

文章编号:1002-2082(2019)01-0105-08

一款新型高精度全自动多波段太阳光度计

黄冬^{1,2}, 李新¹, 张艳娜¹, 张权^{1,2}

(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, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:研制一种高精度全自动可实时测量、远程控制覆盖可见-近红外多波长太阳光度计 PSR-2, 可实现太阳直射辐照度、天空辐亮度(主平面、等天顶角)、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量和臭氧含量的实时测量和显示, 具有各通道独立同时测量、精确的温度控制、精确的太阳跟踪等检测功能。PSR-2 在本单位自研 PSR-1 的基础上进行改进, 经受住长时间沙漠风沙和雨水侵蚀的测试, 具有能够长时间有效稳定观测、更加小型化、数据处理更便捷和更高的性价比等特点。在敦煌给仪器进行了 Langley 法标定和仪器温控性能测试, 结果显示 PSR-2 Langley 定标拟合直线相关性高于 99%, 恒温仓温度稳定在 $(25 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, 与国外行业标准 CE318 的合肥、敦煌两地实际测量结果对比, PSR-2 气溶胶光学厚度和大气柱水汽含量偏差分别在 0.02 和 0.1 以内, 并进行了误差分析。

关键词:太阳光度计; 定标; 温控; 气溶胶光学厚度; 水汽

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201940.0105001

Novel high-precision full autocontrol multi-waveband sun photometer

HUANG Dong^{1,2}, LI Xin¹, ZHANG Yanna¹, ZHANG Quan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A high precision and full autocontrol real-time measurement and remote control covering visible near infrared multi-wavelength sun photometer PSR-2 was developed. It can realize real-time measurement and display of direct radiation irradiance of the sun, sky radiance (main plane, equal zenith angle), aerosol optical thickness, atmospheric column water vapor content and ozone content. And it has the functions of simultaneous detection, accurate temperature control, accurate sun tracking and other detection functions. PSR-2 was improved on the basis of PSR-1, which had been tested for long time desert wind sand and rainwater erosion. It is characterized by long time effective stable observation, more miniaturization, more convenient data processing, and higher performance and price ratio. In addition, the Langley method calibration and temperature control performance test were carried out on the instrument in Dunhuang. Results show that the PSR-2 Langley calibration fitting linear correlation is higher than 99%, the constant temperature warehouse temperature is stabilized within $(25 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, the PSR-2 aerosol optical thickness and the large column water vapor content deviation are within 0.02 and 0.1, respectively, compared with the actual measurement results in Hefei and Dunhuang by the foreign industry standard of CE318. Finally the error analysis was carried on.

Key words: sun-photometer; calibration; temperature control; aerosol optical thickness; water vapor

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 十三五航天预研项目(D040401); 国家自然科学基金(61505222); 国家自然科学基金青年项目(41705013)

作者简介: 黄冬(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气遥感和光学遥感定标研究。E-mail: hd125014@mail.ustc.edu.cn

引言

太阳辐射是驱动地球-大气系统以及天气和气候变化的动力,也是气候变化、天气预报、大气环境等领域的重要研究对象。同时,在地球表面进行太阳辐射测量,对于研究太阳辐射对地球生物影响和合理有效利用太阳能有着很重要的作用^[1]。

太阳光度计是用来测量太阳光谱特性的仪器,它测得的直射太阳辐射数据可用来反演计算大气透过率、消光光学厚度、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量和臭氧含量。它的天空扫描数据可以用来反演大气气溶胶粒子尺度谱分布及气溶胶散射相函数。因此,太阳光度计不仅仅是一种大气气溶胶环境监测仪器,也可在遥感卫星及遥感器辐射定标时进行大气光学参数测量。国外许多国家已经研制出全自动太阳光度计,像日本的干涉滤光太阳辐射计 POM02,法国的 CMEL 公司生产的 CE318 等。国内,北京大学早期研制了七波段辐射计^[2]。中国科学院安徽光学精密机械研究所自 1989 年以来,经过不断改进已发展了多种型号的便携式自动太阳辐射计^[3],但未形成商业化应用。随着国家对大气科学研究的重视,越来越多的遥感应应用单位需要使用太阳光度计,但国内市场没有商业化的产品,都需要从国外进口,价格相对昂贵,费用较高;此外,国外商业化仪器也存在部分不足,一是温控问题。由于极端低温,在极地进行基于太阳直射和天空光散射的地基气溶胶遥感观测时,通常会遇到一些特殊问题,进行 Langley 定标如果不进行温度订正,Langley 定标系数的误差可达 2%^[4],同时,气溶胶光学厚度对

