

基于可调谐激光器的太阳光谱辐照度仪定标方法

张艳娜, 郑小兵, 李 新, 刘恩超, 李文伟

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘 要: 太阳光谱辐照度仪是利用棱镜分光技术对太阳直射辐射进行连续光谱测量的新型仪器, 为了实现高精度观测要求, 开展了基于可调谐激光器的系统级定标方法研究。使用激光导入积分球产生的均匀辐照度场作为定标光源, 利用标准辐照度探测器作为传递标准, 将低温绝对辐射计的辐射标准传递到太阳光谱辐照度仪。在仪器的 870 nm 波段进行了定标实验, 与标准灯法、Langley 法得到的定标系数进行对比, 偏差分别为 2.84% 和 4.08%, 验证了该方法的可行性。根据不确定度评估规范, 这种定标方法的不确定度优于 0.882%, 可以用于高精度的太阳光谱辐射观测。

关键词: 辐照度定标; 太阳光谱辐照度仪; 可调谐激光器; 标准探测器

中图分类号: O432.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2678-06

Calibration method of solar irradiance spectroradiometer based on tunable laser

Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Xin, Liu Enchao, Li Wenwei

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Solar irradiance spectroradiometer was a new type of instrument for solar direct continuous spectrum irradiance measurement. To meet the requirements of the high-precision observation, a system-level calibration method based on tunable laser was developed. In this method, the uniform irradiance source was acquired from the tunable laser-illuminated integrating sphere, and the standard irradiance detector was used as transferring standard, so the spectral irradiance responsibility of solar irradiance spectroradiometer can be traced to the cryogenic absolute radiometer. The experiment of the 870 nm channel was carried out. The deviations with the standard lamp and Langley are 2.84% and 4.08%, which validates the rationality of this method. According to the evaluation of uncertainty specification, the uncertainty of this method is 0.882%, which can improve the measurement of the solar spectral radiation.

Key words: irradiance calibration; solar irradiance spectroradiometer; tunable laser; standard detector

收稿日期: 2013-12-14; 修订日期: 2014-01-12

基金项目: 国家 973 计划(2010CB950801); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906036)

作者简介: 张艳娜(1987-), 女, 博士生, 主要从事光辐射定标、光电检测方面的研究。Email: zynbao@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

0 引言

通过大气层到达地球表面的太阳辐射,包括直射辐射和由大气散射引起的漫射辐射两部分,直射辐射占总辐照度的比例以及随太阳高度角的变换特性,可以表征大气中气溶胶的粒谱分布和辐射收支等,为气象预报、环境监测以及卫星遥感器的辐射校正等提供基础性的实验参数^[1-3]。太阳光谱辐照度仪就是在可见-近红外波段对太阳直射辐射进行高精度观测的仪器,它的连续光谱观测功能,可以克服目前滤光片式太阳辐射计测量通道少,信息量有限的缺点^[2],表征大气、海水的光谱选择性吸收和散射等效效应^[4],为不同谱段地球-大气-海洋系统的研究提供数据基础。开展太阳光谱辐照度仪的定标研究,就是将仪器的硬件信号溯源到最高精度的辐射基准,从而为仪器在气象、环境、能源以及卫星遥感等领域的应用提供精确的实验依据。

目前,这种连续光谱的太阳直射辐照度观测仪器的定标方法主要有 Langley 法、标准灯法和单色仪扫描法。Langley 法是根据比尔-朗伯定理将辐射基准溯源于大气层顶的太阳理论辐照度,全球气溶胶观测网(AERONET)在海拔 3 400 m 的 Mauna Loa 观测站定标滤光片太阳辐射计的重复性优于 1%^[2],但是该方法应用的前提是大气光学厚度为常数,这就对定标地点的海拔及大气条件要求非常苛刻;标准灯法是通过仪器光谱扫描的方法将辐照度基准溯源于黑体辐射源,但是标准灯与太阳光谱差异大、能量低且标准传递环节多等缺点限制了定标精度的提高,不确定度一般为 2%~4%^[5],且该方法假设仪器带宽内的相对光谱响应为常数,仅适用于窄带光谱仪(如光栅光谱仪)^[6],对带宽为 5~15 nm 的太阳光谱辐照度仪定标会引起带宽效应;单色仪法是使用卤钨灯-单色仪得到的单色光作为光源,利用光谱替代扫描的方式,使用标准探测器将辐照度标准溯源于低温绝对辐射计,但是该方法的出射光通量只有 nW 量级,制约了仪器的信噪比和动态范围^[7]。

