型太阳光度计概述

CE318型太阳光度计是法国CIMEL公司制造的一种自动跟踪扫描太阳辐射计,主要由以下部分组成:①仪器主体:传感器头部、扫描步进马达和机器人臂;②控制箱:提供软件控制预定的扫描和采样指令,获取数据,格式化远程星基传输数据,内置电池;③发射天线,传输数据到GOES卫星;④控制箱与外置电池的安装箱和仪器安装架,安装箱外还装有太阳能电池板和湿度传感器。该仪器是进行大

气光学特性观测基本的仪器之一<sup>[17]</sup>,它在可见近红外波段设有8个观测通道(极化式太阳光度计包括1020 nm,870 nm,670 nm,440 nm,936 nm,870P1,870P2,870P3或普通式太阳光度计包括1020 nm,870 nm,670 nm,500 nm,440 nm,936 nm,380 nm,340 nm),带宽均为10 nm,它不仅能自动跟踪太阳作太阳直接辐射测量,而且可以进行太阳等高度角天空扫描、太阳主平面扫描和极化通道天空扫描。CE318型太阳光度计测得的太阳直接辐射数据可用于反演计算大气透过率、气溶胶光学厚度、大气水汽柱总量和臭氧总量等。天空扫描数据可以反演大气气溶胶粒子尺度谱分布及气溶胶相函数,表1给出了极化式太阳光度计各特征波段的中心值、带宽及对应的主要用途。该仪器不仅是一种大气气溶胶环境监测仪器,还可以用于卫星遥感产品真实性检验和气溶胶气候研究。

表1 CE318型太阳光度计光谱通道

Table 1 Spectrum channels of CE318 sunphotometer

通道号	CE318 标准		主要用途
	中心波长	带宽/nm	
1	1020 nm	10	
2	870P1	10	光的偏振
3	670 nm	10	大气臭氧含量
4	440 nm	10	
5	870P2	10	光的偏振
6	870 nm	10	
7	936 nm	10	大气柱水汽含量
8	870P3	10	光的偏振

注:P1,P2,P3为极化通道。

#### 1.1.2 CE318型太阳光度计基本观测原理

地面测得的直接太阳辐射 $E$ 在给定波长上根据Bouguer定律<sup>[21]</sup>,

$$E = E_0 R^{-2} \exp(-m\tau) T_g \quad (1)$$

式(1)中, $E_0$ 是在一个天文单位距离上的大气外界的太阳辐照度, $R$ 是测量时的日地距离因子, $m$ 是大气质量数, $\tau$ 为大气总光学厚度, $T_g$ 为吸收气体透过率。若仪器输出电压 $V$ 代表 $E$ ,式(1)可以写成

$$V = V_0 R^{-2} \exp(-m\tau) T_g \quad (2)$$

式(2)中, $V_0$ 是仪器的标定常数<sup>[22]</sup>。

### 1.2 积分球辐射源

室内标定采用的标准光源是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的积分球辐射源,该积分球辐射源通过精密的光学结构设计和高精度的电源控制,具有较高的面均匀性、朗伯性和输出稳定性。

在可见光到近红外波段近似灰体,可广泛应用于相关光学仪器的辐射标定工作。表 2 给出了积分球辐射源辐射标定参数及其不确定度。

表 2 积分球辐射源辐射标定参数

Table 2 Calibration coefficients of integrating sphere

波长/nm	标准灯		积分球 8 灯 全开亮度值/ (W · cm <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup> · nm <sup>-1</sup> )	不确定因子				综合不 确定度/%
	标准值/ (W · cm <sup>-2</sup> · nm <sup>-1</sup> )	不确定度 /%		测量/%	几何/%	波长定位/%	稳流/%	
440	9.48 × 10 <sup>-7</sup>	2.2	6.43 × 10 <sup>-6</sup>	1.2	0.5	0.6	0.2	2.6
500	1.79 × 10 <sup>-6</sup>	2.1	1.46 × 10 <sup>-5</sup>	1.1	0.5	0.4	0.2	2.5
700	4.71 × 10 <sup>-6</sup>	2.0	4.38 × 10 <sup>-5</sup>	1.0	0.5	0.2	0.2	2.3
870	5.97 × 10 <sup>-6</sup>	2.0	5.13 × 10 <sup>-5</sup>	1.0	0.5	0.2	0.2	2.3
940	6.05 × 10 <sup>-6</sup>	2.1	4.97 × 10 <sup>-5</sup>	1.4	0.5	0.2	0.2	2.6
1020	6.06 × 10 <sup>-6</sup>	2.1	4.76 × 10 <sup>-5</sup>	2.0	0.5	0.2	0.2	3.0

