

基于大气辐射传输和 δ -二流近似的斜程能见度反演方法

马愈昭^{1,2*}, 朱峻¹, 张宇航¹

¹中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300;

²中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 从能见度定义出发, 提出采用 SBDART 辐射传输模式结合 CALIPSO 卫星数据求解辐射传输方程, 对华北地区斜程能见度进行了详细的仿真与分析。首先, 使用 SBDART 模式结合 CALIPSO 卫星数据获取实际条件下天空背景辐射亮度。然后, 根据斜程能见度探测原理, 得到斜程能见度所处区间, 进而采用 δ -二流近似估计区间内部辐射亮度分布, 从而反演得到精确的斜程能见度。结果表明, 采用 CALIPSO 卫星数据结合 SBDART 模式模拟大气辐射传输过程, 计算结果与 MERRA-2 辐射数据变化趋势一致, 相关系数达到 0.949; 使用 δ -二流近似能更加高效地模拟辐射传输过程, 且提出方法结果与 SBDART 模式保持较好的一致性, 两者相对误差在 14.3% 以内; 当斜程能见度小于 1 km 时, 使用提出方法反演斜程能见度同经验公式相比误差约为 7.1%, 且适用于 15° 以外以及向上观测的斜程能见度探测。

关键词 大气光学; 斜程能见度; SBDART; δ -二流近似; CALIPSO

中图分类号 P422.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221729

1 引言

能见度是反映大气稳定性和垂直结构的重要指标, 同时也是保障人们日常生活和交通运输安全的主要气象因素之一, 按照观测路径不同可以分为水平能见度和斜程能见度两大类。目前, 我国机场使用的能见度探测设备仅针对地面跑道区域附近的水平能见度, 但对于飞机起降过程而言, 飞行员实际需求的是在离场边和进场边上的斜程能见度, 在特殊天气条件下与水平能见度存在较大差异, 几乎 50% 的飞行事故与能见度不足有关。可见, 获取大气准确的斜程能见度对保障飞行安全具有重要意义^[1]。

能见度理论一般都是基于目标与背景的亮度对比展开的^[2], 其值与斜程路径上的大气透过率和天空背景辐射亮度密切相关。近年来国内外学者针对斜程能见度反演进行了大量工作, 邱金桓等^[3]提出了一个斜程能见度的近似表达式, 但仅适用于 15° 以内的空对地观测, 且未充分考虑地表反射对辐射亮度分布的影响。王毅等^[4]提出了利用 δ -Eddington 近似求解辐射传输方程, 推导出了斜程能见度的数值范围, 但为了简化计算忽视了目标的反射吸收特性。Sun 等^[5]提出了对塔克拉玛干沙漠 CALIPSO 消光系数廓线进行分类, 使

用分类拟合结果反演斜程能见度, 但所选地区天气情况单一, 适用的场景较少。Wang 等^[6]提出了一种考虑斜程路径散射辐射修正的斜程能见度测量方法, 对不同观测方向上的斜程能见度进行了分析, 但缺乏对相对方位角较大时以及地对空观测的研究。熊兴隆等^[7]提出了考虑低能见度天气条件下多次散射的影响, 改进了多次散射激光雷达方程反演斜程能见度的方法, 但多次散射传输模型中仅针对沙尘型和水溶性气溶胶进行研究, 缺乏常见的气溶胶类型。杜嘉敏等^[8]提出了利用双波长拉曼-米激光雷达探测大气气溶胶为 SBDART 模式提供参数, 获得 33 层实际大气散射辐射亮度分布, 但该方法视亮度对比度分辨率较低, 不适用于低俯仰角下斜程能见度反演且未考虑反射率的空间分布。可见, 在斜程能见度反演过程中, 辐射传输对视亮度对比度有关键性的作用, 研究辐射传输有利于斜程能见度的精确反演。

本文在 SBDART 模式的基础上, 利用 CALIPSO 卫星提供的气体分子和气溶胶粒子参数, 提出了一种基于 δ -二流近似估计天空背景辐射亮度分布的方法, 通过该方法对斜程能见度所处区间的天空背景辐射亮度分布进行估计, 获取高分辨率的天空背景辐射亮度分布, 从而实现不同观测角度下斜程能见度的精确反演。

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2022-11-02; 录用日期: 2022-11-29; 网络首发日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (U1833111)

通信作者: *yzma@cauc.edu.cn

2 CALIPSO 数据

2018 年, CALIPSO 卫星脱离 A-Train 轨道, 与 CloudSat 组成 C-Train 卫星群。其有效载荷双波长正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP 拥有 532 nm 垂直、532 nm 平行和 1064 nm 等三个后向散射信号接收通道。CALIOP 数据空间分辨率随高度增加而逐渐降低, 最高水平分辨率为 333 m, 垂直分辨率为 30 m^[9-10]。CALIPSO 可以提供连续飞行轨迹上云和气溶胶的三维信息, 主要包括: 垂直特征层(VFM)分布、消光系数、体积退偏比和色比等参数信息。相关方程^[11]可表示为

$$\begin{cases} \delta(z) = \frac{\beta_{532\perp}(z)}{\beta_{532\parallel}(z)} \\ \chi(z) = \frac{\beta_{1064}(z)}{\beta_{532,\text{total}}(z)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\delta(z)$ 为体积退偏比; $\chi(z)$ 为色比; z 为高度; 下标 \perp 、 \parallel 、total 分别代表垂直、平行和总衰减后向散射; 532 nm 总衰减后向散射系数 $\beta_{532,\text{total}}$ 为垂直 $\beta_{532\perp}$ 和平行 $\beta_{532\parallel}$ 衰减后向散射系数之和。体积退偏比反映气溶胶粒子的不规则程度, 其值越大表示气溶胶粒子越不规则。色比反映气溶胶粒子的大小, 其值越大表示气溶胶粒子尺寸越大。气溶胶类型主要依据激光雷达比进行识别, 反演算法中主要定义了七类气溶胶类型, 主要包括清洁海洋型、清洁大陆型、沙尘、污染沙尘型、污染大陆型、烟尘和沙尘海洋型气溶胶^[12]。

本文辐射传输仿真主要对 CALIPSO 卫星 Level 1、Level 2 数据中的气象数据、消光系数廓线和 VFM 数据对华北地区 (35°~42° N, 113°~119° E) 的斜程能见度变化进行了研究。CALIPSO 气象数据由 MERRA-2 (the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2) 提供, 气溶胶消光系数廓线可通过激光雷达方程反演获得^[13]。

3 基本原理

3.1 斜程能见度反演方法

本文斜程能见度反演过程中使用的几何角度如图 1 所示。图中, 立方体表示观测目标物 (黑体, 大小适度), z_o 、 z_v 分别为目标高度和观测高度, τ_o 、 τ_v 分别为目标和观测者所处高度对应的光学厚度, θ_s 、 θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角为辐射传输方向与 Z 轴正半轴的夹角, ϕ_s 、 ϕ 分别为太阳方位角和观测方位角为辐射传输方向投影与 Y 轴正半轴的夹角, φ ($\varphi \geq 0$) 为相对于太阳出射光线的方位角, θ_z 为观测俯仰角为辐射传输方向与水平面的夹角。

