

基于散射比值的粒子特性提取

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

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 前向小角度的散射辐射分布与散射介质的粒子大小和光学厚度有关。基于一种新型变视场光度计, 测量不同天气条件下的前向小角度散射比值、大气光学厚度 τ 和气溶胶粒子的 Angstrom 指数 α , 并与 DISORT 方法模拟结果进行对比分析。研究表明: 散射比值随光学厚度的增大而增大; 但当光学厚度 $\tau < 1$ 时, 散射比值取决于粒子有效尺度, 粒子尺度越大, 散射比值越小。卷云冰晶尺度较大时 ($D_e > 10 \mu\text{m}$), 其散射比值小于气溶胶粒子和水云, 这为区别薄卷云与气溶胶提供了一种新方法。给出一种提取卷云光学厚度的简单方法, 证明了卷云的消光系数在短波段与波长无关。以上研究为地基探测大气特性提供了一定参考价值。

关键词 大气光学; 前向散射比值; Angstrom 指数; 云粒子

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1001004

Particle-Property Extraction Based on Scattering Ratio

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

¹Laboratory of Photoelectric Detection, Center of Fundamental Science, 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 distribution of forward small-angle scattering radiation is related to the particle size and optical thickness of the scattering medium. The forward small-angle scattering ratio, atmospheric optical thickness τ and the Angstrom index α of aerosol particles are measured based on a new type of variable field photometer under different weather conditions. The results are compared with the results of DISORT simulation. It is shown that the scattering ratio increases with increasing of optical thickness. However, when the optical thickness is less than 1, the scattering ratio would depend on the effective scale of the particle. The larger the particle, the smaller the scattering ratio. When the size of cirrus ice crystal is larger ($D_e > 10 \mu\text{m}$), the scattering ratio is smaller than that of aerosol particles and water clouds. This provides a new method to distinguish thin cirrus clouds with aerosols. A simple method for extracting optical thickness of cirrus clouds is presented. It is proved that the extinction coefficient of cirrus clouds is independent of wavelength in short wavelength band. The research provides a certain reference for ground based detection on atmospheric properties.

Key words atmospheric optics; forward scattering ratio; Angstrom index; clouds particle

OCIS codes 010.1290; 290.2558; 010.1110; 010.1615

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-04-24; 录用日期: 2018-05-16

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

1 引 言

卷云由各种形状的冰晶粒子组成,一般位于对流层中部到平流层底部,对地气系统的能量收支、辐射平衡、气候变化、辐射传输以及大气探测等都有很大的影响^[1]。在可见光波段,卷云可反射(或散射)太阳辐射,使到达地表和云层下的太阳辐射能量减少,冷却大气;而在红外波段,卷云吸收大气和地表的长波辐射,并且向外发射辐射,加热大气。卷云对大气的两种作用效果下的净辐射直接影响着大气的辐射平衡^[2]。

卷云的特性与其散射和发射作用有关,决定了卷云对地表、云下大气以及大气层顶部的辐亮度的影响。卷云的特性主要与其光学和物理参数(如光学厚度、粒子有效尺度、云高等)有关。除了影响气候,卷云层反射的太阳光也会影响卫星对地观测。另外,当地面对空间目标进行探测时,卷云成为一个强背景辐射干扰源,严重影响对目标的识别以及对目标特性的探测^[3]。因此,识别卷云、探测其光学特性有重要的研究意义。在卷云识别技术中,地基探测主要依靠激光雷达^[4]探测云的后向散射。激光雷达一般用于夜晚探测,且通常情况下未考虑大气多次散射的影响^[5]。研究表明:通过前向散射光可以研究物质的有关特性^[6-7],卷云与气溶胶粒子相比,前向小角度散射辐射变化剧烈,通过地基太阳光度计探测云的前向散射特性,实现薄卷云与气溶胶的区分,这对准确提取气溶胶的光学特性具有重要意义。

为了推断云的光学特性,科研工作者们提出了很多方法,但大多数方法都是基于一种复杂的辐射传输模型以反演云的光学特性^[8-10]。在晴朗大气下,通常用太阳光度计测量太阳直接辐射,并推断出气溶胶的光学厚度和谱分布等参数。为此,将比尔朗伯定律应用于有薄云存在的大气条件,通过测量大气的透射辐射,提取薄云的有关信息。由于云的前向散射辐射很强,太阳光度计实际测量到的大气透射辐射值很高(其中包含了云强烈的多次散射辐射),从而导致测量的云光学厚度值偏低,因此,需要对云的光学厚度值进行校正,去除多次散射对云光学特性的影响^[11]。

