

三维云层遥感辐射传输中的水平方向邻域 多次散射近似模型

张寅¹, 颜灏¹, 马俊¹, 闫钧华^{1*}, 智喜洋², 巩晋南²

¹南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210016;

²哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 针对遥感应用中的三维云层辐射传输计算问题, 提出一种水平方向邻域多次散射近似模型。通过分析水平方向相邻云体单元间的辐射通量密度变化机制, 建立相邻云体水平辐射交换方程。引入太阳方向补偿函数, 修正太阳入射角对辐射传输的影响。利用 I3RC Phase II 淡积云场(Cu)数据、基于实测修正的多尺度叠加分形算法得到的层积云场(Sc)数据和高积云场(Ac)数据进行实验。实验结果表明, 与独立像元近似(IPA)模型和严格单次散射结合爱丁顿多次散射(SSEddMS)模型相比, 在 $0\sim 60^\circ$ 太阳天顶角范围内, 所提模型的上行方向辐射源函数(USF)平均相对误差优于13%; 在低太阳天顶角条件下, 计算精度提升超过15%; 在不同观测条件下, 像元级辐射计算精度优于5%。所提模型能够适用于具有不同光学厚度与水平非均匀性的三维云层, 在稳定性、适用性及计算精度方面均具有显著优势。

关键词 大气光学; 遥感; 三维云层; 辐射传输; 水平方向邻域; 多次散射

中图分类号 V11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2401003

Multiple-Scattering Approximation Model Among Horizontally Adjacent Fields for Three-Dimensional Radiative Transfer in Cloud Remote Sensing

Zhang Yin¹, Yan Hao¹, Ma Jun¹, Yan Junhua^{1*}, Zhi Xiyang², Gong Jinnan²

¹Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract An approximation model of multiple-scattering among horizontally adjacent fields is proposed as a means of improving the three-dimensional (3D) radiative transfer calculation for clouds in remote-sensing applications. Horizontal radiative-exchange equations are established after analyzing the mechanism of radiation flux density variation among horizontally adjacent cloud units. By introducing the solar-compensation function, the influence of the solar incidence angle upon radiative transfer is corrected. The experiment is conducted using I3RC Phase II cumulus (Cu), stratocumulus (Sc) and altocumulus (Ac) data generated by the multi-scale superposition fractal algorithm based on actual observation and correction. The experimental results show that compared with the independent pixel approximation (IPA) and combined strict single-scattering and Eddington multiple-scattering (SSEddMS) models, the mean relative error of the upwelling source function (USF) calculated using the proposed model is better than 13% when the solar zenith angle is in the range of $0^\circ\sim 60^\circ$. The accuracy of the proposed model is improved by even more than 15% under low solar zenith angles. The accuracy of the pixel-level-radiance calculation of the proposed model falls within 5% under different observational conditions. Furthermore, it can be applied to 3D clouds with different optical thicknesses and horizontal non-uniformities. This has obvious advantages for stability, applicability, and accuracy.

Key words atmospheric optics; remote sensing; three-dimensional cloud; radiative transfer; horizontally adjacent field; multiple scattering

OCIS codes 010.0280; 010.1615; 010.5620

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-09-16; 录用日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61705104)、江苏省自然科学基金(BK20170804)

* E-mail: yjh9758@126.com

1 引 言

云层是大气分布最为广泛的自然现象,由于其微观结构与宏观形态的随机性和复杂性,云层辐射成为大气辐射传输领域中的世界性难题。大气辐射测量(ARM)组织在进展报告中总结:云层辐射传输是目前决定人类对气候影响的唯一重要因素^[1]。当传统遥感应用中涉及大气辐射传输问题时,大多使用平面平行模型(一维模型)和独立像元近似(IPA)模型(扩展的一维模型)^[2],认为通过对一维模型结果进行空间平均和时间平均可以有效模拟云层辐射^[3]。但近年来,越来越多的研究表明,仅在一维框架内讨论云层的辐射传输问题有着极大的局限性。一方面,一维模型过度简化了云层内部不同位置粒子间的辐射交换,在可见光和红外短波区间计算的相对误差很容易超过 100%,计算精度无法保证^[4-5];更重要的是,由于忽略了云层显著的三维(3D)非均匀性特征,无法模拟空基或天基观测时云层在水平方向和垂直方向的结构化辐射特性,难以满足高分辨率遥感、预警监视及军事侦察等方面对辐射数据的仿真需求。