物体被人眼感知的清晰程度, 取决于物体与背景的视亮度对比度, 常取 0.05 作为气象能见度对比阈值, 对比阈值所确定的距离就是能够从大气中辨认出

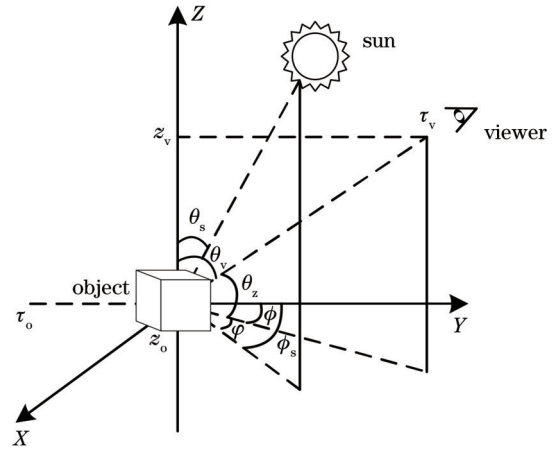


图 1 斜程能见度几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of slant-range visibility

目标物的最大距离。视亮度对比度 $C(\pm\mu, z_v)$ ^[5,14] 可表示为

$$C(\pm\mu, z_v) = \frac{\left| \frac{I_{\text{obj}}(\mu, z_o) - I_b(\mu, z_o)}{\max[I_b(\mu, z_v), I_{\text{obj}}(\mu, z_v)]} \exp\left[-\frac{\int_{z_o}^{z_v} \sigma(z') dz'}{\mu}\right] - \frac{I_{\text{obj}}(-\mu, z_o) - I_b(-\mu, z_o)}{\max[I_b(-\mu, z_v), I_{\text{obj}}(-\mu, z_v)]} \exp\left[-\frac{\int_{z_o}^{z_v} \sigma(z') dz'}{\mu}\right] \right|}{\left| \frac{I_{\text{obj}}(\mu, z_o) - I_b(\mu, z_o)}{\max[I_b(\mu, z_v), I_{\text{obj}}(\mu, z_v)]} \exp\left[-\frac{\int_{z_o}^{z_v} \sigma(z') dz'}{\mu}\right] + \frac{I_{\text{obj}}(-\mu, z_o) - I_b(-\mu, z_o)}{\max[I_b(-\mu, z_v), I_{\text{obj}}(-\mu, z_v)]} \exp\left[-\frac{\int_{z_o}^{z_v} \sigma(z') dz'}{\mu}\right] \right|}, \quad (2)$$

式中: μ 为观测天顶角余弦, 以向下观测为正; I_{obj} 、 I_b 分别为目标与背景的辐射亮度; σ 为消光系数。可见, 辐射亮度和消光系数分布对视亮度对比度求解十分重要, 但辐射亮度计算涉及复杂的辐射传输过程。在实际应用过程中, 为了简化斜程能见度的计算复杂度, 邱金桓^[3]根据数值模拟实验提出了一个斜程能见度近似表达式, 计算在 15° 以内空对地观测的斜程能见度 R 可表示为

$$R = \frac{1}{\bar{\sigma}} \ln \left[\frac{0.955D(1 + \sin\theta_z)(\rho_o - \rho_b - \epsilon\rho_b)}{\epsilon} + 1 \right], \quad (3)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为观测路径上的平均消光系数 (可根据迭代法获得); D 为气象因子; ϵ 为对比阈值; ρ_o 、 ρ_b 分别为目标和背景的反射率。本文斜程能见度反演过程中选用白背景和大小适度的黑体目标。

3.2 高分辨率辐射亮度求解方法

SBDART 是一种基于离散坐标法解决地球大气平面平行传输问题的实用模式^[5], SBDART 模式在太阳天顶角较大的情况下引入一阶校正, 减小由于平面平行近似带来的误差^[15]。依据标准大气模型将地球大气划分为 33 层, 并认为每一层具有相同的光学特性。标准 SBDART 模式在 25 km 以下的天空背景辐射亮

度分辨率为 1 km,但对流层底部丰富的气溶胶粒子会导致强烈的散射辐射,使用标准 SBDART 模式进行斜程能见度反演无法准确反映近地表处视亮度对比度分布。通过结合 CALIPSO 卫星数据,天空背景辐射亮度分辨率可以达到 60 m,但随着俯仰角的减小由区间

估计引起的误差不容忽视。因此,本文提出采用 δ -二流近似进一步求解区间内部的天空背景辐射亮度分布。对于辐射亮度的研究,需要对辐射传输方程进行求解。辐射传输方程的形式解^[16-17]可表示为

$$I(\tau; \pm\mu, \varphi) = \begin{cases} I(\tau_0; \mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau_0 - \tau}{\mu}\right) + \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau'; \mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) \frac{d\tau'}{\mu} \\ I(0; -\mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu}\right) + \int_0^{\tau} J(\tau'; -\mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau - \tau'}{\mu}\right) \frac{d\tau'}{\mu} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: τ_0 为大气底层光学厚度; $J(\tau', \pm\mu, \varphi)$ 为源函数, 主要包括单次散射 I_s 和多次散射 I_m 。由于实际大气光学特性随高度变化,要想获得准确的空间光谱辐射亮度分布特征,通常将大气划分为多个大气薄层。图 2 给出了多层大气辐射传输示意图,图中 τ_i 为第 i 层光学厚度, $\tilde{\omega}_i$ 为第 i 层单次散射反照率, g_i 为第 i 层不对称因子, τ_n ($\tau_n \approx 0$) 所在大气层视为大气层顶部。

辐射传输求解过程中一般假定在大气层顶部除太阳直射方向外,其他方向没有向下辐射;在地表处不考虑地表反射形成的上行辐射。考虑实际边界条件,由式(4)可以得到不同层大气之间辐射亮度透射与单次散射部分表达式,具体可表示为

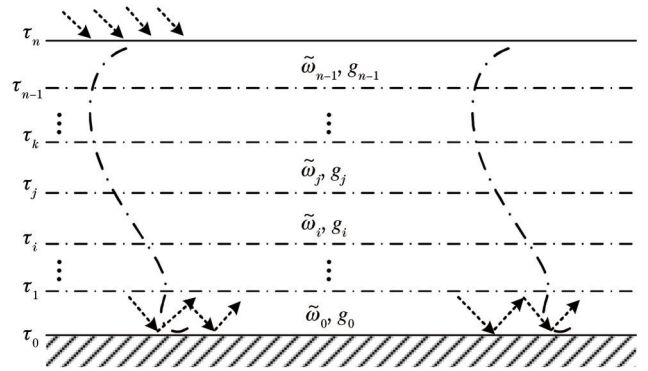


图 2 多层大气辐射传输示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radiative transfer in multi-layer atmosphere

$$I'(\tau_j; \mu, \varphi) = I(\tau_j; \mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau_i - \tau_j}{\mu}\right) + \frac{\tilde{\omega}_i \mu_0 F_0}{4\pi(\mu + \mu_0)} P(\Omega, \Omega_0) \left\{ \exp\left(-\frac{\tau_j}{\mu_0}\right) - \exp\left[\frac{\tau_j}{\mu} - \tau_i \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\right] \right\}, \quad (5)$$

