

斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析

陆川¹, 刘文清^{1,2}, 王玉峰^{1*}, 贾立松¹, 高天乐¹, 李兴兴¹, 李仕春¹, 狄慧鸽¹,
刘晶晶¹, 宋跃辉¹, 华灯鑫¹

¹西安理工大学激光雷达遥感研究中心, 陕西 西安 710048;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 从斜程能见度探测原理出发, 利用 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 模式求解辐射传输方程, 对天空背景辐射进行了详细的理论仿真与分析。利用 SBDART 模式自带的气溶胶模型, 仿真得到了不同类型气溶胶模型在晴天条件下的天空背景辐射结果, 探讨了太阳直接辐射和大气散射辐射以及不同高度上大气散射辐射的分布趋势, 分析了气溶胶单次散射反照率和不对称因子对结果的影响。提出了激光雷达结合 SBDART 模式的实际天空背景辐射的计算方法, 以实测扫描激光雷达的气溶胶探测数据作为 SBDART 模式的输入参数, 计算获得了实际大气中太阳直接辐射以及不同高度处天空背景辐射的分布结果。为了验证结果的正确性, 利用太阳光度计同步测量的太阳直接辐射, 进行了对比验证, 两者具有较好的一致性, 相关系数达到 0.99。以黑体为目标, 初步探讨了天空背景辐射对斜程能见度的影响, 结合激光雷达和 SBDART 模式所得到的实际天空背景辐射可为斜程能见度精确反演提供保证。

关键词 大气光学; 天空背景辐射; 辐射传输方程; 斜程能见度; SBDART

中图分类号 P422.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1401001

Simulation and Analysis of Sky Background Radiance in Slant Visibility Calculation

Lu Chuan¹, Liu Wenqing^{1,2}, Wang Yufeng^{1*}, Jia Lisong¹, Gao Tianle¹,
Li Xingxing¹, Li Shichun¹, Di huige¹, Liu Jingjing¹, Song Yuehui¹, Hua Dengxin¹
¹Centre for Lidar Remote Sensing Research, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In this paper, based on the principle of slant visibility detection, the SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) model is used to solve the radiation transfer equation, and detailed theoretical simulation and analysis of the sky background radiation are carried out. First, using the aerosol models from SBDART model, the sky background radiation results of different types of aerosol models under sunny conditions are obtained. The distribution trends of solar direct radiation and atmospheric scattering radiation at different heights are discussed. The influences of single scattering radiation albedo and asymmetry factor on the results are analyzed. A calculation method combined with Lidar and SBDART model is presented to obtain the real sky background radiation. The aerosol data obtained by a scanning lidar is taken as the input parameter of SBDART model, and the distribution results of solar direct radiation in the real atmosphere and sky background radiation at different heights are calculated. In order to validate the correctness of the results, the solar direct radiation synchronously measured by the solar photometer is compared and verified. The results show that a consistent change trend can be obtained between them, showing positive correlation with a correlation coefficient of 0.99. Finally, taking blackbody as the target, the influence of sky background radiation on slant visibility is preliminarily discussed. The actual sky background radiation obtained by combining Lidar and SBDART models can provide guarantee for accurate inversion of slant visibility.

Key words atmospheric optics; sky background radiation; radiation transfer equation; slant visibility; SBDART

OCIS codes 010.1360; 010.5620; 290.1310

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-24; 录用日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(U1733202, 41627807)

* E-mail: wangyufeng@ xaut.edu.cn

1 引 言

能见度是大气稳定性和垂直结构的重要指标之一,同时也是影响交通运输安全的重要因素,一般可分为水平能见度和斜程能见度。水平能见度是指人眼能够从天空背景下看到和辨认出目标物的水平距离,对于人们日常出行和道路交通运输有重要意义。空间目标探测领域则主要涉及斜程能见度,对斜程能见度的探测和研究在航空、航天、导弹发射、天气预报等领域具有重要的科学意义和应用价值^[1-3]。

目前,对于水平能见度的测量,主要有透射式能见度仪、散射式能见度仪和能见度自动测量仪等仪器^[4-6]。对于斜程能见度的探测,主要有肉眼粗略目测法和激光雷达能见度仪。其中,激光雷达能见度仪主要是利用米散射激光雷达技术探测斜程路径上的平均气溶胶消光系数来估算平均斜程能见度距离,但是该技术未考虑斜程路径上天空背景辐射对目标物和背景视亮度的影响^[7-9]。根据斜程能见度的探测原理,在斜程探测中,斜程能见度取决于目标物和背景的视亮度对比度,表示为^[10-11]

$$C = \left| \frac{L_O^* - L_B^*}{L_B^*} \right| = \left| \frac{t_R(L_O - L_B)}{t_R L_B + D_R} \right|, \quad (1)$$

式中: L_O 和 L_B 分别为目标物和背景的固有亮度; L_O^* 和 L_B^* 分别为目标物和背景的视亮度; t_R 为大气透过率; D_R 为目标与观察者之间大气路径上的程辐射,即路径上的天空背景辐射。可见,在白天探测中,天空背景辐射亮度对目标物和背景的视亮度产生了关键性作用,若忽略大气辐射传输影响,目标物与背景的视亮度对比度和斜程能见度之间将不存在确定关系,在这种情况下很难获得准确的斜程能见度。因此,天空背景辐射亮度的研究将有助于获得准确的斜程能见度探测结果。

对于天空背景辐射亮度的研究,一般要求解复杂的辐射传输方程。目前国内外大气物理科学家们已开发了多套解决地球大气辐射传输问题的实用计算模式,如 HITRAN 数据库、MOTRAN 和 DISORT 等模式,可获得太阳辐射传输、热辐射以及辐射亮度等参数的模拟计算结果^[12-14]。国内的中国科学院大气物理所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、电子科技大学等研究单位在大气辐射传输特性领域也开展了一系列测量和研究^[15-17]。

本文基于斜程能见度探测原理,通过 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)模式对辐射传输方程进行求解,对斜程能

能见度计算中的天空背景辐射亮度进行详细的理论仿真与分析。首先,利用 HITRAN 数据库和米散射理论,分别对大气分子和气溶胶在可见光波段的散射和吸收特性进行了仿真和分析,得到了分子光学厚度和分子透过率以及不同类型气溶胶模型下的气溶胶散射与消光参量,从而获得了斜程能见度计算中和 SBDART 模式输入的大气透过率。进而,利用 SBDART 模式,仿真获得了不同类型气溶胶模型下的天空背景辐射亮度的分布特征,分析了太阳直接辐射和每层散射辐射的分布趋势,得到气溶胶单次散射反照率和不对称因子对结果的影响,并利用激光雷达实际测量的气溶胶数据作为 SBDART 模式的输入参数,获得了实际大气晴天条件下天空背景辐射亮度的分布情况,探讨了不同高度下散射辐射和太阳直接辐射的变化趋势,通过与同步太阳光度计的数据进行对比验证了结果的可靠性。最后以黑体为目标,初步探讨了天空背景辐射分布对斜程能见度的影响,该研究为斜程能见度精确反演提供保证。