目前,显式数值法和蒙特卡罗(MC)法^[6]是三维辐射传输中公认精度最高的两类方法。前者利用空间离散化将复杂的积分微分方程转换为常微分方程组,进而通过线性代数求解方程组,代表性模型有离散坐标法(DOM)^[7]和球谐离散坐标法(SHDOM)^[8]。后者模拟辐射源释放大光子并在介质中追踪它们的过程,代表性模型包括 Grimaldi、MC-UNIK 及 MCARaTS 等^[9]。但二者均需要通过消耗大量计算资源以提高计算精度,难以在大规模场景下进行广泛应用,一般作为验证其他方法精度优劣的标准。因此,以三维大气辐射传输代码比对计划(I3RC)为代表的研究者们尝试寻找高效率的三维辐射近似模型^[9],以平衡计算精度与速度。Jakub 等^[10]提出一种十流法,该方法将一维二流近似扩展为三维十流,能够较好描述不同方向的辐射传输过程,但计算过于复杂;Várnai 等^[11-12]通过将三维辐射效应分为逃逸和捕获来描述散射问题,并通过构建反射场来分析该效应对亮度分布的影响;Hogan 等^[5,13-14]进一步分析了含云大气内的辐射交换机制,提出了一种基于通过三维辐射效应和二流辐射来计算短波辐射通量的方法,但该方法仅适用于气候模式,在空间尺度与方向性更加精细的遥感领域并不适用。

针对高分辨遥感应用中的三维云层辐射传输问题,本文提出一种水平方向邻域多次散射近似模型,该模型在避免复杂计算的同时能有效提升计算精度。

2 水平方向邻域多次散射近似模型

2.1 模型基本原理

辐射传输方程描述了辐射能量在传输路径上的发射、吸收及散射作用的过程,三维辐射传输量方程可写为

$$\frac{dI(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})}{ds} = -k(\mathbf{s}) [I(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) - J(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})], \quad (1)$$

式中: \mathbf{s} 为位置矢量; $\boldsymbol{\Omega}$ 为方向矢量; $k(\mathbf{s})$ 为消光系数; $I(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 和 $J(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 分别为位置 \mathbf{s} 处沿 $\boldsymbol{\Omega}$ 方向的辐射强度和源函数。

辐射传输的核心问题是辐射源函数的求解。完整的辐射源函数包括单次散射项、多次散射项及热辐射项。其中,多次散射项由于耦合了不同方向的辐射强度,是源函数计算过程中的难点。在可见光与近红外波段,多次散射在总辐射传输中占比较大,无法忽略。

$$J_{\text{MS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) = \frac{\omega(\mathbf{s})}{4\pi} \iint_{4\pi} I(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}') P(\mathbf{s}; \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}') d\boldsymbol{\Omega}', \quad (2)$$

式中: $\omega(\mathbf{s})$ 为单次散射反照率; $P(\mathbf{s}; \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}')$ 为由 $\boldsymbol{\Omega}'$ 方向散射至 $\boldsymbol{\Omega}$ 方向的相函数。在严格模型中,SHDOM对整个辐射场进行多次迭代,直至 $J_{\text{MS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 收敛,而MC法通过追迹大量光子来对多次散射过程进行模拟,两种方法都需要消耗大量计算成本。

在可见光波段,云层粒子的单次散射反照率较高,辐射总能量中热辐射占比很小,此时总辐射的来源主要为单次散射和多次散射。一维辐射模型忽视了云层水平方向散射特性差异产生的辐射变化,通常仅能准确反映均匀水平结构云层的多次散射情况。根据一维辐射模型的计算特点与三维云层空间的结构分布,多次散射主要可分为两部分:基于均匀水平结构的云层辐射;针对非均匀水平结构的水平方向云层辐射交换。由此建立(2)式中 $I(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 的近似模型,表达式为

$$I(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) \approx I_{\text{SS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) + I_{\text{ICMS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) + I_{\text{HRE}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}), \quad (3)$$

式中: $I_{\text{SS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 为单次散射项,表示由太阳单次散射产生的辐射强度,可根据三维云层网格点单次散射参数和太阳入射路径直接计算; $I_{\text{ICMS}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 为独立列多次散射项,表示云层垂直方向差异导致的多次散射能量分布,可利用爱丁顿近似等一维大气辐射传输模型

近似计算; $I_{\text{HRE}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 为水平辐射交换项, 表示云层水平方向非均匀性导致的多次散射变化。多次散射计算复杂性在很大程度上由散射角数量决定, 利用辐射通量密度, 可耦合具有相同传输方向分量的辐射强度, 减少多次散射计算所需的散射角数量。水平方向辐射通量密度反映了辐射强度在该方向上的整体情况, 其变化值可近似表征云层水平方向非均匀性产生的辐射交换。散射相函数表示水平方向 $\boldsymbol{\Omega}'$ 到散射方向 $\boldsymbol{\Omega}$ 的强度映射, 将 $I_{\text{HRE}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega})$ 近似表达为

$$I_{\text{HRE}}(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}) \approx \frac{P(\mathbf{s}; \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}')}{\pi} \Delta F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}'), \quad (4)$$

式中: $\Delta F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}')$ 为经水平方向邻域辐射交换产生的水平辐射通量密度变化; $\frac{P(\mathbf{s}; \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}')}{\pi}$ 为水平方向辐射通量密度到空间方向辐射强度的分配关系。