$$I'(\tau_j; -\mu, \varphi) = \begin{cases} I(\tau_k; -\mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau_j - \tau_k}{\mu}\right) + \frac{\tilde{\omega}_j F_0 \mu_0}{4\pi(\mu_0 - \mu)} P(\Omega, \Omega_0) \left\{ \exp\left(-\frac{\tau_j}{\mu_0}\right) - \exp\left[-\frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0 \mu} \tau_k - \frac{\tau_j}{\mu}\right] \right\}, & \mu \neq \mu_0 \\ I(\tau_k; -\mu, \varphi) \exp\left(-\frac{\tau_j - \tau_k}{\mu}\right) + \frac{\tilde{\omega}_j F_0 (\tau_j - \tau_k)}{4\pi \mu_0} P(\Omega, \Omega_0) \exp\left(-\frac{\tau_j}{\mu_0}\right), & \mu = \mu_0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\Omega = (\mu, \varphi)$; μ_0 为太阳天顶角的余弦值; F_0 为大气顶部太阳辐照度; $P(\Omega, \Omega_0)$ 为散射相函数。多次散射部分采用离散代替积分,考虑与方位角无关的情形,使用 Gauss-Legendre 积分简化表达式,具体可表示为

$$\begin{cases} I_m(\tau_j; \mu) = \frac{\tilde{\omega}_i}{2\mu} \int_{\tau_j}^{\tau_i} \left\{ \left[P\left(\mu; \frac{1}{\sqrt{3}}\right) I\left(\tau'; \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \right] + \left[P\left(\mu; -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) I\left(\tau'; -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \right] \right\} \exp\left[-\frac{(\tau' - \tau_j)}{\mu}\right] d\tau' \\ I_m(\tau_j; -\mu) = \frac{\tilde{\omega}_j}{2\mu} \int_{\tau_k}^{\tau_j} \left\{ \left[P\left(-\mu; \frac{1}{\sqrt{3}}\right) I\left(\tau'; \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \right] + \left[P\left(-\mu; -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) I\left(\tau'; -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \right] \right\} \exp\left[-\frac{(\tau_j - \tau')}{\mu}\right] d\tau' \end{cases}. \quad (7)$$

对式(7)中的 $I\left(\tau'; \pm\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ 采用 δ -二流近似,二流近似是只关心向上和向下的辐射通量,不对各个方向上的辐射亮度进行直接求解,简化辐射传输求解过程,可以获得解析解;而 δ 函数的引入是考虑大尺度参数强前向散射,以进一步提高近似方法的精确度,具体^[17]可表示为

$$\begin{cases} I(\tau; \mu_1) = Kv \exp(k\tau) + Hu \exp(-k\tau) + \xi \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \\ I(\tau; -\mu_1) = Ku \exp(k\tau) + Hv \exp(-k\tau) + \gamma \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \end{cases}, \quad (8)$$

式中, K, H 与大气层顶部和底部的漫射辐射边界条件有关, 假定上边界 $I^\dagger = I(\tau_n; -\mu_1) = 0$, 下边界 $I^\dagger = I(\tau_0; +\mu_1)$, 具体可表示为

$$\begin{cases} k^2 = 3(1 - \tilde{\omega})(1 - \tilde{\omega}g), S^\pm = \frac{F\tilde{\omega}}{4\pi} (1 \pm \sqrt{3} g\mu_0) \\ \alpha = \frac{\mu_0^2(S^+ + S^-) \left[\frac{\sqrt{3}}{\mu_0} + 3(1 - \tilde{\omega}g) \right]}{1 - \mu_0^2 k^2}, \beta = \frac{\mu_0^2 \left[\frac{\sqrt{3}}{\mu_0} (S^+ + S^-) + 3(1 - \tilde{\omega})(S^+ + S^-) \right]}{1 - \mu_0^2 k^2} \\ v = \frac{1 + a}{2}, u = \frac{1 - a}{2}, a^2 = \frac{1 - \tilde{\omega}}{1 - \tilde{\omega}g}, \xi = \frac{\alpha + \beta}{2}, \gamma = \frac{\alpha - \beta}{2} \\ K = -\frac{\xi v \exp\left(-\frac{\tau_0}{\mu_0}\right) - \gamma u \exp(-k\tau_0) - vI^\dagger}{v^2 \exp(k\tau_0) - u^2 \exp(-k\tau_0)}, H = \frac{\xi u \exp\left(-\frac{\tau_0}{\mu_0}\right) - \gamma v \exp(-k\tau_0) - uI^\dagger}{v^2 \exp(k\tau_0) - u^2 \exp(-k\tau_0)} \end{cases}. \quad (9)$$

对式(9)中不对称因子、光学厚度和单次散射反照率进行 δ 函数调整, 具体可表示为

$$\begin{cases} g' = \frac{g}{1 + g} \\ \tau' = (1 - \tilde{\omega}g^2)\tau \\ \tilde{\omega}' = \frac{(1 - g^2)\tilde{\omega}}{1 - \tilde{\omega}g^2} \end{cases}. \quad (10)$$

图 3 为基于 SBDART 模式通过 δ -二流近似求解高分辨率天空背景辐射亮度分布的主要流程框图, 本文采用 CALIPSO 卫星提供的实际大气分子和气溶胶粒子参数进行天空背景辐射亮度仿真。相较于传统离散坐标法, 本文方法先估计能见度区间, 再对区间内部辐射亮度分布进行详细计算, 提高了计算效率, 降低了计算量, 且辐射流数量减少, 进一步降低了空间复杂度。

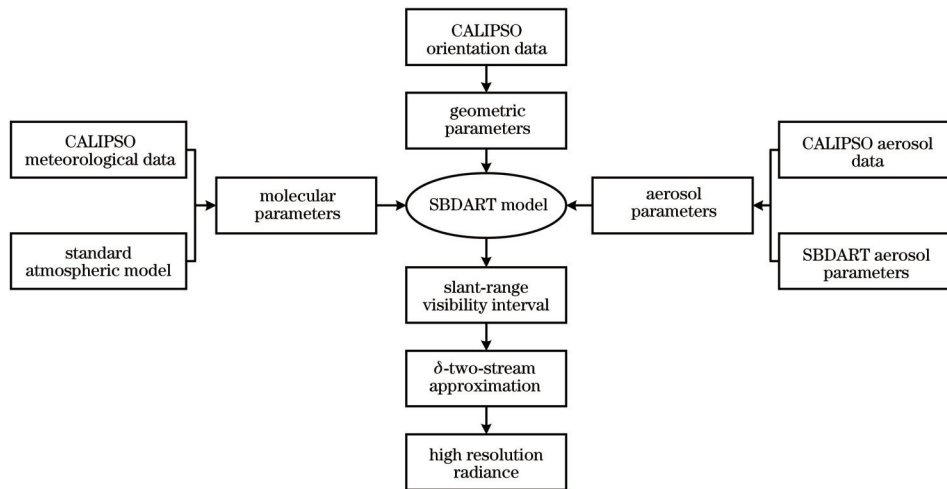


图 3 高分辨率辐射传输方程求解流程框图

Fig. 3 Flow chart of solving high-resolution radiative transfer equation

4 仿真结果与分析

斜程能见度反演的关键在于视亮度对比度, 而天空背景辐射亮度分布依赖于实际大气状态。在大气气溶胶光学厚度较大时, 通过标准 SBDART 模式反演斜程能见度获取的天空背景辐射亮度分布不足以反映实

