

# 整层大气连续透过率的测量与标定方法

黄 晟<sup>1,2</sup>, 靖 旭<sup>1</sup>, 谭逢富<sup>1</sup>, 何 枫<sup>1\*</sup>, 张巳龙<sup>1</sup>, 程 知<sup>1,2</sup>, 侯再红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 为了获得连续精细的整层大气光谱透过率, 将光栅光谱仪与高精度二维跟踪机架相结合, 研制了能够进行连续波段测量的太阳辐射计。通过小波变换对光谱进行去噪与基线校正, 减小了仪器结构设计的复杂度。鉴于 Langley 标定法与标准光源法各自的局限性, 提出了一种将二者结合的混合标定法, 将标定基准溯源至大气层外的太阳辐照度。将所提系统与 POM-2 辐射计进行了同时同地的对比实验, 并且将实验结果与大气辐射传输软件 MODTRAN 的计算结果进行了对比, 对比结果验证了仪器结构设计的可靠性与标定方法的准确性。

**关键词** 遥感; 大气透过率; 标定; 太阳辐射计; 小波变换

**中图分类号** O433.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0710001

## Measurement and Calibration Methods for Total Atmospheric Continuous Transmittance

Huang Sheng<sup>1,2</sup>, Jing Xu<sup>1</sup>, Tan Fengfu<sup>1</sup>, He Feng<sup>1</sup>, Zhang Silong<sup>1</sup>,  
Cheng Zhi<sup>1,2</sup>, Hou Zaihong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In order to obtain continuous spectral transmittance of total atmosphere with high accuracy, a sun-photometer is developed based on the combination of grating spectrometer and high precision two-dimensional rotating frame. We can use the wavelet transformation to achieve spectral denoising and baseline correction, and the design complexity of the instrument structure is reduced. A mixed calibration method which combines Langley calibration method and standard light source method is introduced in consideration of limitations of the two methods above mentioned. The base of calibration can be traced to the extra-atmospheric sun irradiance. A comparative experiment between the sun-photometer and the POM-2 photometer is carried out at the same place and time, and the subsequent comparative analysis is also made between data measured by the sun-photometer and data obtained by the MODTRAN software. The experiment indicates the reliability of instrument structure design and the high precision of the new calibration method.

**Key words** remote sensing; atmospheric transmittance; calibration; sun-photometer; wavelet transformation

**OCIS codes** 280.1100; 040.1880; 010.0280; 010.1320

## 1 引 言

大气气象条件变化迅速, 整层大气连续透过率能够反映大气辐射传输性质, 在天气预报、环境监测和武器制导等领域中都具有重要的应用。整层大气是指从大气层顶到仪器观测高度之间的大气, 目前常用的测

**收稿日期:** 2017-03-07; **收到修改稿日期:** 2017-03-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(41405014)

**作者简介:** 黄 晟(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学精密仪器设计方面的研究。E-mail: hs928@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 侯再红(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: zhhou@aiofm.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: fhe@aiofm.ac.cn

量透过率的方法包括实验室标准光源法和 Langley 标定法。标准光源法对实验条件要求严格,标定过程中的各种误差都会对测量结果产生影响。Langley 标定法在非气体吸收波段的标定精度较高,在气体吸收波段则不遵循 Beer-Bouguer-Lambert 定律<sup>[1]</sup>,若对所有通道都采用 Langley 标定法进行标定,会带来很大的误差。为此,国内外很多学者展开了相关研究。Reagan 等<sup>[2]</sup>提出用平方根的依赖性来描述 940 nm 水汽通道的水汽吸收;Bruegge 等<sup>[3]</sup>通过建立 940 nm 水汽、臭氧以及二氧化氮的模型来进行标定,但是这些模型引入的假设因子同样会产生较多的不确定因素<sup>[4]</sup>。

目前常见的测量大气透过率的仪器都是分通道的,国内具有代表性的仪器是由中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的 DTF 系列便携式自动太阳辐射计<sup>[5]</sup>,国外具有代表性的仪器是日本 PREDE 公司研制的全自动太阳光度计 POM-2 和法国的 CE318 太阳辐射计,但是这些仪器的价格较为昂贵。由于这些太阳辐射计采用滤光片转盘旋转的方法来进行测量,带宽较大,不能得到连续精细的光谱特征,并且测量精度可能会受到转盘旋转所带来的传动误差的影响。