2.2 相邻云体水平辐射交换

三维云层空间可划分为有限个网格区域, 在网

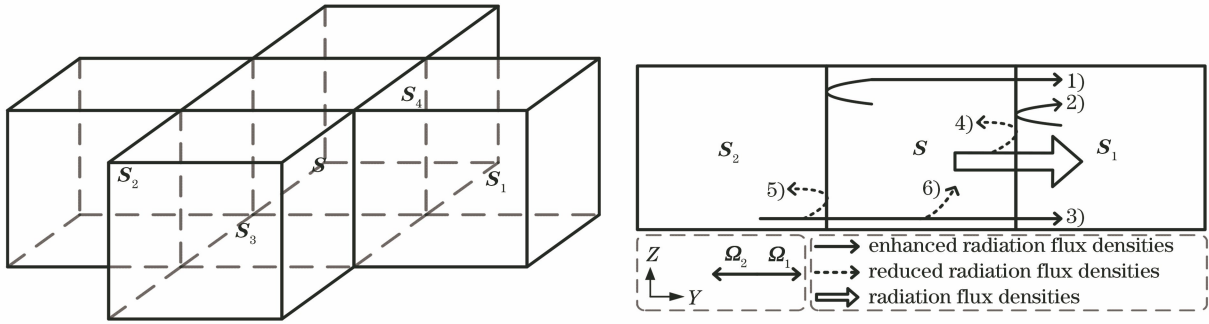


图 1 三维空间邻域水平辐射通量密度交换

Fig. 1 Exchange of radiation flux densities among horizontally adjacent fields in 3D space

以在 s 单元位置处沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的水平辐射通量密度变化为例, 水平辐射通量密度增强量 $F^+(\mathbf{s},$

格顶点处存储云层光学属性信息, 可以将每个网格点视为一个小云体单元, 水平方向相邻云体辐射相互作用产生三维辐射效应^[11], 可表现为单元位置处的辐射增强和减弱。如图 1 所示, 目标云体 s 沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的辐射变化为

- 1) s 沿 $\boldsymbol{\Omega}_2$ 方向的辐射散射至相邻云体 s_2 时, 在单元边界处发生反射, 增强 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射;
- 2) 相邻云体 s_1 沿 $\boldsymbol{\Omega}_2$ 方向的辐射传输至 s 时, 在单元边界处发生反射, 增强 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射;
- 3) 相邻云体 s_2 沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的辐射散射至 s , 增强 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射;
- 4) s 沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的辐射受单元边界阻拦贡献给反向辐射, 减弱 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射;
- 5) 相邻云体 s_2 沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的辐射传输至 s 时, 在单元边界处发生反射, 减弱 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射;
- 6) 相邻云体 s_2 沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向的辐射传输至 s 的过程中在云体内部衰减, 减弱 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向辐射。

$\boldsymbol{\Omega}_1)$ 和减弱量 $F^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_1)$ 可写为

$$\begin{cases} F^+(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_1) = R(s'_2)F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_2) \exp[-\tau_H(s'_2, \boldsymbol{\Omega}_1; d)] + R(s'_1)F(\mathbf{s}_1, \boldsymbol{\Omega}_2) + \\ \quad [1 - R(s'_2)]F(\mathbf{s}_2, \boldsymbol{\Omega}_1) \exp[-\tau_H(s'_2, \boldsymbol{\Omega}_1; d)] \\ F^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_1) = R(s'_1)F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_1) + R(s'_2)F(\mathbf{s}_2, \boldsymbol{\Omega}_1) + \\ \quad [1 - R(s'_2)]F(\mathbf{s}_2, \boldsymbol{\Omega}_1) \{1 - \exp[-\tau_H(s'_2, \boldsymbol{\Omega}_1; d)]\} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: s'_1, s'_2 分别为位置 s 与 s_1 、位置 s 与 s_2 处的单元界面中心位置; $\tau_H(s'_2, \boldsymbol{\Omega}_1; d)$ 为位置 s'_2 处沿 $\boldsymbol{\Omega}_1$ 方向在距离 d 上的光学厚度; d 为路径距离, 大小为单元长度; $F(\cdot)$ 为水平辐射通量密度; $R(\cdot)$ 为云侧反照率。当光学厚度处于较小范围内时, 根据小尺度云层和平面平行大气表面反照率模型^[15-16], 可推导出用于描述水平辐射交换的云侧反照率, 表

达式为

$$R(s'_l) = \frac{\bar{\tau}_H [1 - g(s'_l)] \sqrt{\omega(s'_l)}}{2 + \bar{\tau}_H [1 - g(s'_l)] \sqrt{\omega(s'_l)}}, \quad (6)$$

式中: $g(s'_l)$ 为不对称因子; $\bar{\tau}_H$ 为交界 s'_l 位置处两侧水平路径距离上的平均光学厚度; l 为水平方向索引, 取值为 1~4, 分别代表图 2 中正负 X 方向与正负 Y 方向。由于单元界面处 R 唯一, 因此需要考

考虑分别通过两单元的水平路径上的不同光学厚度对其交界处 R 计算过程的影响。当 $\bar{\tau}_H$ 不断增大时, R 将趋近于 1, 严重偏离真实值。针对该情况, 参考

