

doi:10.3788/gzxb20184710.1012003

地基太阳光谱辐照度计的余弦误差 影响及其校正方法

刘振海^{1,2}, 骆冬根¹, 张运杰¹, 韦玮¹, 张艳娜¹, 邹鹏¹, 董浩¹, 洪津¹

(1 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, 合肥 230031)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:针对自研的太阳光谱辐照度计入射光学系统的结构特征,分析了引入余弦误差的因素,研究了直、漫射辐照度以及漫射-总辐射比的余弦校正方法,开展了实验室余弦响应特性测量和多种仪器的敦煌外场比对试验.结果显示,余弦误差与积分球入口黑色阳极化内壁及结构有关,在入射角为 60° 时,440 nm、500 nm、670 nm 和 870 nm 波段太阳光谱辐照度计的余弦误差为 $4.3\% \sim 9.1\%$;由太阳光谱辐照度计获取的直射辐照度反演得到的大气光学厚度受到余弦误差的严重影响,余弦校正前后与 CE318 太阳光度计反演结果相比,偏差分别为 $0.11 \sim 0.13$ 和小于 0.012 ;基于天空辐亮度各向同性分布假设,余弦校正后四个波段漫射辐照度数值提升 $6.8\% \sim 10\%$.基于天空辐亮度分布数据,提出了一种漫射辐照度的精确校正方法,仿真结果显示,余弦校正后的漫射辐照度与理论数据一致,初步验证了该方法的可行性.

关键词:太阳光谱辐照度计;余弦误差;余弦校正;漫射辐照度;漫总比;天空辐亮度分布

中图分类号:TP732; P414.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2018)10-1012003-13

Cosine Error Influence of Ground-based Solar Spectral Irradiance Meter and Its Correction Method

LIU Zhen-hai^{1,2}, LUO Dong-gen¹, ZHANG Yun-jie¹, WEI Wei¹,
ZHANG Yan-na¹, ZOU Peng¹, DONG Hao¹, HONG Jin¹

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: According to the structural characteristics of the entrance optics of self-developed solar spectral irradiance meter, the factors that introduce cosine error were analyzed. The cosine correction methods of direct irradiance, diffuse irradiance and diffuse-to-global ratio were studied. Laboratory measurements of cosine characteristic of solar spectral irradiance meter and a field campaign in Dunhuang with a variety of instruments involved were carried out. The results show that the cosine error is related to the structure and the black anodized inner wall of the input aperture, and it ranges from $4.3\% \sim 9.1\%$ at the incident angle of 60° at 440 nm, 500 nm, 670 nm and 870 nm. Atmospheric optical thickness of the four bands retrieved from the direct irradiance obtained by solar spectral irradiance meter is severely affected by the cosine error, and the deviation of the atmospheric optical thickness before and after cosine correction is $0.11 \sim 0.13$ and smaller than 0.012 , respectively, compared with the CE318 sun photometer inversion

基金项目:中国科学院联合基金(No.6141A01011602)和民用航天技术预研项目(No. D040401)资助

第一作者:刘振海(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为光学遥感及光电探测技术. Email: lzhenhai@aiofm.ac.cn

导师(通讯作者):洪津(1969—),男,研究员,学士,主要研究方向为光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术. Email: hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期:2018-03-22; **录用日期:**2018-07-13

<http://www.photon.ac.cn>

results. Four-band diffuse irradiance increases by 6.8%~10% after cosine correction by assuming an isotropy distribution of sky radiance. Based on the sky radiance distribution data, an accurate correction method for diffuse irradiance was proposed. The simulation shows that the diffuse irradiance after cosine correction is in good agreement with the theoretical result, which proves the feasibility of the method.

Key words: Solar spectral irradiance meter; Cosine error; Cosine correction; Diffuse irradiance; Diffuse-to-global ratio; Distribution of sky radiance

OCIS Codes: 120.5630; 120.6200; 010.0280; 010.1290

0 引言

目前针对大气污染和气候变化的监测手段主要是采用卫星和地面遥感设备.地基太阳光谱辐照度计获取的直、漫射辐照度、总辐照度以及反演得到的大气光学参数,可用于气象观测与气候研究、大气污染监测以及卫星光学遥感器的有效性验证等,特别是基于辐照度基法的光学遥感器的在轨替代定标^[1-2].

具有代表性的辐照度观测仪器包括基于单色仪的漫射器型紫外/可见光谱辐射计 Brewer MKIII/MKIV^[3]和基于双全息凹面光栅的积分球型便携式高精度光谱辐射计 OL756/754^[2]等.这类仪器的角度响应理论上与光线入射方向和水平面法向夹角的余弦成比例,而实际角度响应往往与理想的余弦响应存在偏差,即为余弦误差.黄勃等^[4]对常见的紫外辐照度计进行了专门测试,结果显示,当入射角为 $\pm 60^\circ$ 时 UVC (Ultraviolet C, UVC)波段余弦误差均超过 20%,而且,即便使用最先进的入射光学系统,余弦误差仍然是影响地基光谱辐照度测量精度的重要不确定度来源^[5]. MILBURN D I 等^[6]根据积分球型光谱辐射计的光学入口几何特征建立数学模型;张保洲等^[7]给出了积分球入口为垂直切口,且入口内壁采用聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE)涂层条件下的余弦误差模型.其他研究工作还包括积分球入口结构^[7-8,14]、漫射式余弦校正器材料及形状结构^[9-11]等方面,以求得较小的余弦误差以及较低的角度和波长依赖性.

辐照度观测仪器的余弦误差在一定条件下可以进行校正.对于太阳直射辐照度,由于太阳天顶角能够确定,可以直接使用实验室测量的仪器角度响应结果进行余弦校正;而天空漫射辐照度的余弦校正则比较复杂,影响因素包括大气条件(云量、气溶胶含量等)、天空偏振、地-气耦合以及天顶角和方位角等^[12-13].天空漫射辐照度的余弦校正方法可以分为两类:一类是假设天空辐亮度分布为各向同性条件下的漫射辐照度的余弦校正^[8,12,15-19],因其校正系数为常量,并不能准确反映真实情况,但对于余弦误差较大的仪器,该方法仍可以提高漫射辐照度的测量精度^[12];另一类是通过辐射传输模型计算^[4,20-21]或通过辐射计实测天空辐亮度分布^[12,22]来进行漫射辐照度校正.目前研究工作绝大部分集中在紫外波段,但随着波长增长天空辐亮度分布更趋各向异性,基于各向同性假设引入的误差在可见波段要比紫外波段大^[12].

本文结合中科院安徽光学精密机械研究所研制的太阳光谱辐照度计 (Solar Spectral Irradiance Meter, SSIM),分析了引入的余弦误差的影响因素,并进行了实验室余弦响应特性测试;开展了多种仪器的外场联合试验,通过与 CE318 太阳光度计、太阳光谱辐照度仪 (Solar Irradiance Spectroradiometer, SIS)^[23]的结果比对,检验了可见-近红外波段太阳直射辐照度的余弦校正效果;进行了基于天空各向同性分布假设下漫射辐照度和漫总比的余弦校正;最后,提出一种基于天空辐亮度实测结果进行漫射辐照度精确校正的方法,并通过仿真进行了可行性验证.

