

文章编号: 0253-2239(2010)05-1337-06

太阳辐射计先进定标方法研究

徐秋云 郑小兵 张 伟 王先华

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

摘要 利用自行研制的光谱辐亮度响应度定标系统对 CIMEL CE318 的天空散射通道进行绝对定标, 对于无偏 675, 870 和 1020 nm 和三个偏振 870 nm 通道合成标准不确定度优于 1%。对于同一台太阳辐射计, 定标系数与 NASA 的相对偏差在 $\pm 1.4\%$ 以内, 说明了定标结果的可靠性。

关键词 光度学; 辐亮度响应度; 定标太阳辐射计; 积分球

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1337

Advanced Calibration Method for Sun Radiometers

Xu Qiuyun Zheng Xiaobing Zhang Wei Wang Xianhua

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

Abstract A CIMEL CE318 is calibrated by using a new tunable laser-based facility for spectral radiance responsivity with combined standard uncertainties lower than 1%. The same CE318 is also calibrated by using a NASA lamp-illuminated integrating sphere source. Relative deviations between NASA and our calibration coefficients are within $\pm 1.4\%$; which indicates that the proposed method is accurate.

Key words photometry; radiance responsivity; calibration sun radiometers; integrating sphere

1 引 言

由于气溶胶与大气之间具有直接和间接的辐射作用以及它们对大气修正算法的影响, 正确理解和描述气溶胶非常关键。太阳辐射计在分离波长下对气溶胶进行被动遥感观测, 可以得到气溶胶光学厚度(来自太阳辐照度)和相函数、单次散射反照率、复折射指数和粒子尺度分布(来自天空辐亮度的角度分布)。因为反演过程的非线性和其它效应的影响, 比如表面反射的辐通量、点误差、云层屏蔽、气溶胶分布和模型假设等等, 上述参数的精度与辐射测量不确定度之间的关系是非常复杂的。

利用实验室标准定标太阳辐射计很有意义, 不仅可以独立地评估仪器的稳定性, 还可以评价大气外太阳辐照度测量的不确定度和有效性。对参考太

阳辐射计进行详细表征和定标可以提供更多的比对数据, 还可以量化其它误差源, 比如辐射响应温度的依赖性(外场应用中环境温度变化比较大)^[1]。

太阳辐射计的观测包括两种完全不同的模式, 辐照度测量模式和辐亮度测量模式, 前者指太阳直射辐照度测量, 后者包括天空散射辐亮度和日晕测量。太阳辐射计观测网络^[2,3]提供气溶胶光学厚度、气溶胶单次散射反照率和粒子尺度谱分布等数据产品。现有辐照度响应度定标方法是在高海拔点利用 Langley-Bouguer 技术^[4,5]定标初级参考太阳辐射计, 然后采用交叉定标技术相对初级参考太阳辐射计定标用户辐射计。辐亮度响应度则利用实验室内置灯积分球光源进行定标, 联合标准不确定度为 3%~5%^[6]。积分球光源的辐亮度通过灯-板系统传递。

收稿日期: 2009-05-22; 收到修改稿日期: 2009-07-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z106)资助课题。

作者简介: 徐秋云(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事光谱辐照度和辐亮度响应度高精度定标等方面的研究。

E-mail: qyxu@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事卫星传感器定标方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

本文采用自行研制的光谱辐亮度响应度定标系统定标 CIMEL 公司太阳辐射计 CE318-2(CE318)。定标光源是新型的外部导入可调谐激光的积分球光源,具有稳定性好、波长精度高、波长在宽波段范围内可调谐等优点,结合溯源于低温辐射计的标准探测器,可以在辐亮度模式下对滤光片辐射计进行整机定标。CE318 是多通道滤光片辐射计,天空散射观测功能标称中心波长分别为 440, 675, 870 和 1020 nm,其中 870 nm 包括一个非偏振通道和三个偏振通道,标称通道带宽为 10 nm。日晕观测包括三个偏振通道之外的其它通道。定标了 CE318 的 675, 870 和 1020 nm 通道的光谱辐亮度响应度,计算定标系数并与美国国家航空航天局(NASA)对同一台仪器的定标结果进行比对。虽然天空散射和日晕观测都是辐亮度测量,但是它们使用不同的准直筒和探测器。实验结果表明日晕定标系数与 NASA 结果的相对偏差比天空散射定标系数略大,可能是由于日晕观测功能的增益阻抗较小引起的。本系统不仅有效降低了太阳辐射计辐亮度观测模式的定标不确定度,而且可以作为一种新的、独立的手段提供定标系数比对数据,也为实验室定标辐照度观测模式积累了经验。