2 天空背景辐射亮度的仿真方法

2.1 基于 SBDART 模式求解辐射传输方程的方法

对于天空背景辐射亮度的研究,一般要求解复杂的辐射传输方程^[18-19]:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\delta I(\tau, \mu, \varphi)}{\delta \tau} = & -I(\tau, \Omega) + \\ & \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} p(\Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') \delta \Omega' + \\ & \frac{1}{4} F_0 e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} p(\Omega, \Omega_0) + (1 - \omega) B(T), \quad (2) \end{aligned}$$

式中: δ 为波数飘逸系数; Ω_0 为初始辐射传播方向; Ω 为散射相函数中光子传递方向; Ω' 为多次散射的光子传递方向; $I(\Omega, \Omega_0)$ 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; τ 为大气的光学厚度; ω 为大气单次散射反照率; p 为大气散射相函数; μ 和 μ_0 分别为观察天顶角和太阳天顶角的方向余弦; φ 为观察方位角。可见,天空背景辐射亮度不仅与太阳位置和观察位置有关,更受到大气模型和大气气溶胶吸收和散射特性的影响。

SBDART 模式是由美国加利福尼亚大学大气物理科学家们开发的解决地球大气平面平行辐射传输问题的实用模式,它应用了 DISORT 模式来计算辐射传输过程,使用分层介质的离散坐标法,能够较为准确地拟合和仿真不同情况下的天空背景辐射,

是目前普遍公认的辐射传输精确算法的实用模式包^[20]。默认 100 km 处为大气层顶端,从高度 100 km 开始直到 0 km 地表处,将地球的大气分为 33 层,并认为每一层具有均匀的物理特性,通过输入太阳和观察者的几何位置、大气分子和气溶胶等参数,可获得每层自上而下和自下而上的天空背景辐射分布。图 1 所示为基于 SBDART 模式求解辐射传输方程的主要流程框图。

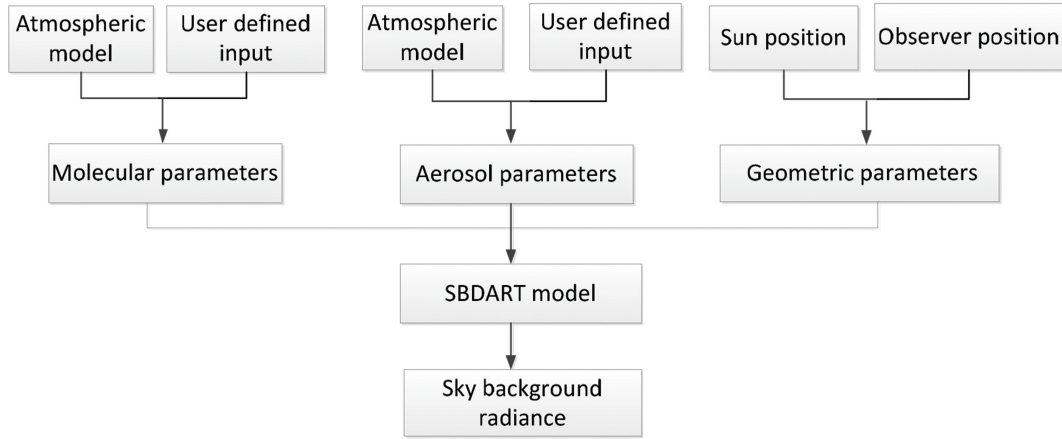


图 1 SBDART 模式求解辐射传输方程的流程框图

Fig. 1 Flow chart for solving radiative transfer equation with SBDART model

2.2 利用 HITRAN 数据库的大气分子吸收特性仿真方法

利用 HITRAN 数据库提供的大气分子吸收谱线,并结合 Lorentz 线型函数,可计算获得分子的光学厚度和透过率,主要计算公式如下^[22]:

$$\tau_{\eta\eta'} = N \cdot \Delta H \cdot K_{\eta\eta'}, \quad (3)$$

$$K_{\eta\eta'} = S_{\eta\eta'} \cdot f, \quad (4)$$

$$S_{\eta\eta'}(T) =$$

$$S_{\eta\eta'}(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \frac{\exp\left(-\frac{c_2 E_\eta}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{c_2 E_\eta}{T_{\text{ref}}}\right)} \left[1 - \frac{\exp\left(-\frac{c_2 v_{\eta\eta'}}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{c_2 v_{\eta\eta'}}{T_{\text{ref}}}\right)} \right], \quad (5)$$

$$f(p, T) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha(p, T)}{\alpha(p, T)^2 + (v - v_{\eta\eta'}^*)^2}, \quad (6)$$

$$\alpha(p, T) = \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T}\right)^n [\gamma_{\text{air}}(p - p_s) + \gamma_{\text{self}} p_s], \quad (7)$$

式中: $\tau_{\eta\eta'}$ 为分子单谱线吸收光学厚度; ΔH 为选取的路径长度; T_{ref} 为温度参考值,取 $T_{\text{ref}} = 296 \text{ K}$; N 为单层大气对应分子的粒子数; $K_{\eta\eta'}$ 为单谱线吸收系数; $S_{\eta\eta'}$ 为谱线强度; Q 为总分配函数; c_2 为第二辐射常数,一般取值为 $1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$; $v_{\eta\eta'}$ 为中心波数; E_η 为低态能量; f 为 Lorentz 线型函数; T 为

一般,在运行 SBDART 模式时,气溶胶参数和分子参数的输入可选择标准大气模型或用户输入方式。由于大气的复杂多变性,输入参数的精确描述是影响 SBDART 模式辐射亮度输出结果的重要因素^[21]。在本文中,大气气溶胶的输入参数主要采用 SBDART 自带的气溶胶模型和实际大气气溶胶数据的输入方式进行计算,大气分子的输入参数则通过 HITRAN 数据库计算。