1 仪器、模型和方法

1.1 仪器

本文所讨论的 SSIM 光学系统与 OL754/756 类似,采用积分球作为入射光学系统、平场凹面光栅进行分光,在可见-近红外波段(400~1 000 nm)光谱分辨率优于 4 nm,信噪比大于 600@600 nm.通过仪器的太阳跟踪机构控制挡光球可实现太阳直射辐射的精确遮挡,可在无人值守条件下实现漫射辐照度和总辐照度的自动观测,这是与 Brewer MKIII/MKIV 和 OL754/756 等典型辐照度测量仪器的主要区别.漫射辐照度和总辐照度单周期测量时间不超过 20 s,最小可设置测量周期为 1 min.积分球入口直径为 12 mm,挡光球为黑色实心小球,直径为 16 mm,工作过程中在天顶角 $0^\circ\sim 75^\circ$ 范围内,挡光球到积分球口的距离不小于 25 cm,则挡光球视场(FOV)不大于 3.66° ,比文献^[25]中设置更小,相应天空漫射遮挡误差更低.SSIM 整体效果和入射光学系统局部视图如图 1 所示.

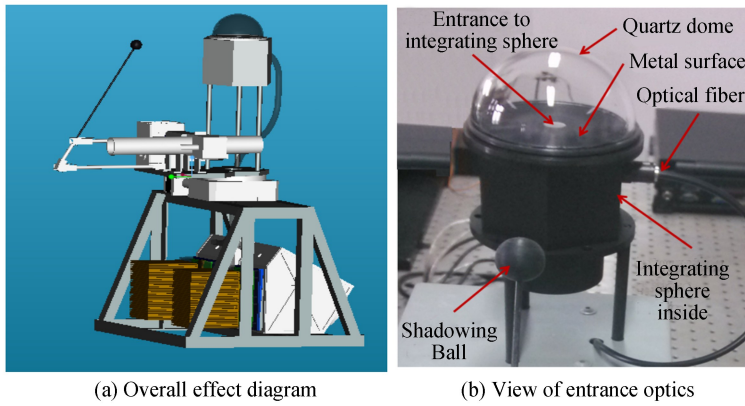


图 1 SSIM 视图
Fig.1 View of SSIM

1.2 余弦误差

对于辐照度观测仪器,其入射光学系统决定着仪器的余弦误差^[8,13,19].理想情况下,均匀平行光以角度 θ 入射时光谱辐照度计的响应 $s(\theta)$ 应该与角度的余弦成比例,即 $s(\theta) = s(0) \cos \theta$,其中 $s(0)$ 表示光线入射角为 0° 时仪器的响应.忽略仪器方位角依赖性,记实际角度响应为 $f(\theta)$,有 $f(\theta) = s(\theta)/s(0)$,则余弦误差表示为 $f(\theta)$ 与 $\cos \theta$ 的相对偏差,即

$$e(\theta) = \left[\frac{s(\theta)}{s(0) \cos \theta} - 1 \right] \times 100\% \quad (1)$$

SSIM 积分球入口结构示意图如图 2 所示.积分球口为 0.71 mm 厚的铝合金材料,外表面及球口内壁黑色阳极化,入口直径为 12 mm,积分球内部涂层材料为 PTFE.当光线以一定角度入射时,积分球口内壁会遮挡部分入射光,从而导致余弦误差.

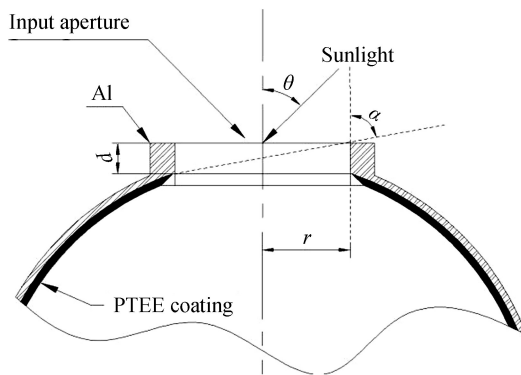


图 2 积分球入口结构示意图
Fig.2 Inlet structure diagram of integrating sphere

对积分球口壁厚引起的余弦误差建模,假设内壁反射率为零,则理论余弦误差为^[6]

$$e_r(\theta) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{d}{2r} \tan \theta \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r} \tan \theta \right)^2} + \arctan \frac{\frac{d}{2r} \tan \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r} \tan \theta \right)^2}} \right] \quad (2)$$

式中, r 为积分球入口半径, d 为球口壁厚, θ 为光入射角度.

由图 2 可以看出, α 限定了积分球入口的最大入射角.令 $\tan \alpha = 2r/d$, $x(\theta) = \tan \theta / \tan \alpha$,则利用三角变换,式(2)可以进一步改写为

$$e_r(\theta) = 1 - \frac{2}{\pi} \{ \arccos [x(\theta)] - x(\theta) \cdot \sqrt{1 - [x(\theta)]^2} \} \quad (3)$$

当 $x(\theta) = 1$,即 $\theta = \alpha$ 时,入射光将全部被遮挡,此时理论余弦误差 $e_r(\theta) = 1$,达到最大.

实际上,黑色阳极化的内壁仍有一定的反射率.假设实测的余弦误差为 $e_m(\theta)$,则 $\Delta e(\theta) = e_r(\theta) - e_m(\theta)$,即表示经内壁反射后进入积分球内的辐射量.黑色阳极化铝合金内壁反射特征应为混合反射,则实测与理论余弦误差的比值应不是常量,与内壁 PTFE 涂层时比值为 $1/2^{[6]}$ 不同.定义 $\Delta e'(\theta) = \Delta e(\theta)/[1 - e_m(\theta)]$,则可以分析进入积分球的总辐射量中反射光占比.

1.3 余弦校正

太阳光谱辐照度计实际测量的漫射辐照度和总辐照度分别记为 E'_d 、 E'_g ,而理想仪器测量的结果分别为 E_d 和 E_g ,对应的直射辐照度为总辐照度与漫射辐照度的差值,分别记为 E'_b 和 E_b .

1.3.1 直射辐照度余弦校正

定义直射辐照度的校正系数为 f_b ,表示为仪器实测的直射辐照度与理想仪器测量结果之比,即

$$f_b = \frac{E'_b}{E_b} = \frac{s(\theta)/R}{s(0)\cos(\theta)/R} = \frac{f(\theta)}{\cos\theta} \quad (4)$$

式中, R 为仪器在 0° 入射条件下的响应度定标系数, s 为仪器输出信号, $f(\theta)$ 为被测仪器的角度响应,其可以用经验公式表示为 $^{[18-19]}$

$$f(\theta) = (\cos\theta)^\alpha \quad (5)$$

1.3.2 漫射辐照度及漫总比余弦校正

定义漫射辐照度的校正系数为 f_d ,表示为仪器实测漫射辐照度与理想仪器测量结果之比,即 $^{[13]}$

$$f_d = \frac{E'_d}{E_d} = \frac{\iint L(\theta, \varphi) f_b(\theta) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi}{\iint L(\theta, \varphi) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi} \quad (6)$$

式中, $L(\theta, \varphi)$ 表示天顶角为 θ 、方位角为 φ 时的天空辐亮度分布.若假定天空辐亮度分布为各向同性,则式(6)可以消掉 $L(\theta, \varphi)$ 项,忽略方位角影响,并根据式(5)进一步简化为

$$f_d = \iint f_b(\theta) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi = 2 \int_0^{\pi/2} (\cos\theta)^\alpha \cdot \sin\theta d\theta = \frac{2}{1+\alpha} = \text{constant} \quad (7)$$