注:参照标准 1000 W 卤钨灯(编号 93004);工作条件:8.500 A;稳流精度:0.05%。

### 1.3 标准太阳光度计

标准太阳光度计每年都经过严格标定,标准仪器标定采用 Langley 法在 2500 ~ 3500 m 高山上进行。标准仪器选择关键是仪器的稳定性,需要作十几次早晨期间 Langley 测量,需要核实绝对校正系数  $V_0$  值的重复性,最后  $V_0$  值的确定是取这十几次 Langley 获得值的平均值。这种方法要求大气气溶胶状况在大气质量数在 2 ~ 5 之间恒定不变。

本次标定所使用的标准太阳光度计与美国的 AERONET、法国的 PHOTONS 等监测网使用相同的定标标准,这种标准仪器性能要比通常的太阳光度计更加稳定,而且可以同 AERONET, PHOTONS 等其他站网的标准仪器保持在一个精度上。

## 2 CE318 型太阳光度计太阳直接辐射通道和天空散射辐射通道标定

### 2.1 天空散射辐射通道室内积分球辐射源标定原理及方法

CE318 型太阳光度计天空散射辐射通道标定的室内积分球辐射源于 1999 年安装在国家卫星气象中心的超净室内,超净室是由中国科学院安徽光学精密机械研究所传递过来的,保持室内工作温度为  $23 \pm 1$  °C,相对湿度不高于 60%。

在进行 CE318 型太阳光度计天空散射辐射通道标定时,将积分球辐射源内 8 只 250 W 的 PHILIPS 卤钨灯全部打开,使其发射出的辐亮度最大,减少测量的相对误差,积分球辐射源的标定参数见表 2。

待标仪器天空散射辐射通道标定系数计算公式

如下:

$$C_2 = \frac{R_a}{D_c} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

式(3)中, $D_c$ (Digital Count)为各波段测量电信号的平均值, $n_1$ 为待标仪器出厂标定时所用的增益因子, $n_2$ 为待标仪器本次标定时所使用的增益因子, $R_a$ 为积分球辐射源各特征波段的辐亮度, $C_2$ 为天空散射辐射通道各波段标定系数。

天空散射辐射通道标定流程是将进光筒安装在太阳光度计传感器头部,把传感器头部固定在滑架上并将进光筒对准积分球出光口中心,此时通过控制箱执行命令,同时根据所测得数值大小来前后左右移动滑架,使测得的电信号值  $D_c$  在 10000 左右,这样可以减少测值的相对误差,然后固定滑架。如果测值无法达到要求,则需要调整增益因子。待各波段增益因子调整好以后,再次执行命令,并连续测得 10 组数据。

在最后处理试验数据计算天空散射辐射通道的标定系数之前,需要检验实验数据的质量状况。要求测得的数据数值均匀,不能有太大的起伏,时间序列连续,没有过长的时间间隔。此次待标仪器测得的各波段  $D_c$  值均具有较好的均匀性,基本满足室内标定对数据的要求。

### 2.2 太阳直接辐射通道标定原理及方法

CE318 型太阳光度计太阳直接辐射通道标定主要是在野外标定场进行观测,要求标定场周围视野开阔,没有高山或高层建筑物遮拦,并且远离污染源,同时标定场所在地大气相对湿度要较小,降水频率较低。在天气晴朗,天空无云或少云的条件下,大气状态保持稳定,基本无风或风力很小,大气 500 nm

波段的光学厚度低于0.30。

CE318型太阳光度计的野外太阳直接辐射通道标定主要通过以下两种方法进行:Langley法和标准仪器相对标定法,本次标定的待标仪器是极化式太阳光度计,即8个观测通道中包括3个极化轨道扫描通道,而标准仪器是普通的8通道太阳光度计,因此在利用标准仪器进行相对标定时只能标定出4个与普通太阳光度计相同的通道,即1020 nm, 870 nm, 670 nm, 440 nm等波段。本次标定所使用的资料是太阳光度计自动观测所得的NSU(SUN Triplet Measurement)数据以及BCLSUN 2 min一次的观测数据。

