

不同视场下太阳透射比值的快速测量与云检测

杨东^{1,2**}, 李建玉³, 徐文清^{3***}, 徐青山^{1*}, 魏合理^{3,4}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所基础科学中心光电探测室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

³中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴中国科学技术大学环境科学与光电技术研究院, 安徽 合肥 230026

摘要 与气溶胶粒子相比,前向小角度太阳透射比值变化对卷云中的冰晶粒子更加敏感。研发了一种基于图像跟踪、自动快速变视场的太阳光度计 VFOVSP,它可快速测量窄视场到宽视场太阳的透射辐射,为地基测量卷云提供了新的技术手段。介绍了仪器的系统组成与测量原理。在大气无吸收波段,将仪器 VFOVSP 经 Langley 法标定后的测量结果与 POMO2 的测量结果进行对比,以验证仪器测量精度的可靠性。在不同的天气条件下进行测量,结果表明:不同小角度视场下透射比值的变化与粒子的种类有关,这为区分薄卷云和气溶胶粒子提供了可能。该仪器弥补了传统太阳光度计在有云天气下实时性、单一视场探测的不足,可以较好地识别出当前大气下是否有卷云存在,能够更好地满足实际科研需求。

关键词 光学器件; 可变视场; 光度计; 卷云探测; 图像跟踪

中图分类号 TH765

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1012001

Fast Measurement and Cloud Detection of Solar Transmission Ratio at Different Fields of View

Yang Dong^{1,2**}, Li Jianyu³, Xu Wenqing^{3***}, Xu Qingshan^{1*}, Wei Heli^{3,4}

¹Laboratory of Photoelectric Detection, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

³Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The forward small-angle solar transmittance ratio is more sensitive to ice crystal particles in cirrus clouds compared with aerosol particles. A photometer, named VFOVSP, is developed based on image tracking and automatic fast changing field of view, which can quickly measure transmitted radiation from narrow field of view to wide field of view of the sun. It provides a new technology for ground-based measurement of cirrus. The system composition and measurement principle of the instrument are introduced. In the atmosphere non-absorption band, after the instrument is calibrated with Langley method, the VFOVSP measurement results are compared with the measurement results of POMO2 photometer to verify the reliability of the instrument measurement accuracy. Under different weather conditions, the experimental results show that the transmission ratio at different small angle fields of view is related to the type of particles, which makes it possible to distinguish thin cirrus clouds and aerosol particles. The instrument makes up for the lack of real-time and single-field detection of traditional solar photometers in cloudy weather. It can better identify whether there is cirrus under the current atmosphere and meet actual scientific research needs.

Key words optical devices; variable field; photometer; cirrus detection; image track

OCIS codes 120.4640; 230.3120; 120.4640; 010.1615; 110.2970

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-20; 录用日期: 2018-04-25

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201608)、中国科学院 GF 实验室创新基金(CXJJ-16S081)

* E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn; ** E-mail: yangdong19901010@sina.com; *** E-mail: wqxu@aiofm.ac.cn

1 引 言

气溶胶和云对大气辐射传输、光电工程应用、天气和气候变化具有重要影响。除此之外,卷云是一个主要的背景辐射干扰源,其主要由形状和大小不同的冰晶粒子组成。与气溶胶和水云相比,卷云具有强烈的前向散射。卷云层反射太阳光,会对空间目标识别探测以及卫星对地观测产生不可忽视的影响^[1-3]。卷云云层较高,一般较薄且透光性良好,存在时间较短,因此探测其性质较为困难,并且薄卷云时常会干扰气溶胶光学特性的测量。因此,区分气溶胶与薄卷云具有重要的研究意义。

在大气光学中,传统的太阳辐射计常被用来测量太阳的直接辐射,其探测波段常被用于获取大气气溶胶的光学性质和水汽含量等。卷云在地球辐射收支及水循环中具有重要作用,其辐射特性一直是国际上活跃的研究课题。光学厚度和冰晶粒子的有效尺度是影响卷云辐射特性的重要参数,为此,很多专家开展了如何确定卷云光学特性方面的研究^[4-5]。