如果能获取并利用天空辐亮度实际分布数据将有助于实现漫射辐照度的精确校正.一种可行方案是采用全天光谱成像仪 $^{[26]}$ 配合挡光球 $^{[27]}$ 实现天空辐亮度分布测量.假设获得的天空辐亮度实际(相对)分布为 $L(\theta, \varphi)$,则在此(相对)分布下对于理想余弦响应有

$$I_d = \iint L(\theta, \varphi) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi = \int_0^{\pi/2} L(\theta) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta \quad (8)$$

式中 θ 和 φ 分别为天顶角和方位角, $L(\theta)$ 为对应天顶角 θ 时 $L(\theta, \varphi)$ 沿方位角的积分.其次,在此(相对)分布下对于实际角度响应有

$$I'_d = \iint L(\theta, \varphi) f_b(\theta) \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi = \iint L(\theta, \varphi) f(\theta) \cdot \sin\theta d\theta d\varphi = \int_0^{\pi/2} L(\theta) f(\theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (9)$$

忽略仪器的方位角依赖性,定义归一化因子 $N(\theta) = L(\theta)/I_d^{[30]}$,则由式(8)和(9)即可得到基于实际辐亮度(相对)分布下的漫射校正系数为

$$f_d = \frac{E'_d}{E_d} = \frac{I'_d}{I_d} = \int_0^{\pi/2} \frac{L(\theta)}{I_d} f(\theta) \cdot \sin\theta d\theta = \int_0^{\pi/2} N(\theta) f(\theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (10)$$

定义直漫比 r_{bd} 为理想仪器获得的直射辐照度与漫射辐照度之比,即

$$r_{bd} = \frac{E_b}{E'_d} = \frac{E_b/f_b}{E'_d/f_d} = \frac{E'_b}{E'_d} \cdot \frac{f_d}{f_b} \quad (11)$$

进而漫总比 r_{dg} 为

$$r_{dg} = \frac{E_d}{E_g} = \frac{E_d}{E_b + E_d} = \frac{1}{1 + r_{bd}} \quad (12)$$

1.4 大气光学厚度反演

大气光学厚度反演结果的比对可用于检验仪器余弦误差的影响 $^{[1,21]}$.非水汽吸收波段大气光学厚度的反演一般采用 Langley 法 $^{[23,28-29]}$,公式可以写成

$$\ln E(\lambda) = -\tau(\lambda) \cdot m + A_0 \quad (13)$$

式中, $E(\lambda)$ 为地面接收到的直射法向辐照度, A_0 为常量, $\tau(\lambda)$ 为总的大气消光光学厚度, m 为大气质量.

Langley 法的优点之一是可以只使用相对量, 如仪器输出电压值或 DN 值等. 假设仪器辐射定标系数为 $R(\lambda)$, 输出信号值为 $s(\lambda)$, 有 $E(\lambda) = s(\lambda)/R(\lambda)$, 对于直接测量太阳直射辐射的仪器, 式(13)变为

$$\ln s(\lambda) = -\tau(\lambda) \cdot m + A'_0 \quad (14)$$

式中, $A'_0 = A_0 + \ln R(\lambda)$.

辐照度仪器测量的直射辐照度 $E'_b(\lambda)$ 与直射法向辐照度 $E(\lambda)$ 的关系为

$$E(\lambda) = E'_b(\lambda) / \cos \theta_s \quad (15)$$

直射辐照度进行余弦校正后, 式(15)变为

$$E(\lambda) = [E'_b(\lambda) / f_b(\theta_s)] / \cos \theta_s = E'_b(\lambda) / f(\theta_s) \quad (16)$$

直接使用仪器的输出信号, 余弦校正前后式(14)可分别改写成

$$\ln \left[\frac{s(\lambda)}{\cos \theta_s} \right] = -\tau(\lambda) \cdot m + A'_0 \quad (17)$$

$$\ln \left[\frac{s(\lambda)}{f(\theta_s)} \right] = -\tau(\lambda) \cdot m + A'_0 \quad (18)$$

2 实验结果和讨论

2.1 实验室余弦响应测试

SSIM 的余弦响应测试在传统的辐照度定标平台上进行, 平台包括标准灯、光阑以及平行导轨等, 并增加转台用于角度控制. 转台角度精度为 $1'$, 转轴在导轨方向上, 距标准灯 50 cm , 辐照度计置于转台上, 调节辐照度计高度, 采用准直激光器调节标准灯灯丝中心和辐照度计积分球入口中心高度一致, 并调节积分球入口中心与转台转轴在垂直方向一致. 余弦响应测试原理如图 3 所示.

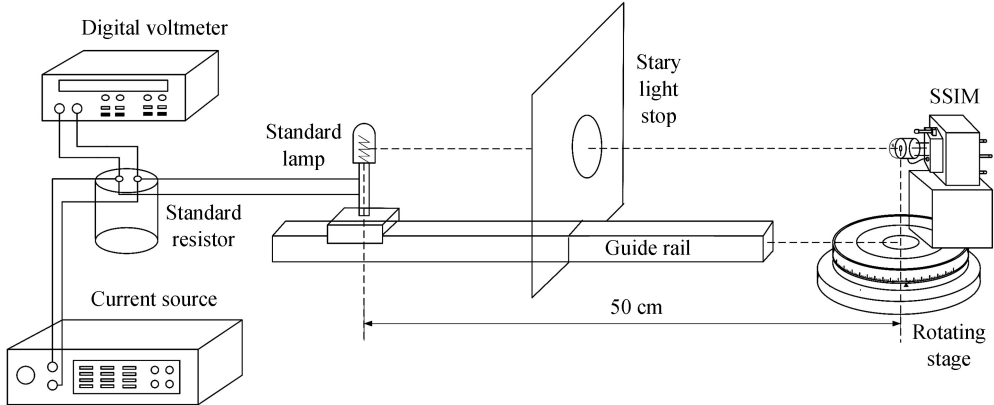


图 3 余弦响应测试平台原理

Fig.3 Schematic diagram of cosine response test bench

图 4(a) 显示了 SSIM 在 440 nm 、 500 nm 、 550 nm 、 670 nm 和 870 nm 波段的实测余弦响应, 根据式(5)拟合得到对应波段的参数 α 分别为 1.2137 、 1.2145 、 1.2185 、 1.221 和 1.1459 , 相应拟合优度 R^2 均大于 0.998 . 图 4(b) 显示了不同参数下理论余弦误差与 SSIM 实测余弦误差的比较结果. 由三条理论误差曲线可以看出, 增大积分球口尺寸 (或减小球口壁厚) 有助于减小余弦误差, 而增大壁厚 (或减小球口尺寸) 则会导致余弦误差增加, 亦可得出两者之比 $(2r/d)$ 增大则余弦误差降低, 比值降低则余弦误差增大. 然而, 球口尺寸不仅受限于积分球开口比, 还影响着用于漫射辐照度测量的挡光球大小, 球口尺寸越大则挡光球越大, 为了保证挡光球对应的视场角足够小, 在漫射辐照度的测量过程中需将挡光球放置在距离积分球口更远的位置, 这对于自动观测的设备来说无疑会增加难度. 比较而言, 减小积分球口壁厚则切实可行.