光学厚度接近无穷大时的反照率表达式^[17], 对(6)式进行修正, 得到更具一般性的云侧反照率表达式, 即

$$R(s'_l) = \frac{\bar{\tau}_H [1 - g(s'_l)] \sqrt{\omega(s'_l)}}{2 + \bar{\tau}_H [1 - g(s'_l)] \sqrt{\omega(s'_l)}} \times \left[\frac{\sqrt{1 - \omega(s'_l)g(s'_l)} - \sqrt{1 - \omega(s'_l)}}{\sqrt{1 - \omega(s'_l)g(s'_l)} + \sqrt{1 - \omega(s'_l)}} \right]. \quad (7)$$

在实际计算水平辐射通量密度时, 采用三维离散方向上的高斯积分, 表达式为

$$F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_l) \approx \sum_{G=1}^{N_l} a_{G_l} \psi_{G_l} I_0(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_{G_l}), \quad (8)$$

式中: $I_0(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_{G_l})$ 为沿离散高斯方向 $\boldsymbol{\Omega}_{G_l}$ 的辐射强度, 可近似为(3)式中单次散射与独立列多次散射之

和; a_{G_l} 、 N_l 与 ψ_{G_l} 分别为相应的高斯积分权重、离散方向数与水平方向投影系数。

$$\psi_{G_l} = \sin \theta_{G_l} \cos \Delta\varphi_{G_l}, \quad (9)$$

式中: θ_{G_l} 为沿高斯方向的天顶角, $\Delta\varphi_{G_l}$ 为沿高斯方向的方位角与 $\boldsymbol{\Omega}_l$ 的夹角, 取值为 $-\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{4}$, 如图 2 所示。

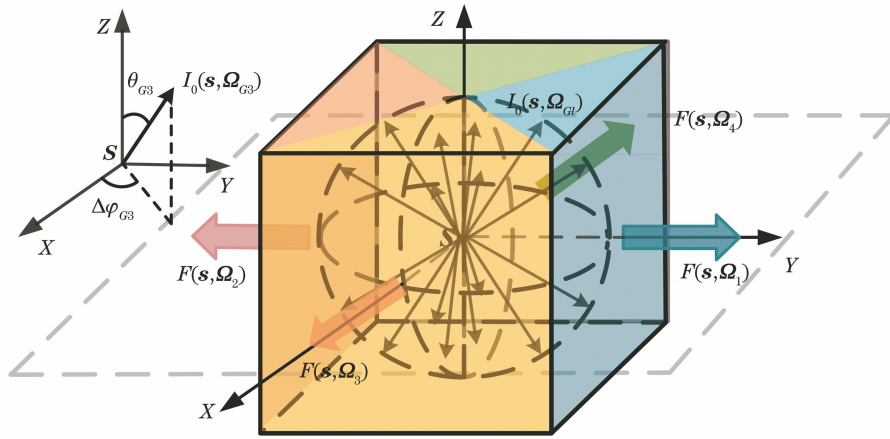


图 2 水平辐射通量密度和高斯方向辐射强度示意图

Fig. 2 Schematic of radiation flux densities along horizontal direction and radiation intensities along Gaussian direction

2.3 太阳方向补偿函数

随着太阳天顶角度增大, 云表面反射回空间的太阳辐射也增加。Hogan 等^[5]在研究中表明, 随太阳天顶角度增大, 由三维辐射效应产生的云辐射通量变化 (CRF) 比例 r 也不断增加, 为 $-25\% \sim 100\%$ 。当太阳天顶角为 80° 时, 辐射增加量可达 1 倍, 此时相邻云体辐射作用主要表现为辐射增强。基于此, 引入太阳方向补偿函数 A_{HRE} 以进一步修正太阳入射角对相邻云体间辐射交换的影响, 补偿后的辐射通量密度变化可写为

$$\Delta F(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_l) = [1 + A_{\text{HRE}}(\theta_0)] F^+(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_l) - [1 - A_{\text{HRE}}(\theta_0)] F^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_l), \quad (10)$$

其中,

$$A_{\text{HRE}}(\theta_0) = \frac{\sin^2 \theta_0 \times (r_{\max} - r_{\min})}{\sin^2 \theta_{0, \max} - \sin^2 \theta_{0, \min}} + r_{\min}, \quad (11)$$

式中: 由正弦函数平方曲线拟合随太阳入射角增大

补偿程度变化的趋势, 补偿函数的数值范围由 r 的最值确定; θ_0 为太阳天顶角度。

3 实验与分析

3.1 实验数据及评价指标

在三维辐射传输领域, 独立像元近似 (IPA) 模型作为应用最广泛的近似模型常被用于验证其他近似模型的效能^[5, 10, 18]。Evans^[8]在此基础上提出了一种更加合理的改进, 即严格三维单次散射结合爱丁顿多次散射 (SSEddMS) 模型。为验证所提模型的效果, 对所提模型、IPA 模型、SSEddMS 模型进行比较。利用 I3RC Phase II 提供的三维淡积云 (Cu) 数据 (<https://i3rc.gsfc.nasa.gov/>)、基于实测修正的多尺度叠加分形算法得到的三维层积云 (Sc) 数据和高积云 (Ac) 数据^[19], 从中截取 $5 \times 5 \times 5$ 区域进行实验分析, 场景具体参数如表 1 所示。