地基遥感探测具有时间连续、观测方便的优点,作为卫星遥感的补充及验证,得到了快速发展。目前,地基主要基于偏振激光雷达主动遥感探测云的后向散射特性来识别卷云和探测卷云特性,但其一般用于夜晚探测大气^[6-7]。而白天,地基主要采用天空辐射计来探测云的光学特性。如:Nakajima等^[8]将天空辐射计测量云透射的太阳辐射与云雷达测量结果进行对比,确定了云的光学厚度和有效粒子半径。Leontieva^[9]等基于一种新型多光谱旋转遮蔽影带辐射仪(MFRSR)实现了对太阳散射和直接辐射比值的测量,并推断出了云的有关参数。Shiobara等^[10]给出一种纠正前向小角度散射对卷云透射辐射影响的方法,近似提取了云的光学特性。前向小角度视场的散射辐射分布与散射介质粒子的大小和形状有关,通过前向小角度散射能量的比较,可以获得散射介质的状态^[11-12]。李建玉等^[13]研制了一种双筒多视场太阳光度计,其测量结果表明,不同视场太阳透射比值对粒子的光学厚度和有效尺度具有一定的敏感性。但双筒多视场太阳光度计的测量时间较长,而云的光学特性随时间和空间变化较快,为了确保精确测量卷云的有关信息,区别卷云与气溶胶粒子,仪器的测量时间需要缩短。另外,双筒多视场太阳光度计的两套光路系统和器件参数的一致会引入测量误差。

本文设计了一种快速变视场太阳光度计VFOVSP,通过CCD图像跟踪避免了有不均匀的

薄云时,四象限探测器的4个象限能量分布不均,容易丢失目标的问题。有关研究表明,可见光波段对云的光学厚度较为敏感,近红外波段对云中的粒子尺度较为敏感^[14],故而本研究选择可见到近红外的带通滤光片。一般的光学设计通过系统变焦来实现视场的切换^[15],为减小仪器结构设计的复杂度,缩短仪器测量时间,实时检测云态的变化,本课题组提出了一种新的设计方案,并进行仪器研制,将所研制的仪器与POMO2辐射计进行实验对比。基于Yang等^[16-17]提出的有限时域差分法和改进的几何光学法精确计算了不同形状和大小的冰晶粒子的光散射,建立了几种卷云冰晶粒子的散射数据库;对于气溶胶和水云,基于Mie散射建立了相应的散射数据库,再利用精确计算大气多次散射的辐射传输专用软件DISORT^[18-19],计算大气不同介质前向小角度的透射比值,并与仪器在不同天气下的测量结果进行对比,结果表明:卷云大气下的透射比值明显区别于晴朗天气下气溶胶粒子的透射比值,能够根据视场的透射比值识别出当前天气是否有卷云存在;研制的仪器可以应用于实际的大气探测。

2 设计原理

基于Mie散射计算了水云和气溶胶粒子的散射特性,利用改进的几何光学法计算了卷云的散射特性,得到了卷云、水云和气溶胶在670 nm波段下的相函数,如图1所示。可见:卷云在前向散射角 0° 附近显示出十分剧烈的峰值。在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 的前向小角度内,卷云的相函数比水云和气溶胶的变化更剧烈,如图2所示。利用这一特性可以有效地检测出卷云是否存在。基于地面测量卷云时,可通过接收来自云层前向不同的小角度散射来判断是否有卷云存在。通过分析不同视场辐射通量比值的变化能够在一定程度上识别出卷云,并且这与卷云中冰晶粒子