### 2.2.1 Langley法基本原理

根据式(1),(2),在大气状况相对稳定条件下,进行不同太阳天顶角情况下的太阳直接辐射测量,仪器的输出 $V$ 是 $m$ 的函数, $V_0$ 从一系列测值外插到 $m=0$ 时 $V$ 的结果。由 $\ln V + \ln R^2$ 与 $m$ 画直线,直线的斜率就是大气光学厚度 $\tau$ ,截距就是太阳光度计在大气外界测得的电信号 $V_0$ ,这就是常说的Langley法。从理论上讲,这种标定方法是比较精确的,但是在实际操作中,因为很难找到稳定、晴好、无云的天气条件,而所使用的数据多存在一些噪声,使标定数据质量下降,在进行Langley法标定时,可能会存在一定的误差。

### 2.2.2 标准仪器相对标定法基本原理

该方法的基本原理是,首先对标准仪器进行标定,然后使用标准仪器对待标仪器进行标定。在稳定的晴好天气条件下,待标仪器与标准仪器同时进行观测,前提是假设在这一时刻气溶胶光学厚度

( $\tau$ )、大气质量数( $m$ )是相同的。根据式(2),可以得到如下计算待标仪器标定系数的公式:

$$V_{02} = \frac{V_2}{V_1} \cdot V_{01} \quad (4)$$

式(4)中, $V_{02}$ 是待标仪器的标定常数, $V_{01}$ 为标准仪器的标定常数, $V_1, V_2$ 分别为标准仪器和待标仪器测得的 $D_e$ 值, $V_2/V_1$ 值应为固定值。这样就可以根据标准仪器来标定待标仪器了,这就是标准仪器相对标定法。这种方法要求标准仪器的标定常数准确,测得的 $D_e$ 数值精确,才能保证待标仪器标定的结果具有较高的可信度。为了提高相对标定法的准确度,要求标准仪器每3个月在清洁的高山上进行一次标定,每一年要到太阳光度计国际标定场进行标定。

## 3 标定试验过程及结果分析

### 3.1 天空散射辐射通道标定结果分析

积分球辐射源标定方法是以积分球辐射源作为标准源,利用太阳光度计测得其 $D_e$ 值,结合积分球辐射源的辐亮度标定系数,利用式(3)计算出太阳光度计天空散射辐射通道的标定系数,并将室内积分球辐射源的标定结果与仪器出厂时所给定的标定系数进行比较。利用天空散射辐射通道测得的积分球辐射源发射的辐亮度达到最大值,且基本保持稳定,没有明显的波动。如表3及图1,2所示,在1020 nm, 870 nm, 670 nm, 870P1和870P2波段的标定结果与出厂值基本相符,偏离出厂值的幅度在5%左右,只

表3 待标仪器天空散射通道标定值与出厂值对比

Table 3 Comparisons of calibration coefficients of the sky scattering radiation channels of the calibrated sunphotometer between this calibration and original calibration

滤光片	增益因子	出厂值/( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )	标定值/( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )	标定值/出厂值	(标定值 - 出厂值)/出厂值	标定值较出厂值
SKY 1020 nm	2	$4.16 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-5}$	0.96	-0.04	偏小
SKY 870 nm	2	$3.00 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-5}$	0.95	-0.05	偏小
SKY 670 nm	2	$3.43 \times 10^{-5}$	$3.44 \times 10^{-5}$	1.003	0.003	偏大
SKY 440 nm	2	$9.54 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-4}$	1.17	0.17	偏大
SKY 870P1	2	$6.11 \times 10^{-5}$	$5.68 \times 10^{-5}$	0.92	-0.08	偏小
SKY 870P2	2	$6.16 \times 10^{-5}$	$5.76 \times 10^{-5}$	0.93	-0.07	偏小
SKY 870P3	2	$6.91 \times 10^{-5}$	$5.58 \times 10^{-5}$	0.81	-0.19	偏小
AUR 1020 nm	16	$1.97 \times 10^{-4}$	$1.89 \times 10^{-4}$	0.96	-0.04	偏小
AUR 870 nm	16	$1.50 \times 10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-4}$	0.95	-0.05	偏小
AUR 670 nm	16	$1.80 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$	1.01	0.01	偏大
AUR 440 nm	16	$4.22 \times 10^{-4}$	$5.01 \times 10^{-4}$	1.18	0.18	偏大

有 670 nm 和 440 nm 小角散射标定结果较出厂值偏大,其中 670 nm 小角散射标定结果较接近于出厂值,二者最小相差仅 0.3%,而 440 nm 小角散射的天空散射辐射通道标定结果偏离出厂值较大,二者最大相差约 18.9%。从标定结果可以推断,积分球辐射源对太阳光度计天空散射辐射通道的标定具有较好的可行性和可信度,然而标定值与出厂值存在一定的偏差。根据太阳光度计的实际使用情况,由于长期架设在野外观测,导致滤光片老化或一些大