由理论余弦误差 (r, d) 与实测余弦误差对比曲线可以看出, 实测余弦误差在入射角小于 30° 时小于 1% , 而从入射角等于 30° 开始逐渐增大, 入射角达到 60° 时, $440 \sim 670 \text{ nm}$ 波段的余弦误差基本一致, 约为 9.1% , 而 870 nm 波段的余弦误差为 4.3% , 明显较小. 由黑色阳极化铝合金表面反射率数据可知, $300 \sim 680 \text{ nm}$ 波

段的反射率基本相同,约为2%~3%,从680 nm波段开始,反射率随着波长增加而增大,870 nm波段的反射率为39.6%。由此推断,黑色阳极化内壁反射的部分光线进入了积分球内部,并使得实测余弦误差比理论值小,且反射率越大,该补偿作用越强,余弦误差越小,与实测结果吻合。

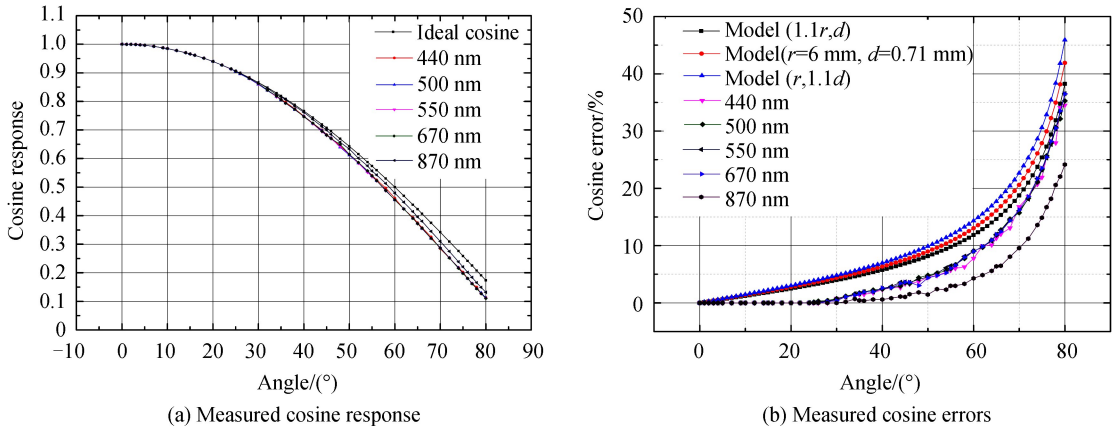


图4 SSIM 实测余弦响应和余弦误差

Fig.4 Measured cosine response and cosine errors of SSIM

$\Delta e(\theta)$ 和 $\Delta e'(\theta)$ 曲线如图5所示。图5(a)反映出,随着入射角的增大,由积分球口内壁反射进入积分球的辐射量先增加后减少;图5(b)显示出内壁反射进入积分球的辐射量与进入积分球的总辐射量之比,随着入射角的增大,占比先慢增、趋稳再剧增。由此发现,入射光在积分球口的反射情况较为复杂,不易实现余弦误差的准确建模。因此,在采用积分球作为入射光学系统时,应避免这种情况,积分球口可以采用刀口设计以降低余弦误差^[5]。

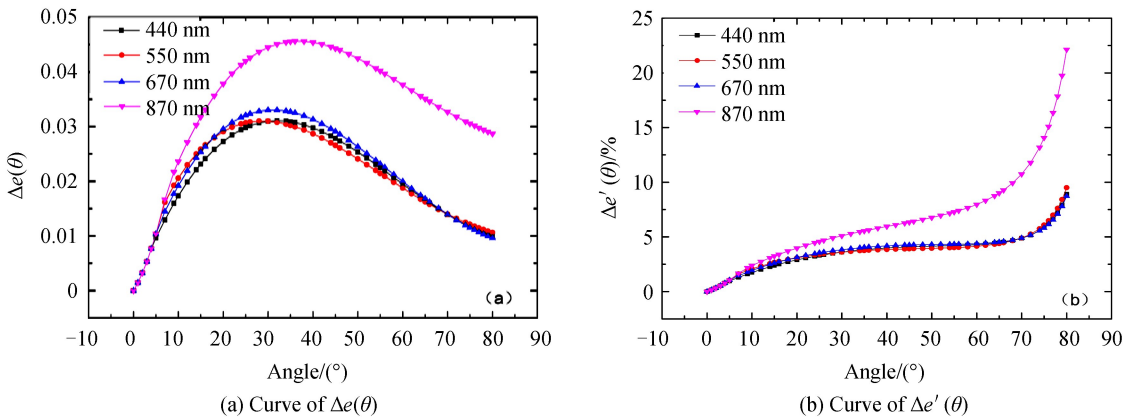


图5 $e(\theta)$ 和 $\Delta e'(\theta)$ 曲线

Fig.5 Curve of $\Delta e(\theta)$ and $\Delta e'(\theta)$

2.2 外场试验

2012年8月中上旬中国气象局国家卫星气象中心组织了卫星辐射定标敦煌外场同步观测试验。参与试验的部分仪器包括CE318太阳光度计、OL756高精度光谱辐射计、太阳光谱辐照度计(SIS)^[23]、太阳光谱辐照度计(SSIM)和太阳光谱辐亮度计(Solar Spectral Radiance Meter, SSRM)。其中,CE318为法国CIMEL公司研制的自动跟踪扫描的太阳光度计,是美国气溶胶全球监测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)和中国气溶胶光学特性监测网(China Aerosol Remote Sensing Network, CARSNET)的核心设备,具有较高的可靠性,在本次观测试验中作为大气参数观测的参照仪器。OL756是美国Optronics公司开发的紫外-可见波段高精度光谱辐射计,采用积分球作为入射光学系统、双全息凹面光栅进行分光,通过增加挡光球可以实现漫总比的人工测量。SIS、SSIM和SSRM均由中科院安徽光机所研制,其中SIS为基于棱镜分光的光谱扫描型辐照度计,用于直接观测太阳直射辐射;SSRM为基于平场凹面光栅分光的光谱辐亮度计,试验中使用3°探头以及便携式参考板和挡光板,采用挡板法人工测量漫总比^[24]。试验

时间、场地及天气等信息见表 1,其中 DTS(Dunhuang Test Site)表示敦煌辐射校正场(94.42°E、40.09°N), DMB(Dunhuang Meteorologic Bureau)表示敦煌市气象局(94.68°E、40.14°N).试验过程中因偶有云出现,在进行大气光学厚度反演时对部分云污染数据进行了剔除.

表 1 时间、天气及试验相关信息
Table 1 Related information of time, weather and test

Instruments	2012-8-7				2012-8-13			
	Site	Time	Measuring period	Points num.	Site	Time	Measuring period	Points num.
CE318	DTS	11:03-19:37	~8 min	72	DTS	13:06-19:32	~8 min	57
OL756	DTS	11:38-19:36	~15 min	33	DTS	13:15-19:17	~15 min	25
SIS	DTS	11:23-19:34	~1 min	386	DMB	09:10-19:30	~1 min	454
SSIM	DTS	14:19-19:01	~2 min	144	DMB	09:09-19:02	2 min	211
SSRM	DTS	11:32-19:31	~10 min	49	DMB	10:15-17:23	15~30 min	23

2.2.1 直射辐照度余弦校正与大气光学厚度反演

8月7日和13日SSIM测得的直射分量在余弦校正前后分别根据式(17)和(18)进行处理,结果如图6所示.可以看出,余弦校正后相应的幅值有所提高,且线性基本保持.

