

基于激光雷达和 SBDART 模式的大气散射辐射亮度计算

杜嘉敏, 王玉峰*, 秦一丁, 李仕春, 狄慧鸽, 宋跃辉, 闫庆, 华灯鑫

西安理工大学激光雷达大气遥感研究中心, 陕西 西安 710048

摘要 为给辐射传输方程求解提供足够的气溶胶状态信息, 提出了一种双波长拉曼-米激光雷达探测技术和系统。首先, 设计了高性能 4 通道分光系统, 用于提取中心波长分别为 354.7 nm 和 1064.2 nm 以及 386.7 nm 和 852.7 nm 的米-瑞利散射回波信号和氮气拉曼散射回波信号, 实现对大气气溶胶的精细探测和反演。然后, 在不同天气条件下利用该系统开展了探测实验, 通过反演的气溶胶多参量廓线构建了由 33 层光学厚度、单次散射反照率、散射相函数组成的实际大气气溶胶状态参数列表, 并将其作为平面平行辐射传输(SBDART)模式的实际大气自定义气溶胶输入文件。最后, 求解辐射传输方程, 得到 33 层实际大气散射辐射亮度分布以及太阳直接和散射辐射亮度的计算结果。通过分析不同天气条件下的实际大气散射辐射亮度, 验证了大气气溶胶状态对大气散射辐射亮度的决定性影响。实验结果表明, 该系统与地面气象站测量的总辐射亮度平均相对误差为 8.2%, 相关性系数达到 0.98。

关键词 大气光学; 激光雷达; 气溶胶; 散射辐射亮度; 平面平行辐射传输

中图分类号 P422.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1201005

Calculation of Atmospheric Scattered Radiance Based on Lidar and SBDART Model

Du Jiamin, Wang Yufeng*, Qin Yiding, Li Shichun, Di Huige, Song Yuehui,
Yan Qing, Hua Dengxin

*Laser Radar Center of Remote Sensing of Atmosphere, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, Shaanxi, China*

Abstract A dual-wavelength Raman-Mie lidar technique and system are proposed in this paper to provide sufficient aerosol information for the solution of the radiative transfer equation. First, a high-performance four-channel spectroscopic system is designed to extract the Mie-Rayleigh scattering echo signals with center wavelengths of 354.7 nm and 1064.2 nm and Raman scattering echo signals of 386.7 nm and 852.7 nm for the fine detection and inversion of atmospheric aerosols. Then, the system is applied for experiments under different weather conditions, and the list of actual atmospheric aerosol state parameters is formed on the basis of the aerosol multi-parameter profiles obtained by inversion, which is composed of 33-layer optical thickness, single scattering albedo, and scattering phase functions. The list is used as the input file of actual atmospheric aerosols for the Santa Barbara DISORT atmospheric radiative transfer (SBDART) model. Finally, the radiative transfer equation is solved, and the calculation results of the actual atmospheric scattered radiance distribution of 33-layer and the direct and diffuse solar irradiance are obtained. By analyzing the actual atmospheric scattered radiance under different weather conditions, this study verifies the decisive influence of the atmospheric aerosol on atmospheric scattered radiance.

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1733202)、国家自然科学基金(41627807)、陕西省创新人才推进计划(2020-TD014)

通信作者: *wangyufeng@xaut.edu.cn

The experimental results reveal that the average relative error of the total irradiance measured by the system and the ground meteorological station is 8.2%, and the correlation coefficient reaches 0.98.

Key words atmospheric optics; Lidar; aerosol; scattered radiance; Santa Barbara DISORT atmospheric radiative transfer

1 引言

大气散射辐射亮度,也被称为天空背景辐射亮度,指的是太阳辐射被大气中的分子和气溶胶吸收和散射后形成的散射光亮度分布。大气散射辐射亮度作为大气光学特性的一个重要参量,是气溶胶光学特性反演、空间目标/背景识别、目标跟踪与成像、大气成分探测等领域一个重要的研究内容,在多个领域得到了广泛应用^[1-2]。大气散射辐射亮度作为主要的背景噪声,是航空航海、天文观测、气象研究中的重要影响因素,此外,大气散射辐射亮度还直接影响斜程能见度的精确测量^[3-4]。因此,对大气散射辐射亮度的测量在大气科学、地球和空间科学以及相关工程应用领域具有重要研究意义。

测量大气散射辐射亮度的方法:1)采用非扫描型观测设备或直接成像设备对天空背景辐射亮度进行直接测量,如利用天空成像仪、全天空成像仪分析天空亮度分布^[5-6];2)利用分光测量仪器获取天空背景光谱并进行积分得到辐亮度^[7-8];3)利用辐射传输模式等软件对天空辐射亮度进行理论计算。人们已经开发了多套解决地球大气辐射传输问题的实用模式,以获得太阳辐射传输、热辐射以及辐射亮度等参数的模拟计算结果,如 LOWTRAN、MOTRAN 和 DISORT 模式^[9-11]。中国科学院大气物理所、中国科学院安徽光机所、电子科技大学等研究单位也在大气辐射传输特性领域开展了一系列测量和研究^[12-14]。研究表明,天气状况、观察时间以及是否存在云等因素都会对天空背景的光谱辐射亮度产生影响,此外,大气参数(如密度、温度、压力)在垂直方向上是非均匀分布的,且随地域、气候、季节和观测方位等因素的变化而变化,这些因素也会对天空背景的光谱辐射亮度产生极大的影响。实际大气散射辐射亮度的计算和测量是一个难题,如何利用辐射传输模式获得更接近实际环境的近似解也是数学和物理学家研究的热点。大气散射辐射亮度不仅与太阳几何位置和地表反照率有关,也会受到大气分子、气溶胶吸收和散射的影响。如果能获得丰富的实际大气气溶胶状态信息,就能通过辐射传输模式获得准确的大气散射辐射亮度。

激光雷达是获取大气气溶胶参数的有效手段,

作为一种主动遥感探测手段,激光雷达具有时空分辨率高、探测精度高、可实现连续动态监测等优势,在大气气象、环境监测等领域中扮演着越来越重要的角色^[15-16]。基于单波长米散射激光雷达,利用 Klett 方法或 Fernald 方法可反演得到气溶胶消光系数的后向散射系数廓线。拉曼法是目前普遍采用的气溶胶光学参量反演方法,利用氮气拉曼散射回波信号实现无雷达比假设的气溶胶消光系数反演,结合氮气拉曼散射和米散射回波信号可反演得到大气气溶胶后向散射系数廓线。利用多波长米散射激光雷达,可先获得不同波长下的消光系数和后向散射系数等气溶胶光学参量,进一步反演得到气溶胶粒谱、复折射率等微物理参量。目前,国内外众多科研院所所在利用激光雷达的大气气溶胶探测领域开展了深入的研究和应用工作^[17-19]。