为此,文中提出了一种基于连续可调谐参考光源的定标方法,采用可调谐激光器导入积分球产生的能量高、单色性好、偏振度低且波长可调的参考光源,实现宽波段范围内的精细光谱扫描,并利用陷阱

探测器作为传递标准,通过系统级的方法将辐照度标准溯源到高精度的低温绝对辐射计。同以上方法相比,该方法具有较高的辐射功率和较短的辐射传递链,可以为太阳直射光谱观测仪器的室内定标提供新的技术途径。

文中首先介绍了太阳光谱辐照度仪的工作原理和定标装置,然后以 870 nm 波段为例,详细介绍了系统级定标的实验过程和结果,并针对定标过程中的不确定度来源进行了分析和评估,最后通过和标准灯法、Langley 法得到的定标系数比对,验证了该方法的合理性。

1 太阳光谱辐照度仪

太阳照度仪是通过 Fery 棱镜进行分光的光谱仪器,Fery 棱镜由高纯度和低 OH 含量的熔石英材料加工而成,集色散、会聚于一体,并仅产生单一级次光谱,有利于降低杂散光、提高光通量、简化结构设计,具体工作原理如图 1 所示。

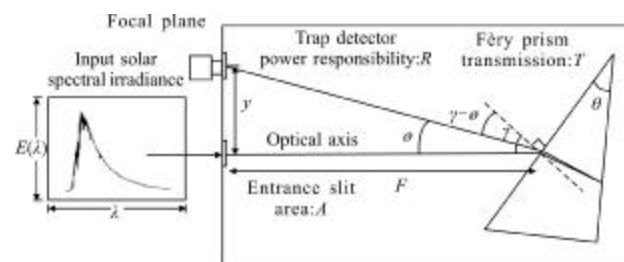


图 1 太阳光谱辐照度仪工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of solar irradiance spectroradiometer

通过精密的太阳跟踪后,太阳直射辐射就可以通过仪器的入射狭缝进入到 Fery 棱镜,棱镜的前后表面均为球面,前表面对入射光进行色散,后表面通过高反射率的镀铝膜实现色散光的反射会聚,由此将不同波长的单色光谱会聚于出射狭缝所在的成像面。由于棱镜对不同光谱的色散角度不同,因此通过控制棱镜的转动,就可以将各个波长的光入射到出射狭缝处的陷阱探测器中,从而完成光谱的测量。其中,陷阱探测器是由三片硅光电二极管按照一定的空间结构组合而成的一种复合型光电探测器,具有线性范围宽、稳定性好等优点,其不确定度可达 0.035%^[8],可以保证太阳光谱的长期高精度观测,仪器的测量方程由下式表示:

$$V = A \int_{\Delta\lambda} E(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot s(\lambda, \lambda_c) d\lambda = \int_{\Delta\lambda} E(\lambda) \cdot R_E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中： V 为仪器测量得到的电压信号； E 为入射的太阳辐照度；狭缝的面积 A 决定了入射的辐射能量和衍射效应校正因子 ϕ ，棱镜的透过率 T 以及仪器的光学结构参数(包括棱镜夹角 θ 、折射率 n 、前后表面曲率半径 R_1 和 R_2 半径、成像面距离 F 、入射光与前表面法线夹角 γ ，以及光线在成像面上的位置 y) 决定了光谱带宽 $\Delta\lambda$ 以及光谱传递函数 s ，陷阱探测器的响应率 R 则决定了测量得到的光谱信号的大小。如果使用部件级的定标方法，需要对公式(1)中的各个因子分别进行定量评估，复杂的定标过程会引入很大的测量不确定度。为此，文中提出了系统级的定标方法，将太阳照度仪作为一个整体，通过定标直接得到仪器的辐照度响应度 R_E ，从而确定仪器输出值 V 与测量的照度值 E 之间的对应关系。