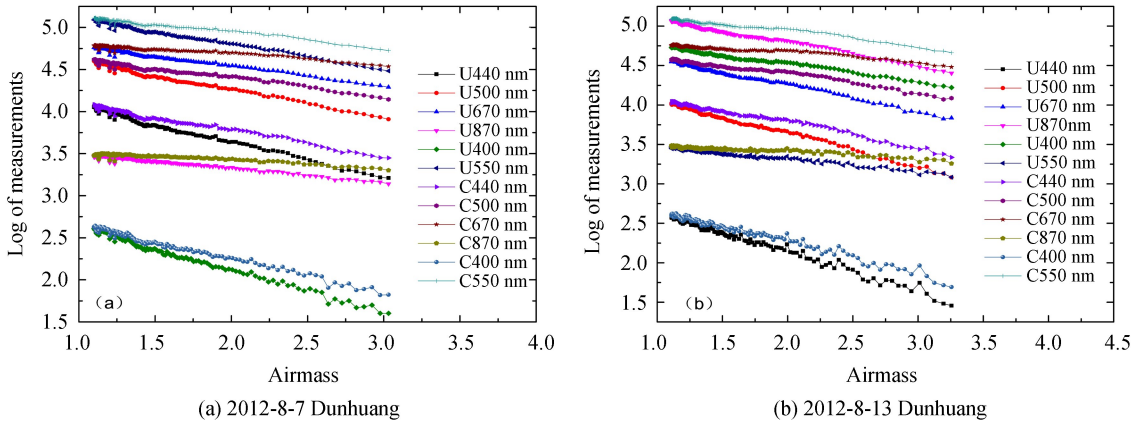


图 6 余弦校正前后不同波段的太阳直射分量对大气质量曲线,前缀 C 表示校正,U 表示无校正
Fig.6 Logarithm of solar direct component before and after cosine correction versus air mass for different bands, prefix C indicates corrected, while U indicates uncorrected

图 7 进一步显示了两天 CE318、SIS 和 SSIM 在 500 nm 波段数据归一化后的对比结果.SSIM 余弦校正前两个波段的曲线斜率均与 CE318 结果偏差较大,而 8 月 7 日校正后的曲线基本与 CE318 和 SIS 重合,13 日 SSIM 与 SIS 曲线重合,但与 CE318 仍有较大偏差.表 2 显示了各仪器根据式(14)~(18)得到的两天大气

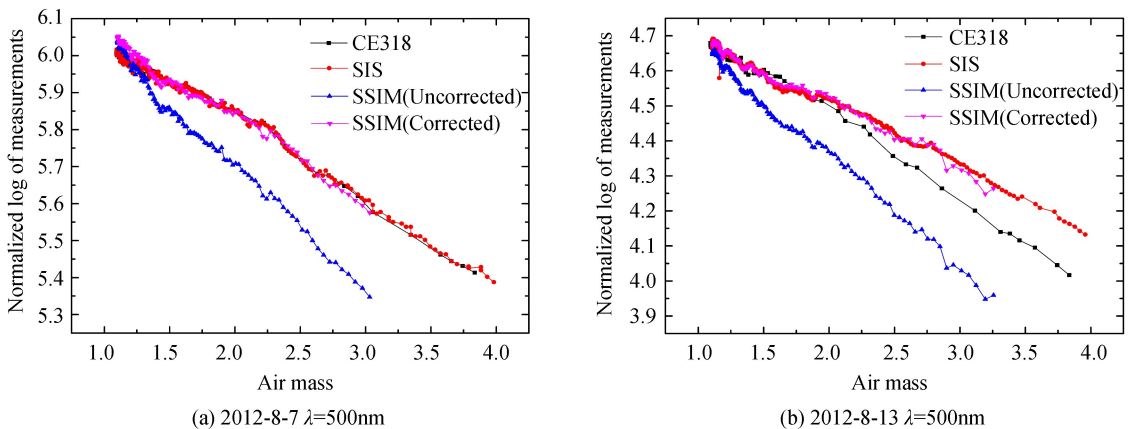


图 7 三种仪器观测的太阳直射分量在 500 nm 波段的归一化对比曲线
Fig.7 Normalized logarithm of solar direct component curve observed by three instruments at 500 nm

表 2 大气光学厚度反演结果

Table 2 Inversion results of atmospheric optical thickness

λ/nm	CE318	SIS	SSIM	
			$\tau^U(\lambda)/R^2$	$\tau^C(\lambda)/R^2$
2012-8-7				
440	0.303 8	0.299 6	0.435/0.989	0.310 1/0.984
500	0.216 2	0.213 4	0.343 5/0.987	0.218 7/0.976
670	0.104 7	0.106	0.236 2/0.988	0.109 6/0.941
870	0.057 8	0.059 8	0.159 2/0.938	0.069 3/0.903
2012-8-13				
440	0.324 6	0.277	0.417 4/0.995	0.291 3/0.987
500	0.233 8	0.182 3	0.331 4/0.993	0.186 3/0.98
670	0.124 1	0.093 9	0.227 5/0.988	0.101/0.943
870	0.078 4	0.052 8	0.158 0/0.979	0.065 9/0.923

光学厚度参数.可以看出,8月7日 SIS 与 CE318 反演的大气光学厚度偏差小于 0.005,说明结果一致性较好;余弦校正前 SSIM 反演结果与 CE318 结果偏差达到 0.11~0.13,而校正后偏差小于 0.012.8月13日 SIS、SSIM 与 CE318 反演结果偏差较大,主要原因在于三台仪器试验地点不同,CE318 位于辐射校正场,而 SIS 和 SSIM 位于敦煌市气象局内.根据 CE318 结果,辐射校正场 13 日大气光学厚度与 7 日相比四个波段均增大,而由 SIS 和 SSIM 结果可知,13 日敦煌市气象局试验点所有波段大气光学厚度与 7 日辐射校正场结果相比均有不同程度下降.由此推断,13 日当天两试验点大气光学厚度不同,CE318 不再适合作为参照标准,但 SSIM 余弦校正后大气光学厚度与 SIS 结果偏差小于 0.015,与 7 日的比对结果较一致.

以上分析结果说明了 SSIM 的余弦误差会导致大气光学厚度的反演结果被严重高估,而经过余弦校正可以显著提高大气光学厚度反演的准确性,这与 KHATRI P 等^[21]得到的结论一致.