鉴于上述分析,为了能够测得整层大气连续透过率并降低实验成本,将光栅光谱仪与高精度二维跟踪转台结合起来,研制了一台光栅分光式太阳辐射计。通过小波变换对辐射计测量所得的连续太阳光谱进行去噪和基线校正,减小了仪器结构设计的复杂度。为了提高整层大气连续透过率的标定精度,本文提出了一种结合 Langley 标定法与标准光源法的混合标定方法,将标定基准溯源到了大气层外太阳光谱辐照度。为了验证所提标定方法的可行性与仪器的可靠性,将所研制系统与 POM-2 辐射计进行了同时同地的观测实验,并且将系统测量得到的整层大气光谱透过率与大气辐射模式计算软件 MODTRAN 计算得到的数据进行了对比分析。

## 2 测量原理

测量系统如图 1 所示,由滤光片、视场光阑、光纤耦合器、光纤与光谱仪组成。光纤一端通过耦合器与光筒连接,另一端与光谱仪连接。所用视场光阑可使光接收系统满足 32' 的太阳视场,在光筒内部设置多级光阑可以减小散射光对测量数据的影响。

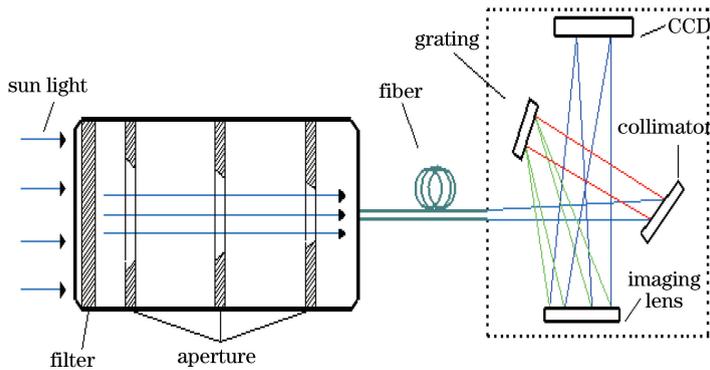


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of measurement system

选用美国海洋公司的 USB-2000 型光谱仪,该光谱仪的内部结构采用 Czerny-Turner 系统的变形形式,包括两片球面反射镜和一块平面反射光栅<sup>[6]</sup>。光谱仪中所采用的探测器为 ILX511B 线性 CCD 阵列,具有 2048 个像素,光栅刻线密度为 600 line/mm,配合狭缝感光范围为 450~1000 nm,平均分辨率为 0.36 nm/pixel。考虑光栅多级衍射会产生光谱级次重叠现象,使用长波通滤光片截取的有效测量范围为 500~1000 nm。光谱仪的测量方程式为

$$D_N = AT \int_{\Delta\lambda} E(\lambda)r_1(\lambda)r_2(\lambda)h_o(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

式中  $A$  为有效耦合面积(单位为  $\text{cm}^2$ ), $T$  为积分时间(单位为  $\text{s}$ ),入射的辐射能量由  $A$  和  $T$  共同决定; $E(\lambda)$  为光源在系统入瞳处的光谱辐照度分布; $r_1(\lambda)$  为探测器的光谱响应; $r_2(\lambda)$  为滤光片的光谱响应; $h_o(\lambda)$  为

光学系统在波长  $\lambda$  处的点扩散函数,反映狭缝衍射、光栅衍射和光学系统像差的共同作用<sup>[7]</sup>。

跟踪方法采用 CCD 图像处理跟踪,太阳辐射计实物图如图 2 所示。上位机系统可实时处理 CCD 相机拍摄的太阳图像,从而得到质心坐标;上位机系统将信号发送给单片机控制系统,单片机通过控制方位轴和俯仰轴电机来使转台旋转,从而达到实时跟踪太阳的目的。