考虑到实际大气气溶胶状态对大气散射辐射亮度的影响,结合激光雷达的探测优势,本文提出了一种双波长拉曼-米激光雷达探测技术,并构建了大气气溶胶精细探测激光雷达系统和 4 通道拉曼-米分光系统。首先,通过提取紫外和近红外波段的米散射和拉曼散射回波信号,实现对大气气溶胶光学参量、气溶胶微物理参量和气溶胶散射特性参量的探测和反演,为辐射传输方程求解提供实时的大气气溶胶状态信息。然后,构建由 33 层大气气溶胶信息组成的列表作为平面平行辐射传输(SBDART)模式的用户自定义气溶胶输入文件,求解辐射传输方程,获得实际大气散射辐射亮度。最后,开展不同天气条件下的激光雷达实验和数据反演,对实际大气散射辐射亮度分布和太阳直接/散射辐射亮度进行了分析,并与地面气象站的测量结果进行比对,验证了该系统测量结果的可靠性。

2 激光雷达系统

为了提供丰富的气溶胶参数,设计了一套双波长拉曼-米气溶胶精细探测激光雷达系统,其结构如图 1 所示。实验研究的大气散射辐射亮度是以民航机场作为特殊应用场景,以期实现对民航机场斜程能见度的测量,考虑到对人眼安全、飞行器飞行与操控安全的激光发射波长,同时结合人眼的最大容许曝光值,系统选用 354.7 nm 和 1064.2 nm 的激光

发射波长。此外,为了提供足够多的气溶胶参数,提出了双波长拉曼-米散射激光雷达技术。由 Nd:YAG 固体激光器发射的 1064.2 nm 和 354.7 nm 波长激光,扩束后经一组 45° 反射镜进入大气。大气回波信号由直径为 254 mm 的卡塞格林望远镜接收并耦合进入光纤,由高效率二向色镜 (DM 1~DM 3) 和超窄带干涉滤光片 (IF 1~IF 4) 组成的高光谱分辨率分光系统进行分光,实现对中心波长分别为 354.7 nm 和 1064.2 nm 的米-瑞利散射信号以及中心波长分别为 386.7 nm 和 852.7 nm 的氮气分子拉曼散射信号的高效提取。经透镜 (L) 聚焦后由光电倍增管 (PMT) 和雪崩二极管 (APD) 进行

光电转换,由采集卡完成数据采集,并利用计算机进行数据反演与分析。系统的主要参数如表 1 所示。该激光雷达系统具有三维扫描功能,可实现水平方向 0°~360° 和垂直方向 0°~90° 范围的扫描。通过垂直激光雷达探测实验可反演得到大气气溶胶光学参量、微物理参量和散射参量廓线,通过斜程扫描激光雷达探测实验可反演得到斜程路径上的气溶胶光学厚度和大气透明度,进而计算出不同方向斜程路径上的斜程能见度。实验重点关注实际大气散射辐射亮度的计算和分析,因此主要涉及垂直激光雷达探测实验和结果分析。

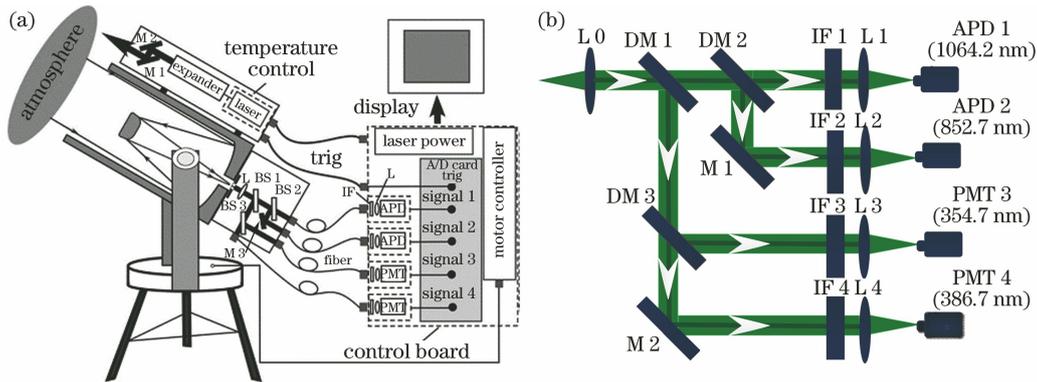


图 1 双波长拉曼-米激光雷达系统的原理。(a) 结构; (b) 分光系统示意图

Fig. 1 Principle of dual-wavelength Raman-Mie lidar system. (a) Structure; (b) schematic diagram of the spectroscopic system

表 1 拉曼-米激光雷达系统的主要参数

Table 1 Specification parameters of Raman-Mie lidar system

Parameter	Value
Laser wavelength (Nd:YAG) /nm	354.7, 1064.2
Pulse energy /mJ	180, 100
Repetition frequency /Hz	10
Diameter of telescope(Cassegrain) /mm	254
Field of view /mrad	0.4
Optic fiber diameter /mm	0.8
Quantum efficiency of PMT (R7056) /%	25
Quantum efficiency of APD (S11519-30) /%	40

3 计算理论

3.1 大气气溶胶参量的反演方法

该激光雷达系统提供了 2 路米-瑞利弹性散射回波信号 (中心波长分别为 354.7 nm 和 1064.2 nm) 和 2 路氮气拉曼散射回波信号 (中心波长分别为 386.7 nm 和 852.7 nm)。利用紫外波段或近红外波段的米-瑞利散射和氮气拉曼散射通道的回波信号实现对大气气溶胶消光系数和后向散射

系数的精确反演^[15-18], 可表示为

$$\alpha_{\text{aer}}(\lambda_0, z) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N_N(z)}{z^2 P_N(z)} \right] - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_0, z) - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_N, z)}{1 + \lambda_0 / \lambda_N}, \quad (1)$$

$$\beta_{\text{aer}}(\lambda_0, z) = -\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z) + R_S(z_0) \times \beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z) \times \frac{P_{\text{Mie}}(z)}{P_{\text{Mie}}(z_0)} \times \frac{P_N(z_0)}{P_N(z)} \times \frac{\beta_N(z)}{\beta_N(z_0)} \times \frac{\exp \left\{ -\int_z^{z_0} [\alpha_{\text{aer}}(\lambda_0, z') + \alpha_{\text{mol}}(\lambda_0, z')] dz' \right\}}{\exp \left\{ -\int_z^{z_0} [\alpha_{\text{aer}}(\lambda_N, z') + \alpha_{\text{mol}}(\lambda_N, z')] dz' \right\}}, \quad (2)$$

式中, z 为探测距离, $P_N(z)$ 为氮气振动拉曼后向散射回波信号, $P_{\text{Mie}}(z)$ 为米-瑞利后向散射回波信号, N_N 为大气氮气分子的数密度, R_S 为散射比, z_0 为参考高度, λ_0 为出射激光波长, $\beta_{\text{aer}}(\lambda_0, z)$, $\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, z)$ 和 $\beta_N(z)$ 分别为气溶胶、大气分子和氮气分子的后向散射系数。

在探测距离为 z_1 和 z_2 的路径上对应的气溶胶光学厚度 τ 可表示为

$$\tau_{z_1-z_2} = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z') dz' \quad (3)$$

获得不同波长的气溶胶消光系数和后向散射系数后,根据第一类 Fredholm 积分方程,利用正则化算法可进行气溶胶粒子谱分布的反演^[19],可表示为

$$G_p(\lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{3}{4r} \cdot Q_{\beta/\text{ext}}(r, \lambda, m) V(r) dr, \quad (4)$$