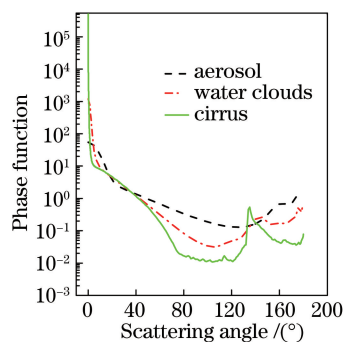


图1 卷云、水云、气溶胶的相函数

Fig. 1 Phase functions of cirrus, water clouds and aerosol

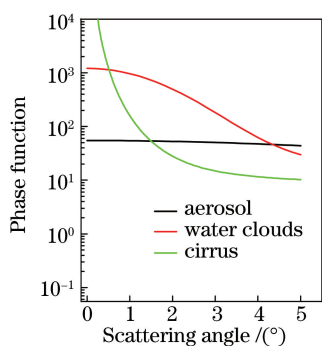


图 2 相函数的比较

Fig. 2 Phase function comparison

的有效尺度和光学厚度有关。

卷云在 670 nm 前向不同视场下总透射通量比值 R_{θ_0/θ_1} 的计算公式如下：

$$R_{\theta_0/\theta_1} = \frac{F_{\theta_0} + F_{\theta_0} e^{-\tau_c}}{F_{\theta_1} + F_{\theta_1} e^{-\tau_c}}, \quad (1)$$

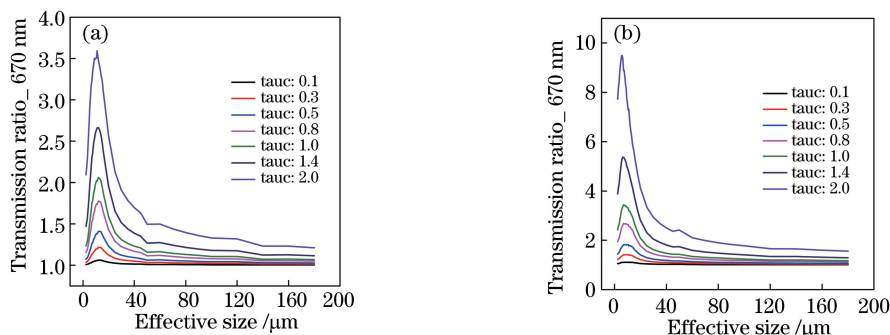


图 3 不同视场下,卷云的透射比值随有效尺度和光学厚度的变化。(a) 2.0°/0.8°视场;(b) 5.0°/0.8°视场

Fig. 3 Changes of transmission ratio of cirrus clouds with effective size and optical thickness at different fields of view.

(a) 2.0°/0.8° field of view; (b) 5.0°/0.8° field of view

3 系统测量原理

VFOVSP 探测模块机械结构图如图 4 所示;上端镜筒是太阳跟踪光筒;下端是变视场探测光路系统,由内壁涂黑的探测镜筒、滤光片转盘、可变程控视场光阑、聚焦透镜与光电探测器组成。探测镜筒

式中: F_{θ_0} 和 F_{θ_1} 分别为不同视场下的散射辐射通量; $F_0 e^{-\tau_c}$ 为直射辐射通量。

利用 DISORT 软件模拟计算了卷云在 670 nm 波段下透射比值随有效尺度和光学厚度(tauc)的变化,如图 3(a)、(b)所示。由图 3 可以看出:2.0°/0.8°和 5.0°/0.8°视场下的透射比值在有效尺度较小(<40 μm)时,随有效尺度的增大而先增大后减小,且变化剧烈,峰值在 12 μm 左右;当有效尺度较大(>40 μm)时,透射比值随有效尺度的增大而缓慢减小。另外,从图 3 中还可以看出,不同视场下的透射比值随着卷云光学厚度的增大而增大,这主要是由随着光学厚度增大,直射通量逐渐减小造成的。模拟结果表明,卷云在不同视场下的透射比值主要与其冰晶粒子的有效尺度和光学厚度有关。因此,设计一种能够识别卷云并反演卷云光学特性的快速变视场光度计具有重要意义。

内是限制光通量的光阑组和透镜,光阑组用于减小杂散光对测量数据的影响。有时为了避免太阳光太强而导致探测器的输出电压饱和,需要适当添加衰减片。考虑到太阳约 32' 的视场,所用程控视场光阑可使光接收系统满足最小 0.8°和最大 5°视场的需求。