DISORT 软件模拟计算结果表明:在前向 5°视场内,卷云的相函数比气溶胶的相函数变化剧烈得多,这与介质的光学厚度和粒子有效尺度有关。为

此,可以通过前向不同小角度散射比值的方法来识别卷云与气溶胶粒子,提取卷云的光学特性。

本文研制了一种变视场的太阳辐射计(VFOVSP),仪器有 440, 670, 880 nm 三个探测波段,可以测量 0.8°, 2°, 5°三个视场的太阳透射辐射。在不同天气下,进行实验测量。将大视场内的透射辐射值 F_{5° 和 F_{2° 分别减去小视场的透射辐射能量 $F_{0.8^\circ}$, 对两者求比值并取对数,即得到视场散射对数比值。不同天气下,测量小角度的散射对数比值、气溶胶粒子的 Angstrom 指数 α 和大气光学厚度 τ , 并与 DISORT 的模拟结果进行对比。实验结果表明:实测的小角度的散射对数比值能够较好地识别出当前大气介质中粒子的尺度大小,识别出卷云,并提取其相关参数。

2 测量原理

利用 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散射特性,得到 670 nm 波段下,卷云、水云、气溶胶的平均相函数,如图 1 所示。结果表明:卷云在前向散射角为 0°附近出现了十分剧烈的峰值;在 0°~5°的前向小角内,卷云的相函数比水云和气溶胶的相函数变化更剧烈,前向小角度内散射分布的比较如图 2 所示。利用这一特性,可以有效地检测卷云是否存在。在地面测量卷云时,可通过接收来自云层不同小角度的前向散射判断是否有卷云存在。根据不同视场辐射值的变化,能够在一定程度上识别出卷云,区分出卷云与气溶胶粒子。

利用 DISORT 模拟软件计算了 0.8°, 2°, 5°视场

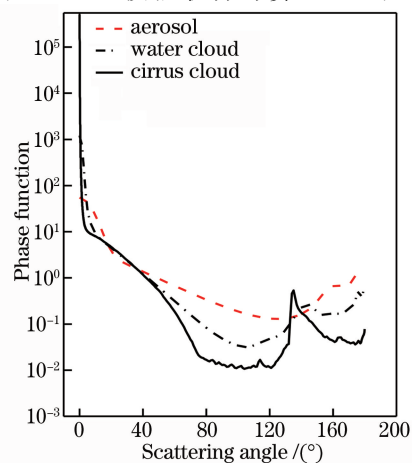


图 1 卷云、水云、气溶胶的平均相函数
Fig. 1 Average phase function of cirrus cloud, water cloud and aerosol

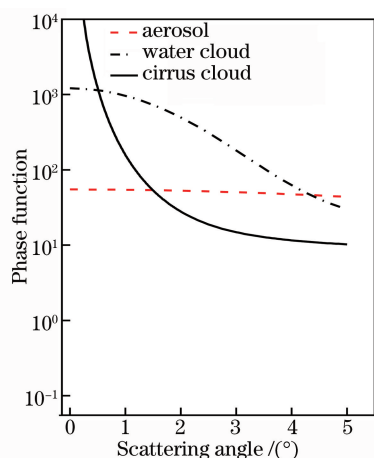


图 2 前向小角度内散射分布的比较
Fig. 2 Comparison of scattering distribution in forward small angle

内的透射辐射能量 $F_{0.8^\circ}$ 、 F_{2° 、 F_{5° ，考虑到太阳视场角为 0.532° ，利用 F_{2° 和 F_{5° 分别减去前向 0.8° 的透射辐射能量 $F_{0.8^\circ}$ 后，将两者相除，得到散射比值为

$$R = \frac{F_{5^\circ} - F_{0.8^\circ}}{F_{2^\circ} - F_{0.8^\circ}} \quad (1)$$

对(1)式取对数，得到不同视场的散射对数比值如图 3(a)~(c)所示。从图中可以看出，在相同光学厚度下，粒子的尺度越小，其视场散射对数比值越大；粒子有效尺度越大，视场散射对数比值越小。这是因为小粒子反射(吸收)太阳光能量较强，而大粒子对太阳光散射能力强。介质的光学厚度越大，其视场散射对数比值也越大。对于卷云冰晶粒子，当尺度较大($D_e > 10 \mu\text{m}$)时，视场散射对数比值小于气溶胶粒子和水云。