2 辐照度定标系统

2.1 定标原理

此系统级的定标方法是利用可调谐激光器导入积分球产生的点光源作为照度定标光源，将标准辐照度探测器复现的物理量值传递到太阳照度仪。其中标准探测器由陷阱探测器和精密孔径光阑构成，光阑面积为 A 。标准探测器和太阳照度仪对同一个积分球点光源进行观测，假设标准探测器接收到的光谱辐照度和电压信号分别为 E_{Trap} 和 V_{Trap} ，太阳照度仪为 E 和 V ，则可得如下关系：

$$V_{Trap}(\lambda) = E_{Trap}(\lambda) \cdot R_{E-Trap}(\lambda) = E_{Trap}(\lambda) \cdot R_{Trap}(\lambda) \cdot A \quad (2)$$

$$V(\lambda) = E(\lambda) R_E(\lambda) \quad (3)$$

式中： R_{E-Trap} 和 R_{Trap} 分别为标准探测器的辐照度响应度和功率响应度； R_E 为太阳照度仪的辐照度响应度。如果 d_{Trap} 和 d 分别为标准探测器孔径光阑和太阳照度仪入射狭缝与激光-积分球点光源出口之间的距离，则根据照度平方反比定理，两者之间有如下关系：

$$E(\lambda) = \frac{d_{Trap}^2}{d^2} E_{Trap}(\lambda) \quad (4)$$

由此可得太阳照度仪在带宽 $\Delta\lambda$ 内的光谱辐照度响应度为：

$$R_E(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} R_E(\lambda) d\lambda = \int_{\Delta\lambda} \frac{V(\lambda)}{V_{Trap}(\lambda)} \cdot \frac{d^2}{d_{Trap}^2} \cdot R_{E-Trap}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

2.2 定标装置

图 2 为基于可调谐激光器的太阳照度仪定标装置示意图。

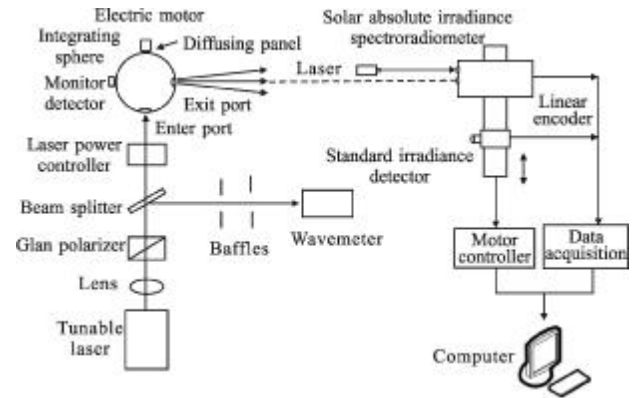


图 2 太阳光谱辐照度仪的定标装置图

Fig.2 Calibration system of solar irradiance spectroradiometer

钛宝石可调谐激光器(MBR110, Coherent)在 532 nm (Verdi-V18, Coherent) 激光泵浦的激励下，可以在 700~1 060 nm 波段产生波长连续可调的激光，其输出功率可达 0.2~1 W。出射激光经过透镜聚焦、偏振棱镜起偏后，进入到分束镜中，一束入射至波长计，通过迈克尔逊干涉测量技术进行波长测量及监视，其测量精度可达 0.001 nm。另一束则进入到激光功率控制器，进行激光功率的测量、调节和稳定。调制后的激光导入到积分球中进行匀光，积分球的外径为 30 mm，内径为 25.4 mm，入口直径为 6 mm，出口直径 3 mm，内部装有漫射板，通过直流电机控制其旋转来去除激光空间相干性产生的散斑，最终可以在积分球出口处产生均匀、稳定且波长连续可调的照度场。

由于太阳照度仪采用波长反馈的方法来实现波长定位，而积分球产生的光源面只有 3 mm，并不能覆盖波长反馈的入射狭缝，为此使用 632.8 nm 的氦氖激光器作为波长反馈光源，该激光光束与积分球出口光轴平行。在定标过程中，将标准探测器和太阳照度仪固定在电动平移台上，采用光栅尺进行精确定位，精度可达 1 μm。通过电动平移台控制箱使两者交替对准积分球出口中心进行测量，同时采集放置在积分球内部的监视探测器的信号，来修正两者在交替测量过程中照度场的变化，由此即可得到太阳照度仪的光谱辐照度响应度。