温度; p 为空气压强; p_s 为气体分压; $\alpha(p, T)$ 为经过温度和压强修正后的谱线半展宽; γ_{air} 为空气展宽半宽度; γ_{self} 为自展宽半宽度; n 为温度依赖系数; $v_{\eta\eta'}^*$ 为压力对谱线中心位置的修正,表示为

$$v_{\eta\eta'}^* = v_{\eta\eta'} + \delta \cdot p. \quad (8)$$

HITRAN 数据库中已经给出从 $0 \sim 23000 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内共一百多万条分子吸收线的参数汇编,列出了每条吸收线的 $v_{\eta\eta'}$ 、 Q 、 γ_{air} 、 γ_{self} 、 E_η 、 n 、 δ 等重要参数以及主要参数的精度。根据分子单谱线吸收光学厚度进而得到大气分子总光学厚度 τ_m ,即所有分子谱线光学厚度的累加,表示为

$$\tau_m = \sum \tau_{\eta\eta'}. \quad (9)$$

由此,可计算得到整层的大气透过率 t_R :

$$t_R = \exp\left(-\frac{\tau}{\cos \Theta}\right), \quad (10)$$

式中: Θ 为消光路径倾角; τ 为大气光学厚度,为大气气溶胶光学厚度 τ_a 和大气分子光学厚度 τ_m 的总和,表示为

$$\tau = \tau_m + \tau_a. \quad (11)$$

在实际应用中,为了降低计算量,SBDART 模式在计算分子光学厚度时采用了相关 k 分布法。在每层物理特性均匀的假定下,对于相关 k 分布法的

具体处理参考了 LOWTRAN 7 的算法^[23]。用户可以根据 HITRAN 仿真输出的吸收系数 $K_{\eta\eta'}$, 按照指数模式计算得到 k 分布文件, 作为 SBDART 分子参数输入^[24]。

2.3 大气气溶胶吸收和散射特性的仿真方法

SBDART 模式计算中大气气溶胶的输入参数主要包括大气气溶胶光学厚度 τ_a , 体单次散射反照率 ω_a , 体不对称因子 g_a 以及散射相函数 p 的 $2n$ 阶勒让德矩阵展开。根据米散射理论, 将气溶胶粒子近似看作是球型粒子, 可以计算大气气溶胶的体消光系数 β_{ext} 、体散射系数 β_{sca} 、体单次散射反照率 ω_a 、体不对称因子 g_a , 分别表示为^[25-26]

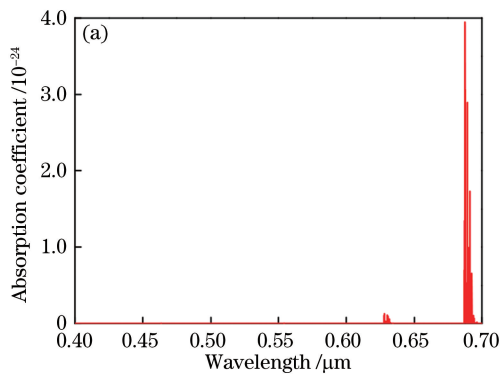
$$\beta_{\text{ext}} = \pi \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 Q_{\text{ext}}(\lambda, m) n(r) dr, \quad (12)$$

$$\beta_{\text{sca}} = \pi \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 Q_{\text{sca}}(\lambda, m) n(r) dr, \quad (13)$$

$$\omega_a = \frac{\beta_{\text{sca}}}{\beta_{\text{ext}}}, \quad (14)$$

$$g_a = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 Q_{\text{sca}}(\lambda, m) n(r) g(\lambda, m) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 Q_{\text{sca}}(\lambda, m) n(r) dr}, \quad (15)$$

式中: r_{min} 、 r_{max} 分别为粒子最小和最大半径; Q_{ext} 、 Q_{sca} 分别为粒子的消光效率因子和散射效率因子, 它们与折射率 m 、波长 λ 以及粒子半径 r 有关; g 为对应单个粒子的不对称因子; $n(r)$ 为气溶胶粒径谱。当采用实际大气气溶胶数据的输入方式时, 可利用扫描激光雷达的探测数据, 首先反演获得大气气溶胶消光系数和后向散射系数廓线, 进而反演获得实际大气的气溶胶粒子谱分布 $n(r)$, 根据上述公式计算获得大气气溶胶的散射特性参量信息, 作为



SBDART 模式的输入条件。

有关 SBDART 模式中散射相函数的输入, 需要使用 $2n$ 阶勒让德矩阵对散射相函数进行展开。由于一般直接对散射相函数进行展开较为复杂, 本文中选用 H-G 散射相函数对气溶胶原本的散射相函数进行近似替代, 表示为

$$P_{\text{HG}}(\cos \theta, g_a) = \frac{1 - g_a^2}{(1 + g_a^2 - 2g_a \cos \theta)^{\frac{3}{2}}}, \quad (16)$$

对应的展开系数表示为

$$\bar{\omega}_n = (2n + 1)c_n, \quad (17)$$

式中: c_n 为 H-G 散射相函数的 n 阶勒让德正交矩阵元素, 可表示为

$$c_n = \frac{\int_{\cos \theta = -1}^1 P_{\text{HG}}(\cos \theta) P_n(\cos \theta) d(\cos \theta)}{\int_{\cos \theta = -1}^1 P_{\text{HG}}(\cos \theta) d(\cos \theta)}, \quad (18)$$

式中: P_n 为 n 阶勒让德多项式。

3 大气的吸收与散射特性对天空背景辐射的影响分析

大气气溶胶和分子参数的输入选择, 对天空背景辐射亮度的输出结果有重要影响。在这里, 首先对 SBDART 模式自带的 4 种不同类型的大气气溶胶模型进行了仿真, 分析不同大气气溶胶模型下大气分子和气溶胶的吸收和散射特性对天空背景辐射亮度输出结果的影响。

3.1 大气分子吸收谱线和透过率的仿真

可见光波段的主要吸收分子气体有氧气和水汽。图 2 给出了大气中的氧气和水汽分子在标准状况下的可见光波段吸收谱线图。在可见光波段中, 氧气吸收谱线主要位于 $0.70 \mu\text{m}$ 附近的波段范围, 而水汽在可见光波段的的不同位置均有较强的吸收。

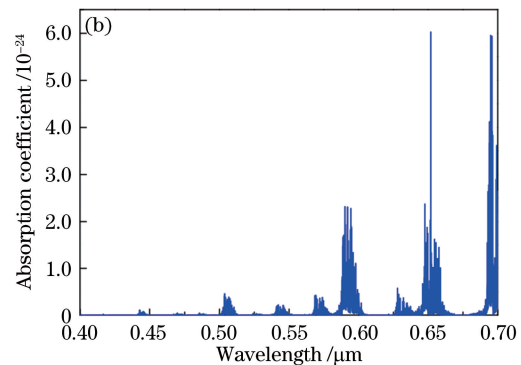


图 2 大气分子在可见光波段的吸收谱线。(a) 氧气; (b) 水汽

Fig. 2 Absorption spectra of atmospheric molecules in visible light region. (a) Oxygen; (b) water vapor

通过计算每个分子的吸收谱线,可以获得所有分子的总吸收光学厚度,进而获得分子的透过率曲线。图3给出了中纬度夏季和冬季的大气透过率(0~1 km,标准状况),可以看出,在冬季和夏季,分子(主要是水汽)的浓度不同造成了不同的大气透过率。