太阳直接辐照度的测量精度十分敏感,很小的测量偏差都能够在气溶胶光学厚度上反映出来,特别是 Si 光电二极管在近红外波段温漂较大,能达到 0.5%/℃。二是时间问题,例如 AERONET 监测网统一采用法国 CIMEL 公司生产的 CE318,采用滤光片转轮实现各个通道的测量,这样 9 个测量通道并非同一时刻测量,在天气变化或者大气扰动较为剧烈的情况下,会引起各个通道测量的并非同一时刻。这些均影响仪器的观测精度,因此研制出性价比高、用户更易操作的高精度全自动太阳光度计成了必要。

本文主要介绍了本单位最新研制的便携式高精度全自动太阳光度计 PSR-2 的组成,光机设计和太阳跟踪结构设计,电子学设计和定标方法,将仪器带到敦煌遥感卫星辐射校正场进行实验,在敦煌对仪器的温控功能进行了测试,并分别与在合肥、敦煌两地与同步观测的 CE318 进行对比,验证 PSR-2 的测量结果和性能是可靠的。

1 整机设计

太阳光度计包括光机头部、二维转台、通信模块、控制箱、环境传感器和支架,太阳辐射计的系统结构示意图如图 1 所示。为了保证太阳光度计可以在野外环境中长期稳定运行,太阳光度计外壳整体设计采用比重较轻、耐腐蚀性能良好的铝合金,表面处理的本色氧化层厚度 $10\ \mu\text{m}\sim 15\ \mu\text{m}$,为保证仪器外壳散热良好,不做外表喷塑处理;太阳光度计内部铝合金材料进行普通的本色氧化处理($7\ \mu\text{m}\sim 8\ \mu\text{m}$),其中仪器前半部分的内部除了本色阳极化处理之外,还需发黑处理。

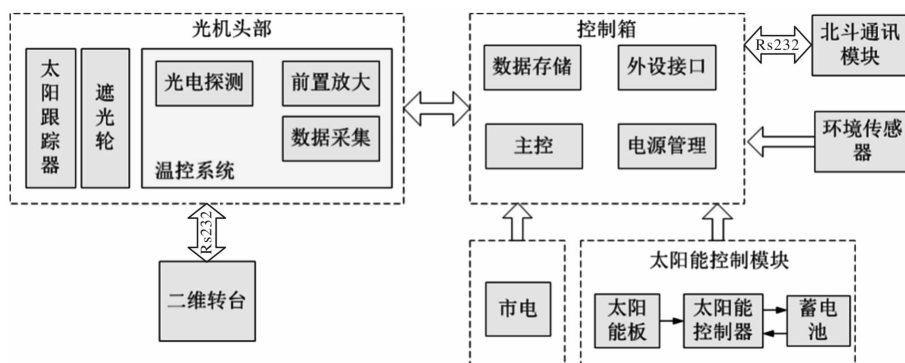


图 1 太阳光度计总体设计图

Fig. 1 General design of solar photometer

1.1 光学机械设计

太阳光度计 PSR-2 光机头部分为前后两个部

分,前半部分主要是光路部分,后半部分主要是电学部分。太阳光度计的测量结构示意图如图 2 所

示。太阳光度计的光路组件由视场光阑、消杂光光阑、孔径光阑、滤光片和探测器等组成。在仪器的前半部分设有石英玻璃窗,起到防护和密封的作用;采用 UV 无影胶水将石英玻璃与光窗基座固定,光窗基座与前部外壳之间有硅橡胶 O 型圈。石英玻璃窗的内侧位于同一圆周上安装有 8 个视场光阑,能够相互独立工作,解决了各通道不能同

时工作的问题。石英玻璃窗的内侧中心设有衰减片,后部是四象限光阑筒及其放大电路;四象限前置放大电路板的后方设有步进电机,在步进电机上安装有挡光轮。当进行太阳直接辐射照度的测量时打开光路,不进行测量或者测量暗电流时关闭光路,避免由于长时间暴晒导致滤光片透过率和光电探测器响应率的衰变。