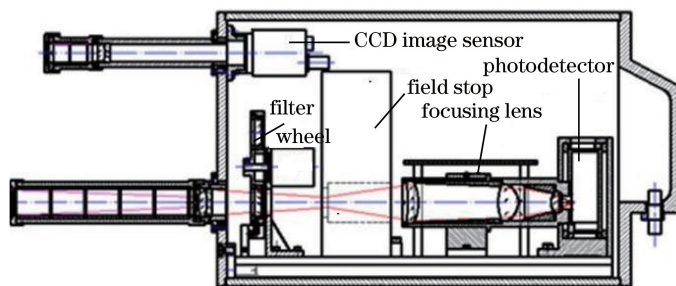


图 4 VFOVSP 探测模块机械结构图

Fig. 4 Mechanical structure diagram of detecting module of VFOVSP

光路测量系统原理如图 5 所示, θ 为视场角, d 为视场角对应的可变程控视场光阑的孔径, f 、 f_1 、

f_2 为透镜的焦距。

从图 5 中可以得到:

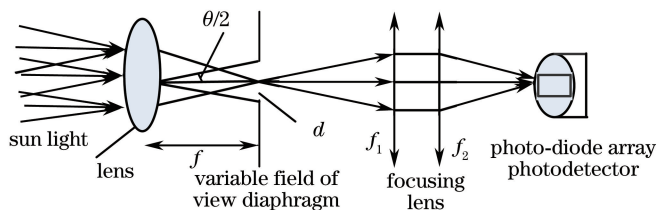


图 5 光路测量示意图

Fig. 5 Schematic of measurement beam path

$$\frac{d}{2} = f \times \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

从(2)式中可以看出,在探测光路中,在所有透镜焦距不变的情况下,仪器视场角 θ 是由程控可变视场光阑的孔径 d 的大小决定的。通过程序控制视场光阑孔径的大小,可以改变探测光路系统的视场。

仪器工作时正面朝南水平摆放。仪器装有用零位检测的光电开关,以实现初始位置的定位。跟踪方法采用天文视日轨迹粗跟踪结合 CCD 图像精跟踪的方式^[20],VFOVSP 实物图如图 6 所示。运行测量程序后,天文视日轨迹跟踪计算出太阳的高度角、方位角,仪器转动相应的水平步数与俯仰步数;当太阳出现在 CCD 视场内时,上位机系统实时对采集到的太阳图像进行灰度处理^[21-22],计算太阳光斑质心坐标离 CCD 视场中心位置的距离。上位机系统将信号通过 RS422 串行通信下发到下位机,下位机系统控制水平、俯仰电机来精细微调二维中空转台,从而实时跟踪太阳。即使有厚云,太阳被完全遮挡也无太大影响,一旦目标出现,系统能够迅速跟踪太阳。上位机系统在判断仪器精确跟准太阳后,下发测量命令,通过控制可变程控视场光阑能够实现不同视场的快速测量。

4 定标原理和方法

仪器选用可见到近红外带宽为 10 nm,中心波段分别为 440,670,880 nm 的滤光片。由于所选波段处于非气体吸收波段,仪器定标采用常用的 Langley 法。按照比尔-朗伯定律,地球表面上波长为 λ 的直接太阳辐射 F_λ 可以表示为

$$F_\lambda = F_{0\lambda} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \exp(-\tau_\lambda m), \quad (3)$$

式中: $F_{0\lambda}$ 为日地平均距离处大气层外波长为 λ 的太阳直接辐照度; τ_λ 为波长为 λ 的光学厚度; m 为大

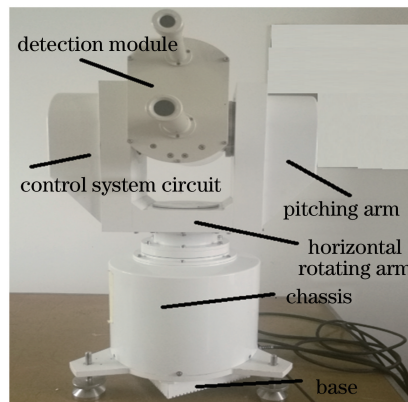


图 6 仪器实物结构图

Fig. 6 Physical structure diagram of instrument

气质量; $(d_0/d)^2$ 为日地距离修正因子。由(3)式可知,只要 τ_λ 不变,即大气保持稳定, F_λ 与 m 就有确定的关系:

$$\ln \left[F_\lambda / \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right] = \ln F_{0\lambda} - \tau_\lambda m \quad (4)$$