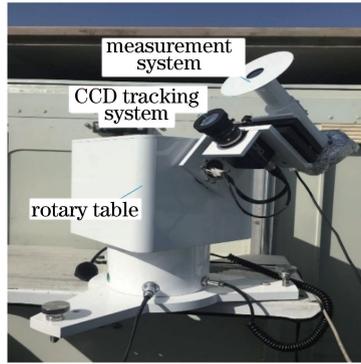


图 2 太阳辐射计实物图  
Fig. 2 Picture of sun-photometer

### 3 混合标定原理

为了保证测量结果的准确性,提出一种混合标定法来计算整层大气连续透过率。首先以太阳为光源在有效标定波段利用 Langley 标定法进行标定,获得辐射计在这些波段的标定因子;然后进行标准光源标定,以获得辐射计对标准灯的全波段标定因子。同一台仪器得到的不同光源的标定因子是相同的,基于这一特征,在有效 Langley 标定法标定波段对两种标定因子所求的归一化比例系数求和,得到比例因子,再将原始全波段标定因子乘以该比例因子,此时可将标定基准溯源至大气层外的太阳光谱辐照度,从而减小了实验室标定过程中的误差。具体方法如下。

用光谱响应函数来简化(1)式,则系统对标准灯的响应值可以表示为

$$D_{NL}(\lambda) = \frac{E_L TA d\lambda}{R_L(\lambda)} + D_{NLO}(\lambda), \quad (2)$$

式中  $E_L$  为标准灯辐照度分布; $R_L(\lambda)$ 为系统对标准灯的光谱响应函数,单位为  $\mu\text{J}/\text{count}$ ; $D_{NLO}(\lambda)$ 为系统的暗噪声,即在光谱仪无任何输入时系统的响应值。仪器对标准灯的标定因子为

$$C_{\text{lamp}}(\lambda) = \frac{D_{NL}(\lambda) - D_{NLO}(\lambda)}{E_L}. \quad (3)$$

同理,系统对日观测时,大气层顶系统的响应值可以表示为

$$D_{NS}(\lambda) = \frac{E_S TA d\lambda}{R_S(\lambda)} + D_{NSO}(\lambda), \quad (4)$$

式中  $E_S$  为大气层顶的太阳理论辐照度,这里采用 Kurucz 等<sup>[8]</sup>在美国 Kitt Peak 国家天文台测量的太阳光谱作为大气层顶的参考光谱,其光谱曲线如图 3(a)所示; $R_S(\lambda)$ 为系统对太阳的光谱响应函数; $D_{NSO}(\lambda)$ 为系统的暗噪声,即在光谱仪无任何输入时系统的响应值。系统对日观测时,大气层顶系统的标定因子为

$$C_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{D_{NS}(\lambda) - D_{NSO}(\lambda)}{E_S}. \quad (5)$$

用 Langley 标定法标定得到的  $D_{N\text{-Langley}}(\lambda_i)$  替代  $D_{NS}(\lambda_i) - D_{NSO}(\lambda_i)$ 。在可以用 Langley 标定法标定的非气体吸收通道  $\lambda_i$ ,  $C_{\text{sun}}(\lambda_i)$  与  $C_{\text{lamp}}(\lambda_i)$  的相对误差应当非常小,实验室标定过程中的误差(包括标准光源本身的不确定度、距离误差和准直误差等)都可以归结为比例因子  $S$ 。 $S$  为一常数,与波长分布无关,计算公式为

$$S = \sum_i^n \frac{C_{\text{sun}}(\lambda_i)}{C_{\text{lamp}}(\lambda_i)} / n, \quad (6)$$

式中  $\lambda_i$  为有效的 Langley 标定法标定通道, $n$  为有效通道总数。整层大气连续透过率  $t$  的计算公式为

$$t = \frac{D_{\text{NSD}}(\lambda)}{SC_{\text{lamp}}(\lambda)E_s}, \quad (7)$$

式中  $D_{\text{NSD}}(\lambda)$  为实际对日测量过程中系统在地面所得的响应值。

有效的 Langley 标定法标定波段  $\lambda_i$  是通过 MODTRAN 软件来实现的, 利用 MODTRAN 软件的太阳直射辐射模式, 模拟计算高海拔地区的相对大气质量从 1 到 15 的太阳直射辐照度 ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}$ )。因为光谱仪与模拟软件的分辨率不同, 采用半峰全宽为 0.36 nm 的三角形函数将 MODTRAN 计算出的数据平滑至与光谱仪分辨率相同<sup>[9]</sup>, 如图 3(b) 所示。半峰全宽是数值强度为峰值最大值一半处的波长差, 可表征光谱仪分辨率。