2 光谱辐亮度响应度定标系统

定标系统由定标光源和传递标准组成。定标光源是外部导入可调谐激光的积分球光源,这种新型光源相对传统的内置灯积分球光源具有光谱辐通量高、波长准确性好、光谱带宽窄和波长可调谐等优点。标准辐亮度探测器由硅陷阱探测器(trap)^[7]和精密光阑组成,其中硅陷阱探测器的光谱辐通量响应度溯源于初级辐射标准低温辐射计。标准传递链较短是本系统定标精度高的主要原因。

2.1 外部导入激光的积分球光源

积分球光源由积分球和球内旋转漫射板组成。旋转漫射板用来消除由于激光空间相干性产生的散斑,提高光辐射场的均匀性和稳定性。采用外部激光双光路导入方式提高积分球光源出射光的角分布均匀性。关于这种新型积分球光源的设计和辐射特性研究,参考文献[8]和[9]分别做过详细介绍,这里不再复述。图 1 是利用可调谐激光的光谱辐亮度响应度定标系统示意图。

2.2 标准传递方法

采用光谱替代法把标准辐亮度探测器的响应度传递到 CE318。

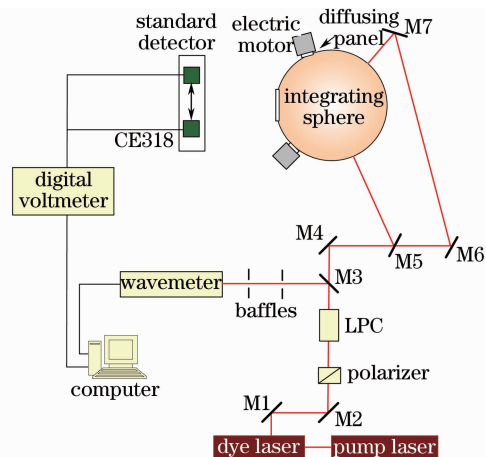


图 1 利用可调谐激光的光谱辐亮度响应度定标系统
Fig. 1 Tunable laser-based facility for spectral radiance responsivity calibration system

对于标准辐亮度探测器,有

$$R'_L(\lambda) = \frac{\pi^2 a^2 c^2}{H^2} R_\dagger(\lambda), \quad (1)$$

式中 $R'_L(\lambda)$ 是标准探测器的光谱辐亮度响应度, $R_\dagger(\lambda)$ 是硅陷阱探测器溯源于低温辐射计的光谱辐通量响应度, a 和 c 分别是孔径光阑和视场光阑的半径, H 是孔径光阑与视场光阑之间的距离。

硅陷阱探测器的增益阻抗是多档可调的,相对低温辐射计定标时是 9968.6 Ω (标称值 10 k Ω),而太阳辐射计定标实验中使用的是 99951515 Ω (标称值 100 M Ω)。因此标准探测器的光谱辐亮度响应度为

$$R_L(\lambda) = \frac{99951515}{9968.6} R'_L(\lambda). \quad (2)$$

标准传递过程用下列公式表示:

$$V(\lambda) = L(\lambda) R_L(\lambda), \quad (3)$$

$$f_{DN}(\lambda) = L(\lambda) R_{CE}(\lambda), \quad (4)$$

式中 $V(\lambda)$ 是标准探测器在波长 λ 下的输出电压; $L(\lambda)$ 是积分球光源的辐亮度[单位: W/(m² · sr)]; $f_{DN}(\lambda)$ 是 CE318 的响应 DN 值; $R_{CE}(\lambda)$ 是 CE318 的光谱辐亮度响应度。