仪器探测的输出信号正比于探测器在仪器视场角内接收的太阳直接辐照度,信号经后续电路转换后输出的数值 $V(\lambda)$ 也正比于辐照度。定义 $P(\lambda)$ 是仪器的测量值, $V_0(\lambda)$ 是对应于大气层顶的太阳直接辐照度 $F_{0\lambda}$ 的仪器测量值,则(3)式可以改写为

$$\ln \left[V_\lambda / \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right] = \ln V_{0\lambda} - \tau_\lambda m, \quad (5)$$

即 $\ln[V_\lambda / (d_0/d)^2]$ 与 m 呈线性关系,且截距正比于太阳常数,斜率即为大气光学厚度。实际上,大气不可能十分稳定,在不同的大气质量(即不同时刻)下测得的 $\ln[V_\lambda / (d_0/d)^2]$ 与 m 往往并不能很好地拟合成一条直线,因此需要尽量在良好的天气条件下进行仪器的定标。

5 定标结果和测量结果分析

2017 年 11 月 9 日下午,合肥天空晴朗无云,能见度为 25 km,适合定标。采用 Langley 法的定标

结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,三波段不同视场的相关系数 R 都在 -0.998 以上,标准误差(SD)在 0.021 以下。图 8 给出了 11 月 9 日下午三波段不同视场下气溶胶光学厚度(AOT)的变化。从图 8 中可以看出,在天气晴朗的条件下,同波段不同视场的气溶胶的光学厚度变化趋势基本一致。图 9 给出了晴朗大气下 670 nm 波段,采用仪器 VFOVSP 与 POMO2 型太阳光度计测量的气溶胶光学厚度的对比,可见:两者的相关性较好,仪器 VFOVSP 在不同视场下的测量结果与 POMO2 测量的 AOT 的均方根误差分别为 0.12% 、 0.38% 和 0.38% ,证明了仪器测量精度的可靠性。仪器 VFOVSP 在 5.0° 、 2.0° 和 0.8° 视场下于上述时间段内测量的光学厚度平均值分别为 0.13196 、 0.13325 、 0.13474 ,三者很接近。但视场越大,测量的光学厚度越小,这是因为大的视场会接收到更多的前向散射,所以测量的光学厚度略偏小。

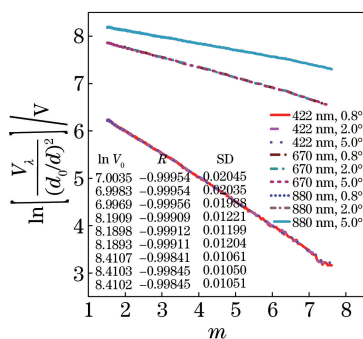


图 7 仪器的标定

Fig. 7 Calibration of instrument

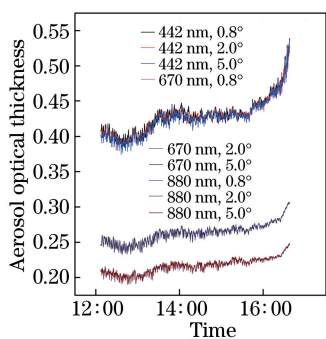


图 8 不同视场下气溶胶的光学厚度

Fig. 8 AOT of aerosol at different fields of view

在不同的天气条件下进行测量:11 月 11 日、23 日、29 日分别为较为晴朗、有较多薄云且云层较高(根据肉眼观测多为薄卷云)、多为厚云且云层较低(主要为水云)的三种天气。670 nm 波段不同视场下的透射比值如图 10(a)~(c)所示。结果表明:在较为晴朗的天气下,如图 10(a)所示, $2.0^\circ/0.8^\circ$ 和