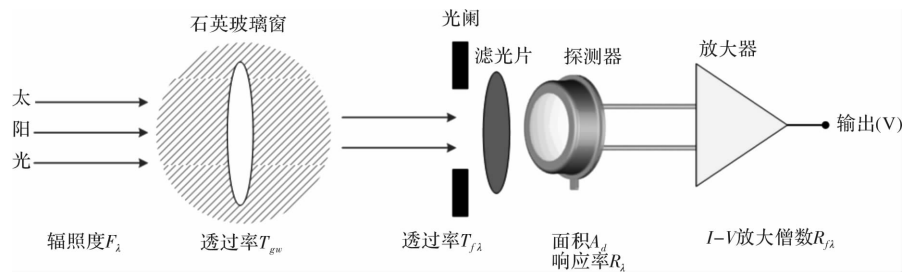


图 2 太阳光度计的结构示意图

Fig. 2 Structure of solar photometer

1.2 电子学设计

高精度全自动多波段太阳光度计的电子学部分实现 8 个通道的直射、天空辐亮度的观测,这部分的内容是利用光电探测、前置放大、数据采集完成。每次的数据采集模式是利用主控电路控制二维转台完成不同的测量功能,并将测量的数据经过北斗通讯模块传递到接收端。光度计实现市电和太阳能供电的需求,经过电源管理模块切换不同的供电工作模式。为了保证仪器工作的稳定性和可靠性,仪器增加了环境测量模块,利用雨水传感器、温湿度传感器、压力传感器实现光度计工作的自我保护。仪器整体的电子学工作流程如图 3 所示。在以前仪器的基础上,首次增加了温控模块,温度场的变化会带来滤光片中心波长的偏移、探测器响应度的增大、放大电路温漂和孔径光阑的变化,因此,精密温控是保证测量数据精确的前提。

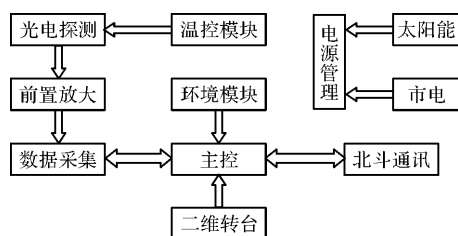


图 3 太阳光度计电子学工作流程图

Fig. 3 Solar photometer electronics working flow chart

1.3 太阳跟踪设计

为了保证测量精度,仪器采用视日跟踪和

光电跟踪相结合的方式,这种方法可以进行全天候的跟踪,并且通过闭环反馈来消除累计误差。

工作流程如图 4 所示,首先计算太阳的当前位置,得到仪器当前位置和太阳位置的角度差,如果大于四象限探测器所能接收的范围,启动开环自动跟踪模式,如果到达光电探测器所能接收的范围后,进入精密跟踪模式,通过四象限探测器上的太阳光斑位置,驱动二维转台转动,直到仪器精确对准太阳为止。其中二维转台采用涡轮蜗杆传动方式,掉电自锁,水平采用滑环结构,能够 360°无限位旋转。可以通过通信接口 RS232 与外部控制器相连,由指令控制及回传功能,可以控制定位分辨率在 $\pm 0.01^\circ$ 的范围之内。

1.4 通信模块及配套软件

远程数据中心通过通信模块接收仪器的数据,并发送指令,完成远程无线数据传输和交互。利用通信模块实现测量数据自动传输到实验室的服务器上,可以远程查看仪器的数据以及工作状态,并根据需要通过仪器串口或者配套软件向仪器发送控制指令,控制仪器的工作方式。通信模块我们设计验证了两种方案,分别为北斗短报文模块和 GPRS 模块。

仪器将观测数据存储到自带的存储设备中,并通过计算机串联接口输出,配套软件可通过接收北斗终端远程自动接收和实时图形化显示观测

数据,并通过数据处理功能完成数据的选择、合成和大气参数等的计算。同时也将数据上传到网络服务器上,可随时随地通过网络和仪器编号下载历史数据,由以下几个部分组成,如图 5 所示。