将(3)式代入(4)式,

$$R_{CE}(\lambda) = \frac{f_{DN}(\lambda)}{V(\lambda)} R_L(\lambda). \quad (5)$$

定标过程中首先使标准探测器测量积分球光源,每次测量采样 10 次取平均,然后移动电控平移台使 CE318 对准积分球出口中心进行测量,每次测量采样 3 次取平均。测量信号减去背景噪声为该波长下辐射计的响应信号。改变激光波长,重复上述测量步骤。每个通道以 1 nm 为间隔在通道中心波长 ± 10 nm 范围内测量 21 个波长点。

3 太阳辐射计定标实验

3.1 光谱辐亮度响应度定标结果

下面给出天空散射 675 nm 通道、四个 870 nm 通道(包括一个无偏通道和三个偏振通道;P1,P2,

P3)和 1020 nm 通道的光谱辐亮度响应度定标结果 [如图 2(a)~(f)所示]。为了比较测量的重复性,把光谱响应度插值在整数波长下。插值方法为分段线性插值。

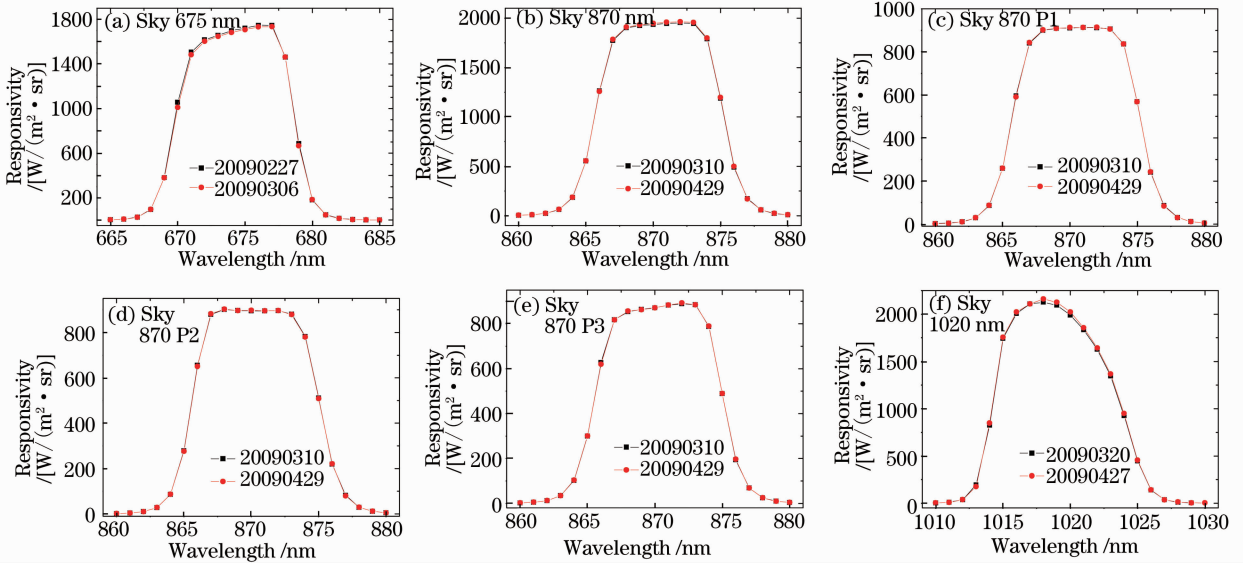


图 2 CE318 绝对光谱响应度定标结果

Fig. 2 Calibration result of CE318's absolute spectral responsivity

3.2 定标系数计算和比对

实验是在 CE318 经 NASA 定标之后没有进行外场测量的条件下进行的,可以认为仪器的状态没有发生改变。与 NASA 定标结果进行比对可以验证新型定标技术的可靠性。根据下列公式进行定标系数的比对:

$$R = \frac{L_{\lambda}(\lambda_0)}{f_{DN}} = \frac{L_{\lambda}(\lambda_0)}{\int [R_{CE}(\lambda)L_{\lambda}(\lambda)d\lambda]} = \frac{L_{\lambda}(\lambda_0)}{L_{\lambda}(\lambda_0) \int R_{CE}(\lambda)[L_{\lambda}(\lambda)]/[L_{\lambda}(\lambda_0)]d\lambda} = 1 / \left[\int R_{CE}(\lambda)L_{\lambda}^r(\lambda)d\lambda \right], \quad (6)$$