际大气情况, 且在低俯仰角观测时, 由于视亮度对比度分辨率不足会导致区间内部斜程能见度反演误差较大, 因此获取高分辨率的天空背景辐射亮度分布十分重要。

4.1 辐射亮度仿真与分析

由于标准大气模型的影响, SBDART 模式默认大

气光谱辐射亮度在 25 km 以下的分辨率为 1 km。对流层底部采用 CALIPSO 卫星提供的大气分子和气溶胶粒子参数,结合标准大气模型和 SBDART 气溶胶参数,使用离散坐标法求解空间光谱辐射亮度分布。以 2020 年 1 月 3 日华北地区为例,图 4 给出了大气分子和气溶胶粒子参数随高度变化的情况,当天气溶胶粒子主要分布在 3 km 以下和 8.5~9.0 km 两个高度区间范

围时,对应单次散射反照率和不对称因子可通过 VFM 数据对气溶胶粒子进行分类,按比例混合后得到气溶胶粒子谱分布,进而得到散射特性参量信息^[12]。随着海拔高度的上升,气溶胶粒子浓度下降,瑞利散射成为主导,不对称因子在高层大气中接近于 0,这与实际情况是符合的。

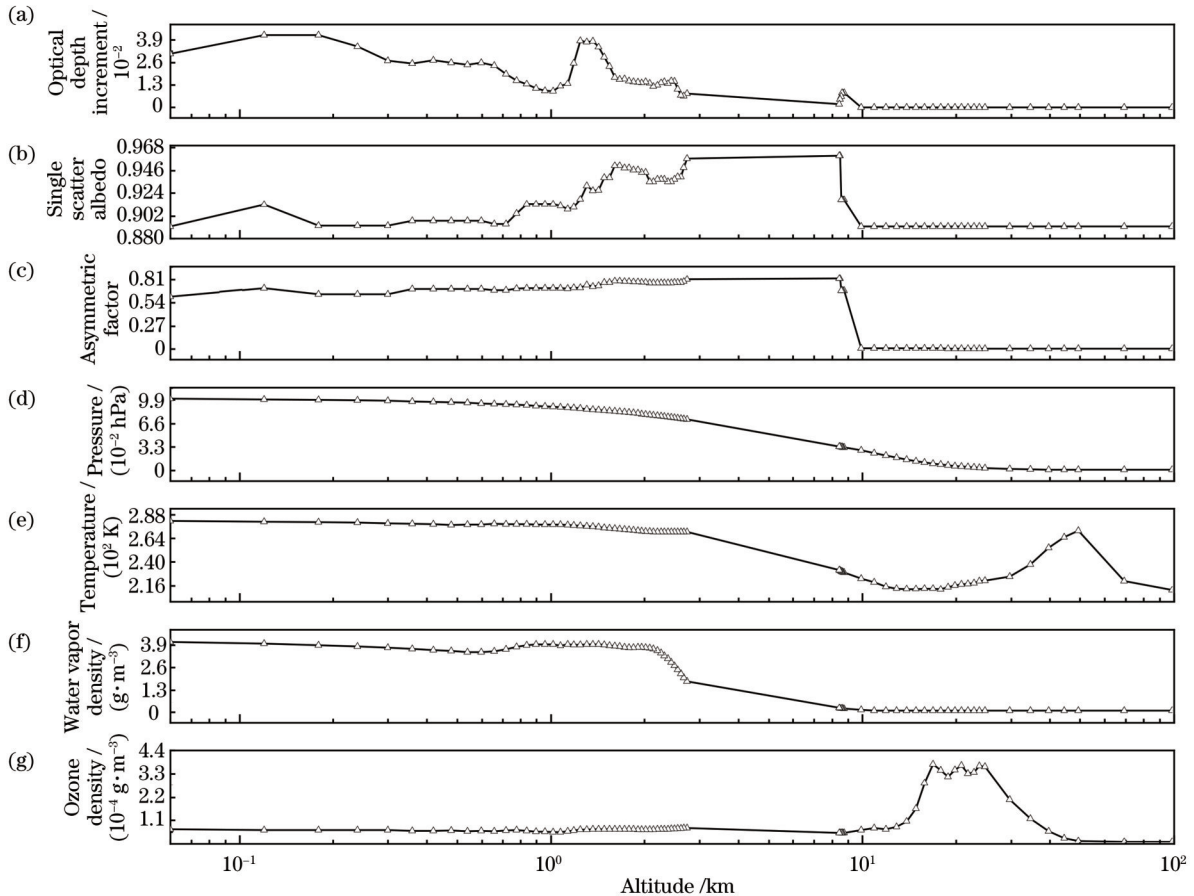


图 4 大气分子和气溶胶粒子数据。(a)光学厚度增量;(b)单次散射反照率;(c)不对称因子;(d)压强;(e)温度;(f)水汽密度;(g)臭氧密度

Fig. 4 Atmospheric molecular and aerosol particle data. (a) Increment of optical depth; (b) single scattering albedo; (c) asymmetric factor; (d) pressure; (e) temperature; (f) water vapor density; (g) ozone density

指定 IOUT 为 21, 相对方位角与观测天顶角分别以 10° 为分辨率。图 5 以 Lambert 模型模拟地表为雪地时的天空背景辐射亮度分布情况, 分别给出了不同高度上的天空背景辐射亮度分布。图中, 极轴为观测天顶角 θ_s , 极角为相对方位角 φ , 由于天空背景辐射亮度关于相对方位角 $\varphi=0^\circ$ 呈对称分布, 因此 φ 的范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。可以发现, 经地表反射后的上行辐射表现为各向同性, 对于下行辐射, 随着海拔高度的上升, 天空背景辐射亮度的峰值点由太阳照射方向逐渐向地平线 (即图中边缘) 位置转移, 这是由于对流层底部具有丰富的气溶胶粒子引起了强烈的散射辐射, 而随着高度的上升气溶胶粒子浓度逐渐下降, 瑞利散射逐渐成为主导。当辐射向下传输时, 天空背景辐射亮度以太阳

照射方向为中心呈对称分布, 亮度峰值位于太阳直射角度附近。

图 6 给出了天空背景辐射亮度随高度变化的趋势, 具体仿真参数为: 相对方位角 $\varphi=0^\circ$, 太阳天顶角 $\theta_s=62^\circ$, 输出 IOUT 为 22, 地表采用 Lambert 反射模型, 使用 32 阶勒让德矩阵对散射相函数进行展开。图中天空背景辐射亮度分辨率为 60 m, 图 6(a) 给出了向下观测时不同观测角度下的天空背景辐射亮度分布, 由于地表使用 Lambert 模型, 下行辐射经地表反射后的表面光谱辐射亮度为各向同性, 因此天空背景辐射亮度在地表处会聚于一点。又因为该天 3 km 以下具有丰富的气溶胶分布带来了强背景散射效应, 天空背景辐射亮度得到增大, 且在近地表处会出现明显的“临