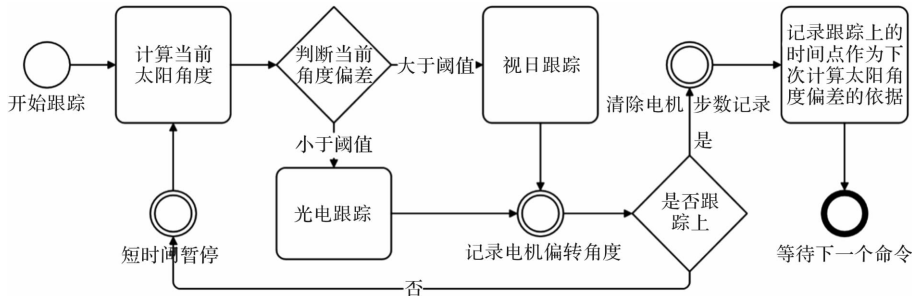


图 4 太阳跟踪流程图

Fig. 4 Sun tracking flow chart

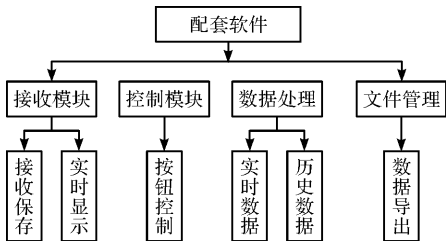


图 5 配套软件设计组成图

Fig. 5 Composition of supporting software design

2 仪器的功能和指标

PSR-2 可通过跟踪太阳进行太阳直接辐照度观测和天空辐亮度观测。太阳直射光可用来反演大气气溶胶光学厚度、大气柱水汽等^[5-8]。在天空辐亮度观测模式中,设计了 2 种观测模式,分别是主平面观测模式和等纬圈观测模式,如图 6 所示。其中主平面观测模式是指在太阳所在平面内(与太阳等方位角),沿天顶方向扫描测量,测量角度为(−85°~+85°)。等纬圈观测模式是指在太阳所在天顶角上,方位角在 0~360°范围内扫描测量。天空辐亮度可用于改进气溶胶粒子大小和光学参数等反演,也可用来直观反映天空是否有云。

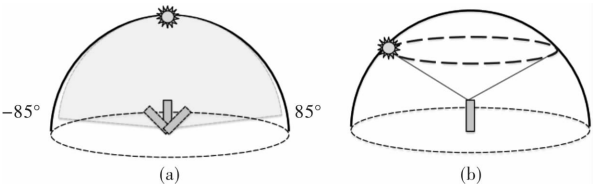


图 6 太阳辐射计的主平面测量(a)和等纬圈测量(b)

Fig. 6 Main plane measurement (a) and almucantar measurement (b) of solar radiometer

PSR-2 所能达到的性能和指标如表 1 所示。

表 1 PSR-2 性能指标

Table 1 Performance indicators of PSR-2

性能	指标
光谱波段/nm	8 个波段:365,412,500,610,675,862,940,1 024
光谱带宽/nm	10
总视场角/(°)	1
最小扫描角/(°)	2
跟踪精度/(°)	±0.1
温控温度/℃	25±0.3
观测项目	太阳直接辐照度测量、主平面扫描、平纬圈扫描
通信方式	计算机串联接口输出;北斗远程数据传输
环境感知	温度、湿度、雨水、气压
电源供电	太阳能/24VDC/220VAC
工作温度/℃	−40~+70
数据存储	可实现 180 天数据存储;可进行历史数据重传
工作环境	0~100%RH
断电工作	可实现断电后的 3 天工作

3 仪器定标

太阳光度计长期放置在野外,滤光片和探测器等部分元件参数难免会发生变化,从而影响仪器整体的响应度,因此需要定期对其进行绝对辐射定标以保证其观测精度。

3.1 直射通道辐射照度

太阳直射通道照度定标可采用 Langley 法和主仪器传递定标法。Langley 法中 $\ln(V \cdot R^2)$ 与 m 呈线性关系

$$\ln(V \cdot R^2) = -m\tau + \ln V_0$$

(1)

式中: V 是观测仪器在地面测量的太阳直射信号; V_0 是在大气外界测量太阳的仪器信号; R 是归一化的日地距离, m 等于大气质量数; τ 是大气光学厚度。太阳辐射计 V_0 的精度决定气溶胶光学厚度的精度。Langley 法是外场常用的太阳光度计定标法^[9]。由于传统的定标方法受成本等限制,因此发展了实验室内以积分球为光源的室内对比定标方法^[10]。此外,目前还有一种基于室内高精度绝对辐射源的相关定标方法研究^[11],未来可以实现主仪器的室内定标。2018 年 5 月 2 日敦煌当天天气非常晴朗,能见度 25 km 以上,无风无云,适合定标,在敦煌遥感卫星辐射校正场基地楼顶对 PSR-2 进行外场 Langley 法定标,拟合直线如图 7 所示,其中 940 nm 通道用改进的 Langley 法进行定标^[7,12],最后得到各通道的 V_0 、相关系数 R 和标准偏差如表 2 所示。