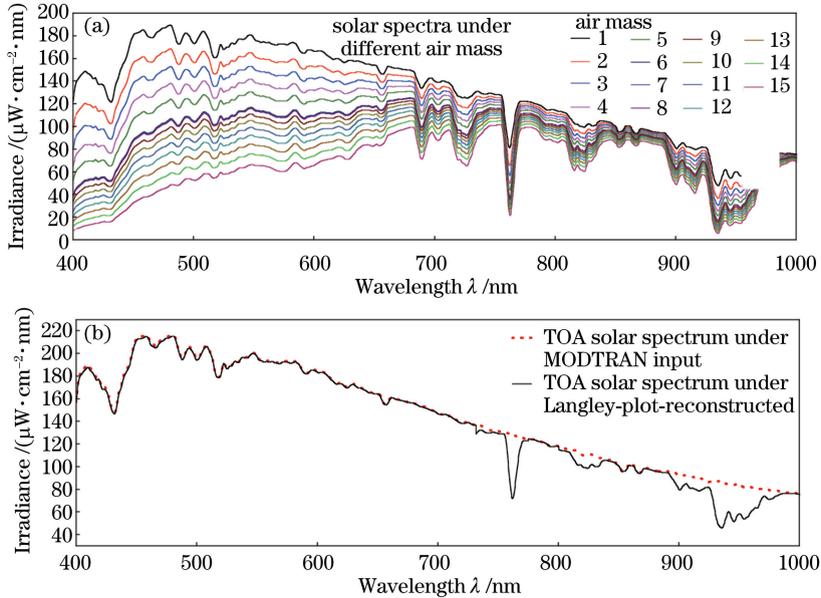


图 3 (a)不同大气质量对应的太阳光谱;(b)拟合外推与 MODTRAN 内置的大气层外太阳光谱辐照度值  
Fig. 3 (a) Solar spectra corresponding to different air mass; (b) solar spectral irradiance values of fitting extrapolation and MODTRAN input in extra-atmospheric space

将计算得到的太阳光谱辐照度值以相对大气质量  $m$  为横坐标、辐照度为纵坐标, 按照波长分布分别进行最小二乘法拟合外推, 得到拟合外推的大气层外太阳光谱辐照度值, 并与 MODTRAN 软件内置的大气层外的太阳光谱辐照度值进行比较, 如图 3(a) 所示。考虑探测器信噪比, 选择两条曲线相对偏差在  $\pm 0.5\%$  以内的通道, 并将其作为有效的 Langley 标定法标定波段。

Langley 标定法测量  $D_{\text{N-Langley}}(\lambda_i)$  的基本原理为: 假设大气由若干平行平面层组成, 在某一给定的太阳位置, 根据 Beer-Bouguer-Lambert 定律得到系统在地面观测到的波长  $\lambda_i$  处的信号  $D_{\text{NSD}}(\lambda_i)$  与大气光学厚度  $\tau$  的关系为<sup>[10]</sup>

$$D_{\text{NSD}}(\lambda_i) = D_{\text{N-Langley}}(\lambda_i) \left(\frac{d_o}{d}\right)^2 \exp(-m\tau), \quad (8)$$

式中  $d_o/d$  为日地距离校正系数;  $m$  为根据太阳天顶角  $\theta$  计算得到的大气质量。对(8)式两边取对数可得

$$\ln \left[ D_{\text{NSD}}(\lambda_i) \left/ \left(\frac{d_o}{d}\right)^2 \right. \right] = \ln [D_{\text{N-Langley}}(\lambda_i)] - m\tau. \quad (9)$$

当大气比较清洁且稳定时, 可以认为大气光学厚度  $\tau$  为常数, 以大气质量  $m$  为横坐标,  $\ln [D_{\text{NSD}}(\lambda_i) / (d_o/d)^2]$  为纵坐标在直角坐标系中作图, 若  $\tau$  不变, 根据(9)式可以得到一条直线, 这条直线的截距为  $\ln [D_{\text{N-Langley}}(\lambda_i)]$ , 这样就获得了在有效 Langley 标定法标定波段  $\lambda_i$  处的外推值  $D_{\text{N-Langley}}(\lambda_i)$ 。

#### 4 光谱去噪与基线校正

在实际测量过程中, 光谱仪的有效信号  $D_{\text{NSD}}(\lambda)$  会受到光谱仪器背景信号和各子系统噪声信号的干扰,

使得基线产生漂移,降低了数据的可信度。利用小波变换可以有效分离信号中低频与高频成分的特点,提出一种基于小波变换的光谱去噪和基线校正方法<sup>[11]</sup>,该方法可以代替传统太阳辐射计中采用的转轮旋转遮挡测量暗噪声的方法,减小了仪器结构设计的复杂度。