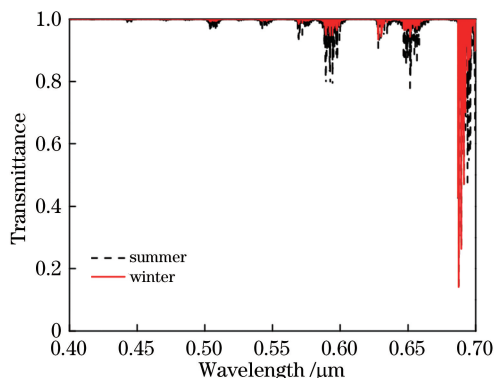


图3 中纬度夏季和冬季大气分子在可见光波段的垂直透过率曲线

Fig. 3 Transmittance of atmospheric molecules in visible light region in summer and winter at mid-latitude

3.2 大气气溶胶的消光和散射特性仿真

以城市型、乡村型、海洋型、云中水滴粒子4种类型气溶胶粒子为例,仿真获得了对应的气溶胶消

光效率因子、散射效率因子、单次散射反照率和不对称因子在粒子半径为0.1~20 μm范围内的变化情况,结果如图4所示。选用0.55 μm波长,对应气溶胶模型的折射率分别取为 $m = 1.75 + 0.44i$, $m = 1.53 + 0.016i$, $m = 1.381 + 4.3 \times 10^{-4}i$ 和 $m = 1.333 + 1.96 \times 10^{-4}i$ 。图4(a)给出了4种类型气溶胶粒子消光效率因子的变化趋势,可以看出,总体变化趋势较为一致,当粒子半径较小时消光效率因子振荡明显,随着粒子半径的增大,在10 μm附近时逐渐保持稳定。图4(b)、(c)分别给出了不同气溶胶模型下的散射效率因子和单次散射反照率随半径的变化。可以看出,不同气溶胶粒子的散射特性差异明显,在不同半径下均有较大差别,其中云中水滴粒子和海洋型气溶胶粒子的散射能力较强,散射效率和单次散射反照率均高于乡村和城市型气溶胶粒子;当粒子半径小于5 μm,乡村型气溶胶粒子的散射能力也要高于城市型气溶胶。图4(d)是4种粒子模型的不对称因子变化情况,均呈现了随半径增加逐渐增大并趋于稳定的趋势,其中海洋型气溶胶和水滴粒子的不对称因子稳定在0.85左右,乡村型气溶胶和城市型气溶胶粒子的不对称因子分别达到0.9和0.95左右。

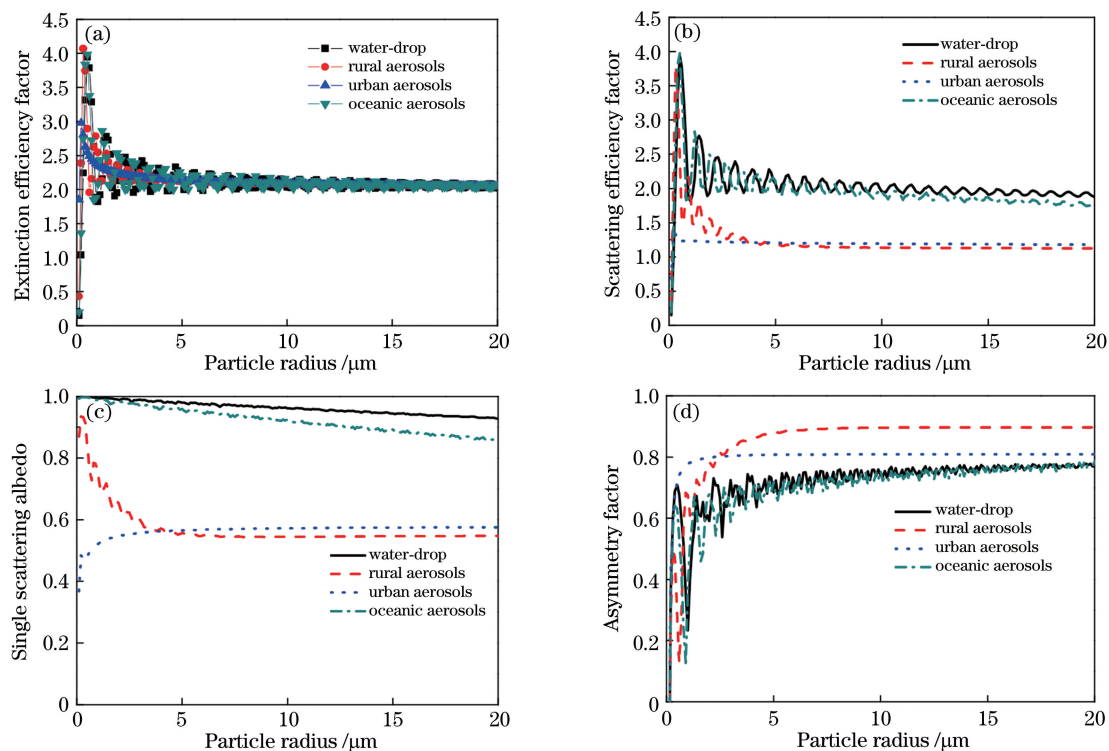


图4 4种模型气溶胶粒子的消光和散射特性随粒子半径的变化。(a)消光效率因子;(b)散射效率因子;(c)单次散射反照率;(d)不对称因子

Fig. 4 Extinction and scattering characteristics of four aerosol models versus particle radius. (a) Extinction efficiency factor; (b) scattering efficiency factor; (c) single scattering albedo; (d) asymmetric factor

3.3 基于 SBDART 大气模型对不同气溶胶类型下天空背景辐射的仿真

下面仿真分析不同类型气溶胶模型下的天空背景辐射亮度分布。仿真具体参数为：太阳天顶角为 60° 、太阳方位角为 -90° ，用户观察方位角为 90° ，以中纬度夏季大气模型为例。图 5 给出了中纬度夏季大气模型下大气气溶胶光学厚度增量随高度的变化趋势，此时，对应的大气气溶胶光学厚度为 0.55。仿真获得了波长 $0.55 \mu\text{m}$ 下在地面位置处观察到的背景辐射亮度随观察天顶角和方位角的变化情况，结果如图 6 所示。可以看出，在晴空情况下，当无气溶胶时，天顶方向 (0°) 的背景辐射很暗，地平 (90°) 位置最亮。当存在气溶胶时，此时需要考虑气溶胶的散射作用，背景辐射亮度则会逐渐增加，在太阳天顶角位置 (60°) 背景辐射亮度到达峰值。其中海洋型气溶胶所带来的背景辐射亮度峰值最高，这是由其单次散射反照率最高、散射效果最强导致的，而城市型气溶胶对光的吸收作用较强，散射较弱，所以产生的背景辐射最弱。图 7 则给出了上述 4 种气溶胶模型下的太阳直接辐射和大气散射辐射随高度的衰减状况。对于太阳辐射的传输过程，在无气溶胶情况下，由于只受到分子的散射和吸收，因此到达