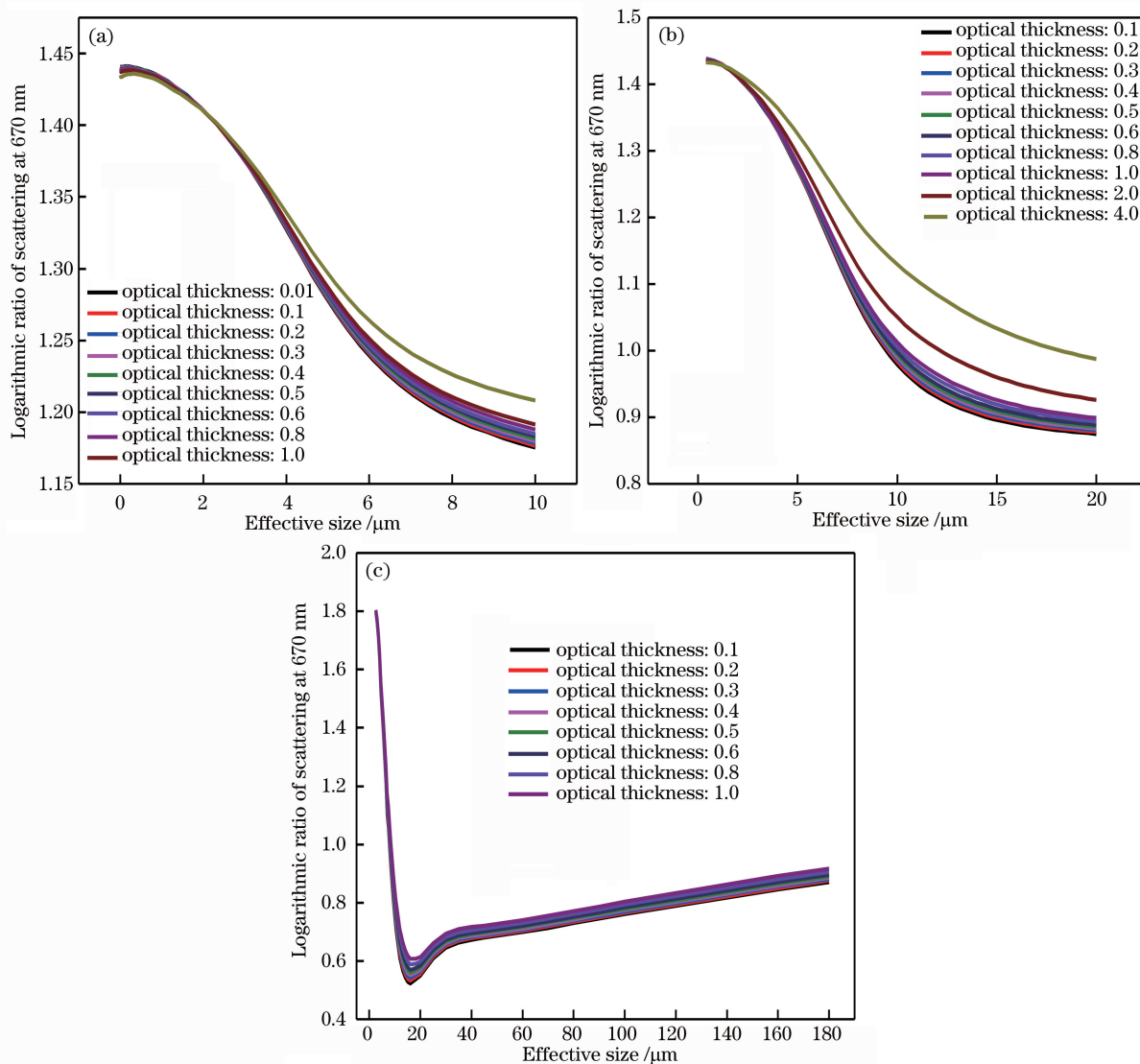


图 3 不同视场的散射对数比值。(a)气溶胶；(b)水云；(c)卷云
Fig. 3 Logarithmic ratio of scattering at different field of views. (a)Aerosol; (b)water cloud; (c)cirrus cloud

3 理论计算方法

3.1 薄云光学厚度提取方法

对于太阳直接辐射,比尔朗伯定律可表示为

$$I^{\text{dir}} = \exp[-(\tau_{\text{ray}} + \tau_{\text{gas}} + \tau_{\text{aer}} + \tau_{\text{cld}})m_0], \quad (2)$$