表 2 八波段标定值、相关系数、标准偏差

Table 2 Calibration values, correlation coefficient and standard deviation of 8 wavebands			
波长/nm	V_0/mv	R	SD
365	63 341	0.997 08	0.009 63
412	49 805	0.999 16	0.004 39
500	20 599	0.998 63	0.003 2
610	50 750	0.998 85	0.002 91
675	47 954	0.998 89	0.002 38
862	56 485	0.998 18	0.002 43
940	51 672	0.998 92	0.003 51
1024	39 703	0.999 07	0.00 161

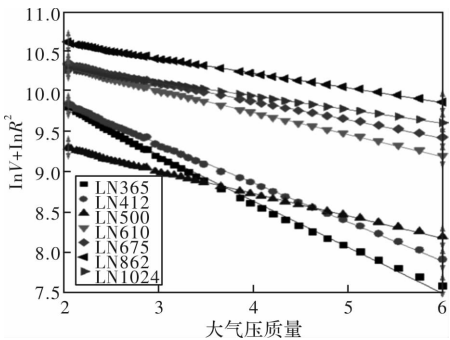


图 7 Langley 拟合直线(2018-05-02)

Fig. 7 Langley fitting straight line(2018-05-02)

3.2 天空辐亮度

太阳辐射计观测一般常采用实验室内经过绝对辐射定标的积分球作为光源,将太阳辐射计的

天空光测量信号标定为辐亮度^[13],还可以用“标准灯+参考板”法进行辐亮度定标,如图 8 所示。此外,还有不依赖于积分球辐亮度绝对值的传递定标^[14]。

“标准灯+参考板”法中标准光源采用的是额定功率为 1 kW 的石英-卤素灯,溯源于中国计量科学研究院。标准灯和消杂光光阑安装在平行导轨上,调节灯丝、消杂光光阑和参考板中心同轴。直流稳流源为标准灯提供电源,预热 30 min 之后,正常工作电流为 8.1 A。直流标准电阻和数字万用表用于实时监测稳流源的电流输出,PSR 放置在平移台上,光轴与参考板平面呈 45°,视场中心对准参考板的中心。

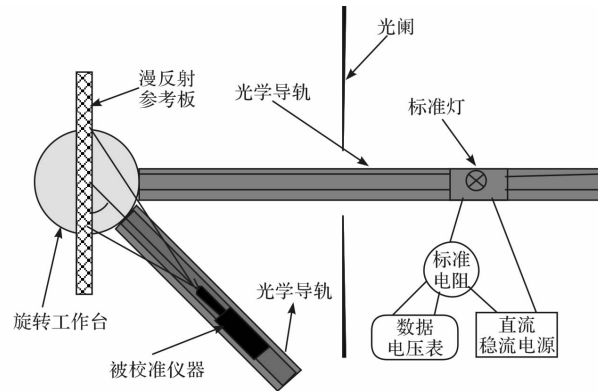


图 8 “灯+板”定标系统示意图
Fig. 8 Schematic diagram of lamp+board calibration system



图 9 “灯+板”定标系统实物图
Fig. 9 Physical map of lamp+board calibration system

PSR-2 波段 i 响应度符合(2)式:

$$C_{\text{PSR}_i} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\text{panel}}(\lambda) RSR_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSR_i(\lambda) d\lambda \over DN_i} \tag{2}$$

式中: i 是 PSR 的波段号; $L_{\text{panel}}(\lambda)$ 是参考板的光谱辐射亮度; $RSR_i(\lambda)$ 是太阳光度计的相对光谱响应函数; DN_i 是对地辐射计与 PSR 波段的输出 DN 值。只要标准灯与参考板之间的距离确定,参

考板的光谱辐射亮度可表示为

$$L_{\text{panel}}(\lambda) = \frac{E_d(\lambda) \cdot \rho_{\text{panel}}(\lambda)}{\pi} \quad (3)$$

$$E_d(\lambda) = E_{d_0}(\lambda) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (4)$$