式中 R 是 NASA 给出的定标系数,由内置灯积分球光源定标; $L_{\lambda}(\lambda)$ 是内置灯积分球光源的光谱辐亮度 [单位: $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$]; $L_{\lambda}(\lambda_0)$ 是内置灯积分球光源在 CE318 某通道中心波长 λ_0 处的光谱辐亮度; L_{λ}^r 是内置灯积分球光源的相对光谱辐亮度。

假定内置灯积分球光源在 10 nm(CE318 标称通道带宽)波段范围内的相对光谱辐亮度 $L_{\lambda}^r \approx 1$,则可以计算定标系数 $1/\int R_{CE}(\lambda)d\lambda$ 并与 NASA 进行比对,定标系数相对偏差按照(7)式计算

$$f_R = \left[R - 1 / \int R_{CE}(\lambda)d\lambda \right] / R, \quad (7)$$

在测量的 20 nm 波段范围内进行积分。

CE318 曾于 2007 年的 8 月份在法国里尔科学技术大学大气光学实验室(LOA)定标过,定标光源同 NASA 一样,是灯照明积分球光源。表 1 给出对于同一台仪器,NASA,LOA,中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室(KLOCC)的四次定标结果。

比较表 1 中的四次定标结果,以 NASA 的测量数据为标准,计算相对偏差,比对结果如表 2 所示。表 2 中前两列分别按照 $(R - R_{LOA})/R$, $(R - R_{KLOCC})/R$ 计算,第三列按照(7)式进行计算。

由表 2 可以看出相对偏差均在 4.1% 以内,说明各种方法之间的可比性。总的来说,KLOCC 的激光照明积分球光源与 NASA 的定标结果最接近,其中四个 870 nm 通道与 NASA 的相对偏差最小,可能是因为在这个波段激光功率较高,仪器的信噪比较大。NASA 的定标结果代表太阳辐射计定标的最高精度,比对结果表明新型实验方法的可靠性。

表 1 CE318 的四次定标结果

Table 1 Four calibration results of the CE318

Channel	Calibration coefficients $R/10^{-5}$			
	NASA/100 (2009/02/09)	LOA (2007/08/29)	KLOCC lamp-sphere (2009/05/12)	KLOCC laser-sphere (2009/02/27~2009/05/04)
675 nm	6.474	6.406	6.372	6.386
870 nm(P1)	11.12	11.08	10.72	11.04
870 nm(P2)	11.27	11.16	10.87	11.172
870 nm	5.213	5.124	5.035	5.18
870 nm(P3)	11.55	11.41	11.14	11.46
1020 nm	5.06	4.971	4.854	5.13

表 2 定标系数与 NASA 的相对偏差(%)

Table 2 Calibration coefficients' relative deviations with the results of NASA

Channel	LOA (2007/08/29)	KLOCC lamp-sphere (2009/05/12)		KLOCC laser-sphere (2009/02/27~2009/05/04)	
675 nm	1.06	1.58	1.35		
870 nm(P1)	0.39	3.61	0.74		
870 nm(P2)	0.91	3.57	0.84		
870 nm	1.71	3.41	0.63		
870 nm(P3)	1.13	3.52	0.76		
1020 nm	1.76	4.07	-1.39		

3.3 比较光谱响应度与滤光片光谱透射比廓线

以 870 nm 和 1020 nm 通道为例比较 CE318 的光谱辐亮度响应度曲线与滤过片光谱透射比廓线(2005 年厂家提供的数据)。

从图 3 看出与滤光片光谱透射比相比较,光谱

响应度曲线向长波方向有微小偏移,这可能是由于经过多年野外试验,滤光片衰变引起的。滤光片自身的衰变引起定标系数发生改变,正是由于这一点所以需要定期对太阳辐射计进行定标。