式中, m 为复折射率, r 为粒径, r_{\min} 和 r_{\max} 为大气气溶胶粒子粒径的下限和上限, $G_p(\lambda)$ 为波长为 λ 时的大气气溶胶光学参量(如大气气溶胶后向散射系数或气溶胶消光系数), $Q(r, \lambda, m)$ 为某一波长光在某一半径下的消光效率和后向散射效率, $V(r)$ 为粒子的体积谱分布函数。采用正则化方法进行不同高度粒谱分布的反演,同时可获得复折射率,然后基于最小偏差准则,利用数值逼近的方法近似实际谱分布。在反演过程中,复折射率、拉格朗日乘子和粒径范围都是变化的:粒径最大值 r_{\max} 的范围为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$,粒径最小值 r_{\min} 的范围为 $0.01 \sim 0.10 \mu\text{m}$;复折射率实部取值范围为 $1.31 \sim 1.55$,步长为 0.01 ;虚部取值范围为 $0.001 \sim 0.030$,步长为 0.001 ;拉格朗日乘子 $\gamma = 2^W 10^{-b}$,参数 W 的取值范围为 $1 \sim 25$,步长为 1 ;参数 b 的取值范围为 $20 \sim 28$ 。在三组参量的数据范围内进行遍历迭代,并对每组谱进行偏差计算,偏差最小时对应的谱即为式(4)的解。

云滴谱可用修正的伽马分布函数和赫尔基安-马津公式^[20]表示为

$$n(r) dr = ar^u \exp(-br^\nu) dr, \quad (5)$$

式中,控制参数 a 、 b 、 u 和 ν 均为正数,且相互制约,通过调节四个控制参数的取值可拟合不同谱型的云、雨滴谱,实验中取 $a = 2.3730$ 、 $u = 6$ 、 $\nu = 1$ 、 $b = 2/3$ 。

单次散射反照率 $\tilde{\omega}$ 定义为散射系数与消光系数之比,能反映气溶胶粒子和大气分子的消光效果^[21],可表示为

$$\tilde{\omega} = \frac{\int r^2 Q_{\text{scat}} n(r) dr}{\int r^2 Q_{\text{ext}} n(r) dr}, \quad (6)$$

式中, Q_{ext} 为消光效率因子, Q_{scat} 为散射效率因子, $n(r)$ 为气溶胶粒子数浓度谱。

不对称因子 g 能反映前向散射和后向散射的

相对大小,可表示为

$$g = \frac{\int r^2 \cdot Q_{\text{scat}} \cdot n(r) \cdot g_a dr}{\int r^2 \cdot Q_{\text{scat}} \cdot n(r) dr}, \quad (7)$$

式中, g_a 为单个粒子的不对称因子^[21],可表示为

$$g_a = \langle \cos \theta \rangle, \quad (8)$$

式中, θ 为散射角。散射相函数 P 可用经验的 H-G (Henry-Greenstein) 散射相函数^[22]表示为

$$p_{\text{HG}}(\cos \theta, g) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}, \quad (9)$$

式(9)的勒让德展开式为

$$P(\cos \theta, g) = \sum_{l=0}^N (2l+1) c_l^* p_l(\cos \theta), \quad (10)$$

式中, $p_l(\cos \theta)$ 为 l 阶勒让德多项式, c_l^* 为多项式的系数。可以发现,当获得某高度上的粒子谱分布和复折射率时,结合球形粒子假设和米理论,利用式(6)~式(10)可计算得到该高度上的单次散射反照率、不对称因子和散射相函数。因此,利用激光雷达探测技术以及上述反演公式可依次获得大气气溶胶消光系数和后向散射系数廓线、气溶胶粒子谱分布和复折射率以及单次散射反照率、不对称因子和散射相函数。这些基于激光雷达探测技术的反演结果为后续辐射传输方程的求解提供了思路和数据支持。

3.2 实际大气散射辐射亮度的计算方法

研究大气散射辐射亮度时的辐射传输方程^[23]可表示为

$$\begin{aligned} \mu \frac{d(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = & \\ -I(\tau, \Omega) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} p(\Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega' + & \\ \frac{1}{4} F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) p(\Omega, \Omega_0) + (1 - \omega) B(T), & \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Ω 为散射相函数中光子的传递方向, Ω' 为多次散射中光子的传递方向, $I(\Omega, \Omega_0)$ 为经过光学厚度 τ 和方向 Ω 后辐射强度的衰减, $B(T)$ 为普朗克函数, F_0 为大气层顶部初始的太阳辐射照度, μ 和 μ_0 分别为观察天顶角和太阳天顶角方向的余弦, ω 为大气的单次散射反照率, p 为大气散射相函数, φ 为观察方位角。可以发现,除太阳位置和观察位置外,实际大气散射辐射亮度还会受到大气气溶胶吸收和散射的影响。式(11)是一类带有积分项的微分方程,求解过程比较复杂,因此,有关实际大气散射

辐射亮度的计算和测量一直都是相关领域的难点问题。目前,求解辐射传输方程的方法主要包括有限元法、逐线积分法、离散坐标法和蒙特卡罗方法^[24]。其中,离散坐标法是目前公认的辐射传输方程求解方法,利用离散坐标矩阵和积分常数的求解方法可得到方程的特征向量和特征值。此外,人们基于离散坐标法还开发了对应的辐射传输软件包 DISORT,实验用含有 DISORT 软件包的 SBDART 模式求解辐射传输方程^[25-26]。具体实现过程:首先,设定边界层气溶胶类型参数为用户自定义输入;然后,基于激光雷达探测反演获得的气溶胶光学参量、

微物理参量和散射特性参量廓线形成一个由 33 层高度大气光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数的 $2N$ 阶勒让德多项式组成的列表,并将其作为实际大气的自定义气溶胶输入文件;最后,结合实际太阳几何位置和经纬度等信息,利用 SBDART 模式的输出文件,获得实际大气的太阳直接和散射辐射亮度以及 33 层实际大气散射辐射亮度的分布。图 2 为利用激光雷达结合 SBDART 模式进行实际大气散射辐射亮度的计算流程,其中,虚线框为由激光雷达探测提供的实际大气气溶胶状态参数。

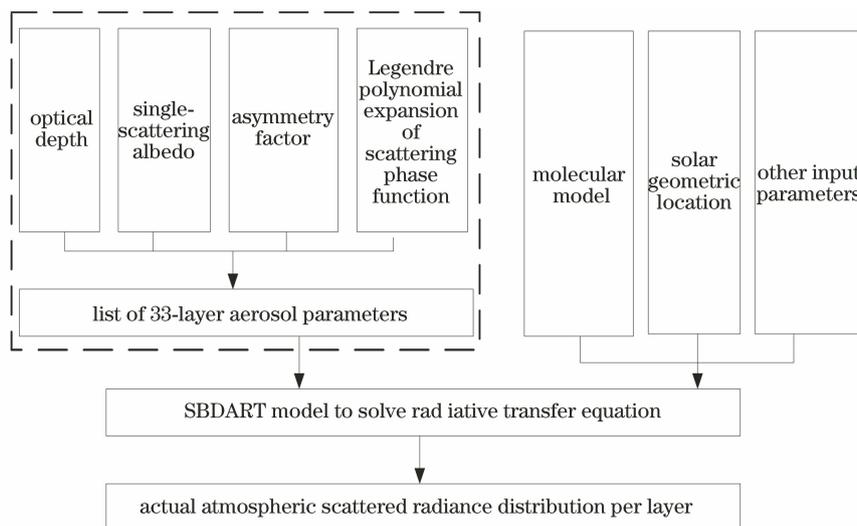


图 2 实际大气散射辐射亮度的计算流程

Fig. 2 Calculation process of the actual atmospheric scattered radiance

4 实际大气散射辐射亮度的计算与分析

利用激光雷达系统在不同天气条件下进行了激光雷达探测实验,按照气溶胶各参量的反演算法,依次进行气溶胶光学参量、微物理参量和散射特性参量的反演,进而得到由 33 层气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数组成的实际大气气溶胶参数列表,并利用 SBDART 模式实现对实际大气散射辐射亮度的计算和分析。