地面的辐射最强；海洋型气溶胶由于其对太阳辐射的吸收作用最弱，因此到达地面的太阳直接辐射与大气散射辐射的强度要高于乡村型和城市型气溶胶模型；城市型气溶胶由于其对辐射吸收作用最强，所以到达地面的背景辐射强度最弱。可见，对于不同的气溶胶模型，气溶胶吸收和散射特性的不同，带来了不同的天空背景辐射亮度，每层大气散射辐射的不同将直接影响对斜程能见度的探测。

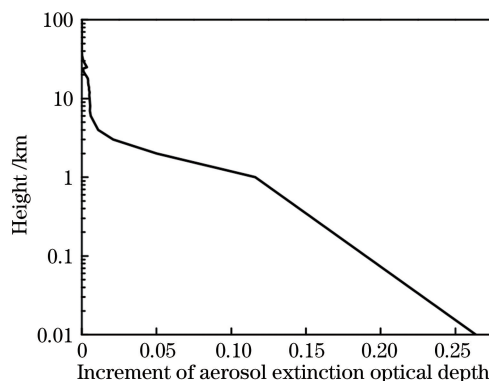


图 5 中纬度夏季大气模型中气溶胶消光光学厚度增量与高度的关系

Fig. 5 Relation between increment of aerosol extinction optical depth and height in mid-latitude summer atmospheric model

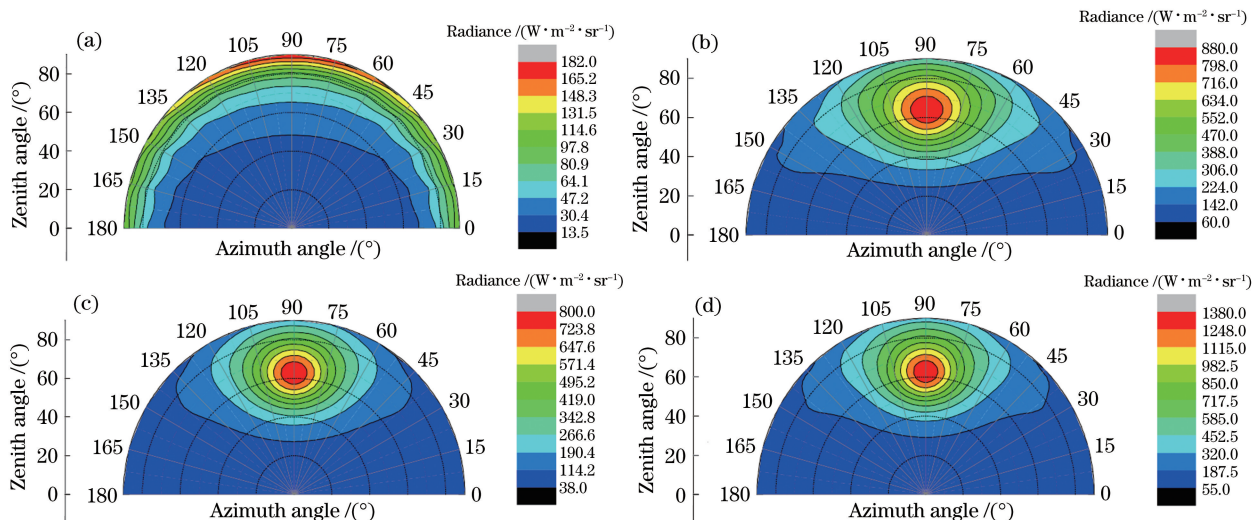


图 6 不同气溶胶模型仿真的天空背景辐射亮度分布。(a)无气溶胶；(b)乡村型气溶胶；(c)城市型气溶胶；(d)海洋型气溶胶

Fig. 6 Background radiation brightness distributions for different aerosol models. (a) Without aerosols; (b) rural aerosols; (c) urban aerosols; (d) oceanic aerosols

4 天空背景辐射的仿真与分析

针对实际的大气情况，将实测激光雷达探测获得的大气气溶胶数据作为 SBDART 模式的输入条件，求解辐射传输方程，计算获得实际大气中太阳直

接辐射以及不同高度处天空背景辐射亮度的分布结果，进而分析其对斜程能见度的影响。

4.1 散射相函数的勒让德矩阵近似替代

为了将 H-G 相函数以 $2n$ 阶勒让德矩阵展开进行近似替代，首先仿真讨论了不同不对称因子下的

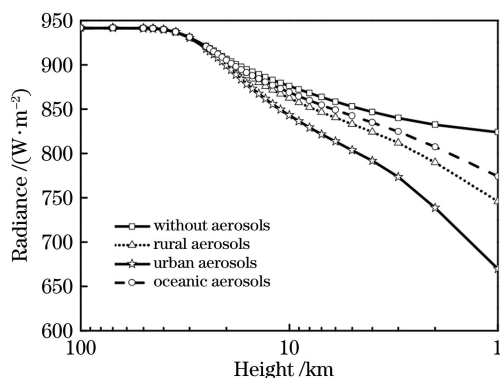


图 7 不同类型气溶胶模型下太阳直接辐射和大气散射辐射传输随高度的变化趋势

Fig. 7 Trends of solar direct radiation and atmospheric scattered radiation transfer varying with height under different aerosol models

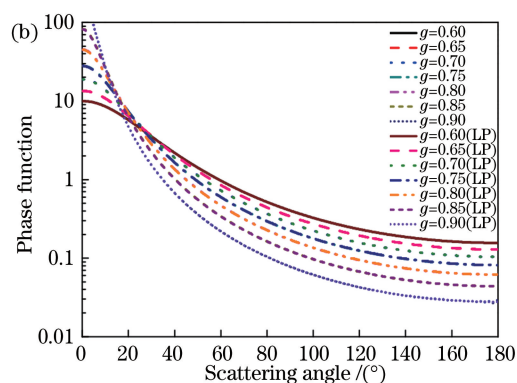
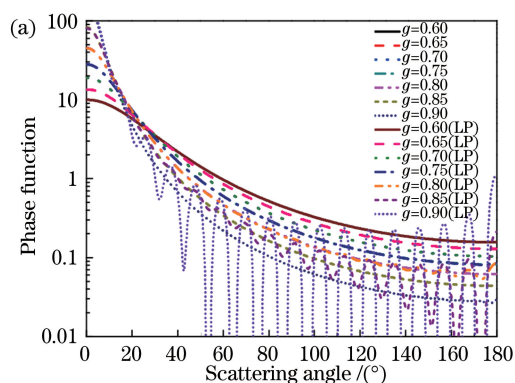


图 8 不同不对称因子下勒让德矩阵展开得到的散射相函数与 H-G 相函数的比较。(a) 32 阶；(b) 106 阶

Fig. 8 Comparison between phase function of Legendre matrix expansion and H-G phase function under different asymmetric factors. (a) 32-order; (b) 106-order