式中: I^{dir} 为直接光束的透射比; m_0 为大气的质量因子,取决于太阳天顶角与方位角; $\tau_{\text{ray}}, \tau_{\text{gas}}, \tau_{\text{aer}}, \tau_{\text{cld}}$ 分别为大气瑞利散射的光学厚度、大气气体吸收的光学厚度、气溶胶粒子的光学厚度和薄卷云的光学厚度。

瑞利散射的光学厚度与波长的关系可以用 Hansen and Travis(1974)的近似表达式表示为^[12]

$$\tau_{\text{ray}} = \frac{0.008569\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda + 0.00013\lambda^2)P}{P_0}, \quad (3)$$

式中: P 为测量点气压平均气压(hPa); P_0 为海平面的气压。

分子吸收光学厚度 τ_g 由国际上公认的精确逐线积分计算程序 LBLRTM 计算得到^[13]。

对于气溶胶光学厚度,采用 Mie 散射计算,假设气溶胶粒子谱分布符合 Junge 谱分布的条件,气溶胶的光学厚度为

$$\tau_{\text{aer}}(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (4)$$

式中: α, β 为常量。基于变视场太阳光度计测量时,其表达式为

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau_{\text{aer}}^{(670)}/\tau_{\text{aer}}^{(880)}]}{\ln(0.670/0.880)}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\tau_{\text{aer}}^{(670)}}{0.670^{-\alpha}}, \quad (6)$$

式中: $\tau_{\text{aer}}^{(670)}, \tau_{\text{aer}}^{(880)}$ 分别为测量路径无云时,670 nm 和 880 nm 波段测量的气溶胶光学厚度。气溶胶粒子的 Angstrom 指数常量 α 是粒子大小的指标^[14-15],可以适当反映出当前大气环境下粒子的大小,其变化范围为 $0 \leq \alpha \leq 4$ 。气溶胶的污浊系数 β ,依赖于大气中气溶胶的量。一般大气条件下,瑞利散射和分子吸收散射的光学厚度只有微弱的变化,假定其是常量,并可通过以上计算得出。将大气总的光学厚度减去分子的散射与大气吸收的光学厚度,在 670 nm 和 880 nm 波段,仪器测到的气溶胶和薄云的总光学厚度为

$$\tau_{\text{aer+cld}}^{(670)} = \beta \cdot 0.670^{-\alpha} + \tau_{\text{cld}}^{(670)}, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{aer+cld}}^{(880)} = \beta \cdot 0.880^{-\alpha} + \tau_{\text{cld}}^{(880)}, \quad (8)$$

式中: $\tau_{\text{aer+cld}}^{(670)}, \tau_{\text{aer+cld}}^{(880)}$ 分别为 670 nm 和 880 nm 波段气溶胶和云的总光学厚度值; $\tau_{\text{cld}}^{(670)}, \tau_{\text{cld}}^{(880)}$ 为当前薄云的光学厚度值。(7)式和(8)式中分别有三个未知

数,需要确定气溶胶准确的光学厚度值,才可得到薄卷云的光学厚度值,因此区分薄卷云与气溶胶十分重要。由于气溶胶和云的时间和光谱特性不同,当云不完整时,在有薄云的天气下,可以确定气溶胶的光学特性。从 670 nm 和 880 nm 波段探测的数据计算得出,当 $\alpha > 1.3$ 时,假设较为晴朗的大气,当有卷云出现时,由于卷云存在时间很短且变化快,而气溶胶存在时间长而且其组成和分布变化比卷云变化慢很多,故可认为在薄卷云变化的时间内,其 α, β 均为常量值,从而可简单提取到薄卷云光学厚度。与气溶胶粒子相比,云前向小角散射能量强。基于太阳直接辐射得到的透射比包括了云前向小角度散射能量,导致得到的大气透过率比实际值略偏大,计算所得的云光学厚度值略偏小。因此,为了得到云真实的光学厚度值,还需要考虑对其进行前向小角度散射校正。

3.2 前向散射校正

对于云真实的光学厚度,需要对仪器直接辐射测量得到的云的光学厚度值进行纠正。考虑到云真实的光学厚度 $\tau_{\text{cld}}^{\text{true}}$ 与仪器测量到的云光学厚度值 $\tau_{\text{cld}}^{\text{apparent}}$ 之间不可能是一次线性关系,故通过软件对两者进行多项式拟合,拟合公式为

$$\tau_{\text{cld}}^{\text{true}} = \frac{a}{\mu_0} + b(\tau_{\text{cld}}^{\text{apparent}}) + c(\tau_{\text{cld}}^{\text{apparent}})^2 + d(\tau_{\text{cld}}^{\text{apparent}})^3, \quad (9)$$