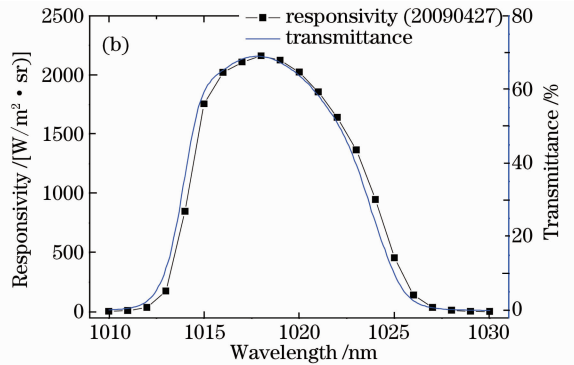
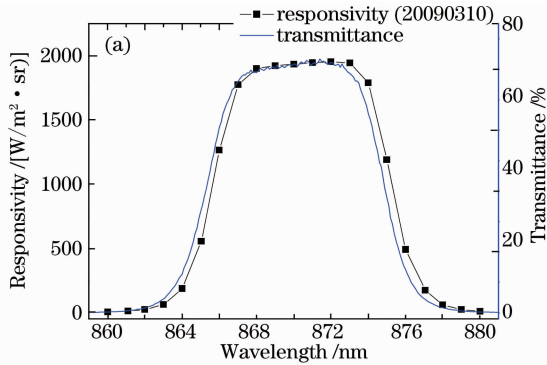


图 3 比较光谱响应度曲线和滤光片光谱透射比。(a)870 nm;(b)1020 nm

Fig. 3 Spectral responsivities and filter transmittance profiles of different channels. (a)870 nm;(b)1020 nm

分别根据(8)式和(9)式计算通道的中心波长和带宽:

$$\lambda_c = \int \lambda R_{CE}(\lambda) d\lambda / \left[\int R_{CE}(\lambda) d\lambda \right], \quad (8)$$

$$\Delta\lambda = \int R_{CE}(\lambda) d\lambda / [R_{CE}(\lambda_c)], \quad (9)$$

式中 $R_{CE}(\lambda_c)$ 是通道中心波长处的光谱辐亮度响应度。计算结果如表 3 所示。

3.4 定标结果验证

CE318 测量灯照射积分球光源,比较预测信号

和实测信号以验证上述光谱辐亮度响应度定标结果。预测信号计算如下:

$$S_p(f_{DN}) = \int L_\lambda(\lambda) R_{CE}(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

灯照射积分球光源的光谱辐亮度由灯-板系统传递,如图 4 所示。采用三次样条插值法得到灯照射积分球光源在 CE318 定标波长点的光谱辐亮度。比较结果如表 4 所示。

表 3 根据光谱响应度计算的通道中心波长和带宽

Table 3 Central wavelengths in channel and bandwidths of the filter channels

Channel	Data	Central wavelength /nm	Bandwidth /nm
675 nm	2009/02/27	674.32	9.21
	2009/03/06	674.33	9.20
870 nm (P1)	2009/03/10	870.48	9.95
	2009/04/29	870.48	9.92
870 nm (P2)	2009/03/10	870.35	10.00
	2009/04/29	870.34	9.96
870 nm	2009/03/10	870.47	9.93
	2009/04/29	870.47	9.92
870 nm (P3)	2009/03/10	870.33	10.02
	2009/04/29	870.33	10.02
1020 nm	2009/03/20	1018.98	9.32
	2009/04/27	1019.00	9.29

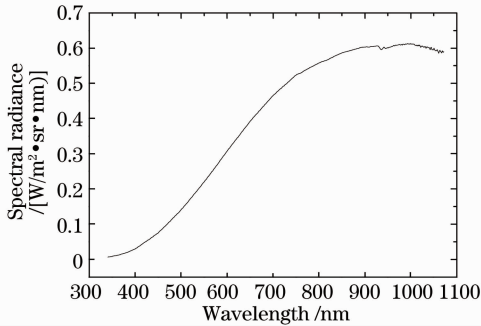


图 4 灯照射积分球光源的光谱辐亮度

Fig. 4 Spectral radiance from lamp-illuminated integrating sphere source

表 4 实测 S_m 和预测 S_p 信号的相对偏差Table 4 Relative deviation between measured signal S_m and predicted signal S_p

Channel	$\frac{S_m - S_p}{S_m} / \%$
675 nm	1.60
870 nm (P1)	2.72
870 nm (P2)	2.49
870 nm	3.30
870 nm (P3)	2.64
1020 nm	4.38