曼激光雷达系统,该系统可获得 355, 532, 1064 nm 三种波长的大气气溶胶光学参量廓线、气溶胶微物理参量(粒子谱)以及气溶胶散射特性廓线,将这些大气气溶胶数据形成列表,作为 SBDART 模式的输入参数,就可以计算得到对应的太阳直接辐射和散射辐射以及不同高度处天空背景辐射的结果。以 2019-11-21T 11:30—15:00 时段内进行的激光雷达扫描探测实验为例。图 9 给出了 2019-11-21T 12:30 时刻激光雷达探测反演获得的大气气溶胶光学厚度增量以及体不对称因子随高度的变化情况。当天为晴天天气条件,大气气溶胶消光系数随着高度逐渐减小,在高度 2 km 以下,气溶胶光学厚度增量急剧上升,所对应的气溶胶体系不对称因子为 0.82~0.83,这反映了对流层底部大气气溶胶的急剧变化;在高度 10 km 以下,气溶胶光学厚度增量缓慢下降,气溶胶体系不对称因子由 0.83 急剧增长至

勒让德矩阵散射相函数以及与 H-G 相函数的对比结果。图 8 给出了 32 阶与 106 阶勒让德矩阵近似得到的散射相函数曲线,图 8(a)和图 8(b)分别对应 32 阶和 106 阶的结果,图中 LP 代表由勒让德矩阵相函数得到的结果。可以看到,当取 32 阶勒让德展开式时,不对称因子取 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8 对应的散射相函数与 H-G 相函数基本一致,但是当不对称因子大于 0.8 时,勒让德矩阵展开得到的散射相函数逐渐发散。当取 106 阶勒让德展开式时,不同不对称因子下得到的散射相函数与 H-G 相函数几乎完全重合,获得较好的模拟结果。因此,在本文中选择了 106 阶勒让德矩阵展开式代替 H-G 相函数,作为参数输入到 SBDART 模式中。

4.2 实际大气天空背景辐射分布的分析

目前,西安理工大学建有一套扫描多波长米-拉

0.94。在高度 10 km 以上,气溶胶含量极其少,使得气溶胶光学厚度增量也很小。两者同步反映了晴天天气条件下实际大气气溶胶状态对大气消光和大气散射作用的影响。图 10 为利用 SBDART 模式计算得到的天空背景辐射分布,分别对应高度 0 km、3 km、5 km 和 10 km,此时太阳天顶角约为 60.6° ,太阳方位角为 -8.4° 。由图可见,天空背景辐射的空间分布基本上呈现以太阳为中心的对称分布,而峰值所在位置基本靠近太阳位置;从地面自下而上,随着高度的升高,天空背景辐射最亮区域逐渐由太阳位置向地平处转移,且整体的天空背景辐射也在逐渐降低,这是与大气气溶胶高度分布直接相关的,对流层底部丰富的大气气溶胶含量引起强烈的大气散射辐射,而随着高度上升,气溶胶浓度逐渐降低,瑞利散射逐渐占主导地位,导致大气散射辐射呈现下降的趋势,这与实际情况是符合的^[27]。

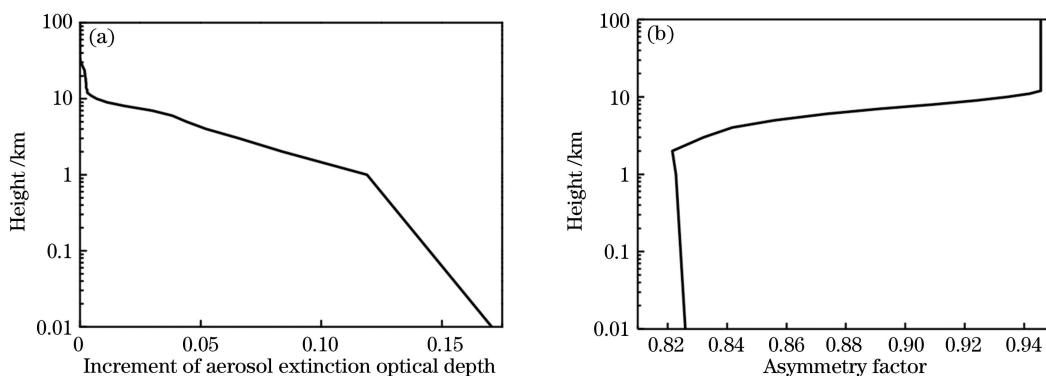


图 9 激光雷达探测反演获得的气溶胶数据。(a)气溶胶消光光学厚度增量;(b)不对称因子

Fig. 9 Aerosol data obtained by Lidar detection retrieval. (a) Increment of aerosol extinction optical depth; (b) asymmetric factor

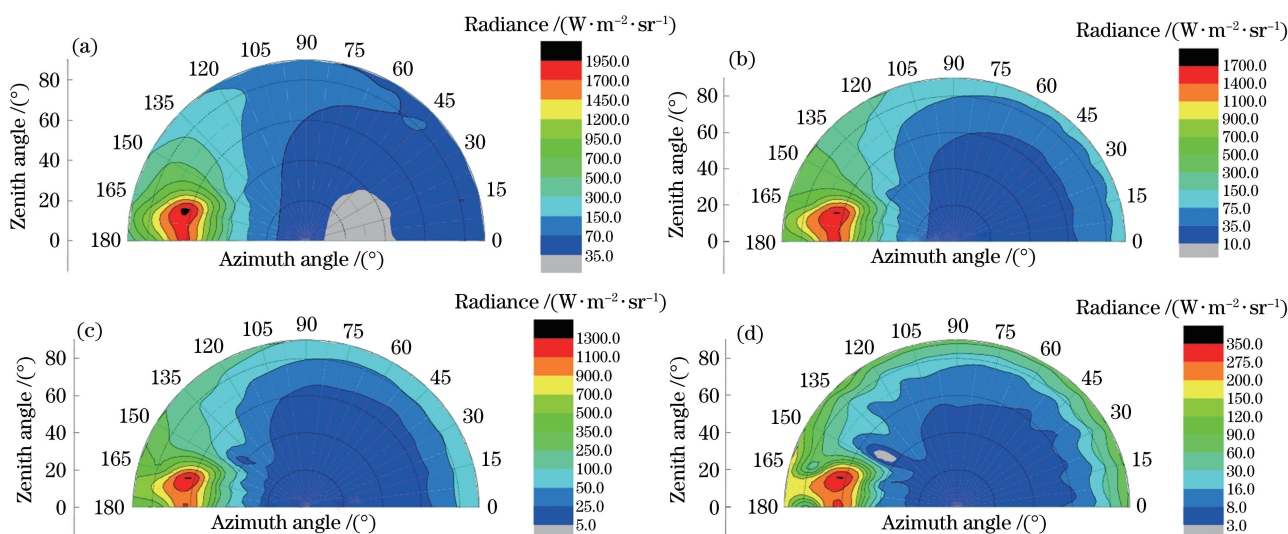


图 10 不同高度下的天空背景辐射亮度分布情况。(a) 0 km;(b) 3 km;(c) 5 km;(d) 10 km

Fig. 10 Distributions of sky background radiation brightness at different heights. (a) 0 km;(b) 3 km;(c) 5 km;(d) 10 km