式中: $\rho_{\text{panel}}(\lambda)$ 是参考板在仪器观测方向上的反射率; d 是标准灯与参考板之间的距离; d_0 是标准灯的校准距离, 为 500 mm; $E_{d_0}(\lambda)$ 是距离标准灯灯丝 d_0 处的光谱辐射照度, 由计量院以金点黑体为基准, 依据普朗克黑体辐射定理传递, $E_d(\lambda)$ 是距离标准灯灯丝 d 处的光谱辐照度, 可根据照度平方反比定律计算得到。实验室中, 标准灯放置位置是按照标准灯的校准距离放置的, 故 $\frac{d_0}{d} = 1$ 。可得到(5)式:

$$C_{\text{PSR}_i} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_d(\lambda) \rho_{\text{panel}}(\lambda) \text{RSR}_i(\lambda) d\lambda}{\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{RSR}_i(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

$$\frac{DN_i}{DN_i}$$

4 仪器精度验证与分析

2018年5月2日, 用 PSR-2 在敦煌卫星辐射校正场基地楼顶的观测数据进行了 Langley 法定标(见图7), 得到各通道的定标系数(见表2), 进行了仪器温控性能测试验证。并处理了该仪器在合肥地区观测的历史数据^[15], 并与同时同地观测的 CE318DP 系列仪器进行了对比。由于两台仪器的中心波长不同, 我们采用卫星在轨场地定标中需要导入大气传输模型 6S、MODTRAN 的 550 nmAOD 进行对比, 550 nmAOD 由其他两个通道的 AOD 通过最小二乘法拟合得到。

实验期间, 用 PSR-2 的实测恒温仓温度数

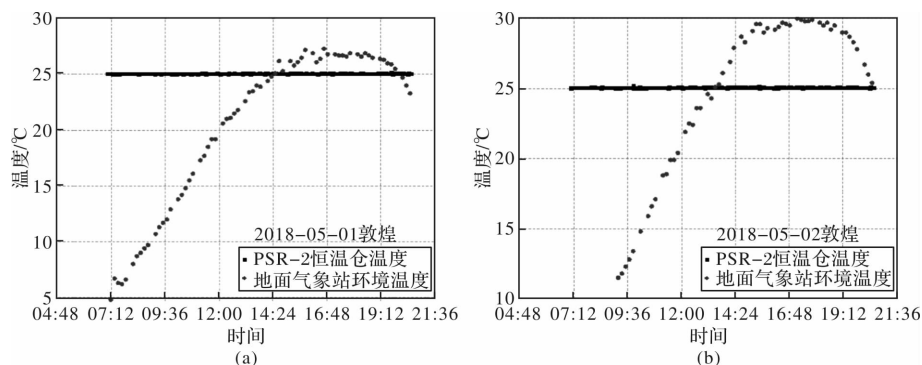


图10 温控温度与环境温度对比

Fig. 10 Temperature comparison between temperature control and ambient temperature

据与同步观测的地面气象站测量数据比较, 图10给出了两仪器相同时间段的对比图。由图可以看出, 当地5月1、2日7:00-21:30环境的最大温差约25°C, 但 PSR-2 内部恒温仓的温度基本不变(25±0.3°C)。在敦煌夏季和冬季, 观测仪器面临着直射约50°C高温和零下15°C的低温, 这难免会影响仪器的观测的精度, PSR-2良好的温控性能具有很强的现实应用价值, 特别是两极观测。

图11、12分别给出了相同时间段的 PSR-2 和 CE318DP、CE318N 系列太阳光度计在 550 nm 波段气溶胶光学厚度^[15]与可大气柱水汽含量的对比图, difference 表示差值。由图11和图12可以看出, 在合肥、敦煌两种仪器测得的气溶胶光学厚度和大气柱水汽含量趋势基本一致, 即总体测量结果有较好的一致性。进一步分析得到两种仪器的气溶胶光学厚度(AOD)的偏差均小于0.02, 大气柱水汽含量误差均小于0.1。出现误差的主要原因是 CE318 类太阳光度计采用的大气外界测量太阳的仪器信号 V_0 是出厂标定的, 时间相对久远, 可能发生不同程度的衰变, 而 PSR-2 Langley 法(940 nm 通道采用改进 Langley 法)定标后对历史数据处理也存在类似问题。此外, 若大气不稳定, 气溶胶光学厚度变化较快, 而 CE318 与 PSR-2 各通道并非完全同步观测。还存在由于二者之间的中心波长有差异, 550 nm 气溶胶光学厚度由2个波段的气溶胶光学厚度拟合得到, 这难免引入了误差。特别940通道数据反演得到的大气柱水汽含量, 水汽含量存在着10%的不确定度^[16]。