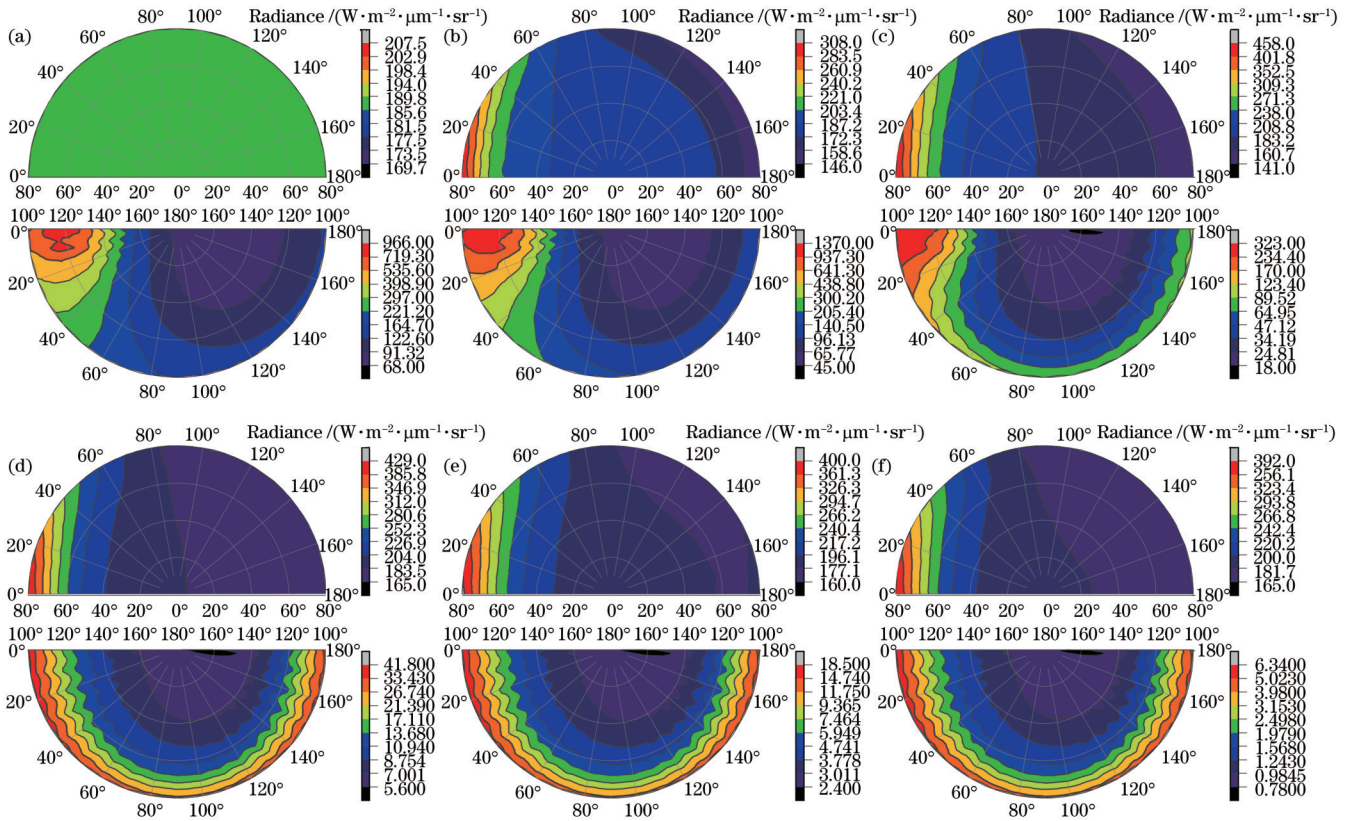


图 5 不同高度天空背景辐射亮度空间分布情况。(a) 0 km; (b) 1 km; (c) 3 km; (d) 10 km; (e) 20 km; (f) 50 km

Fig. 5 Spatial distribution of sky background radiance of different altitudes. (a) 0 km; (b) 1 km; (c) 3 km; (d) 10 km; (e) 20 km; (f) 50 km

边增亮”效应,这是由于地表对下行辐射反射导致的,在低俯角和高地表反射率的情况下更为显著。而向上观测时,在近地表处亮度的峰值会出现在太阳直射方

向附近,并呈现由直射点向两端减弱的变化趋势,图中所选的观测角度均在直射点的一侧,因此出现了随着观测天顶角减小天空背景辐射亮度降低的趋势。

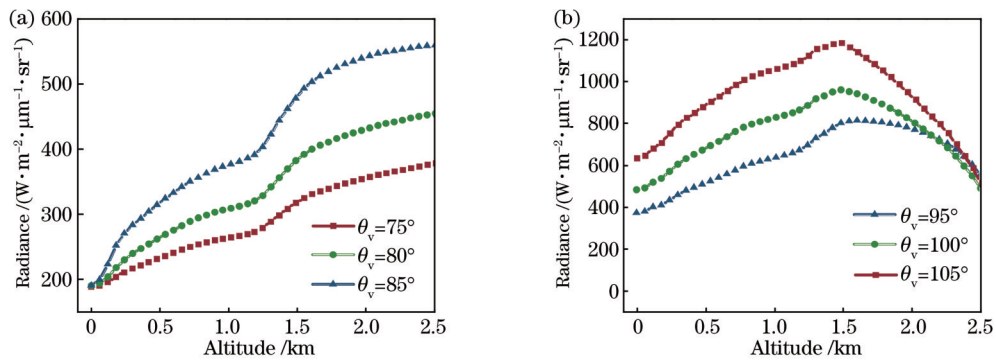


图 6 天空背景辐射亮度随高度变化的趋势。(a) 向下观测; (b) 向上观测

Fig. 6 Variation trend of sky background radiance with altitude. (a) Downward observation; (b) upward observation

利用 CALIPSO 卫星数据结合 SBDART 模式可获得地表处辐照度情况,使用 MERRA-2 辐射数据进行对比验证。图 7 给出了晴朗天气下两者在地表处辐照度的结果对比,两者具有相同的变化趋势,平均相对误差约为 12.3%。图 7(c) 给出了两组数据的相关性分析,两者具有强正相关性,相关系数达到 0.949,说明了利用 CALIPSO 卫星数据和 SBDART 模式计算散射辐射的可靠性,可以用于斜程能见度反演。

将经过上述处理 60 m 分辨率的大气区间视为具有相同光学特性的大气薄层,对薄层内部使用式(5)~(9)的辐射流近似法进行辐射亮度求解,图 8 给出了本文方法与离散坐标法求解结果在端点处的误差分析,折线图为误差概率分布,柱状图为样本数量。从图中可以看出,相对误差集中分布在 20% 范围以内,不同观测天顶角下平均相对误差最大为 14.3%,且随观测俯仰角的增大而减小,当俯仰角为 15° 时,平均相对误