光谱去噪过程包括信号的分解与重构和阈值处理<sup>[12]</sup>,基线校正过程包括信号的分解与重构和低频小波系数置零。离散信号常用的小波分解算法是 Mallat 算法,其表达式为

$$f(t) = \sum_{k \in z} C_{J,K} \varphi_{J,K}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k \in z} d_{j,k} \phi_{j,k}(t), \quad (10)$$

式中  $f(t)$  为信号;  $C_{J,K}$  为  $f(t)$  在第  $J+1$  个频段、第  $K$  个时段上的分量,即低频系数;  $\varphi_{J,K}(t)$  为尺度函数;  $d_{j,k}$  为  $f(t)$  在第  $j$  个频段、第  $k$  个时段上的分量,即高频系数;  $\phi_{j,k}(t)$  为小波基函数;  $z$  为复频域。通过合理选择小波基和分解层数,采用合适的阈值算法和量化方法可以达到同时去除光谱噪声和基线校正的目的。采用  $\text{coif5}$  小波基对实测的太阳光谱信号进行 15 次分解,然后将高频系数  $d_1$ 、 $d_2$  和所有低频系数置零,最后进行信号重构,可以有效抑制噪声和基线干扰。图 4 为在 500~650 nm 与 800~1000 nm 两个波段利用离散小波变换进行光谱去噪和基线校正的效果图,用  $D_N$  表示计数得到的数字。

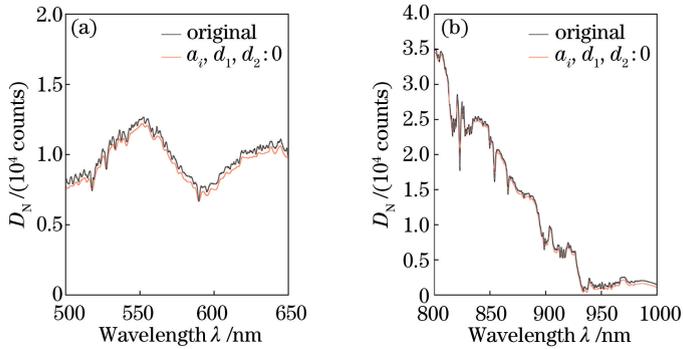


图 4 光谱去噪与基线校正效果图。(a) 500~650 nm; (b) 800~1000 nm

Fig. 4 Effects of spectral denoising and baseline correction. (a) 500-650 nm; (b) 800-1000 nm

## 5 实验测量结果比较

利用 Langley 标定法进行标定时需要洁净的大气,将标定时间选在 2016-05-16,这一天合肥地区的能见度在 30 km 以上。标定时间段选在 2016-05-16 13:00—18:30, 14 个通道标定结果如图 5 所示。经计算可得,各通道相关系数  $R$  在  $-0.990 \sim -0.999$  之间,标准偏差  $S_D$  在  $0.0164 \sim 0.0291$  之间,说明大气状况比较稳定。

对光谱仪进行标定,标准灯选用美国海洋公司的 DH-2000-CAL,内置的钨卤灯可用于测量 400~1050 nm 范围内的光谱辐照度。Langley 标定法标定得到的标定因子与标准灯标定因子如图 6 所示。

将所研制的连续光谱太阳辐射计与 POM-2 于 2016-06-18 在合肥地区进行同步实验观测,并将测量结果进行比较。POM-2 是国际公认的一种太阳辐射计,半功率对应的频率宽度为 10 nm,具有紫外到红外共