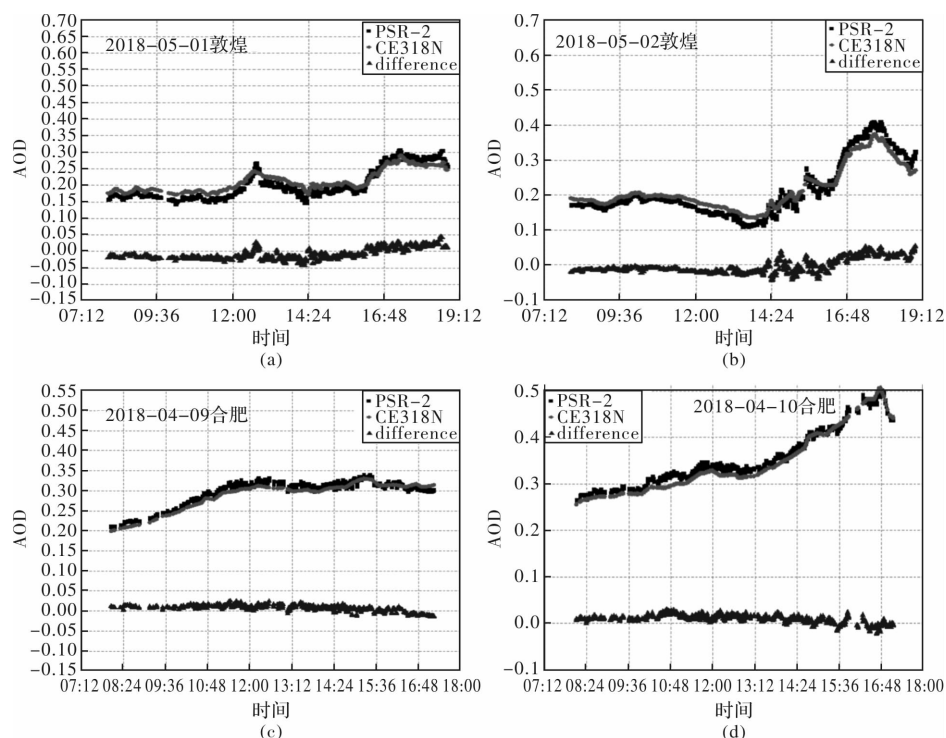


图 11 550 nm 气溶胶光学厚度对比

Fig. 11 Comparison of aerosol optical thickness at 550 nm

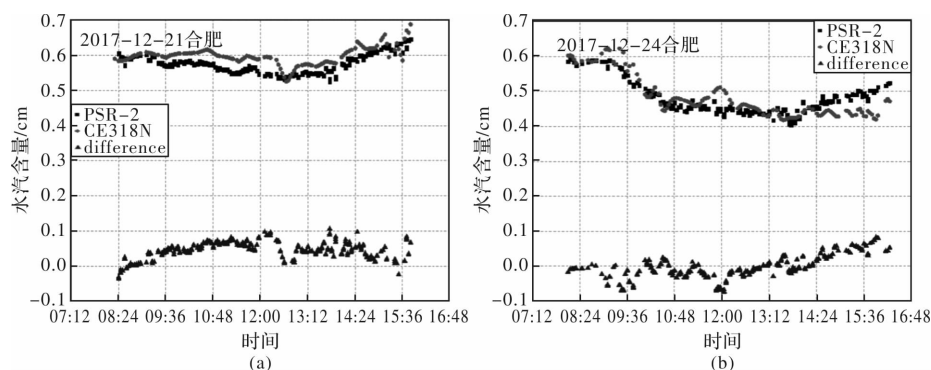


图 12 大气柱水汽含量对比

Fig. 12 Comparison of column of water vapor

5 结论

PSR-2 太阳光度计设有 365 nm、412 nm、500 nm、610 nm、675 nm、862 nm、940 nm、1 024 nm 8 个观测通道,各通道能够独立同时工作,主要通过测量不同波长的太阳直射信号得到相应波长的大气光学厚度、气溶胶光学厚度以及整层的大气透过率。也可以通过大气光学厚度数据计算整个大气柱的含水量。此外,PSR-2 还可以测量等天顶角和太阳所在主平面的天空光信号,用来反演气溶胶粒子谱、散射相函数等许多光学特性参数。实验结果表明,PSR-2 能够在野外长时间工作,温控测试性能良好,观测数据与国外行业