气中的气溶胶颗粒物可能会落在传感器内部的滤光片上,这样就可能使得探测器接收到的辐射量  $E$  变小,由式(1),(2)可知探测器接收到的辐射量  $E$  与  $D_0$  值线性相关,即太阳光度计测得的  $D_0$  值减小。再根据式(3), $D_0$  值变小时,待标仪器天空散射辐射通道标定系数  $C_2$  变大;其他波段标定值略小于出厂值的可能原因是滤光片在传感器内部长期转动使用,致使一些波段的滤光片在转动过程中受到不同程度的磨损,这样光线在进入该波段的滤光片时,

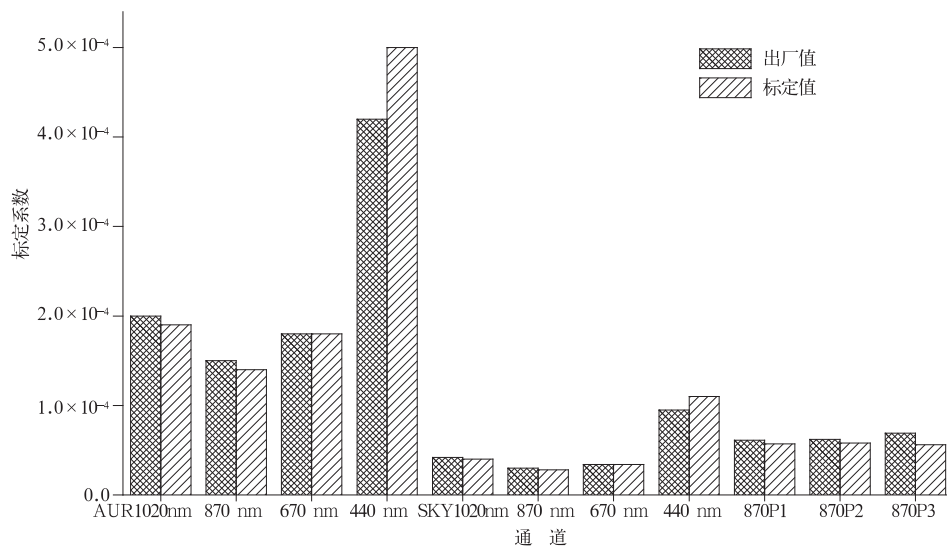


图1 积分球辐射源天空散射辐射通道出厂值与标定值对比

Fig. 1 Comparisons of calibration coefficients of the sky scattering radiation channels of the calibrated sunphotometer between the calibration and original calibration

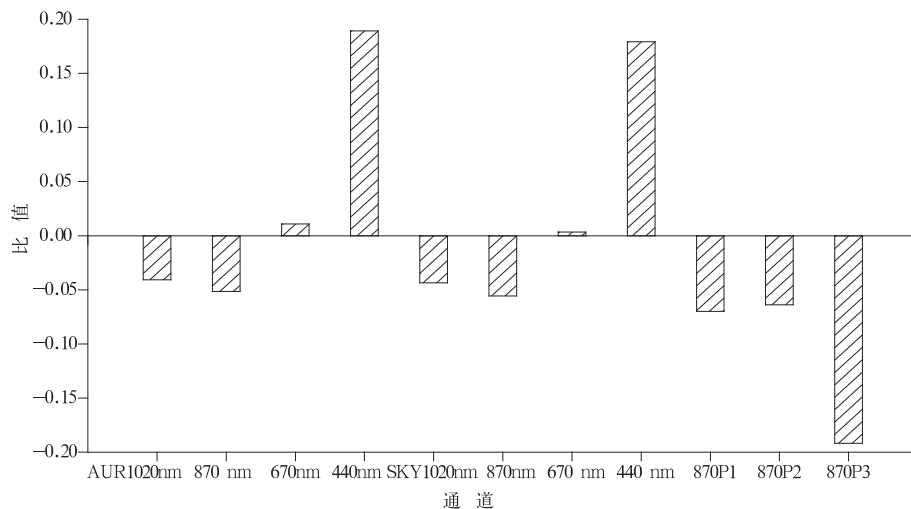


图2 积分球辐射源天空散射辐射通道标定值偏离出厂值的比值

Fig. 2 Ratios of calibration coefficients of the sky scattering radiation channels of the calibrated sunphotometer between the calibration and original calibration