4.1 有云天气条件下的计算结果与分析

以一组有云天气条件下的激光雷达探测和反演结果为例,其探测时间为 2020 年 11 月 19 日 16:00,该时刻的水平能见度为 23 km,空气质量指数(AQI)为 69, $PM_{2.5}$ 为 $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 为 $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 3 为激光雷达垂直探测实验反演获得的 354.7 nm 和 1064.2 nm 波长下大气气溶胶和云的消光系数廓线、后向散射系数廓线。可以发现,大气消光系数随探测高度的升高逐渐下降,在 3.8 km 和 8.0 km 高度

云层处的大气消光系数急剧增大,分别达到 0.15 km^{-1} 和 0.21 km^{-1} 。对反演的大气消光系数廓线进行了盲区校正,并与水平能见度进行了比对^[27]。可以发现,在地面处,354.7 nm 波长下的大气气溶胶消光系数为 0.22 km^{-1} ,与水平能见度仪推导得到的消光系数基本一致。从各波长下气溶胶和云的后向散射系数廓线可以发现,校正后 3.8 km 和 8.0 km 高度云层处的大气后向散射系数也有明显增大。

图 4 为利用正则化算法反演得到的不同垂直高度上的粒子体积谱分布。图 4(a)为 0, 1, 2, 3, 4 km 高度上的粒子谱分布。可以清晰看到,粒子体积浓度随高度的升高逐渐下降,地面附近气溶胶的体积浓度最大,边界层内各高度上均呈双峰谱分布特征,细粒径峰值位于 $0.2 \mu\text{m}$ 附近,小粒径气溶胶粒子含量较多,粗粒径峰值位于 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 范围内。此外,地面处气溶胶粒子谱分布与粒谱仪得到的粒子谱结构基本相似。图 4(b)为 5~8 km 高度上的粒

子体积谱分布。可以发现,气溶胶粒子也为双峰结构,在高度为 3.8 km 和 8.0 km 的云层位置处,呈

现出单峰的云滴谱结构,粒径峰值在 3~6 μm 范围内。

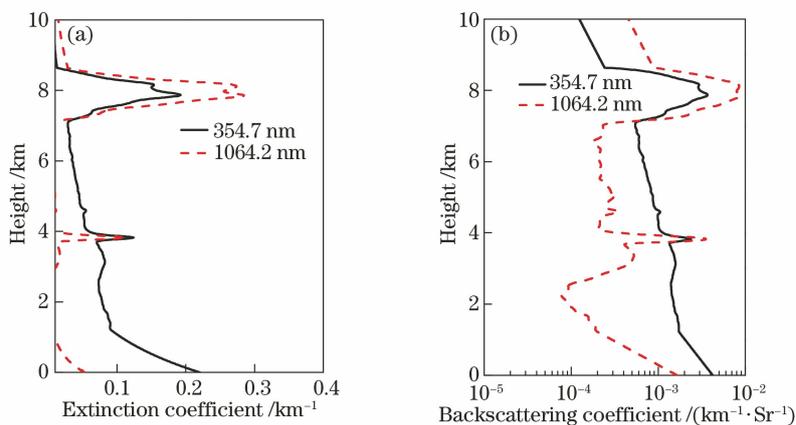


图 3 有云条件下激光雷达反演的大气消光系数和后向散射系数廓线。(a)消光系数;(b)后向散射系数

Fig. 3 Atmospheric extinction coefficient and backscattering coefficient profiles retrieved by lidar under cloudy conditions.

(a) Extinction coefficient; (b) backscattering coefficient

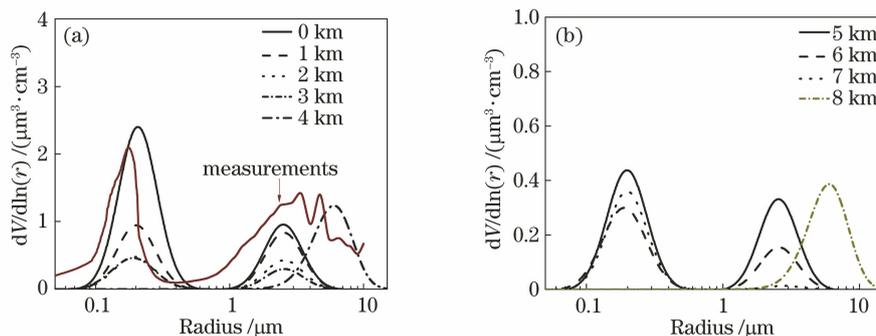


图 4 不同高度层的气溶胶体积谱分布。(a) 0~4 km;(b) 5~8 km

Fig. 4 Aerosol volume spectrum distribution at different layers. (a) 0~4 km; (b) 5~8 km

图 5 为 550 nm 波长下不对称因子和单次散射反照率随高度的变化趋势,同时给出了大气气溶胶的光学厚度。从图 5(a)和图 5(b)可以发现:在 10 km 以下的高度层上,不对称因子的平均值约为 0.72,在云层高度范围内不对称因子增大至 0.87 以上,气溶胶

的平均单次散射反照率约为 0.94,4 km 和 8 km 高度云层范围内的单次散射反照率上升至 0.96 以上,均反映了云层内气溶胶粒子的强散射效应;从 10 km 往上至大气层顶部,单次散射反照率和不对称因子均比较稳定。单次散射反照率表示气溶胶吸收和散射的

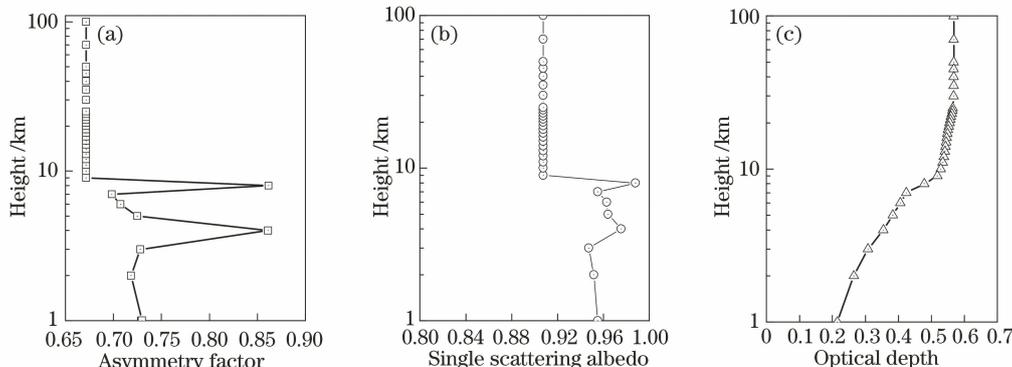


图 5 有云天气条件下的气溶胶参量廓线。(a)不对称性因子;(b)单次散射反照率;(c)光学厚度

Fig. 5 Aerosol parameter profiles under cloudy condition. (a) Asymmetry factor; (b) single scattering albedo; (c) optical depth