表 1 三维云层场景参数
Table 1 Parameters of 3D cloud scene

Parameter	Cu	Sc	Ac
Average liquid water content /($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.93	0.68	0.74
Average extinction coefficient / km^{-1}	125.9	62.39	81.99
Standard deviation of horizontal extinction coefficient / km^{-1}	14.2	2.6	5.5
Average single scattering albedo	0.999997	0.999996	0.999996
Altitude range /km	1.66–1.82	0.46–0.62	4.50–4.62
Grid resolution /m	$66.7 \times 66.7 \times 40$	$80 \times 80 \times 40$	$80 \times 80 \times 40$
Grid size		$5 \times 5 \times 5$	
Scattering phase function model		Mie model	
Ground temperature /K		288	
Ground albedo		0.2	
Wavelength / μm		0.67	

Note: standard deviation of horizontal extinction coefficient is the standard deviation of extinction coefficient for horizontal surface of cloud scene, indicating horizontal non-uniform degree of the cloud.

定义上行方向辐射源函数(USF)平均相对误差($M_{\text{RE,USF}}$)衡量近似模型在遥感应用中的计算精度为

$$M_{\text{RE,USF}} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \left[\frac{|J_{\text{Standard}}(\mathbf{s}_k, \boldsymbol{\Omega}_i) - J_{\text{Approximate}}(\mathbf{s}_k, \boldsymbol{\Omega}_i)|}{J_{\text{Standard}}(\mathbf{s}_k, \boldsymbol{\Omega}_i)} \right]}{NM}, \quad (12)$$

式中: M 为计算区域网格点个数, N 为上行离散方向数,本实验采用8个上行离散高斯方向; $J_{\text{Standard}}(\mathbf{s}_k, \boldsymbol{\Omega}_i)$ 为严格模型计算出的辐射源函数; $J_{\text{Approximate}}(\mathbf{s}_k, \boldsymbol{\Omega}_i)$ 为近似模型计算出的辐射源函数。其中严格模型选用SHDOM,已证明,在像素级别的三维辐射传输计算中,SHDOM的性能要优于MC法^[20]。

3.2 模型精度验证及适用性分析

3.2.1 太阳方向与观测方向变化实验

太阳入射方向决定云场的散射分布,是影响三

维辐射效应的重要因素之一^[21]。表2给出了在不同类型云场、不同太阳天顶角情况下,IPA模型、SSEddMS模型和所提模型的USF平均相对误差。由于IPA模型和SSEddMS模型中的多次散射近似表现为在一定程度上高估辐射增强作用,在太阳入射天顶角较小时误差较大。而当太阳天顶角大于 45° 时,相邻云体辐射增强作用逐渐占主导地位,IPA和SSEddMS结果接近精确值。所提模型考虑了水平非均匀介质间的辐射耦合,通过引入太阳方

表 2 不同模型得到的 USF 平均相对误差

Table 2 Mean relative errors of USF obtained by different models

Cloud scene	Solar zenith angle /($^\circ$)	Mean relative error of USF /%			
		IPA	SSEddMS	Proposed model	Improvement
Cu	0	40.50	25.96	6.93	19.03
	15	42.12	26.76	8.28	18.48
	30	40.49	24.03	10.87	13.16
	45	32.99	16.24	12.06	4.18
	60	19.06	5.71	4.59	1.12
Sc	0	29.85	17.88	2.48	15.40
	15	30.87	18.09	2.88	15.21
	30	27.36	13.27	3.75	9.52
	45	21.98	6.62	6.04	0.58
	60	22.26	8.28	7.83	0.45
Ac	0	32.66	19.87	4.69	15.18
	15	34.02	20.44	4.74	15.70
	30	31.41	16.60	4.83	11.76
	45	25.22	9.61	6.20	3.41
	60	20.65	7.34	5.86	1.48

向补偿函数对相邻云体辐射交换进行了修正。相较两种对比模型,在低太阳天顶角条件下,所提模型在三种类型云场中的计算精度提升均超过 15%;在高太阳天顶角条件下,效果仍然较优;在 0~60° 太阳天顶角下,计算误差均保持在 10% 左右,在稳定性和计算精度方面具有显著优势。

表 3 相机观测参数

Table 3 Observing parameters of camera

Experiment No.	$\theta /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	X_0/km	Y_0/km	Z_0/km
E1	0	180	0.135	0.135	401.820
E2	20	180	-136.673	0.135	377.697
E3	40	180	-256.980	0.135	308.238
E4	60	180	-346.275	0.135	201.820