式中: a, b, c, d 为拟合参数; μ_0 与天顶角有关。根据(9)式可近似得到云层真实的光学厚度。

3.3 软件模拟

在 DISROT 的程序中,使用中纬度夏季大气廓线,地表为草地型,通过光学厚度、散射相函数和单次散射反照率三个参数表征介质的性质。假定大气只有均匀的一层(气溶胶、水云或卷云),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,对于卷云的相函数,采用改进的几何光学法计算。为了获得准确的辐射量计算,在多项式展开中采用 32 流,模拟了卷云的辐射强度。在模拟中,一般设置太阳天顶角为 30° 。虽然冰晶粒子的形状各异,但通过已有的观测与实验,卷云中主要含有大量的六棱柱冰晶粒子,因此模拟卷云时,利用 Yang 等^[16]计算的六棱柱形冰晶粒子的散射特性数据库。

利用 DISORT 辐射传输软件,模拟计算任意卷云和气溶胶小角的散射强度和透射通量。计算云的相函数有一定的难度,因为其散射相函数有很强的前向峰值,把散射相函数展开成勒让德多项式,展开

系数需要很多项才收敛。采用 Hu 等^[17]的 δ -fit 拟合方法对相函数进行前向截断,对 DISORT 中的辐射传输代码进行纠正,计算前后向的辐射。考虑到卷云前向散射强烈,对其单次散射强度 ω 和光学厚度 τ_c 进行调整,调整为

$$\omega' = \frac{\omega(1-f)}{1-f\omega}, \quad (10)$$

$$\tau'_c = \tau_c(1-f\omega), \quad (11)$$

式中: f 为前向散射能量。将调整后的参数,输入到 DISORT 程序中。

4 实验测量与模拟结果对比

晴朗天气下,能见度为 25 km,在合肥地区采用 Langley 法对 VFOVSP 进行标定与测量,图 4 为 VFOVSP 在 670 nm 波段与日本 POMO2 型太阳光度计测量的气溶胶光学厚度的对比。两者的相关性较好,VFOVSP 不同视场的测量结果与 POMO2 测量的气溶胶光学厚度(AOT)均方根误差均小于 0.5%,证实了仪器测量气溶胶精度的可靠性。VFOVSP 仪器在 5° , 2° , 0.8° 视场下,测量得到的光学厚度平均值分别为 0.13196, 0.13325, 0.13474。尽管三者很接近,但仍然能看出视场越大,测量的光学厚度越小。这是由于大的视场能接收到更多的前向散射,所以测量的光学厚度略偏小。

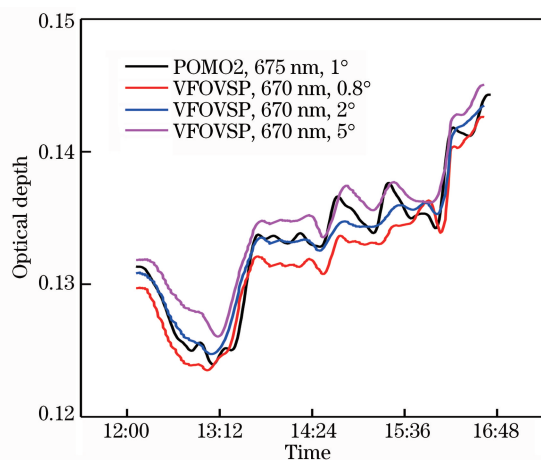


图 4 气溶胶光学厚度对比

Fig. 4 Comparison of aerosol optical thickness

使用 VFOVSP 进行不同视场的透射辐射测量,得到 0.8° , 2° , 5° 视场的透射辐射值。选择合肥地区,在 2018 年 3 月 10 日、3 月 11 日、3 月 16 日三天进行实验,分别测量较为晴朗但天空略泛白的天气、有薄卷云存在时的天气和有厚云存在时的天气。在三种不同天气条件下进行大气测量,将计算得到散射对数比值与 POMO2 计算的 Angstrom 指数 α 、