比值,不对称因子表示前向散射和后向散射的对称性,两者都可以反映实际大气气溶胶对太阳直接辐射和散射辐射的影响。图 5(c)为 550 nm 波长下大气气溶胶光学厚度随高度的变化趋势。可以发现,随着高度的升高,气溶胶光学厚度逐渐增加,该时刻下整层气溶胶的光学厚度约为 0.6。将该系统的实测结果与太阳光度计的测量结果进行了对比。实际测试系统中配有一台全自动太阳光度计(POM-02),计算得到 500 nm 波长下的整层气溶胶光学厚度为 0.65,与激光雷达反演得到的气溶胶光学厚度基本相当,从侧面验证了该激光雷达消光系数反演结果的可靠性。

利用上述反演结果,形成一个由 33 层气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和 106 阶散射相函数的勒让德多项式组成的气溶胶参数列表,以此作为 SBDART 模式的实际大气气溶胶输入文件,并运行 SBDART 模式,输出一个标准数据列表。对数据整理后,可获得 0~100 km 高度范围内 33 个高度

层上的实际大气散射辐射亮度分布,部分结果如图 6 所示。其中,纵坐标和横坐标分别对应天顶角和方位角。可以发现,各高度层上的全天空大气散射辐射亮度基本呈现以太阳为中心的对称分布,峰值基本靠近于太阳位置,该时刻的太阳天顶角为 73.5° ,方位角为 51.4° ,因此,在观测方向 231° 左右太阳辐射亮度达到最大值。从地面自下而上,大气散射辐射亮度随着高度的升高发生变化。受到大气底部气溶胶强散射以及高层云层粒子的吸收作用,在地面处的散射辐射亮度较高,约为 $1300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。由于 3.8 km 和 8.0 km 的云层作用,在云下 3 km、云上 4 km、云下 6 km 和云内 8 km 高度层上的大气散射辐射亮度明显增强,最大值达到 $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,这与云层位置高浓度气溶胶粒子产生的强散射作用有关。在 10 km 以上的高度层,大气散射辐射亮度较低,小于 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

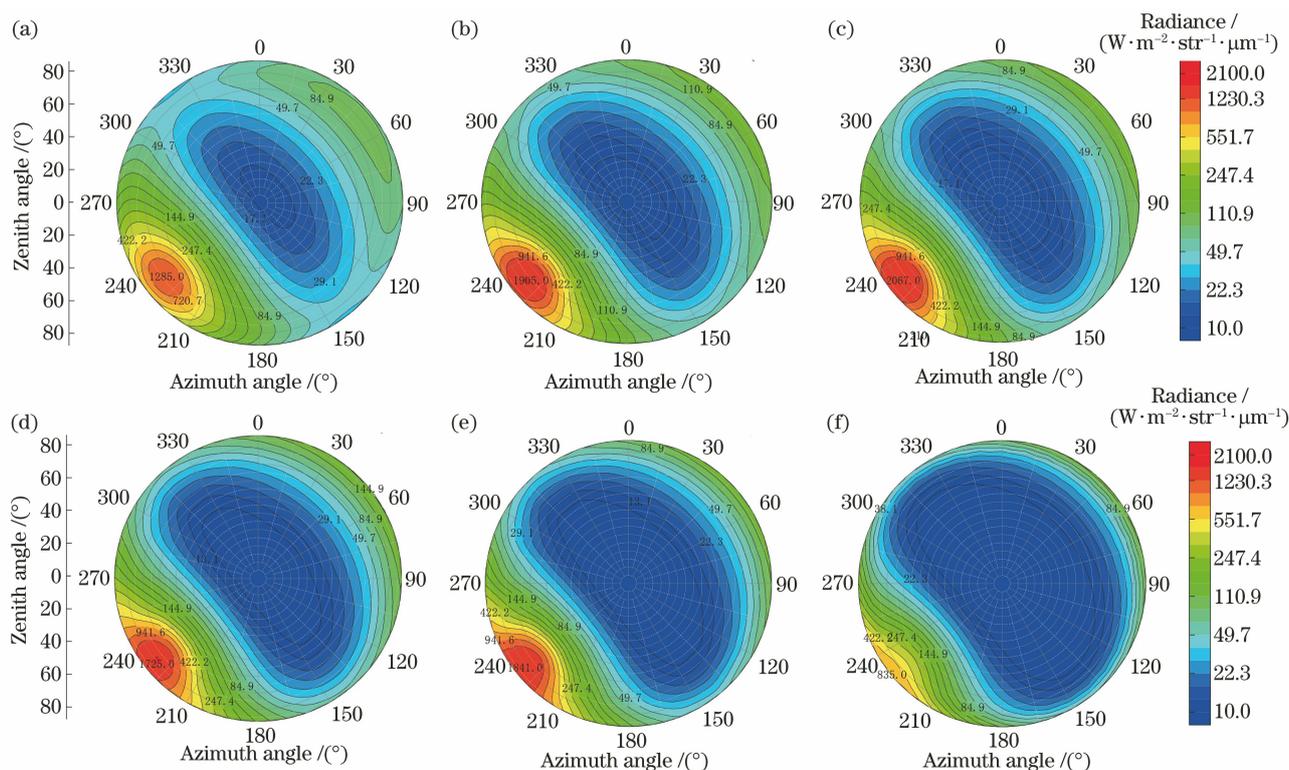


图 6 有云天气条件下实际大气散射辐射亮度分布。(a) 0 km;(b) 3 km;(c) 4 km;(d) 6 km;(e) 8 km;(f) 10 km

Fig. 6 Actual atmospheric scattered radiance under cloudy condition. (a) 0 km; (b) 3 km; (c) 4 km; (d) 6 km; (e) 8 km; (f) 10 km

4.2 低能见度天气条件下的计算结果

在低能见度天气条件下进行了激光雷达探测实验,探测时间为 2020 年 12 月 22 日 11:30,此时的水平能见度为 6 km,空气质量指数为 202,PM_{2.5} 为 $152 \mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀ 为 $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$,该气象条件为霾气

象条件。图 7 为气溶胶不对称因子和单次散射反照率随高度的变化趋势。可以发现:在 3 km 高度以下,气溶胶的平均不对称因子为 0.75,单次散射反照率为 0.97,如图 7(a)和图 7(b)所示;在 4~7 km 高度范围内,不对称因子约为 0.7,单次散射反照率

约为 0.94; 在 8 km 高度有薄云层的存在, 对应的不对称因子达到 0.85 以上, 单次散射反照率上升至 0.98 左右。图 7(c) 为 550 nm 波长下的大气气溶胶光学厚度曲线, 可以发现, 受霾天气的影响, 该时刻