2.2.2 漫射辐照度及漫总比余弦校正

8月7日 CE318 等三台仪器反演的大气总光学厚度一致性较好,可以以此作为输入,通过辐射传输模型计算得到漫总比,并与 SSIM、OL756 以及 SSRM 实测结果进行比较.辐射传输模型采用 6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum),其输入参数中水汽含量、臭氧浓度以及地表反射率均取敦煌辐射校正场典型值^[2],对于 550 nm 的气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, AOT)数据,则采用基于 CE318 观测结果获取 550 nm 波段 AOT 的基本方法^[31-32]得到.由 440 nm、500 nm、670 nm 和 870 nm 大气光学厚度,得到气溶胶光学厚度,再利用 Angstrom 公式得到 550 nm 波段 AOT 为 0.0722.大气模式选择输入水汽、臭氧含量的自定义模式,气溶胶模式选择沙漠型^[33],得到 8 月 7 日不同波段漫总比数据并与三台仪器实测结果对比,如图 8(a)~(d).可以看到 6S 计算结果以及三台仪器实测结果大小及变化趋势不一,因此找出一个可比较的基准点非常重要.当太阳天顶角(Solar Zenith Angle, SZA)小于 30°时,对于 SSIM,一方面,太阳直射分量几乎不受余弦误差的影响,但天空漫射分量在天顶角大于 30°的部分会受到余弦误差的影响,导致测得的漫射分量低于实际值,进而所得漫总比低于实际值;另一方面,SSIM 的挡光球仍不可避免地遮挡了小部分天空辐射,即分离出的直射分量偏大,相应漫射分量偏小.这两个因素决定了 SSIM 测量的漫总要比要小于实际值.由图 8(a)可以看出,在 SZA < 30°时,所得漫总比从小到大依次为 SSRM、OL756、6S 和 SSIM,根据上述分析可知,SSRM、OL756 和 6S 结果均小于真实值.对于 SSRM 和 OL756,其他波段结果亦如此;而对于 6S,在 500 nm 波段与 SSIM 未校正结果基本一致,在 670 nm 和 870 nm 波段则高于 SSIM 未校正结果.首先分析 SZA < 30°时漫总比数据的偏差原因.对于 OL756,在入射角为 60°时其余弦误差检测结果小于 6% @ 400 nm,且随着波长增加余弦误差有减小的趋势,因此在 440~670 nm 波段其余弦误差对漫总比测量结果的影响相对较小.OL756 的积分球入口直径为 31.75 mm,挡光球直径大于 35 mm,试验过程中挡光球到积分球入口的距离约 40 cm,因此该挡光球遮挡视场超过 5°,大于 SSIM 的 3.66°,理论上会遮挡更多的天空漫射光,从而导致分离出的太阳直射分量偏大,漫射分量偏小,进而获得的漫总比被低估,这与测量结果是一致的.对于 SSRM,其造成漫射辐照度测量结果偏低的可能原因包括:1)测量漫射辐照度时挡板遮挡了部分天空光,导致漫总比系统性偏低;2)参考板的方向特性不佳,使得漫射辐射的测量结果被

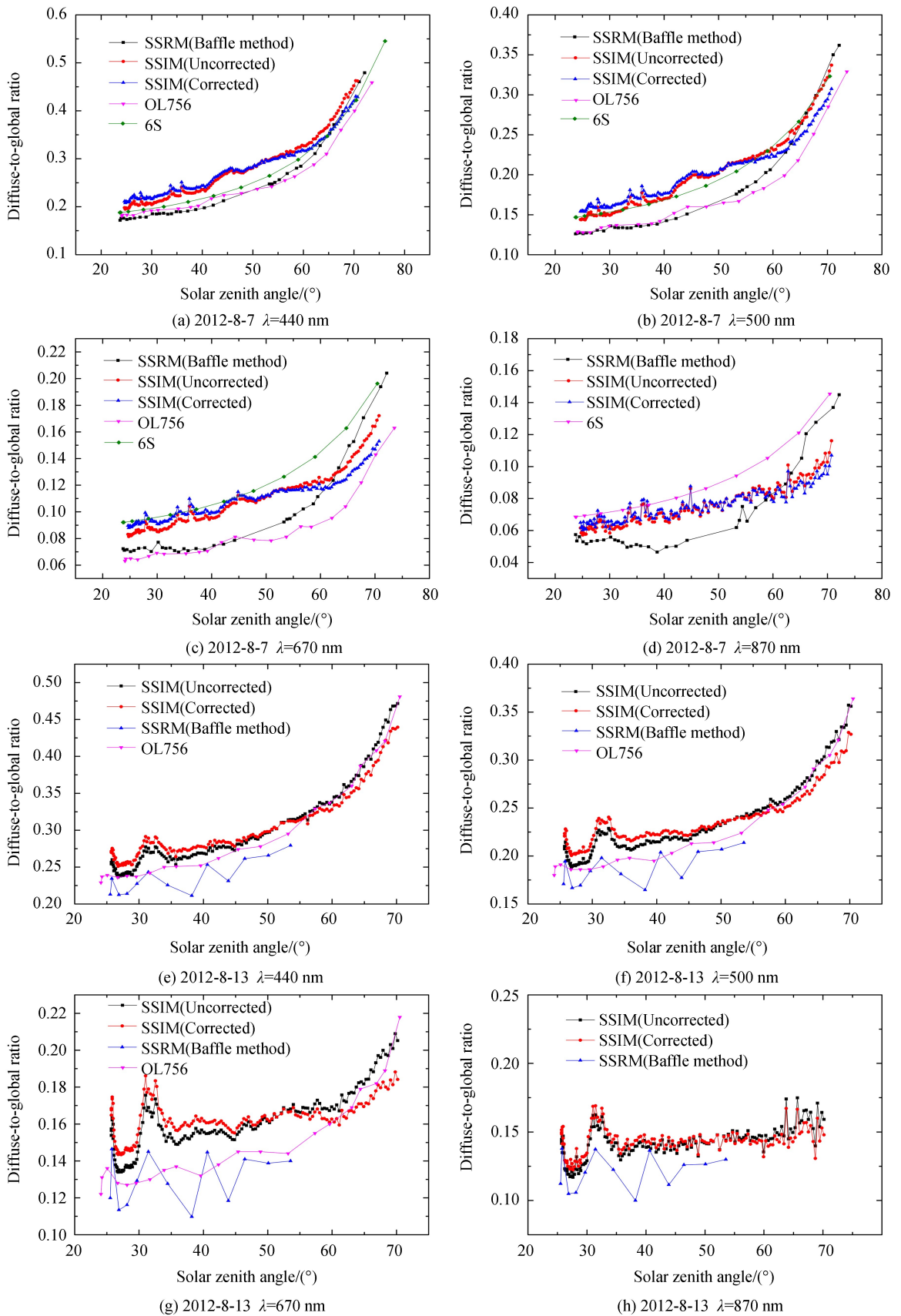


图8 SSIM余弦校正前后漫总比对比曲线

Fig.8 Contrast curves of diffuse-to-global ratio before and after SSIM cosine correction

低估,从而漫总比偏小.两个因素的具体贡献有待进一步研究,但其均会导致漫总比测量结果偏低,能够解释

仪器的实测结果.对于 6S 模型,在小天顶角下其漫总比计算结果总体上与 SSIM 的测量结果较为接近,但可以确定其 440 nm 波段结果要小于实际值,而相应长波段(670 nm 和 870 nm)则无法确定准确性.天空漫射辐射的影响因素较多,不仅与大气条件等相关,也受到地-气耦合的影响,与具体的环境是分不开的,而 6S 无法针对具体情况进行设置,在计算漫射辐照度以及漫总比等参数时不可避免地会存在偏差.8月13日数据如图 8(e)~(h)所示.试验时 OL756 位于辐射校正场,而 SSIM 和 SSRM 位于敦煌市气象局内的气象观测站附近,OL756 测量的漫总比数据与 SSIM 测量结果偏差缩小,间接说明 13 日时两个测试点的大气状况不同.SSRM 的测量结果离散性较大,这与气象局内的环境影响有关,测试过程中参考板放置在地面上,附近的地物环境影响较大,而 SSIM 放置在仪器包装箱上,光学入口距地面大于 1 m,受环境影响较小.两天实验结果对比分析说明,OL756 和 SSRM 进行漫总比测量的方式或方法还需进一步完善,其获取的数据均不适合作为对比标准;6S 得到的结果在较短波段虽也存在一定程度的偏差,但总体较接近 SSIM 测量结果.