气溶胶和云的总光学厚度值 τ 进行对比。变视场光度计测量散射对数比值与 Angstrom 系数以及光学厚度的比较如图 5(a)~(c)所示。

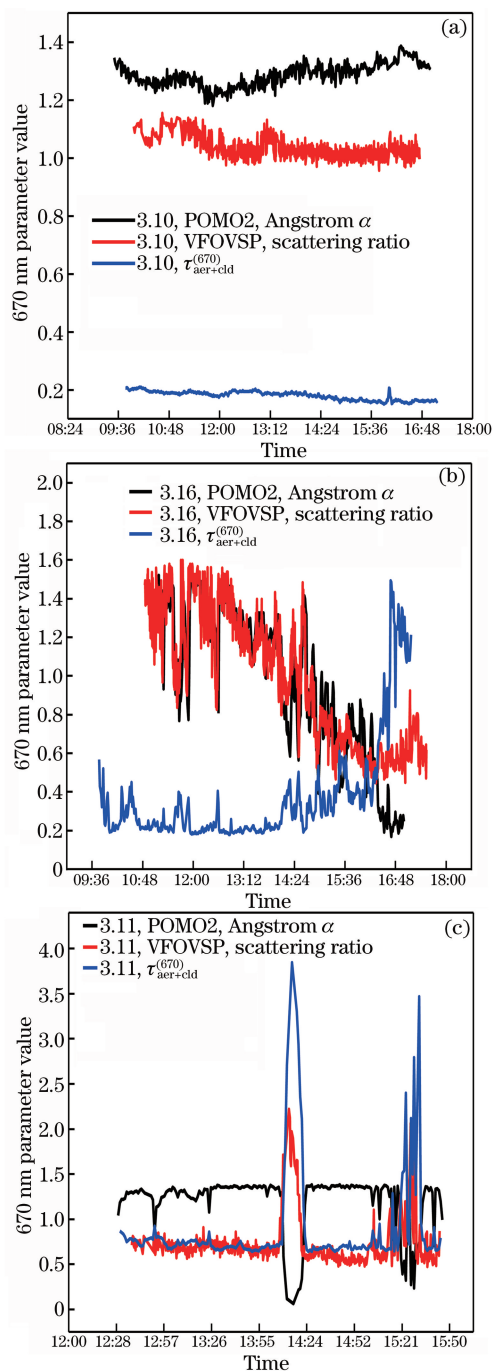


图 5 变视场光度计测得的散射对数比值与 POMO2 计算所得的 Angstrom 系数以及光学厚度的对比。

(a)较晴朗天气; (b)薄云天气; (c)厚云天气

Fig. 5 Comparison between scattering logarithm ratio measured by VFOVSP and Angstrom coefficient calculated by POMO2 and optical thickness. (a) Clear weather; (b) thin cloud weather; (c) thick cloud weather

由实验测量与模拟结果可见,3月10日天气较为晴朗,太阳周围无云,天空略泛白,因此图5(a)中视场的散射比值变化波动较小,约保持在1.1,全天光学厚度值稳定在0.2左右,Angstrom指数 α 值较大且波动较小,表明大气中基本为气溶胶粒子。与图3(a)模拟结果中的气溶胶小角散射比值进行对比,可以推断该天大气中气溶胶粒子的有效粒径较大,可能为大粒子。 α 是判断粒子大小的一个重要指标。利用常用的单筒单视场太阳光度计进行测量,合肥地区十分晴朗的天气条件下Angstrom指数的平均值为1.8。通常情况下, α 越大,说明大气中的粒子越小,而 α 越小,则粒子的尺度越大。

3月11日为全天有薄卷云的天气(根据观测,太阳周围基本为薄卷云,其变化较快且云层较高)。由图5(b)可见,上午10:30到下午15:00这段时间内,测得视场散射比值与Angstrom系数的变化趋势一致,比值波动较大,而光学厚度起伏相对较小。与图3视场散射比值模拟计算结果对比,当光学厚度变化小于1时,散射比值发生很大变化。只有当测量到的粒子尺度发生较大变化时,才会导致散射比值的很大变化。说明此时测到的粒子为大粒子,短时间内散射比值变化快,而水云一般较厚且变化相对缓慢,因此判断云层为薄卷云,与目测天气一致。在11日傍晚,随着太阳周围的薄云变厚,大气的的光学厚度迅速增大至1.2,对应的Angstrom指数减小,但散射比值反而有增大趋势,这是由于随光学厚度变大,散射能量减弱,视场散射比值偏大。通过不同视场的散射比值可以较好地地区别薄卷云与气溶胶,该特性可以用于太阳光度计中以准确提取气溶胶的光学特性,去除薄卷云对其光学厚度的影响。