不仅仅是该波段的光线,而且还包括其他波段的,这样就会使得太阳光度计测得的该波段的辐射量偏大,即  $D_e$  值偏大,根据式(1)可知,待标仪器天空散射辐射通道标定系数  $C_2$  就会偏小。这种解释还有待以后作进一步的实验验证。

### 3.2 太阳直接辐射通道标定结果分析

2007年3月28日—4月9日在北京西郊灵山自然风景区进行了CE318型太阳光度计野外太阳直接辐射通道标定,灵山风景区位于 $40^{\circ}02.96'N$ , $115^{\circ}29.76'E$ ,在北京西郊门头沟区的西北端,与河北省涿县交界处,距北京122 km,其主峰海拔2303 m,是北京的第一高峰。观测场位于主峰东北方向约5 km处的自动气象站,气象站周围地面较平坦,没有人为污染源排放,大气中气溶胶含量较低。

野外观测场标定的流程主要包括如下几个步骤:按要求先将太阳光度计架设在地面较平坦,四周开阔的观测场内;将当地的经纬度、时间输入到控制箱内,检查仪器是否能够自动对准并跟踪太阳;然后分别用自动和手动两种方式进行扫描观测。自动观测扫描包括太阳直接辐射和天空散射辐射,时间间隔主要是以当地的大气质量数为标准。手动观测仪测量不同波段的太阳直接辐射,时间间隔设定为2 min。

野外标定观测数据同室内测量一样,需要进行数据质量控制。从太阳直接辐射的数据可以看出,在晴好无云的稳定大气条件下,其值应该随着太阳天顶角的增大逐渐增加,如果出现波动或者曲线不光滑,可能是太阳光度计的进光筒没有完全对准太阳,也可能是大气不稳定或者天空有云遮挡。标定所采用的太阳直接辐射值选择较均匀、无明显波动的数据<sup>[22]</sup>,标定当日(2007年4月8日)测得各特征波段太阳直接辐射值所有波段测值基本均匀。数据质量的好坏还可以通过查看当日的气溶胶光学厚度日变化进行判断,如果标定当日340 nm处的气溶胶光学厚度在0.2左右,且没有明显的波动,则认为较适合在这种天气条件下进行太阳直接辐射通道标定。标定当日各特征波段气溶胶光学厚度如图3所示,在观测前期大气气溶胶光学厚度基本保持不变,较均匀,而在观测后期有一定的波动,在计算待标仪器的标定系数时,需要将这些数据剔除。

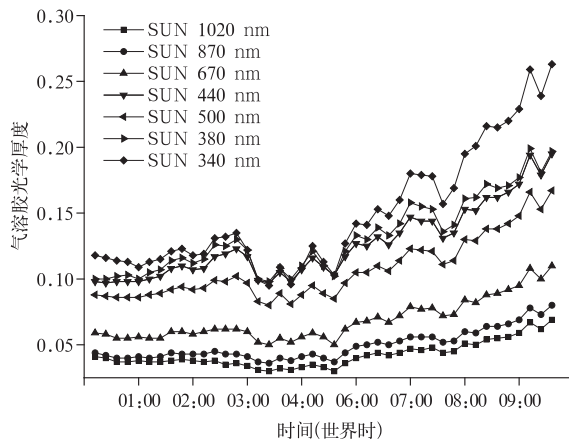


图3 2007年4月8日灵山观测场大气气溶胶光学厚度

Fig. 3 Aerosol optical depth at Lingshan observation station on April 8, 2007

由于待标仪器是极化式太阳光度计,而标准仪器没有极化轨道,因此在做相对标定时,无法标定3个极化通道,只能标定1020 nm,870 nm,670 nm和440 nm等4个通道。另外936 nm波段不在本文讨论的范围内,有待以后再作进一步研究。通过标准仪器相对标定法及Langley法得到的太阳直接辐射通道标定系数发现:两种方法得到的标定结果均大于出厂时给定的标定系数,Langley法偏离出厂值的幅度要明显大于标准仪器相对标定法的结果,如表4及图4,5所示。标准仪器相对标定法在4个波段的标定结果偏离出厂值的幅度均在4%左右。考虑到仪器本身的系统误差、标准仪器与待标仪器之间的差异、天气及人为因素,这种标定结果在误差允许的范围之内,是可以接受的。Langley法的标定结果除了在870P3波段Langley法得到标定结果小于出厂值,其他波段均大于出厂值,其他波段的标定结果偏离出厂值的幅度也都在10%左右,这种标定结果就在误差允许范围之外了。造成Langley法偏离出厂值较大的原因是可能标定当日的天气条件并不完全符合Langley法标定所要求的天气条件,Langley法对天气条件要求较为苛刻,找到真正符合其要求的天气很困难。标定当日观测场以西北风偏多,风力较大。另外野外标定场北距张家口市100 km左右,可能会将一些污染物带到标定场,以上这些因素就可能致导致标定当日大气状态不是十分稳定,从而致使Langley方法标定结果偏离出厂值较大。