3 结果及分析

3.1 定标过程及结果

根据定标原理,对太阳照度仪的 870 nm 波段进行了辐照度定标实验。太阳照度仪的光学结构要求定标光源模拟太阳的发散角进入仪器的入射狭缝中,积分球的出口直径为 3 mm,并不是理想的点光源,因此定标距离需要以积分球的上下边缘为界进行计算,最终得到的定标距离为 860 mm。另外,为了克服 870 nm 波段波长不可见的缺点,在光路调节时使用钛宝石可调谐激光器直接输出的 532 nm 波长处的 8 W 泵浦激光代替图 2 中的可调谐激光器,完成光路的调整。

在定标过程中,使用波长反馈的方法将太阳辐照度仪的棱镜位置固定在中心波长处,在 859~884 nm 范围内以 1 nm 为间隔,交替对标准辐照度探测器和太阳照度仪输出进行测量,并使用监视探测器来记录定标过程中的光源波动。

其中,标准探测器的光谱辐照度响应度可以通过光谱功率响应度以及光阑面积计算得到。标准探测器在 350~1 064 nm 的 24 个波长点进行了溯源于低温绝对辐射计的绝对光谱功率响应度定标^[9],测得的不确定度优于 0.065%,在 870 nm 波段范围内的光谱功率响应度可通过内部插值的方法获得。光阑直径的测量通过万能工具显微镜进行非接触光学测量方法获得,其测量精度可达到 1 μm。根据公式(2)计算得到标准辐照度探测器在 859~884 nm 范围内的光谱辐照度响应度如图 3 所示。

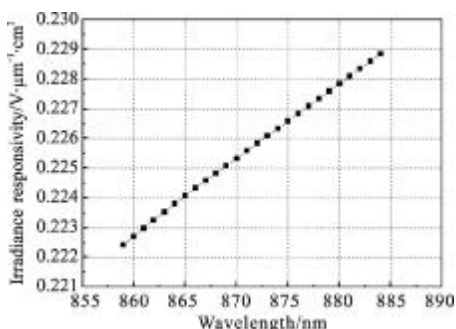


图 3 标准辐照度探测器的光谱辐照度响应度

Fig.3 Spectral irradiance responsivity of the standard irradiance detector

然后,可以使用公式(5)对太阳照度仪的光谱辐

照度响应度进行计算,最终得到的光谱曲线以及其积分值如图 4 所示。

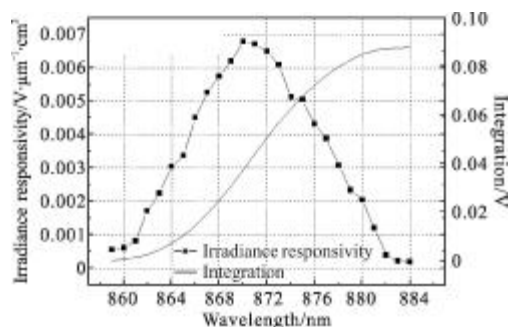


图 4 太阳光谱辐照度仪的光谱辐照度响应度

Fig.4 Spectral irradiance responsivity of solar irradiance spectroradiometer

由图 4 所示的光谱响应积分曲线,可以得到 870 nm 太阳照度仪的辐照度响应度为 0.087 65 V/(μW·cm²)。

3.2 不确定度分析

在仪器的定标过程中,各个环节的偏差以及仪器本身的性能会影响定标结果的不确定度,根据国际通用的测量不确定度评估和表述规范,太阳照度仪定标过程中的不确定度主要来自于三个方面:定标光源、标准辐照度探测器和太阳照度仪,如表 1 所示。

表 1 太阳光谱辐照度仪定标不确定度评估
Tab.1 Uncertainty of solar irradiance spectroradiometer calibration

Components of uncertainty		Contributions
Source's characterizations	Stability	5.89×10 ⁻³
	Uniformity	1.20×10 ⁻³
Standard irradiance detector's characterizations	Trap radiant power responsivity	0.415×10 ⁻³
	Responsivity interpolation	2.15×10 ⁻³
	I-V gain	1.76×10 ⁻³
	Aperture stop area	2.38×10 ⁻³
Solar irradiance spectroradiometer's characterizations	Distance	0.399×10 ⁻³
	Wavelength repeatability	0.75×10 ⁻³
	Instability	4.89×10 ⁻³
Combined uncertainties	I-V gain	1.76×10 ⁻³
	Distance	0.564×10 ⁻³
Combined uncertainties		8.82×10 ⁻³