利用激光雷达实测数据和 SBDART 模式还可以计算得到太阳直接辐射到达地面的衰减情况,获得地面太阳直接辐射,这也是斜程能见度探测中用于计算目标物与背景物对比度的一个重要参数。为了验证数据的正确性,选择西安理工大学同时段太阳光度计(POM-2)测量的地面位置太阳直接辐射与 SBDART 模式计算得到的太阳直接辐射进行了对比和验证,结果如图 11 所示,两者具有一致的变化趋势,呈现先上升再下降的趋势,在 12:30 时刻达到峰值。另外,计算得到的地面位置太阳直接辐射均小于太阳光度计的结果,两者差异在 $5 \sim 31 W/m^2$ 范围内。造成该差异的主要原因在于激光雷达的探测盲区和有限的探测高度,使得由激光雷达反演得到的气溶胶光学厚度与太阳光度计得到的整层气溶胶光学厚度存在差异。本文中采用的扫描激光雷达系统探测盲区为 300 m,探测高度可达

到 10 km 以上。图 11(b)给出了两者数据的相关性分析,可以看出,两者具有强正相关性,相关系数为 0.9944,均方根误差为 21.4461。所以,利用激光雷达反演数据和 SBDART 模式计算得到的天空背景辐射分布是正确的,并可应用于后续斜程能见度的精确测量。

4.3 天空背景辐射对斜程能见度的影响仿真

利用上述结果初步讨论了天空背景辐射对斜程能见度探测的影响。假定天空中的目标为黑体,根据(1)式,以不同位置对黑体目标进行对比度的仿真计算,分析天空背景辐射对斜程能见度的影响。选取了三个观察位置对天空进行观测,分别为观察天顶角为 60° 、观察方位角为 30° ,观察天顶角为 60° 、观察方位角为 90° ,以及观察天顶角为 30° 、观察方位角为 30° 。图 12 给出了三个位置处的天空背景辐射亮度变化趋势以及对应的对比度随高度的变化曲

线。可以发现,三个观察角度得到的天空背景辐射亮度具有不同的分布结果,其中在观察天顶角为 60° 、观察方位角为 30° 处得到的天空背景辐射亮度最强。从图 12(b)所示的对比度曲线来看,在 4 km 以下的高度范围内,对比度急剧衰减,随着高度的增加,对比度缓慢降低,同时,三个方向上的对比度随高度的变化趋势不同,导致斜程能见度距离也有一定差别。一般认为,当对比度为 0.05

时对应的高度为人眼模糊识别的斜程能见度距离,当对比度为 0.02 时将对应人眼精确识别的斜程能见度距离^[28-29]。以观察天顶角为 60° 、观察方位角为 30° 为例,此时人眼模糊识别的斜程能见度距离在高度 7 km 左右,而人眼精确识别的斜程能见度距离接近 6 km。这主要是由于天空背景辐射越强,与目标黑体的固有对比度越大,则目标黑体越容易被人眼识别。

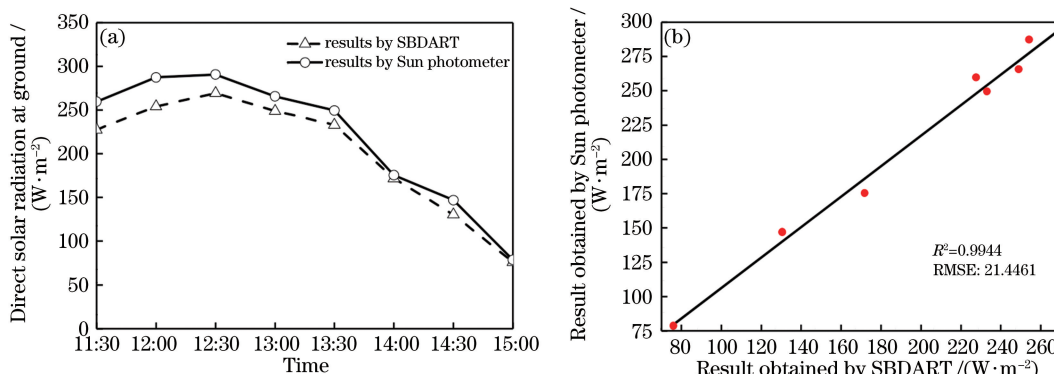


图 11 太阳光度计测量的地面太阳直接辐射与 SBDART 模式计算结果对比。(a)趋势对比;(b)相关性分析
Fig. 11 Comparison of solar direct radiation at ground by Sun photometer and computational result obtained by SBDART model. (a) Trend comparison; (b) correlation analysis

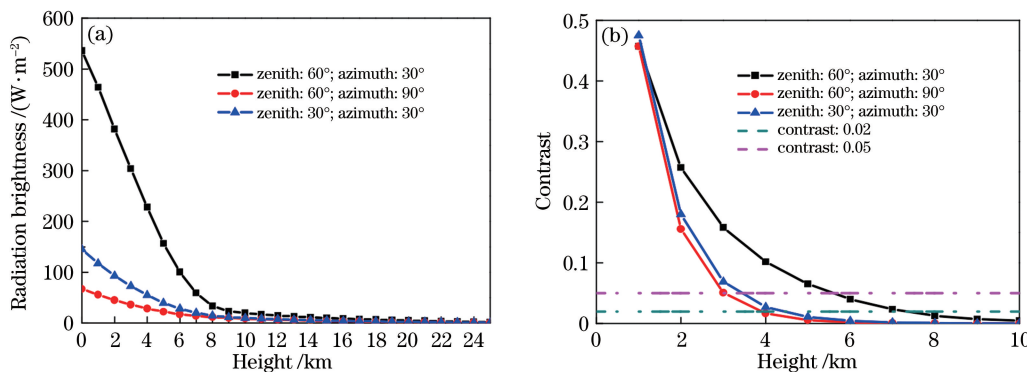


图 12 不同观察位置的天空背景辐射亮度和对比度随高度的变化趋势。(a)天空背景辐射亮度;(b)对比度
Fig. 12 Trends of sky background radiation brightness and contrast versus height at different observation positions. (a) Sky background radiation brightness; (b) contrast

5 结 论

从斜程能见度原理出发,通过理论仿真详细探讨了天空背景辐射对斜程能见度的影响。首先利用 HITRAN 数据库对大气气溶胶与大气分子在可见光波段的散射与吸收进行仿真,讨论了不同类型气溶胶模型的散射和消光特性。利用 SBDART 模式,仿真获得了不同类型气溶胶模型下的天空背景辐射的分布特征,分析了太阳直接辐射和每层散射辐射的分布趋势。可以发现,由于不同类型气溶胶的吸收和散射效率不同,所得到的天空背景辐射分