标准 CE318 对比,气溶胶光学厚度偏差小于 0.02,水汽偏差小于 0.1,误差的主要原因是两台仪器 CE318 各通道并非同时观测、定标时间的差异、拟合 550 nm AOD 两通道中心波长的差异等。所以该仪器在常态化环境监测、气象预报、自动化卫星定标等方面有着很强的实用价值。进一步提高数据的反演精度,充分提取和利用遥感信息将成为遥感仪器未来的发展趋势。因此我们研制了添加偏振功能的多通道偏振太阳光度计并正在野外测试以弥补偏振信息的缺失,未来将进一步融合月亮跟踪与观测的光度计以填补夜晚遥感信息的空白。

参考文献:

- [1] ZHAO Zhigang. Sun photometer[J]. Infrared, 2006, 17(6):35-40.
赵志刚. 太阳辐射计[J]. 红外, 2006, 17(6):35-40.
- [2] ZHAO Bolin, WANG Qiang, MAO Jietai, et al. Optical remote sensing of atmospheric aerosols and water vapor[J]. Scientia Sinica, 1983, 13(10):951-962.
赵柏林, 王强, 毛节泰, 等. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究[J]. 中国科学, 1983, 13(10):951-962.
- [3] LI Jianyu, ZHAN Jie, GAO Yiqiao, et al. Development and calibration of DTF-5 sun-photometer[J]. Journal Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(2):141-149.
李建玉, 詹杰, 高亦桥, 等. 新型太阳光度计 DTF-5 的研制及标定[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(2):141-149.
- [4] LI D H, LI Z Q, BIAN L, et al. Analysis of aerosol properties using groundbasedsun-sky radiometer in polar region[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(3): 553-565.
- [5] HU Xiuqing, ZHANG Yuxiang, ZHANG Guangshun, et al. Measurements and study of aerosol optical characteristics in china radiometric calibration Sites[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 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.
- [6] KAZADZIS S, KOUREMETI N, DIÉMOZ H, et al. Results from the 4th WMO filter radiometer comparison for aerosol optical depth measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18: 3185-3201.
- [7] RAPTIS P I, KAZADZIS S, GRÖBNER J, et al. Water vapour retrieval using the precision solar spectroradiometer[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11:1143-1157.
- [8] NAKAJIMA T, TANAKA M, YAMAUCHI T. Retrieval of the optical-properties of aerosols from aureole and extinction data[J]. Applied Optics, 1983, 22(19): 2951-2959.
- [9] SHAW G E, REAGAN J A, HERMAN B M. Investigations of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer[J]. Journal of Applied Meteorology, 1973, 12(2): 374-380.
- [10] LI Z Q, GU X F, WANG L, et al. Aerosol physical and chemical properties retrieved from groundbased remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(2): 10171-10183.
- [11] ZHAI Wenchao, LI Jianjun, ZHENG Xiaobing, et al. Research on methond of calibration sun channels of sun radiometers[J] Acta Optica Sinca, 2012, 32(4): 131-136.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 131-136.
- [12] HU Xiuqing, ZHANG Yuxiang, HUANG Yifen, et al. The total amount of water vapor in atmosphere was retrieved using the solar radiometer 940 nm channel[J]. Meteorological Science and Technology, 2001, 29(3): 12-17.
胡秀清, 张玉香, 黄意玢, 等. 利用太阳辐射计 940 nm 通道反演大气柱水汽总量[J]. 气象科技, 2001, 29(3): 12-17.
- [13] XU Qiuyun, ZHENG Xiaobing, ZHANG Wei, et al. Advance calibration method for sun radiometers[J]. Acta Optica Sinca, 2010, 30(5):1337-1342.
徐秋云, 郑小兵, 张伟, 等. 太阳辐射计先进定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5):1337-1342.
- [14] LI Z Q, BLAREL L, PODVIN T, et al. Transferring the calibration of direct solar irradiance to diffuse-sky radiance measurements for CIMEL sun-sky radiometers[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1368-1377.
- [15] YANG Lei, ZHANG Xuewen, HAN Qijin. 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.
- [16] MA Jinji. Using sun photometer to retrieve atmospheric column water vapor content of Hefei [J]. Journal of Anhui Normal University, 2006, 29(3): 37-40.
麻金继. 利用太阳辐射计反演合肥地区的水汽含量[J]. 安徽师范大学学报, 2006, 29(3):37-40.