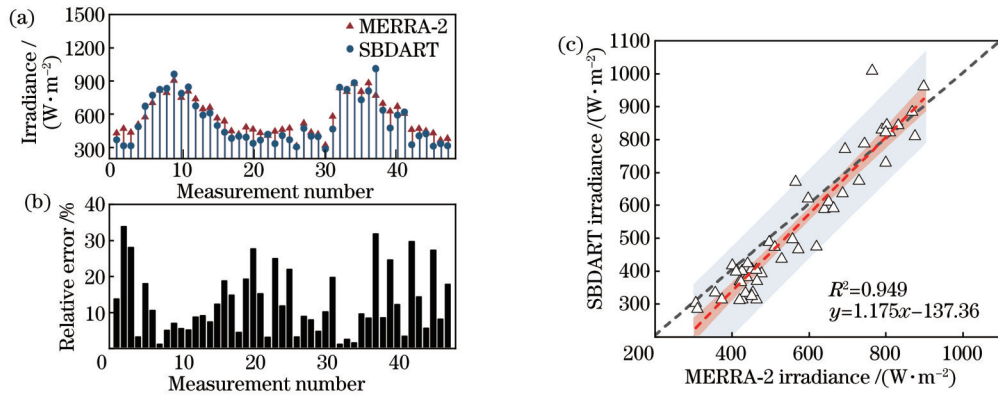


图7 MERRA-2地表辐照度与SBDART模式结果对比。(a)趋势对比;(b)相对误差;(c)相关性分析

Fig. 7 Comparison of surface irradiance between MERRA-2 and SBDART model. (a) Trend comparison; (b) relative error; (c) correlation analysis

差约为 8.6%。从图中还可以看出,秋冬季节的误差相对较大,这是由于秋冬季节的气溶胶颗粒半径较大,相函数的勒让德近似描述效果不理想。

4.2 斜程能见度反演结果

利用上述天空背景辐射亮度结果结合 CALIPSO 气溶胶光学特性数据反演斜程能见度,以不同的观测角度对目标视亮度对比度进行仿真。图 9 给出了依据式(2)得到的向上和向下观测时,不同角度下 60 m 分辨率的视亮度对比度变化曲线,相对方位角 $\varphi = 90^\circ$,虚线表示对比阈值为 0.05,与视亮度对比度曲线交点对应的斜距即为斜程能见度。局部图为采用 δ -二流近似对区间内部视亮度对比度进一步计算后的结果。可以发现,在近地表处的视亮度对比度变化剧烈,而随着斜距增加变化趋势逐渐放缓,这是由于该样本气溶胶粒子主要分布在对流层底部。不同观测天顶角辐射传输路径不同,因此斜程能见度存在一定差别,以观测天顶角 85° 和 95° 为例,相同俯仰角度不同观测方向上的斜程能见度区别明显,这与天空背景辐射亮度空间分布有关。

表 1 给出了斜程能见度在 10 km 以内仅使用 SBDART 模式与本文方法反演斜程能见度的相对误差分析。当能见度小于 10 km 时,两者具有较好的一致性,平均相对误差较小约为 6.2%。然而,随着能见度的下降,相对误差逐渐增大。当能见度小于 1 km 时,两者的平均相对误差约为 15.0%。同时,相对误差总体上随俯仰角的减小而增大。可见,仅使用

SBDART 模式的天空背景辐射亮度分辨率不足,从而导致在低能见度与低俯仰角情况下反演斜程能见度存在较大误差,而通过采用 δ -二流近似进一步计算对比阈值所在区间内部的天空背景辐射亮度,能有效地降低由分辨率不足引入的误差。

图 10 所示为对俯角为 10° 情况下本文方法斜程能见度计算结果与式(3)计算结果进行的对比分析,图中主要探讨了斜程能见度为 10 km 以内的情况。可以发现,两者表现出强正相关性,相关系数 $R^2 \approx 0.928$,采用线性函数拟合,拟合度均在 80% 以上,从侧面验证了本文方法反演斜程能见度结果的可靠性。

表 2 给出了经验公式与本文方法在不同能见范围内的相对误差分布,从表中可知,夏季的平均相对误差较小,相对误差值约为 19.7%。当能见度小于 1 km 时,两种方法的平均相对误差约为 7.1%,且两者变化具有较好的一致性。随着能见范围的增加误差逐渐增大,这是由于 CALIPSO 在高层大气中接收后向散射信号存在部分缺失值,从而导致斜程路径平均消光系数计算误差较大。导致缺失值的原因可能是短波对云层穿透能力有限或粒子浓度较低导致的后向散射信号强度较弱。

5 结 论

精确反演斜程能见度涉及复杂的辐射传输方程求解,而标准的 SBDART 模式天空背景辐射亮度分辨率较差,不适用于低俯仰角情况下的斜程能见度反演。

表1 仅使用SBDART模式与提出方法反演斜程能见度的误差分析

Table 1 Error analysis of slant-range visibility inversion using only SBDART model and proposed method

Range R / km	Downward observation / %			Upward observation / %		
	$\theta_z = 5^\circ$	$\theta_z = 10^\circ$	$\theta_z = 15^\circ$	$\theta_z = 5^\circ$	$\theta_z = 10^\circ$	$\theta_z = 15^\circ$
$R \leq 1$	48.9	19.9	23.5	19.1	20.4	9.7
$R \leq 3$	20.8	8.7	6.8	17.9	9.3	5.7
$R \leq 5$	15.2	6.6	4.6	13.8	7.0	4.1
$R \leq 10$	10.3	4.6	3.4	9.6	4.9	2.9