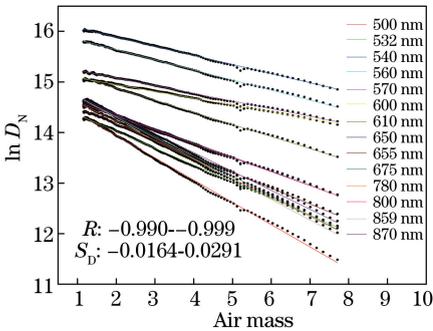


图 5 有效 Langley 标定法通道标定曲线

Fig. 5 Channel calibration curves of valid Langley calibration method

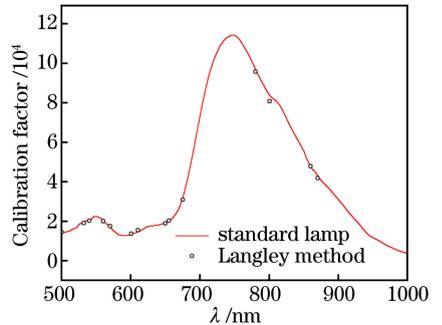


图 6 标定因子

Fig. 6 Calibration factor

11 个波段。将光谱仪得到的 500,675,870,940 nm 4 个波段的数据与 POM-2 对应波段的数据进行比较,因为两种辐射计的半功率频宽不同,所以需将光谱仪对应波段的数据以半峰全宽为 10 nm 的长度进行积分,再将其结果与 POM-2 得到的数据进行对比。光谱仪 4 个波段的透过率由混合标定法标定得到,POM-2 的 500,675,870 nm 3 个波段的透过率由 Langley 标定法标定得到,940 nm 波段的透过率由改进的 Langley 标定法标定得到<sup>[13]</sup>。实验数据对比结果如图 7 所示。

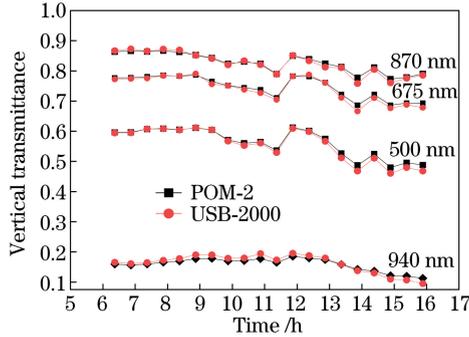


图 7 POM-2 和 USB-2000 测得的一天内垂直透过率对比

Fig. 7 Measured vertical transmittance comparison of POM-2 and USB-2000 in a day

图 7 中给出了两台仪器在 4 个典型波长处对应的大气垂直透过率在 2016-06-18 6:00—16:00 内的变化。从图中可以看出,两台仪器在 4 个对应波长的测量结果在一天之内随时间变化的趋势非常相近,在大气变得不稳定时,两台仪器在同一波段所测得的大气透过率的变化较好的对应。光谱仪所测得的 500,675,870,940 nm 4 个通道的数据与 POM-2 对应通道数据的平均相对偏差分别为 1.38%、0.76%、0.32% 和 3.39%,最大相对偏差分别为 4.17%、2.95%、2.54% 和 6.4%,最小相对偏差分别为 0.06%、0.85%、0.78% 和 0.65%,证明了仪器的可靠性和标定方法的准确性。

将所研制仪器测量得到的整层大气连续光谱透过率与 MODTRAN5 模拟计算得到的数据进行比较,结果如图 8 所示。MODTRAN 选择的模式为中纬度夏季、无云、乡村气溶胶模式。

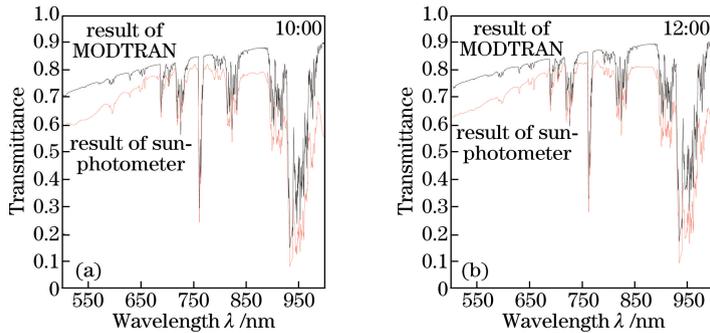


图 8 太阳辐射计的测量结果与 MODTRAN 模拟结果的对比。(a) 2016-06-18 10:00;(b) 2016-06-18 12:00

Fig. 8 Comparison of result measured by sun-photometer and simulation result of MODTRAN.