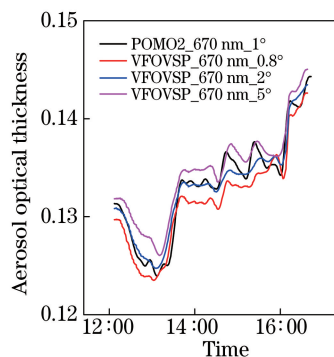


图 9 气溶胶光学厚度的对比

Fig. 9 Comparison of aerosol optical thickness

$5.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射比值为 $1 \sim 1.05$,且比值比较稳定,说明晴朗天气下的大气主要为气溶胶粒子,其前向散射能量较弱,太阳直接辐射占据能量的主要部分。从图 10(b)中可以看出,11 月 23 日,太阳测量路径上有薄云,不同视场下的透射比值出现波动,尤其是在 $15:00$ 之后,随着光学厚度增大,透射比值明显增大,当光学厚度达到 1 左右时, $2.0^\circ/0.8^\circ$ 和 $5.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射比值分别达到 2 和 4 以上,说明此时的散射能量为透射辐射的主要部分。从图 10(c)中可以看出,11 月 29 日,太阳测量路径上有厚云且光学厚度达到 4 左右时, $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射比值达到 1.8 ,而 $5.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射比值基本上达到 4 以上。对比图 10(b)、(c)可以发现,由于不同视场下透射比值与大气中粒子的光学厚度和有效尺度有关,11 月 23 日的云层很可能为卷云,而图 10(c)在相同的光学厚度下的透射比值比图 10(b)测得的比值要弱些,说明 11 月 29 日的云层很有可能为水云。

为了检验仪器设计的合理性和测量数据的可靠性,本课题组将仪器的实际测量结果与辐射传输软件 DISORT 进行对比。通过 DISORT 计算气溶胶、水云以及卷云在 670 nm 波段和 $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场内的透射通量比值,结果如图 11(a)~(c)所示。从图 11 中可以看出:气溶胶、水云以及卷云在 $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射通量比值随有效尺度的变化明显不同;随着光学厚度增加, $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射通量比值呈增大的趋势,这是由于散射辐射占透射辐射通量的比值逐渐增大;从量值来看,卷云的透射比值明显高于气溶胶和水云,这是由于冰晶粒子的散射更强烈些。与图 10(a)~(c)对比可知,不同视场下的透射比值与粒子的有效尺度和光学厚度有关,对于卷云冰晶粒子和水云来说,有效尺度为 $12\ \mu\text{m}$ 左右,其在 $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场下的透射比值有峰

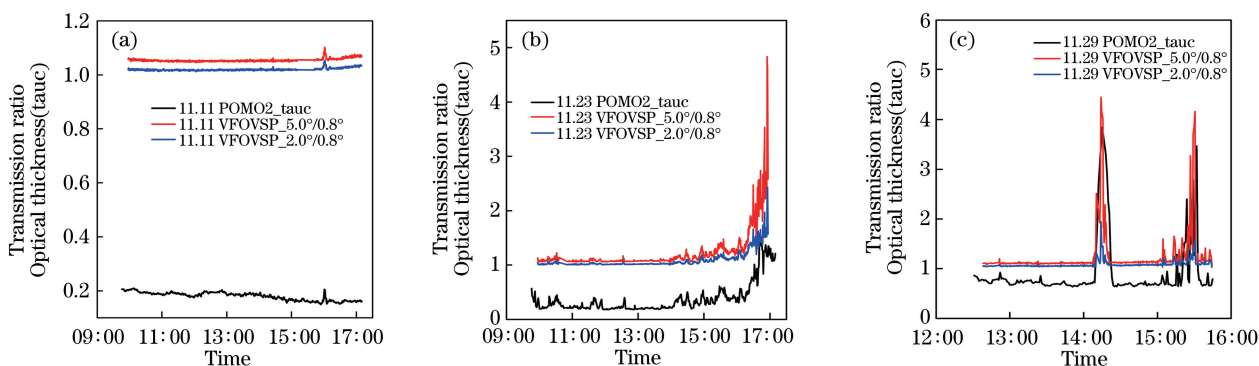


图 10 670 nm 波段下不同天气和视场下的透射比值。(a) 2017 年 11 月 11 日；
(b) 2017 年 11 月 23 日；(c) 2017 年 11 月 29 日

Fig. 10 Transmission ratio in 670 nm waveband under different weather states and fields of view.