定标光源的不确定度由光源的稳定性和均匀性引起,为 0.61%,其中,光源的稳定性通过探测器在 2 h 内对光源连续采样得到,它受限于激光功率控制器的性能,可以通过优化光路来减小。标准辐照度探测器的不确定度来源包括溯源于低温辐射计的标准探测器辐射功率响应度引起的不确定度^[9]、响应度插值误差、不同光功率切换时增益电阻的定标误差、探测器光阑面积测量误差以及定标距离测量误差,为 0.37%,其中光阑面积测量引起的不确定度较大,主要是由于光阑并不是理想的圆形,直接根据测量半径计算会产生较大误差,可以通过二维激光点阵扫描的方法^[10]来减小。太阳照度仪引起的不确定度由仪器的波长重复性、稳定性、增益电阻定标误差以及定标距离测量误差产生,为 0.53%,其中波长定位的重复性以及仪器的稳定性两部分通过对中国计量院的 1 000 W 辐照度标准灯连续观测得到,这两部分作为仪器性能的重要指标,需要通过对仪器的硬件优化来改善。

总体来说,使用可调谐激光器来定标太阳照度仪,合成的定标不确定度优于 0.88%。其标准传递过程为“低温绝对辐射计-标准探测器-太阳照度仪”,作为初级辐射基准的低温绝对辐射计,不确定度仅为 0.005%~0.02%^[8],可以显著提高仪器辐照度定标的不确定度。

3.3 比对验证

为了对定标结果进行验证,使用标准灯法和 Langley 定标法对太阳照度仪进行了辐照度定标实验。

标准灯法是以黑体辐射理论为基础的,通过中国计量科学研究所持有的金点黑体基准,根据普朗克定律逐级传递至标准灯^[9],功率为 1 000 W, 800~2 500 nm 的不确定度为 1.4%~3.7%。太阳照度仪在定标距离处对准标准灯进行光谱扫描,得到仪器在 870 nm 有效带宽内的积分响应值 V,根据仪器接收到的光谱辐照度 E_{Lamp},以及仪器的相对于中心波长 λ_c 的光谱响应度 R_E^r,即可计算得到仪器的辐照度响应度 R_E,具体计算如公式(6)所示:

$$V=A \int_{\Delta\lambda} E_{Lamp}(\lambda)R_E(\lambda)d\lambda=R_E \frac{\int_{\Delta\lambda} E_{Lamp}(\lambda)R_E^r(\lambda,\lambda_c)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R_E^r(\lambda,\lambda_c)d\lambda} \quad (6)$$

Langley 法^[2]的定标实验是在敦煌辐射校正场进

行的(94.68° E, 40.14° N),定标当天大气状况相对稳定,太阳照度仪测得的电压 V 随大气质量 m 的变化如图 5 所示。

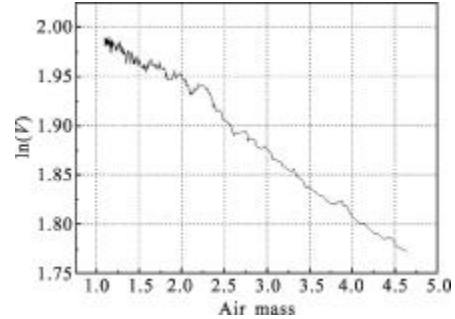


图 5 太阳光谱辐照度仪的大气质量-电压曲线

Fig.5 Air mass-voltage curve of solar irradiance spectroradiometer

根据比尔-朗伯定理,通过线性拟合可获得大气外界太阳照度仪对应的仪器响应电压 V₀,与理论的大气层外的太阳辐照度进行比较,即可得到仪器的辐照度光谱响应度:

$$R_E = \frac{V_0}{E_{sun}} = \frac{V / \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \cdot \exp[-m\tau]}{E_{sun}} \quad (7)$$