图 3 给出了在 E1、E2、E3 和 E4 四种不同观测视角情况下,IPA、SSEddMS 和所提模型在不同太阳入射方向上的像元光谱辐射亮度平均相对误差曲线。可以看出,所提模型能够适应各类光照与观测条件,计算精度优于其他两种三维近似辐射传输模

型,平均相对误差小于 5%。图 4(a)为正午时分星下点观测时 SHDOM 计算出的光谱辐射亮度图像,图 4(b)~(d)分别为三种近似模型的误差分布,所提模型的误差保持在 0.042 W/(m²·sr·μm) 以下,像元级辐射计算精度最优。

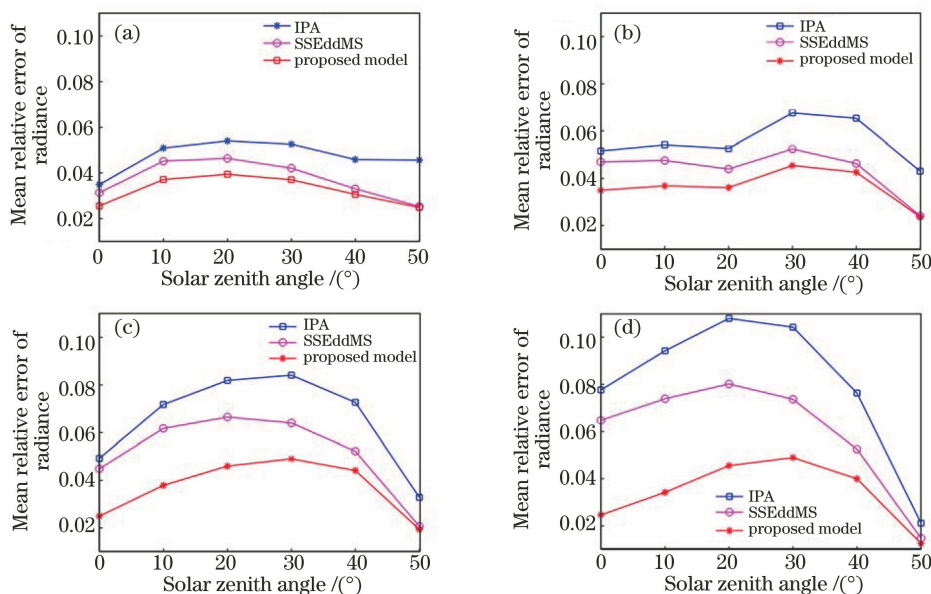


图 3 像元光谱辐射亮度平均相对误差。(a) E1;(b) E2;(c) E3;(d) E4

Fig. 3 Mean relative errors of spectral radiance of pixels. (a) E1; (b) E2; (c) E3; (d) E4

3.2.2 光学厚度与非均匀性变化实验

云层光学厚度大小与水平非均匀性分布同样会显著影响云内辐射效应^[11,22-23]。设计两组实验,通过改变 Cu 场景的消光系数,验证所提模型的适应性。实验云层场景参数如表 4 所示,太阳入射天顶角设为 0°。第 I 组实验中,云层场景水平面消光系数标准差不变,平均消光系数为 45.9~145.9 km⁻¹,云层平均光学厚度逐步增加。第 II 组实验中,云层场景平均消光系数不变,水平面消光系

数标准差为 1.0~30.0 km⁻¹,云层水平方向非均匀性逐步增加。

图 5、6 分别给出了两组实验三维云层场景中间层各网格点 USF 平均值。由于 IPA 和 SSEddMS 忽视了水平相邻云体光学厚度与多次散射之间的强相关关系,随着云层光学厚度增加,计算结果逐渐远离 SHDOM 结果。所提模型计算水平单元间辐射交换时对水平相邻云体光学厚度进行了充分考虑,能够准确描述随云层光学厚度变化而变化的辐射

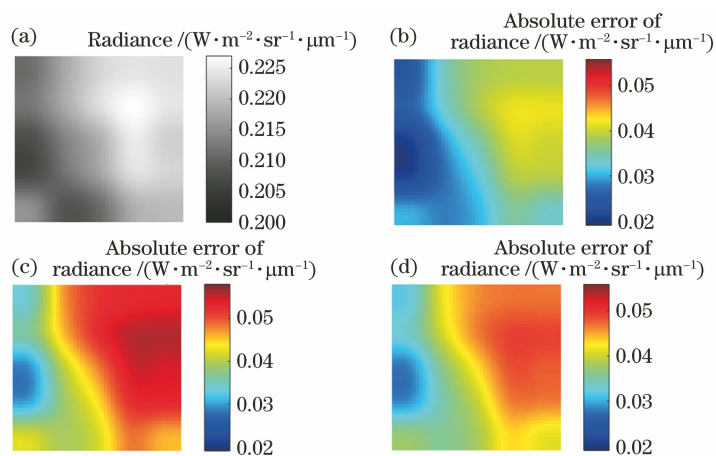


图 4 正午时分星下点观测的光谱辐射亮度图像结果及模型的误差。(a) SHDOM;(b)所提模型;
(c) IPA 模型;(d) SSEddMS 模型

Fig. 4 Spectral radiance image results and model's errors observed under sub-satellite point at noon.