(a) November 11, 2017; (b) November 23, 2017; (c) November 29, 2017

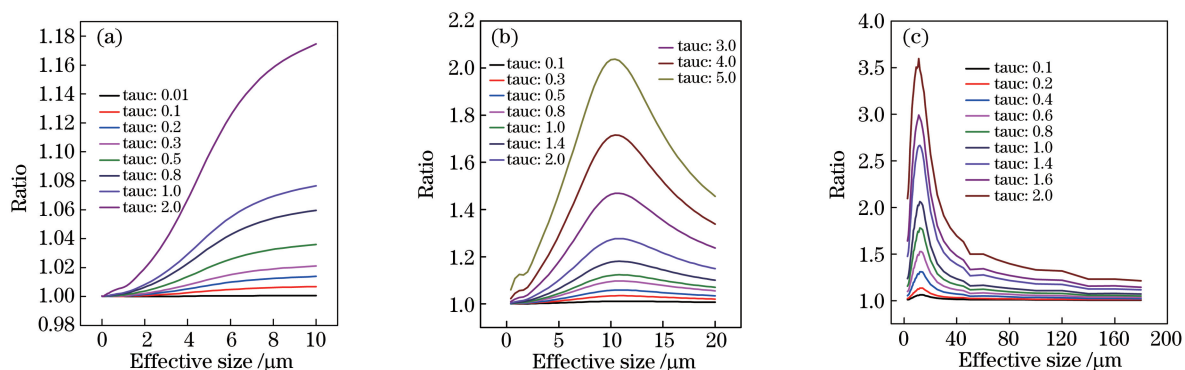


图 11 前向小角内总透射通量比值随有效尺度的变化。(a)气溶胶；(b)水云；(c)卷云

Fig. 11 Total transmission flux ratio changes with effective sizes in forward direction small angle.

(a) Aerosol; (b) water cloud; (c) cirrus

值。在粒子有效尺度一定的情况下，随光学厚度增加，透射比值增大。将模拟结果与实验测量结果进行对比后发现：在图 10(b)中，当光学厚度在 1 附近时， $2.0^\circ/0.8^\circ$ 透射比值较大，平均比值为 1.6 左右，此时的云层应为卷云，且粒子的有效尺度为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ；而在图 10(c)中，当光学厚度为 3.5 左右时， $2.0^\circ/0.8^\circ$ 视场透射比的平均值约为 1.5，说明此时测量到的介质很可能为水云，其卷云中液滴的有效粒子半径为 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 。

通过对比图 10 与图 11 可知，在不同的天气状况下，变视场光度计测量的前向视场的比值与 DISORT 模拟的结果相似。当天气晴朗时，因只考虑气溶胶，故而不同视场下的透射比值较小。当有云出现在测量路径上时，视场比值明显增大，且云的种类不同，其视场比值的大小也会存在一定差异；与水云相比，卷云变化快，且透射比值大。DISORT 软件模拟计算时采用 Mie 散射理论计算球形气溶胶粒子和水云中水滴粒子的相函数。假定大气只有

均匀的一层卷云，使用中纬度夏季大气廓线，太阳天顶角为 30° ，地表为草地型。由于 DISORT 计算卷云相函数存在一定近似，并且无法精确反映局地大气以及地表条件等，因此不同大气介质下的模拟结果会与实际大气测量值存在一定差异。

6 结 论

介绍了一种新型的快速变视场太阳光度计，通过测量太阳辐射在不同视场下透射比值的变化的变化，为地基探测区别卷云、气溶胶和水云奠定了基础，为反演卷云的光学特性提供了一种新思路。通过与日本 POMO2 型天空辐射计测量的气溶胶光学厚度进行对比，验证了仪器测量精度的可靠性。不同天气状态下的实验结果表明：不同视场下的透射比值变化能够反映出大气中云参数的变化，卷云大气下的透射比值明显高于气溶胶粒子和水云天气下的透射比值，能够较好地识别出云的种类，初步证明了仪器具有云识别能力。经过不同天气长时间的测量后可

知,仪器性能稳定。后续还可结合实测结果及DISORT软件模拟计算分析,通过建立查找表,反演得到薄卷云的光学厚度和有效尺度。与其他仪器相比较,该仪器具有以下优点:

1) 可实现窄视场到宽视场的快速变化,仪器能够获得前向 5° 视场内的太阳透射辐射;

2) 在多云天气下,天文跟踪结合数字CCD图像跟踪方法的跟踪精度高,可避免有云天气下四象限跟踪失效的问题;