式中:d₀/d 为日地校正系数;m 和 τ 分别为大气质量以及大气光学厚度,其中大气层顶辐照度 E_{sun} 采用美国材料试验协会(ASTM)2000 年大气层顶的太阳光谱数据^[11]。

根据公式(6)和公式(7),可以分别计算得到标准灯法以及 Langley 法的定标结果,如表 2 所示。

表 2 光谱辐照度响应度比对

Tab.2 Comparison between irradiance responsivity

Method	Irradiance responsivity /V·μW ⁻¹ ·cm ²	Difference
Based on tunable laser	0.087 65	-
Based on lamp	0.085 17	2.841%
Langley	0.084 07	4.084%

基于可调谐激光器的定标方法,与标准灯定标和 Langley 法定标比对,也就是溯源于低温辐射计的辐射标准,与溯源于黑体辐射源和大气层顶的太阳理论光谱辐照度之间的比对。标准灯在 870 nm 自身的不确定度为 1.4%~3.7%,定标过程中还存在距离、仪器的稳定性等不确定度来源,2.841%的比对结果偏差在其不确定度范围内;Langley 法使用的大气层

顶的太阳照度谱数据的不确定度为 2%^[1], 拟合的相关系数为 0.983, 说明定标场地的天气状况、气溶胶稳定性等不严格满足 Langley 法的定标要求, 另外也存在温度、仪器的稳定性等不易定量评估的不确定因素, 所以 4.084% 的定标偏差在允许的偏差范围之内, 和滤光片辐亮度计的 Langley 定标偏差在一个水平上 (小于 5%)^[25], 由此可以证明文中的定标方法是合理的。

4 结 论

文中提出的使用可调谐激光器来进行系统级定标的方法, 可以使太阳光谱辐照度仪的定标不确定度优于 0.882%, 通过与基于标准灯和 Langley 法的定标方法比较, 在 870 nm 波段的定标结果与溯源于黑体辐射源和大气层顶的理论太阳辐照度的比对偏差在 4% 以内, 证明了这种定标方法的可行性。该室内定标法可以作为一种独立的手段提供与室外定标方法的比对数据, 评估仪器的性能并且量化多种误差源对太阳辐射的观测的影响, 对建立太阳光谱观测仪器的高精度定标技术流程, 推动高精度定标技术、太阳辐射观测、遥感信息量化的应用等具有重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian, et al. Inverse method on atmospheric aerosol scattering phase function[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3050-3054. (in Chinese)
韩永, 饶瑞中, 王英俭, 等. 大气气溶胶散射相函数反演算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3050-3054.
- [2] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66(1): 1-16.
- [3] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1119-1125. (in Chinese)
刘李, 顾行发, 余涛, 等. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场地定标与验证[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1119-1125.
- [4] Li Jianyu, Xu Qingshan, Zhan Jie, et al. Atmospheric precipitable water vapor at several typical zones in China [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3055-3060. (in Chinese)
李建玉, 徐青山, 詹杰, 等. 中国部分典型地区大气可降水量特性遥感研究 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3055-3060.
- [5] Souaidia N, Pietras C, Fargion G, et al. Comparison of laser-based and conventional calibrations of sun photometers[C]// *SPIE*, 2003, 5155: 61-72.
- [6] Kindel B C, Qu Z, Goetz A F H. Direct solar spectral irradiance and transmittance measurements from 350 to 2 500 nm[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3483-3494.
- [7] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(32): 8218-8237.
- [8] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, et al. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749-752. (in Chinese)
郑小兵, 吴浩宇, 章俊平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器 [J]. *光学学报*, 2001, 21(6): 749-752.
- [9] Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, et al. Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1 064 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6273-6278. (in Chinese)
李建军, 郑小兵, 卢云君, 等. 硅陷阱探测器在 350~1 064 nm 波段的绝对光谱响应度定标 [J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6273-6278.
- [10] Sheng Jianjun, Zhang Liming, Zheng Xiaobing, et al. Optical method for accurate measurement on the area of aperture diaphragm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 534-537. (in Chinese)
盛建军, 张黎明, 郑小兵, 等. 精确测量孔径光阑面积的光学方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 534-537.
- [11] American Society for Testing and Materials. 2000 ASTM standard extraterrestrial spectrum reference E-490-00 [EB/OL]. [2013-03-12]. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>.