整层气溶胶的光学厚度约为 1.32, 明显高于晴天和多云条件下的气溶胶光学厚度。太阳光度计得到 500 nm 波长下整层气溶胶的光学厚度约为 1.21, 与该系统测量得到的数值差异在误差允许范围内。

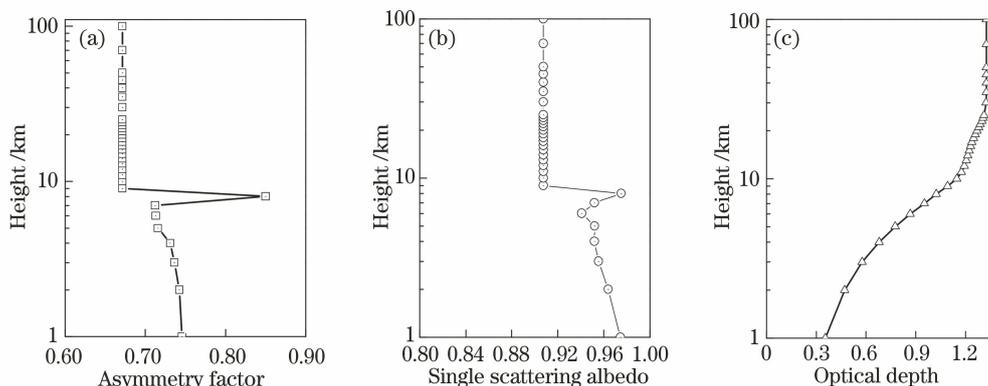


图 7 霾天气条件下的气溶胶参量廓线。(a) 不对称因子; (b) 单次散射反照率; (c) 光学厚度

Fig. 7 Aerosol parameter profiles under haze weather. (a) Asymmetry factor; (b) single scattering albedo; (c) optical depth

利用上述气溶胶分析结果构建了实际大气气溶胶参数列表, 运行 SBDART 模式, 得到不同高度层上的大气散射辐射亮度分布, 结果如图 8 所示。可以发现, 大气散射辐射亮度呈现以太阳为中心

向四周对称辐射的趋势, 太阳天顶角和方位角分别为 59.56° 和 -18.13° , 在方位角 161.87° 左右大气散射辐射亮度最亮, 自下而上, 大气散射辐射亮度逐渐减小。

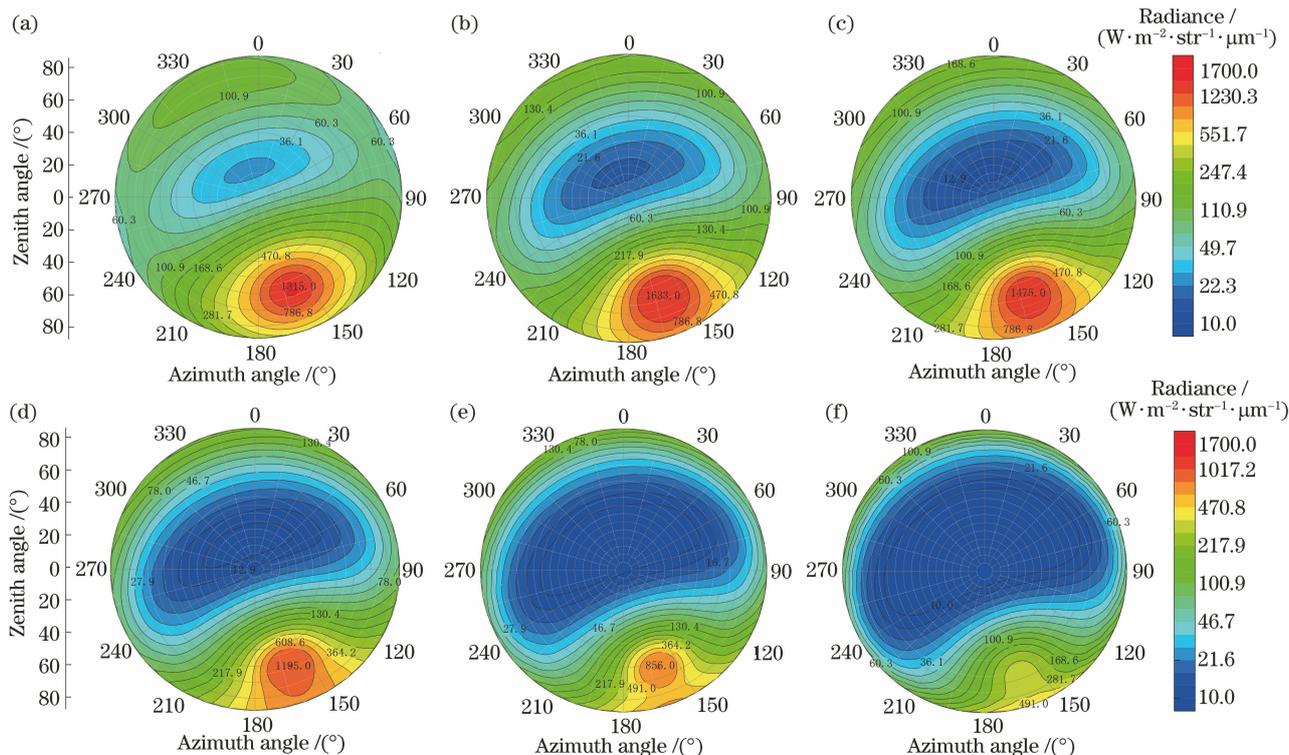


图 8 霾天气条件下实际大气散射辐射亮度分布。(a) 0 km; (b) 2 km; (c) 4 km; (d) 6 km; (e) 8 km; (f) 10 km

Fig. 8 Actual atmospheric scattered radiance under haze weather. (a) 0 km; (b) 2 km; (c) 4 km; (d) 6 km; (e) 8 km; (f) 10 km

4.3 不同天气下的计算结果

对不同天气条件下的实际大气散射辐射亮度分

布进行了对比分析, 以太阳直接和散射辐射亮度和地面 0 km 处的大气散射辐射亮度分布为例, 给出了晴

天、多云、低能见度天气条件下地面 0 km 处的实际大气散射辐射亮度分布,结果如图 9 所示。图 9(a)和图 9(b)为 16:00 的计算结果,对应天气为晴天和多云,太阳在观测方位角 230°~240°范围附近具有最强的散射辐射亮度,分别为 $1500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 和 $1285 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,大气散射辐射亮度向四周辐射且逐渐衰减。图 9(c)和图 9(d)为晴天和低能见

度天气条件下 11:30 的计算结果,由于接近中午,对应的太阳天顶角为 $55^\circ\sim 60^\circ$,太阳方位角在 $160^\circ\sim 170^\circ$ 范围内,在太阳位置处的大气散射辐射亮度达到最大值,分别为 $2200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 和 $1300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{str}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。可以发现,由于探测时间和实际大气溶胶状态不同,在地面处观察到的大气散射辐射亮度存在明显差异。