表 4 待标仪器太阳直接辐射通道标定值与出厂值对比

Table 4 Comparisons of calibration coefficients of the sun direct radiation channels of the calibrated sunphotometer between the calibration and original one

滤光片	增益因子	出厂值	相对标定值	相对标定值/出厂值	(相对标定值 - 出厂值)/出厂值	相对标定值较出厂值	Langley 法标定值	Langley 法标定值/出厂值	(Langley 法标定值 - 出厂值)/出厂值	Langley 法标定值与出厂值对比
SUN 1020 nm	1	11860.65	12306.8	1.03	0.03	偏大	13479	1.13	0.13	偏大
SUN 870 nm	1	21040.70	21954.6	1.04	0.04	偏大	22603	1.07	0.07	偏大
SUN 670 nm	1	26740.76	27771.9	1.03	0.03	偏大	30430	1.13	0.13	偏大
SUN 440 nm	1	15766.05	16329.8	1.03	0.03	偏大	19096	1.21	0.21	偏大
SUN 870P1	1	9896.55					10992	1.11	0.11	偏大
SUN 870P2	1	9940.02					10793	1.08	0.08	偏大
SUN 870P3	1	18018.43					10065	0.55	-0.45	偏小

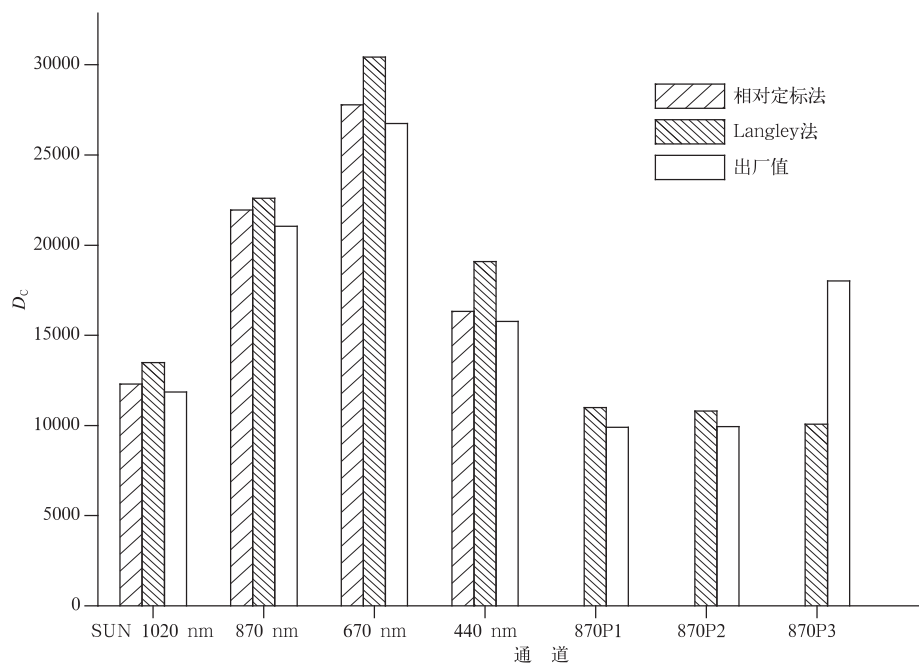


图 4 太阳直接辐射通道两种标定结果与出厂值对比

Fig. 4 Comparisons of calibration coefficients of the sun direct radiation channels of the calibrated sunphotometer between the two calibrations and original one

标准仪器相对标定法和 Langley 法得到的标定系数均大于出厂值,造成这种结果的另外一个可能原因是待标仪器在野外台站已运行了 2 年左右,而且是连续不间断的观测,传感器头内部滤光片可能已经老化或受到磨损,在进行辐射观测时,进入某一波段滤光片的光线不仅仅只包括该波段的,还可能包括其他波段的辐射,这就使得探测器测得的辐射值大于该波段的辐射值,从而  $D_c$  值也就随之偏大。由式(4)可知,当标准仪器的标定常数  $V_{01}$  及其测得的  $D_c$  值  $V_1$  一定时,待标仪器测得的  $D_c$  值  $V_2$  越大,