3.5 不确定度分析

光谱辐亮度响应度定标不确定度来自标准探测器的定标精度、定标光源的辐射特性以及标准传递过程。表 5 分析了所有的不确定度来源,对于每个不确定性因素,相对标准不确定度按照同一个量多次测量的平均值的相对标准偏差计算:

$$u_x = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] / [n(n-1)]}, \quad (11)$$

式中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (12)$$

表示对于同一个量采用多次测量的平均值。

合成标准不确定度按下式计算

$$U = \sqrt{U_{x1}^2 + U_{x2}^2 + \dots + U_{xm}^2} \quad (13)$$

表 5 光谱辐亮度响应度定标不确定度

Table 5 Uncertainty for spectral radiance responsivity calibration

Uncertainty components		Relative standard uncertainties / 10^{-5}		
Standard detector responsivity	Trap radiant power responsivity	675 nm	41.1	
		870 nm	41.5	
		1020 nm	41.1	
	Responsivity interpolation I-V gain Aperture stop area Field stop area Distance between the two stops			152.0
				55.7
				335
				290
				27.8
	Source characteristics	Wavelength /nm	675	20.0
			870	0.231
1020			1.70	
Radiance stability			24.9	
Planar uniformity			24.5	
Angular uniformity			49.0	

(续表 5)

Uncertainty components	Relative standard uncertainties	
	/10 ⁻⁵	
CE318 stability	SKY 675 nm	5.10
	Sky 870 nm (P1)	24.6
	Sky 870 nm (P2)	33.1
	Sky 870 nm	5.00
	Sky 870 nm (P3)	11.1
	Sky 1020 nm	17.4
Combined standard uncertainty	675 nm	479
	Sky 870 nm (P1)	479
	Sky 870 nm (P2)	479
	Sky 870 nm	478
	Sky 870 nm (P3)	478
	Sky 1020 nm	479

由表 5 可以看出,标准探测器光谱辐亮度响应的测量不确定度是定标太阳辐射计最大的不确定度来源。如果各个不确定性因素的标准不确定度按照多次采样的相对标准偏差计算:

$$u_x = \frac{1}{x} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}, \quad (14)$$

对于所有通道最终的合成标准不确定度优于 0.77%。

4 结 论

太阳辐射计广泛应用于气溶胶的观测,因此降低太阳辐射计的定标不确定度对于提高大气辐射特性反演的精度具有重要意义。本文利用自行研制的光谱辐亮度响应度定标系统表征了 CIMEL CE318 的天空散射观测模式。研究的意义在于定标光源即外部导入可调谐激光的积分球光源具有面积大、光谱辐通量高、波长准确性好和光谱带宽窄等优点,完全满足滤光片辐射计的观测要求。标准探测器的光谱辐通量响应度溯源于高精度初级辐射标准低温辐射计。标准传递链短是提高定标精度的重要因素。通过与 NASA 的定标系数进行比对,以及利用灯照射积分球光源对定标结果的验证充分说明了这种新型定标技术的可靠性。

参 考 文 献

1 Nordine Souaidia, Christophe Pietras, Giulietta Fargion *et al.*. Comparison of laser-based and conventional calibrations of sun

- photometers[C]. *SPIE*, **5155**: 61~72
- 2 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): 1~16
- 3 T. Takamura, T. Nakajima. Overview of SKYNET and its activities [J]. *Opt. Pura. Appl.*, 2004, **37**: 3303~3308
- 4 G. E. Shaw, J. A. Reagan, B. M. Herman. Investigations of atmospheric extinction using solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1973, **12**(2): 374~380
- 5 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometers system applied to aerosol robotic network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 6 C. Pietras, M. Miller, R. Frouin *et al.*. 2001: Calibration of sun photometers and sky radiance sensors. In *Situ Aerosol Optical Thickness Collected by the SIMBIOS Program (1997~2000): Protocols, and Data QC and Analysis* [S]. G. S. Fargion, and C. McClain Eds., 2001, NASA's Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD. 76~90
- 7 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
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平等. 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
- 8 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Li Jianjun *et al.*. Development of laser illuminated integrating sphere source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 738~744
徐秋云, 郑小兵, 李健军等. 外部导入激光的积分球辐射源的研制 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 738~744
- 9 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1310~1314
徐秋云, 郑小兵, 张伟等. 利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1310~1314