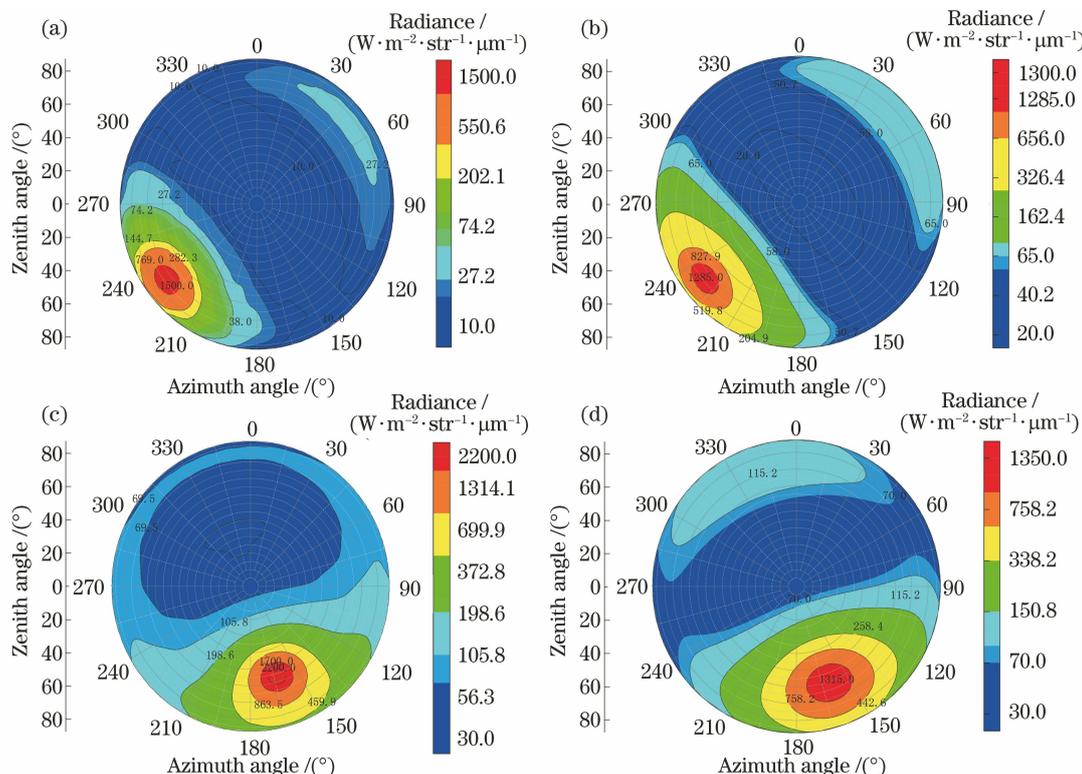


图 9 不同天气条件下地面处的大气散射辐射亮度分布。(a) 2020 年 11 月 18 日 16:00;(b) 2020 年 11 月 19 日 16:00;(c) 2019 年 11 月 21 日 11:30;(d) 2020 年 12 月 22 日 11:30

Fig. 9 Actual atmospheric scattered radiance distribution at the ground under different weather conditions.

(a) 16:00 on Nov. 18, 2020; (b) 16:00 on Nov. 19, 2020; (c) 11:30 on Nov. 21, 2019; (d) 11:30 on Dec. 22, 2020

对到达地面的太阳直接和散射辐射亮度进行了分析。图 10 为不同天气条件下的太阳直接和散射辐射亮度随高度的变化趋势。可以发现,受天气条件影响,太阳辐射从大气层顶向下传输,受到大气气溶胶和分子的不同吸收和散射作用;对于 11:30 时刻,在霾天气下受到大气底层高浓度气溶胶的吸收和散射,到达地面的总辐射亮度约为 $550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,明显低于晴天下的总辐射亮度(约为 $750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$);对于 16:00 时刻,从 100 km 以下,太阳的总辐射亮度逐渐衰减,到达地面的总辐射亮度约为 $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。

为了验证该系统测量结果的可靠性,将计算结果与地面气象站测量的总辐射进行对比和分析,不同天气、不同时刻共 18 次的同步测量结果如图 11

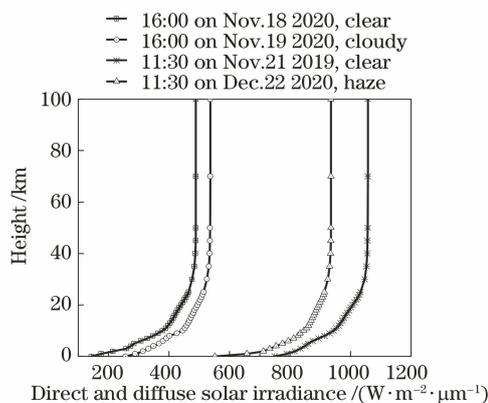


图 10 不同天气条件下的太阳直接和散射辐射亮度
Fig. 10 Direct and diffuse solar irradiance under different weather conditions

所示。可以发现,两种数据之间存在一定的差异。

以第 2 次比对为例(时间为 2019 年 11 月 21 日 12:00),由激光雷达结合 SBDART 模式计算的太阳总辐射为 $749.26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,气象站测量的总辐射为 $733 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,两者的相对误差小于 3%。在 2020 年 12 月 22 日 10:30,气象站测量的总辐射值为 $432 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,模式计算结果为 $374.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,偏差

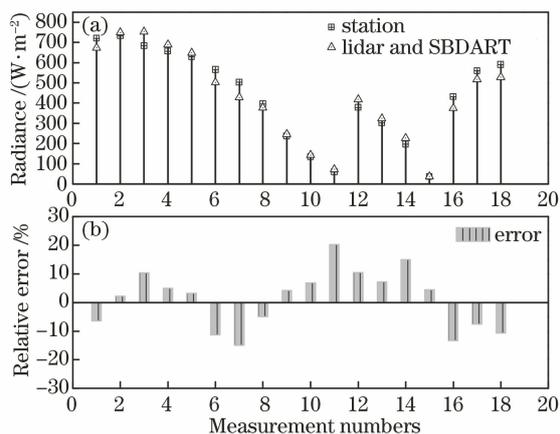


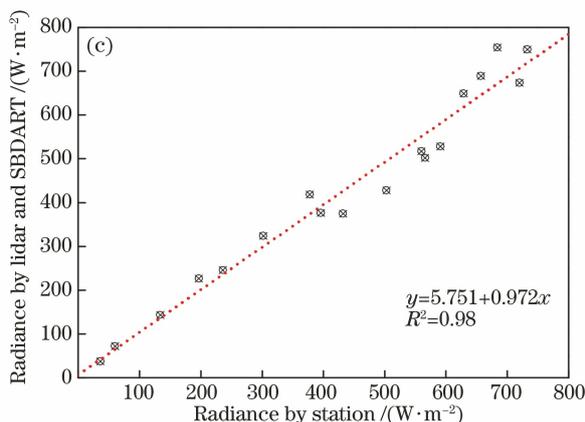
图 11 不同方法计算的辐射量。(a)趋势;(b)相对误差;(c)相关性分析

Fig. 11 Radiant quantity calculated by different methods. (a) Trend; (b) relative error; (c) correlation analysis