布也不同,其中海洋型气溶胶由于其散射作用最强,所得到的天空背景辐射也最强。所以,实际大气气溶胶状况将直接影响天空背景辐射以及斜程能见度的计算结果。

采用西安理工大学的激光雷达连续探测实验数据作为 SBDART 模式的输入参数,并采用 106 阶勒让德矩阵展开的散射相函数,通过 SBDART 模式计算获得了天空背景辐射的分布和变化趋势,以 0~10 km 的天空背景辐射为例,分析了太阳直接辐射和散射辐射以及每层散射辐射的结果。可以发现,随着高度的升高,天空背景辐射逐渐降低,背景

辐射最强的位置逐渐由太阳位置向地平位置转移。

为了验证结果的可靠性,将 SBDART 模式计算的地面位置处太阳直接辐射数据和同步太阳光度计测量获得的太阳直接辐射数据进行了比对和验证,结果表明,两者具有相同的变化趋势,且具有较高的正相关性和较低的均方根误差,这表明利用激光雷达反演数据和 SBDART 模式计算得到的天空背景辐射分布是正确的,可应用于斜程能见度的精确反演。利用所获得的天空背景辐射,以不同位置对假设的空中黑体目标进行了对比度的仿真计算,分析了天空背景辐射对斜程能见度的影响。

参 考 文 献

- [1] Li H, Sun X J, Shan C H, et al. Basis theory and observation of meteorological visibility[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(3): 297-302.
李浩, 孙学金, 单陈华, 等. 关于气象能见度理论与观测的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(3): 297-302.
- [2] Yao Y M, Wen Q Q, Liu X J, et al. Research on laser guided bomb weapon system combat efficiency based on atmospheric visibility[J]. Aero Weaponry, 2017(3): 74-80.
姚跃民, 温求迺, 刘小军, 等. 基于大气能见度的激光制导炸弹武器系统作战使用性能研究[J]. 航空兵器, 2017(3): 74-80.
- [3] Kang X H, Bu X H, Xu W J, et al. Development of visibility lidar and its observation in civil aviation airport[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(6): 727-734.
康晓华, 卜晓鸿, 徐文静, 等. 能见度激光雷达研制及其在民航机场的观测研究[J]. 量子电子学报, 2017, 34(6): 727-734.
- [4] Fu G, Li X L, Wei N. Review on the atmospheric visibility research[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 855-862.
傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 855-862.
- [5] Zhuang Z B, Tai H D, Jiang L H. Changing baseline lengths method of visibility measurement and evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0201001.
庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0201001.
- [6] Wu Z Q, Li W B, Yang S H, et al. Comparative analysis of the measured visibility by Belfort M6000 sensors and visual visibility [J]. Science and Technology Consulting Herald, 2011(32): 99, 101.
吴振强, 李文斌, 杨森槐, 等. Belfort M6000 能见度传感器实测距离与人工目测距离的对比分析[J]. 科技创新导报, 2011(32): 99, 101.
- [7] Ma Y Z, Liu J Q, Wang Q Q, et al. Inversion of aerosol lidar ratio and its effect on slant visibility based on fernald-PSO method [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 0301001.
马愈昭, 刘嘉琪, 王强强, 等. 基于 Fernald-PSO 法反演气溶胶激光雷达比及其对斜程能见度的影响[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0301001.
- [8] Rao R Z. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486-2492.
- [9] Tian F, Luo J, Hu D P, et al. Inversion algorithm for slant visibility based on lidar technique[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(11): 1239-1243.
田飞, 罗佳, 胡大平, 等. 激光雷达观测斜程能见度反演方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1239-1243.
- [10] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 439-441.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 439-441.
- [11] Lee Z, Shang S L. Visibility: how applicable is the century-old Koschmieder model? [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2016, 73(11): 4573-4581.
- [12] Berk A, Bernstein I S, Robertson D C. MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN 7 [EB/OL]. [2020-02-28]. https://www.researchgate.net/publication/239045418_MODTRAN_A_moderate_resolution_model_for_LOWTRAN_7.
- [13] Rothman L S, Gamache R R, Goldman A, et al. The HITRAN database: 1986 edition [J]. Applied Optics, 1987, 26(19): 4058-4097.
- [14] Liu L H, Yu Q Z, Ruan L M, et al. Discrete ordinate solutions of radiative transfer equation [J]. Chinese Journal of Computation Physics, 1998, 15(3): 83-89.
刘林华, 余其铮, 阮立明, 等. 求解辐射传递方程的离散坐标法[J]. 计算物理, 1998, 15(3): 83-89.
- [15] 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.
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.

- [16] Bai J H. The transmission, loss and long term variation of UV in clear skies in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1347-1354.
白建辉. 北京晴天紫外辐射的传输、损失及其长期变化[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1347-1354.
- [17] 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.
陈舜平, 孙凤莹, 徐文清, 等. 分光谱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.
- [18] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 1-33.
Liou K N. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 1-33.
- [19] Ma W J, Gao F, Zhu P P, et al. Finite element method for three-order (P3) approximation of radiative transfer equation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(7): 1117-1121.
马文娟, 高峰, 朱莘莘, 等. 辐射传输方程的三阶球谐展开(P3)近似的有限元法求解[J]. *光子学报*, 2011, 40(7): 1117-1121.
- [20] 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.
- [21] Nie J H, Zhang L M, Chen H Y. Influence of atmospheric model and aerosol type on radiation transfer calculation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(5): 983-986.
聂建华, 张黎明, 陈洪耀. 大气模式与气溶胶模型对辐射传输计算的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(5): 983-986.
- [22] Rothman L S. The evolution and impact of the HITRAN molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(11): 1565-1567.
- [23] Isaacs R G, Wang W C, Worsham R D, et al. Multiple scattering treatment for use in the LOWTRAN and FASCODE models [J]. *Applied Optics*, 1987, 26: 1272-1281.
- [24] Shi G Y. On the k-distribution and correlated k-distribution models in the atmospheric radiation calculations[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 659-676.
石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 659-676.
- [25] Veselovskii I, Kolgotin A, Griaznov V, et al. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(18): 3685-3699.
- [26] Zhang W, Lu Y, Du S M, et al. Analysis of characteristics of Mie scattering [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(6): 936-939.
张伟, 路远, 杜石明, 等. 球形粒子 Mie 散射特性分析[J]. *光学技术*, 2010, 36(6): 936-939.
- [27] Liu W F, Xie Y J, Zhao L Z. Measurement and research on sky background radiance luminance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 351-354.
刘伟峰, 谢永杰, 赵乐至. 天空背景辐射亮度测量与研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 351-354.
- [28] Knowles Middleton W E. Visibility in meteorology: the theory and practice of the measurement of the visual range [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1936, 62(263): 154-155.
- [29] Duntley S Q. The reduction of apparent contrast by the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(2): 179-191.