(a) 2016-06-18 10:00; (b) 2016-06-18 12:00

从图 8 中可以看出,实测的大气透过率的变化趋势与 MODTRAN 的模拟结果的变化趋势相似,在测量范围内各吸收波段的特征峰都能很好地对应。830 nm 和 940 nm 附近的吸收峰主要是由水汽造成的,氧气的吸收峰在 680,730,760 nm 附近,二者在 10:00 时全波段的平均相对偏差为 14.22%,12:00 时全波段的平均相对偏差为 13.29%。这可能是由 MODTRAN 的大气模式与实验当地大气模式的不同造成的。

## 6 结 论

光栅光谱仪可以对波长范围内所有波段的单色光进行同时测量,具有较高的信噪比和稳定性。将光栅光谱仪与高精度二维转台结合,研制了一台能够进行连续波段测量的太阳辐射计。为了克服 Langley 标定法与标准光源法在标定方法上的不足,提出混合标定法。利用混合标定法可将标定基准溯源到大气外的太

阳光谱,减小了实验室标定过程中的误差,为强吸收波段大气参数的测量提供了一种有效的技术手段。利用小波变换进行基线校正和光谱去噪可减小仪器结构设计的复杂性。将所研制的仪器与 POM-2 进行对比,并将仪器的测量结果与 MODTRAN 软件计算得到的数据进行比较,证明了仪器设计的可靠性与标定方法的准确性。后续将开展利用光栅分光式辐射计测量大气恒量气体含量的研究工作。

## 参 考 文 献

- [1] Kindel B C, Qu Z, Goetz A F H. Direct solar spectral irradiance and transmittance measurements from 350 to 2500 nm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3483-3494.
- [2] Reagan J A, Thome K, Herman B, *et al.* Water vapor measurements in the 0.94 micron absorption band-calibration, measurements and data applications[C]. IGARSS'87-International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1987: 63-67.
- [3] Bruegge C J, Halthore R N, Markham B, *et al.* Aerosol optical depth retrievals over the Konza Prairie[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D17): 18743-18758.
- [4] Zhang Yanna, Liu Enchao, Li Xin, *et al.* Calibration method of VNIR solar irradiance spectroradiometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 11-16.  
张艳娜, 刘恩超, 李 新, 等. 可见-近红外波段太阳光谱辐照度仪的辐射定标方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 11-16.
- [5] Li Jianyu, Li Duoyang, Xu Qingshan, *et al.* Development of binocular multi-FOV sun-photometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1022-1028.  
李建玉, 李多扬, 徐青山, 等. 双筒多视场太阳光度计研制[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1022-1028.
- [6] Xu Yingying, Jin Weiqi, Ma Wenwen, *et al.* Measurement of night sky spectral radiation and analysis of spectral denoising[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1456-1459.  
徐英莹, 金伟其, 马文文, 等. 夜晚天空光谱辐射测量研究及光谱去噪分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1456-1459.
- [7] Yang Huaidong, Chen Kexin, Huang Xingyue, *et al.* Global modeling and analyzing of grating spectrometers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 281-284.  
杨怀栋, 陈科新, 黄星月, 等. 光栅光谱仪的整体建模与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 281-284.
- [8] Kurucz R L, Furenli I, Brault J, *et al.* Solar flux atlas from 296 to 1300 nm[J]. *National Solar Observatory*, 1984, 1: 435-436.
- [9] Wei Heli, Hu Huanling. Measurement of atmospheric pollution gas NO<sub>2</sub> column abundance from ground based solar spectra[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(3): 220-226.  
魏合理, 胡欢陵. 用太阳光谱遥测大气污染气体 NO<sub>2</sub> 的含量[J]. *遥感学报*, 2001, 5(3): 220-226.
- [10] Zhou J, Cao C Y, Xu J, *et al.* Sun-photometer calibration and its application[J]. *Journal of Meteorological Research*, 1994, 8(2): 229-237.
- [11] Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0209001.  
李庆忠, 刘 清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0209001.
- [12] Liu Jianfei, Shi Huimin, Zeng Xiangye, *et al.* Channel estimation method based on wavelet and improved ISFA for CO-OFDM systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1205002.  
刘剑飞, 石慧敏, 曾祥烨, 等. 基于小波降噪和改进 ISFA 的 CO-OFDM 信道估计方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1205002.
- [13] Jia Lili, Dai Congming, Xu Qingshan, *et al.* Calibration of near-infrared absorption band for a sun-photometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 928-938.  
伽丽丽, 戴聪明, 徐青山, 等. 近红外大气吸收波段太阳辐射计定标[J]. *遥感学报*, 2012, 16(5): 928-938.