在天空辐亮度各向同性分布假设条件下,SSIM 测量的漫射辐照度的余弦校正根据式(7)进行,得到在 440 nm、500 nm、670 nm 和 870 nm 波段的余弦校正系数 f_d 分别为 0.903 5、0.903 1、0.9 和 0.932,相应漫射辐照度测量偏差达到 6.8%~10%.结合直、漫射辐照度校正系数 f_b 和 f_d 以及式(11)和(12)可实现漫总比校正.8月7日校正前后漫总比随 SZA 的变化曲线如图 8(a)~(d)所示.天空辐亮度各向同性分布条件下, f_d 为小于 1 的常量,校正后的漫射分量增大,在 SZA 较小($<30^\circ$)时 SSIM 的余弦误差小于 1%,此时 f_b 近似为 1,即校正后的直射分量几乎不变,则余弦校正后的漫总比幅值大于实测结果;随着 SZA 的增大, f_b 逐渐变小,校正后的直射分量与实测值之差逐渐增大,而漫射校正系数 f_d 为常量且直接测量的漫射分量绝对量变化较小,则校正后的漫总比与实测值的差值逐渐由正变负.8月13日结果如图 8(e)~(h)所示.可以看出,校正前后的漫总比曲线变化趋势与 7 日结果基本一致.然而,通过漫总比曲线的对比可以发现,在太阳天顶角大于约 55° 时,基于天空辐亮度分布各向同性假设的校正方法会导致漫总比曲线随天顶角的变化率慢于其他方式.一个可能的原因是在太阳天顶角较大时由于地-气耦合等因素的影响,靠近地平线的漫射辐射较强,导致基于各向同性假设的校正方法不再适用.

通过与余弦校正前数据以及其他方式获取的数据对比分析,可以发现基于天空辐亮度分布各向同性假设的余弦校正方法在一定的太阳天顶角下具有其合理性,能够提高漫总比的测量准确度.但在较大的 SZA 条件下,基于天空辐亮度各向同性假设可能会导致漫射辐照度以及漫总比被低估.因此,仍有必要进一步开展漫射辐照度的精确校正.

为了验证本文提出的漫射辐照度精确校正方法的可行性,以 OLMOFJ 等^[27]基于全天空成像仪测量的天空辐亮度分布图(原文图 2)作为输入,将由式(8)~(10)得到的结果与理论结果进行一致性比较来评价方案的可行性.

为了方便仿真计算,需对天空相对辐亮度分布图做一些简单假设和处理:1)假设对应波段为 440 nm;2)将原彩色图转换为 181×181 像素灰度图像,并将像素位数降为 8 bit,设图中心像素对应天顶角为 0° ,且假定天顶角等间隔分布,即以中心像素为原点的水平和垂直坐标轴方向上每个像素与轴上相邻像素天顶角差 1° ;3)为了方便沿方位角积分计算,等方位角路径按照“口”形分割而非以与中心像素等距的“O”形分割.这些假设和处理并不会影响方法的可行性验证结果,但会大大简化计算.选取的天空辐亮度相对分布图如图 9(a)所示.根据式(8)~(10)进行漫射辐照度的余弦校正过程为:

- 1)计算 $L(\theta)$,即分别计算对应天顶角 $\theta=0^\circ, 1^\circ, \dots, 80^\circ$ 时灰度值沿方位角之和;
- 2)由式(9)根据 SSIM 的角度响应函数计算仪器在不同天顶角下的响应 I'_d ;
- 3)由式(8)计算理想仪器的响应 I_d ;
- 4)根据步骤 1)和步骤 3)的结果计算归一化因子 $N(\theta)$;
- 5)计算漫射校正系数 f_d ;
- 6)根据步骤 2)和步骤 5)的结果得到校正后的漫射辐射,并与步骤 3)的结果比较以判断校正效果.

步骤 1)~3)的结果如图 9(b)所示.实际情况下,省略步骤 2),由仪器的实际测量结果代替,利用得到的 f_d 实现漫射辐照度的余弦校正.

按照上述步骤,得到在此天空辐亮度分布下仪器的响应值 I'_d 为 613 264.35,理想仪器响应值 I_d 为 692 356.8, $f_d=0.885 79$,即校正后的漫射值为 692 336,与理想结果相对偏差小于 10^{-4} ,即验证了该方法的有效

性,为进一步开展漫射辐照度的精确校正提供了一个思路.

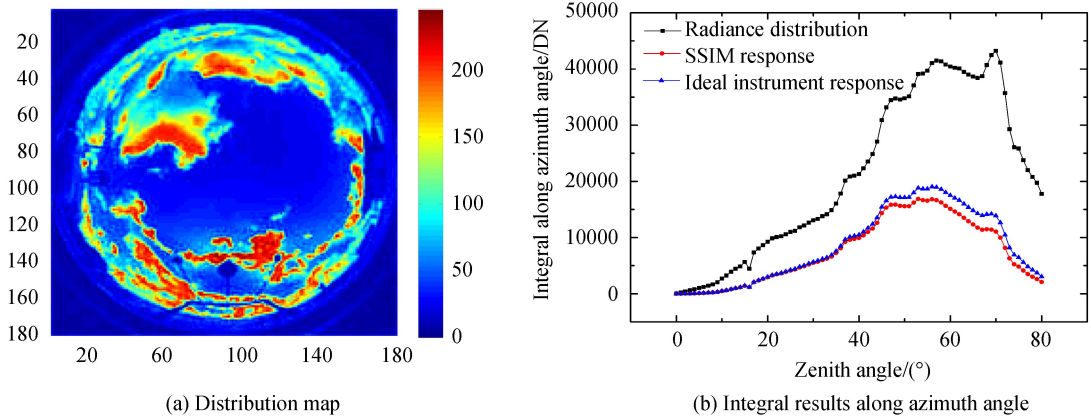


图9 天空辐亮度分布和计算结果

Fig.9 Sky radiance distribution diagrams and calculations

3 结论

本文分析了自研太阳光谱辐照度计入射光学系统引入的余弦误差的特点,并开展了直、漫射辐照度和漫总比的余弦校正方法研究,并通过试验对比进行验证.

通过模型计算和实测对比分析可知,积分球入口直径与入口壁厚之比以及球口黑色阳极化内壁反射率大小均与余弦误差大小呈负相关性,通过减薄球口金属壁厚并采用刀口设计有助于降低积分球入口引入的余弦误差.直射辐照度余弦校正前后反演得到的 440 nm、500 nm、670 nm 和 870 nm 四个波段大气光学厚度与 CE318 太阳光度计结果相比,偏差由 0.11~0.13 降为小于 0.012,显示出在可见-近红外波段余弦误差对大气光学厚度反演准确性的重要影响以及进行余弦校正的必要性.基于天空辐亮度各向同性分布假设下,余弦校正前后四个波段漫射辐照度相对偏差达到 6.8%~10%,同时,余弦校正前后漫总比准确性得到有效提升.通过对比三种不同方法获取的漫总比结果可知,挡光设备是影响漫射辐照度、直射辐照度以及漫总比测量准确度的关键因素之一,挡光设备所限定的视场角过大将会导致上述参数分别被低估、高估和低估.

为了进一步精确校正漫射辐照度,最后提出了一种基于天空辐亮度分布数据进行漫射辐照度余弦校正的方法,原理性仿真结果表明,余弦校正后的漫射辐照度与理论数据一致,初步验证了该方法的可行性.