待标仪器的标定系数  $V_{02}$  就越大。

Langley 法与标准仪器相对标定法的比较:① 天气条件,Langley 法是根据太阳光度计当天观测的电信号值外推到大气外界大气质量数为零时的电信号值,因此对天气条件要求严格<sup>[23]</sup>,其受天气条件的影响要明显大于标准仪器相对标定法,很难找到天气晴好,无云,大气稳定的理想洁净天气条件<sup>[24]</sup>;② 观测仪器,在用 Langley 法作太阳光度计太阳直接辐射通道标定时,不需要标准仪器作为参考,因此不会受到标准仪器的限制;而相对标定法则会受到

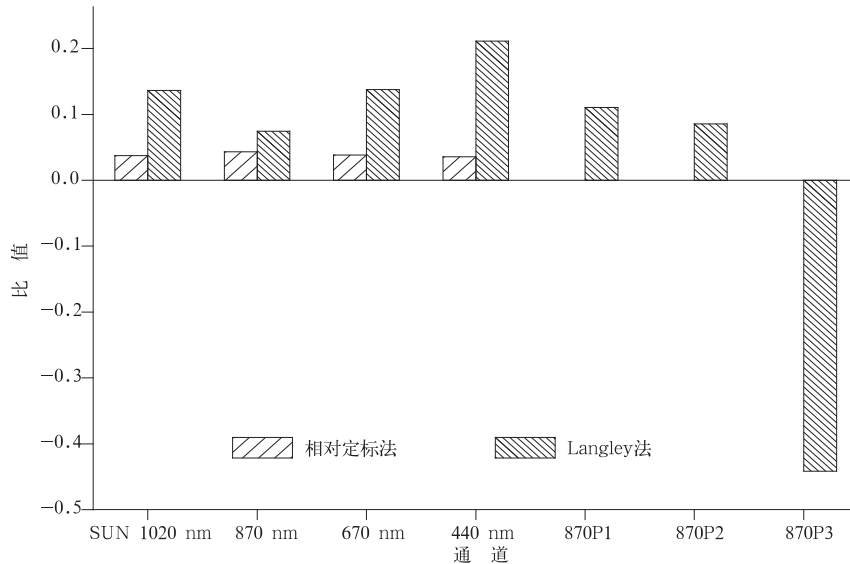


图5 太阳直接辐射通道两种标定结果偏离出厂值的比值

Fig.5 Ratios of calibration coefficients of the sun direct radiation channels of the calibrated sunphotometer between the two calibrations and original one

标准仪器自身系统误差的影响<sup>[25]</sup>。这样,定期对标准仪器采用 Langley 法在大气条件稳定的情况下进行标定,然后运用相对标定法,将标准仪器与待标定仪器进行同时观测,标定出待标仪器的标定系数,从而可以保证待标仪器的精度。

#### 4 结论及讨论

通过此次实验,初步探索出了一套 CE318 型太阳光度计的室内和野外标定方法并进行了实际操作,主要结论如下:

1) 可以利用积分球辐射源对天空散射辐射通道进行标定,标定结果的偏差与出厂值相差 5% 左右,在误差允许的范围之内。

2) 对于太阳直接辐射通道的标定,Langley 法和标准仪器相对标定法的标定结果均大于出厂值,其中相对标定法标定结果要优于 Langley 法的标定结果。

3) 天空散射辐射通道的标定结果普遍小于出厂值,而太阳直接辐射通道的标定结果多数大于出厂值,说明滤光片可能老化严重,需要对仪器的滤光片进行更换并重新进行标定。

4) 结合利用积分球辐射源对太阳光度计进行天空辐射室内标定,运用严格的 Langley 法对标准仪器进行标定,最后运用标准仪器对待标仪器进行

相对标定,可以初步满足中国气象局气溶胶光学特性观测网的标定需求,也将有利于今后提高大气气溶胶光学特性反演结果的准确性。

另外,考虑到国家卫星气象中心的积分球辐射源已经较长时间没有标定了,故希望将标定后的 CE318 型太阳光度计送到中国计量科学院等权威部门作进一步标定检验。

**致谢:**在实验过程中得到了法国 CIMEL 公司工程师 Dami-ri B 博士,CHINAVI 公司王彦女士、刘晓波先生,北京市门头沟区气象局张久山副局长以及中国气象科学研究院魏先生的热情帮助,在此一并表示感谢!

#### 参考文献

- [1] 王明星. 大气化学(第二版). 北京:气象出版社,1999.
- [2] IPCC. Third Assessment Report, Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Angstrom A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 1929,11: 156-166.
- [4] Angstrom A. On the atmospheric transmission of sun radiation II. *Geografiska Annaler*, 1930, 12: 1301.
- [5] 罗云峰,李维亮. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析. *气象学报*, 2001, 59(1): 77-87.
- [6] 罗云峰,周秀骥. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状. *地球科学进展*, 1998,13(6): 572-581.
- [7] 周秀骥. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. *大气科学*, 1998, 22(4): 418-427.
- [8] 邱金桓. 从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度,



- I: 理论. 大气科学, 1995, 19(4): 385-394.
- [9] 邱金桓, 林耀荣. 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式. 气象学报, 2001, 59(3): 368-372.
- [10] 石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式. 大气科学, 1998, 22(4): 659-676.
- [11] 赵柏林, 张芃菲, 高国明. 我国大气气溶胶光学厚度的特性. 气象学报, 1986, 44(2): 235-241.
- [12] 夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究. 遥感学报, 2005, 9(4): 429-437.
- [13] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测 (2004-08—2004-12). 环境科学, 2006, 27(9): 1703-1711.
- [14] 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.
- [15] 毛节泰, 李成才. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. 应用气象学报, 2002, 13(1): 127-135.
- [16] 张军华, 斯召俊. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度. 大气科学, 2003, 27(1): 23-35.
- [17] Holben B N, Kaufman Y J, Eck T F, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens Environ*, 1998, 66(1): 1-16.
- [18] WMO. Strategy for the Implementation of the Global Atmosphere Watch Programme (2001—2007). World Meteorological Organization, 2001, 142:43-45.
- [19] Freemantle J, O'Neill N, Royer A, et al. AEROCAN: The Canadian Sunphotometer Network. *Remote Sensing of Atmospheric Aerosols*, 2005: 32-35.
- [20] 罗军, 易维宁, 何超兰, 等. 利用野外光谱辐射计传递实现太阳辐射计绝对辐射定标. 大气与环境光学学报, 2006, 1(2): 112-116.
- [21] Biggar S F, Gellman D I, Slater N. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data. *Remote Sens Environ*, 1990, 32:91-101.
- [22] 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. 应用气象学报, 2001, 12(3): 257-266.
- [23] 张军华, 王美华. 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.
- [24] Weihs P, Dirmhirn I, Czerwenka-Wenkstetten I M. Calibration of sunphotometer for measurements of turbidity. *Theor Appl Climatol*, 1995, 51(1): 97-104.
- [25] Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry. *Pure Appl Geophys*, 1976, 114(1): 1-14.

## An Introductory Study on the Calibration of CE318 Sunphotometer

Yang Zhifeng<sup>1)</sup> Zhang Xiaoye<sup>1)</sup> Che Huizheng<sup>1)</sup> Zhang Xiaochun<sup>1)</sup> Hu Xiuqing<sup>2)</sup> Zhang Lijun<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, Center for Atmosphere Watch and Services, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081) <sup>2)</sup> (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

### Abstract

The indoor and field calibration methods of CE318 sunphotometer are mainly explored and the calibration results of the two methods are compared. Based on integrating sphere radiation calibration method, an experiment is carried out for the calibration of the sky scattering radiation channels at eight different wave bands of CE318 sunphotometer. Langley calibration method and standard instrument relative calibration method are used to calibrate sun direct radiation channels at different wave bands of CE318 sunphotometer. The results of this experiment show that the calibration results of sky scattering radiation channels at 670 nm, 870 nm, 1020 nm and the original calibration of the same instrument are fundamentally equal with the discrepancy less than 6%. It has high reliability. Unfortunately the result of the wave band of 440 nm is higher than the original calibration, and the departure range is about 18.9%. Based on the calibration results, it can be concluded that there are good feasibility and reliability in using integrating sphere for calibrating the sky scattering radiation channels. However, there is a little difference between the calibration results and the original calibration. Considering the fact that aging filters might be led to by using conditions and measurement for long periods outdoors, some aerosol particles may fall on the filters which are inside the sensor head, even because the filters run very long time, so the filters are made broken. Generally speaking, the calibration results of the sun direct radiation channels are slightly larger than the original calibration.