3月16日太阳周围泛白,有厚云存在,测量结果如图5(c)所示。光学厚度值约稳定在0.8,视场散射比值较平稳。午后一段时间,大气光学厚度增大到4,散射比值也迅速增大,而Angstrom指数迅速减小,两者变化趋势相反,云存在时间较长且变化较慢。根据图3散射比值的模拟结果,比较水云和卷云模拟计算的散射比值,结果表明相同光学厚度下,计算所得的散射比值比实际探测到散射比值小,说明此时探测到的水云之上可能还有卷云存在(根据目测此时云低且厚),此时散射比值受光学厚度影响较大。对比模拟结果,粒子尺度应大于 $10\ \mu\text{m}$ 。

不同天气下的实验结果表明:当光学厚度值很大时,散射比值的大小主要取决于云的光学厚度,粒子的有效尺度对其影响较小;当光学厚度较小时,散

射比值大小取决于粒子的有效尺度。通过实测与理论计算对比发现:

1)在晴朗大气条件下,气溶胶粒子变化较慢,大气中粒子较稳定,视场散射比值趋于稳定,波动较小。

2)在有薄云的天气条件下,大气光学厚度小于1时,散射比值主要受粒子有效尺度的影响,散射比值越小表明粒子的尺度越小,散射比值越大表明粒子的尺度越大。散射比值与Angstrom指数变化趋势较为一致,能够较好地地区分出薄卷云与气溶胶粒子。

3)当大气光学厚度小于1且粒子尺度大于 $10\ \mu\text{m}$ 时,视场的散射比值受光学厚度的影响较大,粒子有效尺度对其影响较小。

由于DISORT计算的相函数存在一定近似,且实际大气也不可能为均匀大气,故无法精确反映局地天气情况以及地表条件,因而不同天气情况下的模拟结果与实测结果存在一定的差异。

5 薄云光学厚度的提取

采用薄云光学厚度提取的方法,利用POMO2在870 nm和675 nm两个波段计算了3月11日在全天有薄卷云情况下的光学厚度,得到675 nm和870 nm波段光学厚度变化趋势如图6所示。根据光学厚度将卷云分成三类:当厚度小于0.03时,为人眼无法识别的薄卷云;当厚度 $0.03\sim 0.3$ 时,为人眼可识别的薄卷云;当厚度大于0.3时,为厚卷云^[18]。根据实验结果,并结合散射比值推断不同有效尺度的粒子的范围:当光学厚度小于0.03时,散射比值较大,粒子尺度小于 $10\ \mu\text{m}$;而光学厚度为

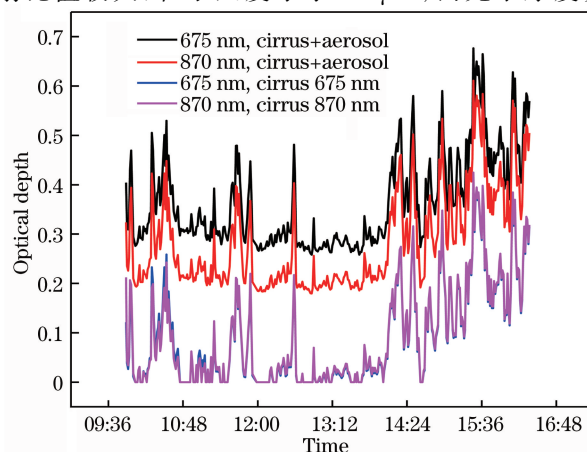


图6 675 nm和870 nm波段光学厚度变化趋势
Fig. 6 Change trend of optical thickness at
675-nm and 870-nm bands

0.03~0.3 的卷云, 散射平均比值约为 0.9, 此时粒子平均尺度范围为 80~120 μm ; 而傍晚光学厚度大于 0.3, 平均散射比值约为 0.7, 此时粒子的尺度范围为 10~30 μm 。

对 870 nm 和 675 nm 两个波段的计算所得的全天卷云光学厚度进行分段统计, 得到的卷云光学厚度出现频率分布如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 当天合肥地区卷云的光学厚度主要集中在 0.03~0.25 时, 主要为薄卷云。两个波段提取的薄卷云光学厚度在误差允许范围内, 具有较好的一致性, 表明卷云冰晶粒子的消光系数在短波段基本与波长无关^[19]。