5 结 论

为了解决实际大气散射辐射亮度分布的计算和测量,结合激光雷达探测技术的优势,提出了一种基于双波长拉曼-米激光雷达探测技术和系统,通过设计 4 通道高光谱分光系统,提取中心波长分别为 354.7 nm 和 1064.2 nm 以及 386.7 nm 和 852.7 nm 的米-瑞利散射信号以及氮气分子拉曼散射信号,用于对大气气溶胶光学参量、微物理参量以及散射特性参量的反演,为辐射传输模式提供实际的大气大气溶胶状态信息。利用该激光雷达系统开展了不同天气条件下的探测实验,并进行数据反演,构建了由气溶胶光学厚度、单次散射反照率和散射相函数组成的 33 层实际大气气溶胶列表,将其作为 SBDART 模式的自定义气溶胶输入文件,得到了实际大气散射辐射亮度,主要包括 33 层大气散射辐射亮度以及太阳直接辐射和散射辐射亮度。以多云和低能见度天气下的实验结果为例,详细说明了激光雷达结合 SBDART 模式的计算过程,并对不同天气下的实际大气散射辐射亮度分布进行了比较与分析,验证了大气气溶胶信息对实际大气散射辐射的重要影响。为了验证计算结果的准确性,将激光雷达结合 SBDART 模式得到的地面辐射计算结果与地面气象站测量的总辐射值进行了比对,不同天气、不同时刻共 18 次测量数据的相关性分析结果表明,

较大,相对误差达到 15%。图 11(c)为两种数据的相关性分析,可以发现,两种数据具有强正相关性,平均相对误差为 8.2%,相关系数达到 0.98,均方根误差约为 41.74,验证了利用激光雷达数据和 SBDART 模式计算大气散射辐射亮度方法的可行性。



两种数据的差异较小,平均相对误差为 8.2%,相关性达到 0.98,均方根误差为 41.74,验证了计算结果的可靠性,也验证了利用双波长拉曼-米激光雷达系统结合 SBDART 模式计算实际大气散射辐射亮度方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 陈川, 易维宁, 崔文煜, 等. 大气散射对地表双向反射分布函数反演的影响与修正[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0729001.
Chen C, Yi W N, Cui W Y, et al. Influence and correction of BRDF retrieval of surface by atmospheric scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0729001.
- [2] 张瑜, 刘秉琦, 魏合理, 等. 基于氧气光谱吸收的被动测距中无云天背景辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 298-304.
Zhang Y, Liu B Q, Wei H L, et al. Study on cloudless sky background radiation characteristic in passive ranging based on oxygen spectral absorption [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 298-304.
- [3] 王毅, 饶瑞中. 空间斜程能见度的影响因素分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 945-950.
Wang Y, Rao R Z. Slant visibility: multi-factor analysis[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(10): 945-950.
- [4] 陆川, 刘文清, 王玉峰, 等. 斜程能见度计算中的天

- 空背景辐射亮度仿真与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1401001.
- Lu C, Liu W Q, Wang Y F, et al. Simulation and analysis of sky background radiance in slant visibility calculation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1401001.
- [5] 徐文清, 詹杰, 徐青山. 宽波段天空背景辐射亮度测量与分析[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801001.
- Xu W Q, Zhan J, Xu Q S. Measurement and analysis of wide-wave band sky background radiance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801001.
- [6] 孙凤莹, 梅海平, 武鹏飞, 等. 基于光纤光谱仪的全天空光谱成像研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070104.
- Sun F Y, Mei H P, Wu P F, et al. Research on Whole sky spectra imaging based on fiber spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070104.
- [7] 路大举, 杨锐, 张波, 等. 天空背景光学辐射特性测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(S1): 51-54.
- Lu D J, Yang R, Zhang B, et al. Measurement of sky background luminance characteristics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(S1): 51-54.
- [8] 刘丽莹, 郑峰, 张国玉, 等. 基于精密太阳光谱辐射计的气象辐射观测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3663-3672.
- Liu L Y, Zheng F, Zhang G Y, et al. Meteorological radiation observation based on precision solar spectroradiometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3663-3672.
- [9] Coelho P J. Discrete ordinates solution of the radiative transfer equation in media with strong forward and backward scattering subjected to collimated irradiation [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 254: 107087.
- [10] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 367-375.
- [11] Haskell R C, Svaasand L O, Tsay T T, et al. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 1994, 11(10): 2727-2741.
- [12] 杨春平, 马小莉, 郭晶, 等. 基于大地坐标系的球面大气辐射传输模型[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(2): 301-305, 311.
- Yang C P, Ma X L, Guo J, et al. Atmospheric radiative transfer model for spherical atmosphere in geodetic coordinate system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(2): 301-305, 311.
- [13] 陈舜平, 孙凤莹, 徐文清, 等. 分光型天空背景辐射计的研制[J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(4): 241-249.
- Chen S P, Sun F Y, Xu W Q, et al. Development of spectral radiance measurement system for sky background [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(4): 241-249.
- [14] 孙凤莹, 梅海平, 武鹏飞, 等. 地基天空背景辐射测量技术及其应用研究现状与展望[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(2): 81-92.
- Sun F Y, Mei H P, Wu P F, et al. Current situation and prospect of ground-based background sky radiance measurement technique and its applications [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, 12(2): 81-92.
- [15] Wang Y F, Fu Q, Zhao M N, et al. A UV multifunctional Raman lidar system for the observation and analysis of atmospheric temperature, humidity, aerosols and their conveying characteristics over Xi'an[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 205: 114-126.
- [16] 杜娟, 宋鹏程. 气溶胶激光雷达在大气环境监测中的应用[J]. 环境保护科学, 2021, 47(2): 107-112.
- Du J, Song P C. Application of aerosol lidar in atmospheric environment monitoring [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(2): 107-112.
- [17] 麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101003.
- Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101003.
- [18] Gao F, Song X Q, Wan Y F, et al. Ultraviolet Raman lidar for high-accuracy profiling of aerosol extinction coefficient [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(2): 95-97.
- [19] Di H G, Hua H B, Cui Y, et al. Vertical distribution of optical and microphysical properties of smog aerosols measured by multi-wavelength polarization lidar in Xi'an, China [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 28-38.
- [20] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学[M]. 葛正谟, 张霭琛, 桑建国, 译. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics

- [M]. Ge Z M, Zhang A C, Sang J G, Transl. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [21] 王海华, 孙贤明, 刘万强, 等. 辐射传输方程中的单次散射参数计算[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 022901.
- Wang H H, Sun X M, Liu W Q, et al. Calculation of single scattering parameters in vector radiative transfer equation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 022901.
- [22] 程晨, 徐青山, 朱琳. 非球形气溶胶粒子散射相函数经验公式[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 1-7.
- Cheng C, Xu Q S, Zhu L. Empirical expression of phase function for non-spherical particles [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 1-7.
- [23] Klose A D, Netz U, Beuthan J, et al. Optical tomography using the time-independent equation of radiative transfer: part 1: forward model[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 72(5): 691-713.
- [24] 魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884-890.
- Wei H L, Dai C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 884-890.
- [25] Ricchiazzi P, Yang S R, Gautier C, et al. SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(10): 2101-2114.
- [26] Fu Y F, Zhu J C, Yang Y J, et al. Grid-cell aerosol direct shortwave radiative forcing calculated using the SBDART model with MODIS and AERONET observations: an application in winter and summer in Eastern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(8): 952-964.
- [27] 狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号标定技术研究[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094215.
- Di H G, Hua D X, Wang Y F, et al. Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection range [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094215.