(a) SHDOM; (b) proposed model; (c) IPA model; (d) SSEddMS model

表 4 云层场景设计

Table 4 Design of cloud scene

Experimental group	Scene number	Average extinction coefficient /km ⁻¹	Standard deviation of horizontal extinction coefficient/km ⁻¹
Experiment I	1	45.9	14.5
	2	85.9	
	3	105.9	
	4	145.9	
Experiment II	1	125.9	1.0
	2		10.0
	3		20.0
	4		30.0

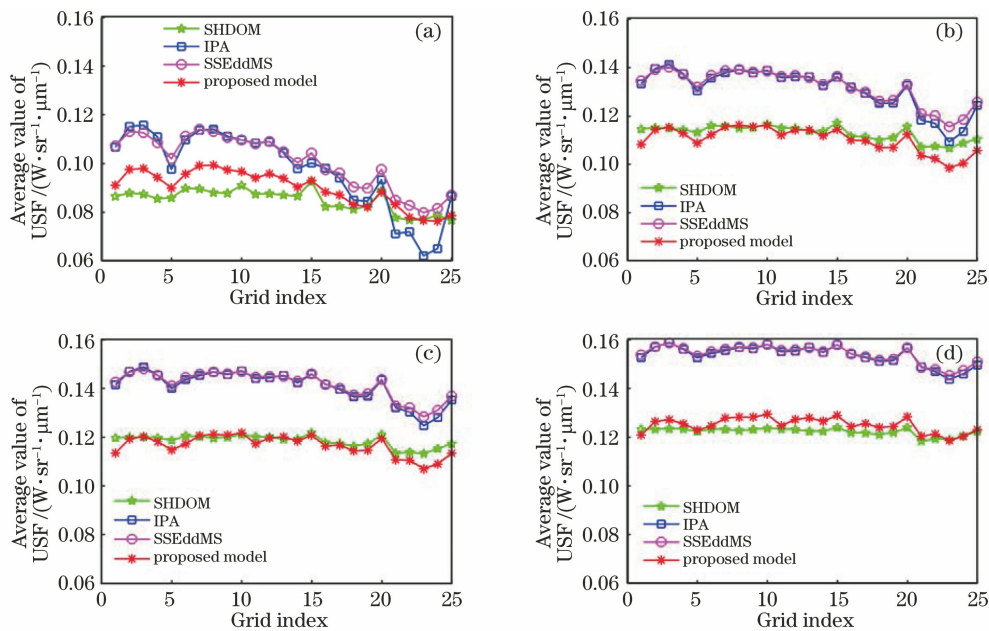


图 5 光学厚度变化条件下三维云场中间层网格点 USF 平均值。(a) I1;(b) I2;(c) I3;(d) I4

Fig. 5 Average value of USF of middle layer's grid point in 3D cloud field under varying optical thicknesses.

(a) I1; (b) I2; (c) I3; (d) I4

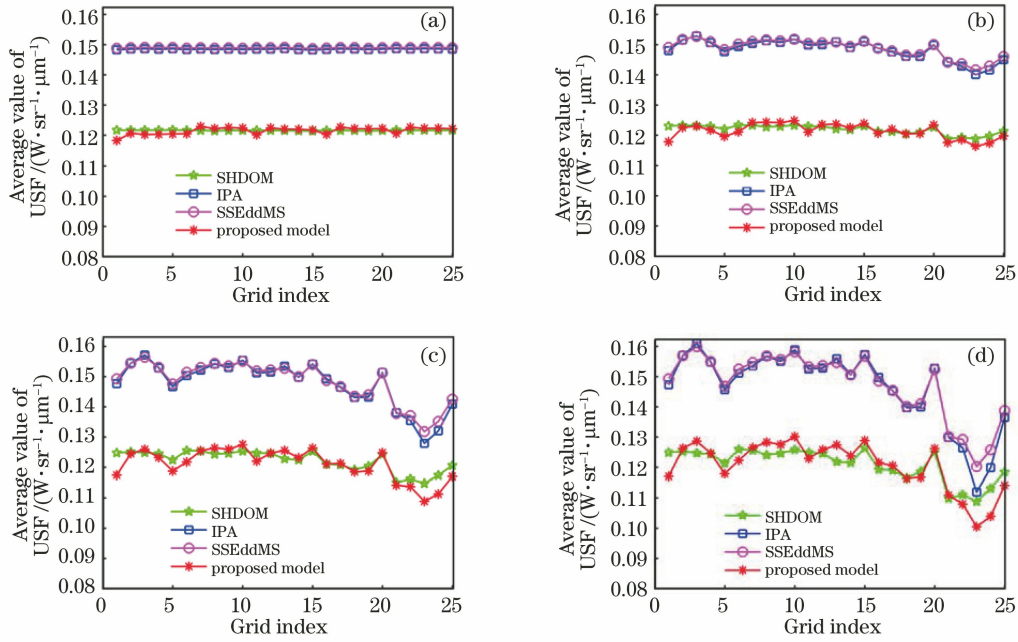


图 6 水平非均匀程度变化条件下三维云场中间层网格点 USF 平均值。(a) II1; (b) II2; (c) II3; (d) II4
 Fig. 6 Average value of USF of middle layer' grid point in 3D cloud field under varying horizontal non-uniform degree. (a) II1; (b) II2; (c) II3; (d) II4