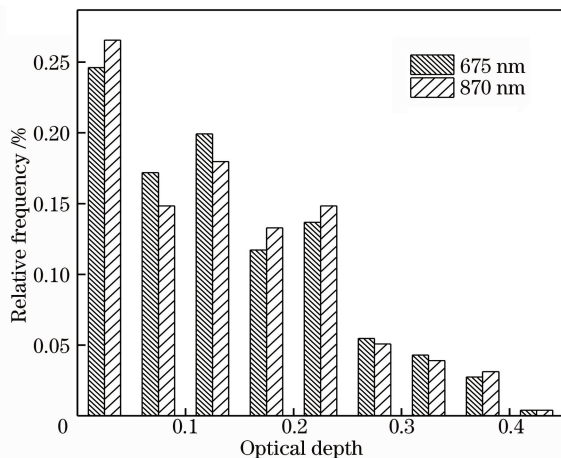


图 7 卷云光学厚度出现频率分布图

Fig. 7 Frequency distribution diagram of optical thickness appearing in cirrus

6 结 论

基于一种新型的变视场太阳光度计, 通过测量不同视场的太阳透射辐射, 得到视场散射辐射的比值。结合大气光学厚度和 Angstrom 指数可以更加准确地识别出粒子的大小和种类, 并较好地地区别薄卷云与气溶胶粒子。在不同天气条件下测量, 与 DISORT 辐射传输软件模拟的结果进行对比, 两者结果较为一致。同时, 采用一种简单的方法估算了较为晴朗天气下的薄卷云的光学厚度值。研究结果表明: 前向小角的散射比值与粒子的有效尺度和光学厚度有关, 光学厚度越大, 视场散射比值越大; 而有效尺度越大, 其视场的散射比值较小, 前向散射能量越强。在有薄云的天气下, 当大气光学厚度小于 1 时, 视场散射比值的大小主要受粒子有效尺度的影响。一般情况下, 粒子尺度越大, 散射比值越小。由此, 可区分薄卷云与气溶胶粒子。在大气光学厚度大于 1 且粒子尺度大于 10 μm 时, 视场的散射比

值大小受光学厚度的影响较大, 粒子的尺度变化对其影响较小。670 nm 和 880 nm 两个波段的反演的薄卷云光学厚度值差异不大, 在误差允许的范围内, 证明了卷云冰晶粒子的消光系数在短波段与波长基本无关。视场散射比值大小与有效尺度和光学厚度密切相关, 能够识别粒子大小, 但在复杂大气环境下, 完全区分薄水云与卷云还存在一定的困难, 下一步应提高仪器灵敏度, 减小大气中如能见度以及水汽等因素对其的干扰。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Chen T, Rossow W B, Zhang Y. Radiative effects of cloud-type variations [J]. Journal of Climate, 2000, 13(1): 264-286.
- [3] 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.
- [4] Ji C L, Tao Z M, Hu S X, *et al.* Effectivelidar ratio of cirrus clouds 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.
- [5] Chen X H, Liu Q, Wei H L. The treatment of scattering phase function in the multi-scattering radiative transfer calculation [J]. Journal of Light Scattering, 2007, 19(3): 283-289.
陈秀红, 刘强, 魏合理. 多次散射辐射传输计算中的相函数处理 [J]. 光散射学报, 2007, 19(3): 283-289.
- [6] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Nearforward 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.
- [7] 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.
- [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] Wang Y, Lü D R, Huo J. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from transmitted solar radiation measurements[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(10): 1199-1207.
- [11] Shiobara M, Asano S. Estimation of cirrus optical thickness from sun photometer measurements[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(33): 672-681.
- [12] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [13] Zhao Y J, Wei H L, Xu Q S, *et al.* Simulation of radiative properties of ice particle at $1.315\ \mu\text{m}$ [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 782-786.
- 赵燕杰, 魏合理, 徐青山, 等. $1.315\ \mu\text{m}$ 波长冰晶粒子辐射特性的模拟研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 782-786.
- [14] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air[J]. *Geografiska Annaler*, 1929, 11(2): 156-166.
- [15] Wang H B, Zhang Z W, Zhang L, *et al.* Identify the size of aerosol particles and analyze its characteristic at three AERONET sites in China [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(4): 995-1003.
- 王宏斌, 张志薇, 张镭, 等. 中国3个AERONET站点气溶胶大小的识别及特征分析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 995-1003.
- [16] 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.
- [17] Hu Y X, Wielicki B, Lin B, *et al.* δ -fit: a fast and accurate treatment of particle scattering phase functions with weighted singular-value decomposition least-squares fitting[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2000, 65(4): 681-690.
- [18] Liu R J, Zhang L, Wang H B, *et al.* Cirrus cloud measurement using lidar over semi-arid areas [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(5): 863-870.
- 刘瑞金, 张镭, 王宏斌, 等. 半干旱地区卷云特征的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2011, 35(5): 863-870.
- [19] 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.