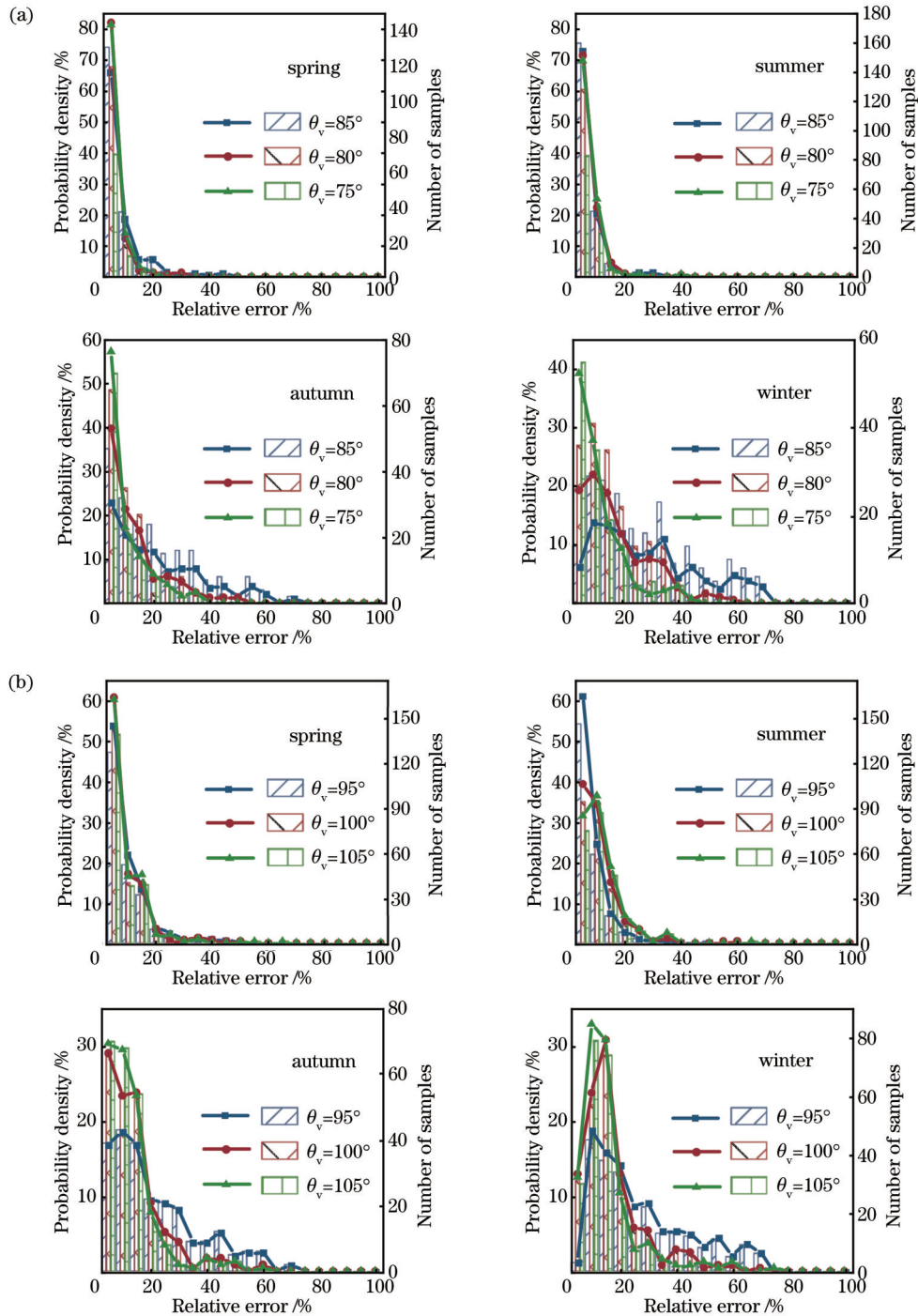


图 8 天空背景辐射亮度相对误差分布。(a)向下观测;(b)向上观测

Fig. 8 Relative error distribution of sky background radiance. (a) Downward observation; (b) upward observation

本文提出了一种基于SBDART模式和 δ -二流近似精确反演斜程能见度的方法,通过使用CALIPSO卫星数据结合SBDART模式获取斜程能见度所处高度区间,再采用 δ -二流近似计算区间内部天空背景辐射亮度分布,从而实现斜程能见度的精确反演。为了验证仿真结果的可靠性,将SBDART模式计算的地表处辐照度结果与MERRA-2辐射数据进行对比。结果表明,两者具有一致的变化趋势,相关系数为0.949,说明仿真结果能准确地反映天空背景辐射亮度分布。将

斜程能见度反演结果分别与仅使用SBDART模式的结果和经验公式反演的结果进行对比,相较于仅使用SBDART模式的结果,两者在低能见度和低俯仰角情况下存在较大差异,随着能见范围和观测俯仰角的增加,两者之间差异逐渐减小;相比于经验公式的结果,两者表现出较好的一致性,相关系数为0.928,能见度1 km以下的相对误差约为7.1%。同时,本文提出方法可用于不同观测角度下的斜程能见度反演,弥补了经验公式仅适用于 15° 以内空对地观测的不足。

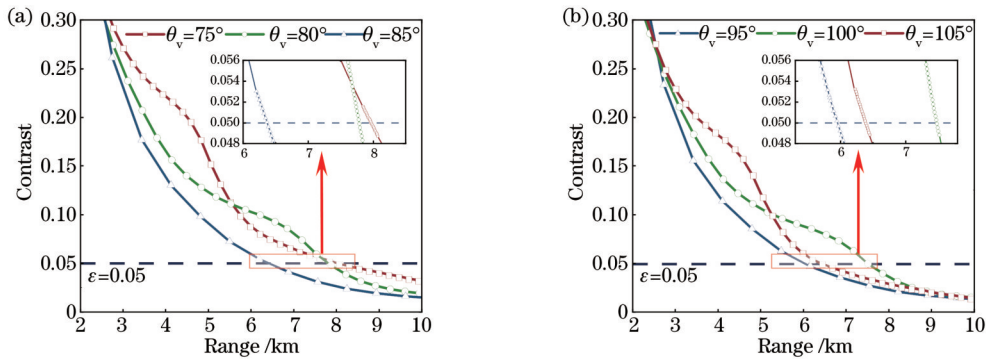


图 9 不同观测天顶角下视亮度对比度随斜距变化的趋势。(a)向下观测;(b)向上观测

Fig. 9 Variation trend of brightness contrast with slant range under different observation zenith angles. (a) Downward observation; (b) upward observation

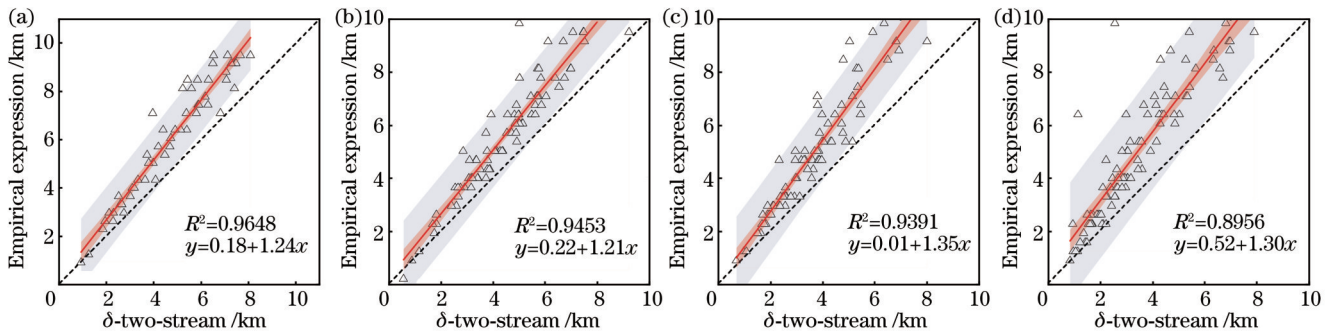


图 10 经验公式与提出方法斜程能见度计算结果分布。(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 10 Distribution of slant-range visibility results using empirical expression and proposed method. (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

表 2 经验公式与提出方法反演斜程能见度误差分析

Table 2 Error analysis of slant-range visibility inversion using empirical expression and proposed method

Range R / km	Relative error / %			
	Spring	Summer	Autumn	Winter
$R \leq 1$	6.4	3.0	17.9	1.0
$R \leq 3$	15.1	14.4	21.5	20.1
$R \leq 5$	17.5	17.9	21.7	24.0
$R \leq 10$	20.9	19.7	24.2	27.3

参 考 文 献

[1] 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.
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.

[2] 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.
Rao R Z. Vision through atmosphere and atmospheric visibility [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.

[3] 邱金桓. 机场斜视视程的数值模拟实验及其计算公式[J]. 大气科学, 1987, 11(4): 404-411.
Qiu J H. Numerical experiment on slant visibility and its calculation formula[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1987, 11(4): 404-411.