3) 由于云的时空特性变化较快,通过采用程控视场光阑改变探测视场,在较短的时间内完成了三波段不同视场的测量,能够较好地探测到云的瞬时变化,提取到云的信息;

4) 采用透射比值的方法避免了实验室标准光源法绝对定标对实验条件的苛刻要求。

参 考 文 献

- [1] Cai Y, Liu Y L, Dai C M, *et al.* Simulation analysis of target and background contrast in condition of cirrus atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801001.
蔡熠, 刘延利, 戴聪明, 等. 卷云大气条件下目标与背景对比度模拟分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801001.
- [2] Cao Y N, Chen X, Wei H L. Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 1965-1970.
曹亚楠, 陈秀红, 魏合理. 卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 1965-1970.
- [3] Cao Y N, Wei H L, Chen X H, *et al.* Simulations of the reflectance of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801004.
曹亚楠, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波反射特性的模拟计算研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801004.
- [4] Ye J, Li W B, Yan W. Retrieval of the optical thickness and effective radius of multilayered cloud using MODIS data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 613-622.
叶晶, 李万彪, 严卫. 利用MODIS数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径[J]. *气象学报*, 2009, 67(4): 613-622.
- [5] Liu X T, Liu Q, Fu Y F. Daytime precipitating clouds identification scheme relying on optical thickness and effective radius[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(5): 903-911.
刘显通, 刘奇, 傅云飞. 基于光学厚度和有效粒子半径的白天降水云识别方案[J]. *大气科学*, 2011, 35(5): 903-911.
- [6] Ji C L, Tao Z M, Hu S X, *et al.* Effective lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0810003.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0810003.
- [7] Ji C L, Tao Z M, Hu S X, *et al.* Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- [8] Nakajima T, King M D, Spinhirne J D, *et al.* Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: marine stratocumulus observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48(5): 728-751.
- [9] Leontieva E, Stamnes K. Remote sensing of cloud optical properties from ground-based measurements of transmittance: a feasibility study [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(11): 2011-2022.
- [10] Shiobara M, Asano S. Estimation of cirrus optical thickness from sun photometer measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(6): 672-681.
- [11] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0529001.
吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0529001.
- [12] Ma Y, Wang L J, Yu J, *et al.* Aerosol concentration measurement based on near-forward light scattering method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092901.
马英, 王龙江, 俞杰, 等. 基于近前向光散射法的气溶胶浓度测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092901.
- [13] Li J Y, Li D Y, Xu Q S, *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.

- [14] Zhao Y J, Wei H L, Chen X H, *et al.* Infrared radiative properties of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(9): 1449-1453.
赵燕杰, 魏合理, 陈秀红, 等. 卷云短波红外辐射特性 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(9): 1449-1453.
- [15] Li Y, Zhang B, Hong Y F, *et al.* Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (11): 1122001.
李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计 [J]. 光学学报, 2013, 33 (11): 1122001.
- [16] Yang P, Liou K N. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(10):2072-2085.
- [17] Yang P, Liou K N. Geometric-optics-integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals [J]. Applied Optics, 1996, 35 (33): 6568-6584.
- [18] Husltu, Bao Y H, Xu J, *et al.* Radiative properties of cirrus clouds based on hexagonal and spherical ice crystals models [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(5): 1165-1168.
胡斯勒图, 包玉海, 许健, 等. 基于六角形和球形冰晶模型的卷云辐射特征研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1165-1168.
- [19] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, *et al.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. Applied Optics, 1988, 27(12): 2502-2509.
- [20] Dai C M, Wei H L, Chen X H. Validation of atmospheric scattering radiance caculated by combined atmospheric radiance transfer (CART) code [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (6): 1575-1581.
戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件 (CART) 大气散射辐射计算精度验证 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1575-1581.
- [21] Li J Y, Li D Y, Wei H L, *et al.* Image tracking system of binocular multi-FOV sun-photometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(5): 40-49.
李建玉, 李多扬, 魏合理, 等. 双筒多视场太阳光度计图像跟踪系统 [J]. 光电工程, 2013, 40(5): 40-49.
- [22] Qin L, Dong L L, Xu W H, *et al.* Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 639-644.
秦莉, 董丽丽, 许文海, 等. CCD 图像灰度与照度的转换标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 639-644.