致谢 卫星辐射定标敦煌外场同步观测试验是在中国气象局国家卫星气象中心精心组织、中国科学院安徽光学精密机械研究所共同参与下进行的,在此向一起参与试验的各位同志表示感谢!感谢中国气象局国家卫星气象中心的胡秀清、孙凌、陈林及相关人员在 CE318 和 OL756 数据获取方面给予的热心帮助.

参考文献

- [1] SMITH J, THOME K, CROWTHER B, *et al.* Field evaluation of a diffuse to global irradiance meter for vicarious calibration[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, 1998, 2: 663-665.
- [2] 顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [3] LOPEZ-SOLANO J, REDONDAS A, CARLUND T, *et al.* Aerosol optical depth in the European Brewer Network[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(6): 3885-3902.
- [4] HUANG Bo, DAI Cai-hong, YU Jia-lin. Research and test of the cosine response property of UV radiometers[J]. *Optical Technology*, 2010, **36**(2): 176-181.
黄勃, 代彩红, 于家琳. 紫外辐射照度计的余弦响应特性测试研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(2): 176-181.
- [5] CORDERO R R, SECKMEYER G, LABBE F. Cosine error influence on ground-based spectral UV irradiance measurements[J]. *Metrologia*, 2008, **45**(2008): 406-414.
- [6] MILBURN D I, HOLLANDS K G T. The directional response of an integrating sphere detector system[J]. *Optics Communications*, 1995, **115**(1995): 158-169.
- [7] ZHANG Bao-zhou, XIE Yin-zhong. Research of integrating sphere for cosine response of radiometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, **30**(3): 209-211.
张保洲, 谢印忠. 积分球余弦校正器误差的研究[J]. *计量学报*, 2009, **30**(3): 209-211.
- [8] BAIS A F, KAZADZUS S, GARANE K, *et al.* Portable device for characterizing the angular response of UV spectroradiometers[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(33): 7136-7143.

- [9] PULLI T, KARAHHA P, IKONEN E. A method for optimizing the cosine response of solar UV diffusers[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(14): 7897-7904.
- [10] ZHENG Ru, ZHANG Guo-yu, GAO Yue, *et al.* Cosine error correction of solar radiation observation instrument[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0112004.
郑茹, 张国玉, 高越, 等. 太阳辐射观测仪余弦误差修正方法[J]. 光子学报, 2016, **45**(1): 0112004.
- [11] BERNI L A, VILELA W A, BELOTO A F, *et al.* System for measuring the angular response of radiometers[C]. SPIE, 2013, **8785**:87852F.
- [12] GRÖBNER J, BLUMTHALER M, AMBACH W. Experimental investigation of spectral global irradiance measurement errors due to a non ideal cosine response[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(18): 2493-2496
- [13] BAIS A F, KAZADZIS S, BALIS D, *et al.* Correcting global Solar ultraviolet spectra recorded by a Brewer spectroradiometer for its angular response error[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6339-6344.
- [14] DAI C, YU J, HUANG B, *et al.* Improved entrance optics design for ground-based solar spectral ultraviolet irradiance measurements and system absolute calibration[C]. SPIE, 2009, **7384**: 73841P.
- [15] di SARRA A, FUA D, CACCIANI M, *et al.* Determination of ultraviolet cosine-corrected irradiances and aerosol optical thickness by combined measurements with a Brewer spectrophotometer and a multifilter rotating shadowband radiometer[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(33): 6339-6344.
- [16] FEISTER U, GREWE R, GERICKE K. A method for correction of cosine errors in measurements of spectral UV irradiance[J]. *Solar Energy*, 1997, **60**(6): 313-332.
- [17] HÜLSEN G, GRÖBNER J. Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(23): 5877-5886.
- [18] FIOLETOV V E, KERR J B, WARDLE D I, *et al.* Comparison of Brewer ultraviolet irradiance measurements with total ozone mapping spectrometer satellite retrievals[J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(12): 3051-3061.
- [19] ANTON M, SERRANO A, CANCELLO M L, *et al.* Correction of angular response error in Brewer UV irradiance measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**: 2018-2027.
- [20] LANDELIUS T, JOSEFSSON W. Methods for cosine correction of broadband UV data and their effect on the relation between UV irradiance and cloudiness[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D4): 4795-4802.
- [21] HATRI P, TAKAMURA T, YAMAZAKI A, *et al.* Retrieval of key aerosol optical parameters from spectral direct and diffuse irradiances observed by a radiometer with nonideal cosine response characteristic [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, **29**: 683-696.
- [22] BLUMTHALER M, GRÖBNER J, HUBER M. Measuring spectral and spatial variations of UVB and UVA sky radiance[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**: 547-550.
- [23] ZHANG Yan-na, LIU En-chao, 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.
- [24] WANG Xi-shi, MIN Xiang-jun, WU Rong, *et al.* Measurement method research on the atmospheric spectral optical depth[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, **12**(2): 8-16.
王喜世, 闵祥军, 吴荣, 等. 大气光谱光学厚度测量方法研究[J]. 遥感技术与应用, 1997, **12**(2):8-16.
- [25] BAIS A F. Absolute spectral measurements of direct solar ultraviolet with a Brewer spectrophotometer[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(21): 5199-5204.
- [26] SIGERNES F, IVANOY Y, CHERNOUSS S, *et al.* Hyperspectral all-sky imaging of auroras[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27650-27660.
- [27] OLMO F J, CAZORLA A, ALADOS-ARBOLEDAS L, *et al.* Retrieval of the optical depth using an all-sky CCD camera[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(34): H182-H189.
- [28] SLUSSER J, GIBSON J, BIGELOW D, *et al.* Langley method of calibrating UV filter radiometers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D4): 4841-4849.
- [29] DAYOU J, CHANG J H W, SENTIAN J. Ground-based aerosol optical depth measurement using sunphotometers[M]. Springer, 2014.
- [30] GRANT R H, HEISLER G M, GAO W. Clear sky radiance distribution in ultraviolet wavelength bands [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1997, **56**: 123-135.
- [31] YANG Lei, ZHANG Xue-wen, HAN Qi-jin. Retrieval and analysis of aerosol optical thickness over Dunhuang region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 37-42.
杨磊, 张学文, 韩启金. 敦煌地区气溶胶光学厚度的反演研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, **9**(1):37-42.
- [32] LI Jian-yu, WEI He-li, XU Qing-shan, *et al.* Atmospheric aerosol optical characteristics measured at several typical zones in China[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1167-1174.
李建玉, 魏合理, 徐青山, 等. 中国部分典型地区气溶胶光学特性观测[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(6):1167-1174.

- [33] HU Xiu-qing, ZHANG Yu-xiang, ZHANG Guang-shun, *et al.* Measurements and study of aerosol optical characteristics in China radiometric calibration sites[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, **12**(3):257-266.
- 胡秀清, 张玉香, 张广顺, 等. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究[J]. *应用气象学报*, 2001, **12**(3):257-266.

Foundation item: The United Foundation of Chinese Academy of Sciences (No.6141A01011602) and the Civil Aerospace Technology Advance Research Project (No.D040401)

引用格式: LIU Zhen-hai, LUO Dong-gen, ZHANG Yun-jie, *et al.* Cosine Error Influence of Ground-based Solar Spectral Irradiance Meter and Its Correction Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1012003

刘振海, 骆冬根, 张运杰, 等. 地基太阳光谱辐照度计的余弦误差影响及其校正方法[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10):1012003