[4] 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.

[5] Sun X J, Zhou Y, Zhang R, et al. Influences of extinction coefficient profile on the estimation of slant visual range[J]. Atmospheric Environment, 2015, 122: 484-492.

[6] Wang Y F, Jia L S, Li X X, et al. Measurement method for slant visibility with slant path scattered radiance correction by lidar and the SBDART model[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 837-853.

[7] 熊兴隆, 王婕, 刘遼, 等. 多次散射影响的激光雷达斜程能见度反演方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0429001.
Xiong X L, Wang J, Liu K, et al. Lidar slant-range visibility retrieval method based on effect of multiple scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0429001.

[8] 杜嘉敏, 王玉峰, 秦一丁, 等. 基于激光雷达和SBDART模式的大气散射辐射亮度计算[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1201005.
Du J M, Wang Y F, Qin Y D, et al. Calculation of atmospheric scattered radiance based on lidar and SBDART model[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1201005.

[9] Reddy K R O, Zhang X, Bi L. Seasonal aerosol variations over a coastal city, Zhoushan, China from CALIPSO observations [J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 117-128.

[10] 朱倩, 潘增新, 毛飞跃, 等. 中国区域CALIPSO和MERRA-2气溶胶三维参数对比验证[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 20200350.
Zhu Q, Pan Z X, Mao F Y, et al. Comparison and verification of 3D parameters of aerosols between CALIPSO and MERRA-2 in China[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 20200350.

- [11] 许潇锋, 刘晨璇, 唐志伟, 等. 基于 CALIPSO 的华北地区气溶胶垂直分布特征[J]. 大气科学学报, 2018, 41(1): 126-134.
Xu X F, Liu C X, Tang Z W, et al. Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(1): 126-134.
- [12] Ma X J, Huang Z, Qi S, et al. Ten-year global particulate mass concentration derived from space-borne CALIPSO lidar observations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 721: 137699.
- [13] Omar A H, Winker D M, Vaughan M A, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26 (10): 1994-2014.
- [14] 李仕春, 任腾, 王旭, 等. 斜程能见度探测的米-拉曼散射扫描型激光雷达研制[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1228001.
Li S C, Ren T, Wang X, et al. Development of Mie-Raman scattering scanning lidar for probing slant visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1228001.
- [15] Ricchiuzzi 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.
- [16] Yang C P, Wu J, Qiu R, et al. Approximate model of clear-sky radiance distribution[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6150: 61504J.
- [17] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2002.

Slant-Range Visibility Retrieval Method Based on Atmospheric Radiative Transfer and δ -Two-Stream Approximation

Ma Yuzhao^{1,2*}, Zhu Jun¹, Zhang Yuhang¹

¹Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract

Objective Atmosphere visibility is an important and popular indicator for evaluating the atmosphere quality and is of great significance for our daily life and traffic safety. According to the observation paths, visibility can be defined as horizontal visibility and slant-range visibility. In some cases, slant-range visibility may be different from horizontal visibility to some degree. In civil aviation, horizontal visibility or ground visibility is normally measured by ground-based equipment called transmissometer. Reported horizontal visibility is employed for air traffic management. However, slant-range visibility is more important for pilots during flights. Thus, far slant-range visibility has not been applied in air traffic management, which is due to the absence of feasible methods for deriving or measuring slant-range visibility. The space-borne lidar CALIOP carried by the sun-synchronous satellite CALIPSO is capable of obtaining the atmosphere properties along the vertical direction, and therefore, it is a good candidate for deriving the slant-range visibility. We aim to develop a sufficient method of deriving slant-range visibility with high accuracy based on the aerosol data provided by CALIPSO and the theory of atmosphere radiative transfer.

Methods We successfully derive the slant-range visibility for North China through the aerosol data provided by the CALIPSO satellite and the atmosphere radiation transfer model of SBDART. Firstly, the aerosol optical properties are characterized by optical depth, single scattering albedo, and scattering phase function provide by the CALIPSO aerosol products. They are leveraged in solving the atmosphere radiative transfer equation using the SBDART model. As the result, the spatial sky background radiance is obtained. The target-background brightness contrast is hence obtained, which is adopted to determine the slant-range visibility based on the visibility definition. Consequently, the atmosphere layer is determined for the desired brightness contrast. Finally, the δ -two-stream approximation is utilized to estimate the sky background radiation with high spatial resolution within the specific atmosphere layer. The slant-range visibility is hence derived with high accuracy.

Results and Discussions The radiance on the ground obtained by the proposed method is shown to have a relative difference of 12.3% from that obtained by the MARRA-2 dataset (Fig. 7). The results show that the sky background radiance obtained by the proposed method is accurate and can be applied for deriving the slant-range visibility. The slant-range visibility obtained with and without the help of δ -two-stream approximation is compared (Table 1). The results show that the invisibility under the two conditions is significantly different for low-visibility weather and small observation pitch angle, while it tends to be consistent with each other as the atmosphere visibility and pitch angle increase. When the slant-range visibility is less than 1 km, the average relative error of slant-range visibility with and without the help of δ -two-

stream approximation is about 15.0%, while the average relative error is about 6.2% with the slant-range visibility of less than 10 km. For low-visibility weather and small pitch angle, the slant-range visibility obtained by the proposed method is expected to have higher accuracy because the sky-background radiance is derived with higher spatial resolution. On the other hand, slant-range visibility is obtained through the empirical expression for slant-range visibility. The results of slant-range visibility for low-visibility weather are shown to have a good correlation with the correlation coefficient of 0.928 (Fig. 10). Meanwhile, under the assumption that the slant-range visibility is less than 1 km, the average relative error of slant-range visibility retrieved by this method is about 7.1% compared with that of the empirical expression. Nevertheless, the empirical expression is valid only for air-to-ground observation angles smaller than 15° (Table 2). The proposed method is sufficient for deriving slant-range visibility with high accuracy under a wide range of observation angle.

Conclusions We propose a new method of deriving slant-range visibility based on the aerosol products provided by the CALIPSO satellite and the atmosphere radiative transfer model SBDART. The δ -two-stream approximation is first introduced in solving the atmosphere radiative transfer equation using the SBDART model. As a result, the sky-background radiance is obtained with high spatial resolution, which enables us to derive the slant-range visibility with high accuracy. We successfully derive the slant-range visibility of North China. The results show that in certain circumstances the derived slant-range visibility obtained by the proposed method has good consistency with that obtained without employing δ -two-stream approximation, and the average relative error between them is about 15.0%. It is also the case when the derived slant-range visibility using the proposed method is compared with the slant-range visibility obtained by the empirical expression. When the slant-range visibility is less than 1 km, the average relative error of slant-range visibility is about 7.1%, which verifies the reliability of the slant-range visibility calculation results. This indicates that the proposed method also has excellent performance and solves the problems of the standard SBDART model under small pitch angles. Additionally, the proposed method exhibits higher accuracy of slant-range visibility and may be applied for extensive weather and observation conditions.

Key words atmospheric optics; slant-range visibility; SBDART; δ -two-stream approximation; CALIPSO