场,在云层整体和内部光学厚度发生显著改变时,计算结果仍然接近精确值。表 5 给出了两组实验条件下 IPA、SSEddMS 和所提模型的 USF 平均相对误差。在较大光学厚度云场中,所提模型计算精

度提升可高达 22%;在不同水平非均匀云场中,所提模型同样效果最优,平均相对误差在 8%以下。所提模型能够适用于不同类型与结构复杂度的云层。

表 5 实验 I 和实验 II 的 USF 平均相对误差

Table 5 Mean relative errors of USF in experiment I and II

Experimental group	Scene number	Mean relative error of USF / %			
		IPA	SSEddMS	Proposed model	Improvement
Experiment I	1	30.44	18.13	8.87	9.26
	2	31.97	19.41	4.74	14.67
	3	36.71	23.05	5.93	17.12
	4	46.13	30.71	8.61	22.10
Experiment II	1	41.15	26.49	6.76	19.73
	2	40.77	26.20	6.84	19.36
	3	40.10	25.66	7.01	18.65
	4	40.44	26.11	7.58	18.53

3.3 模型计算效率分析

为验证所提模型的计算效率,分别在不同规模网格场景下进行实验。实验环境为 VS2010、IVFXE2013.3.4GHZ Intel i7 处理器、64 位 win7 操作系统和 8GB 内存。

表 6 给出了 IPA、SSEddMS、SHDOM 和所提模型解算的三维辐射源函数的耗时。所提模型的计算时间与 IPA 和 SSEddMS 相当。在较大的 $N_x \times$

$N_y \times N_z$ 规模网格场景下,SHDOM 通过迭代方式求解多次散射,当单次反照率较高时,需迭代约 49 次才完成整个辐射场解算,计算成本高昂。在 $500 \times 500 \times 20$ 规模网格场景下,SHDOM 计算时间为 2320.2 s。所提模型简化了多次散射求解过程,与 SHDOM 相比,计算时间节约了 2188.1 s,计算效率可提升 18 倍。在大规模网格场景下,所提模型节约的计算成本相当可观。

表 6 不同模型的计算时间
Table 6 Computing time of different models

N_x	N_y	N_z	Computing time /s				Improved ratio with SHDOM
			IPA	SSEddMS	SHDOM/Number of iterations	Proposed model	
100	100	20	3.1	4.7	73/49	4.8	15
300	300	20	27.3	46.7	799/48	47.3	17
500	500	20	76	131	2320.2/49	132.1	18

4 结 论

提出的水平方向邻域多次散射近似模型能够在保证计算精度的同时,有效提升三维云层辐射传输的计算效率。在不同规模网格云层场景下,和SHDOM相比,所提模型的计算效率可提升15至18倍。与IPA和SSEddMS相比,所提模型在不同光照与观测条件下均具有较大优势,USF平均相对误差保持在10%左右,像元级光谱辐射亮度相对误差小于5%。当云层类型和内部结构发生显著变化时,所提模型仍然具有良好的适应性,是遥感应用中三维云层辐射传输问题的有效解决方法之一,也可作为其他辐射传输应用的参考。

参 考 文 献

- [1] Atmospheric Radiation Measurement. Atmospheric radiation measurement climate research facility decadal vision[R]. America: ARM, 2014: 7-9.
- [2] Marshak A, Davis A, Wiscombe W, et al. The verisimilitude of the independent pixel approximation used in cloud remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52(1): 71-78.
- [3] Yang T P, Si F Q, Ping W, et al. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0901001.
杨太平, 司福祺, Ping W, 等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0901001.
- [4] Ham S H, Kato S, Rose F G. Examining biases in diurnally integrated shortwave irradiances due to two- and four-stream approximations in a cloudy atmosphere[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2020, 77(2): 551-581.
- [5] Hogan R J, Shonk J K P. Incorporating the effects of 3D radiative transfer in the presence of clouds into two-stream multilayer radiation schemes[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(2): 708-724.
- [6] Marchuk G I, Mikhailov G A, Nazaraev M A, et al. The Monte Carlo methods in atmospheric optics [M]. Springer series in optical sciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 1980, 12: 138-146.
- [7] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2002: 261-265.
- [8] Evans K F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(3): 429-446.
- [9] Cahalan R F, Oreopoulos L, Marshak A, et al. THE I3RC: bringing together the most advanced radiative transfer tools for cloudy atmospheres[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(9): 1275-1294.
- [10] Jakub F, Mayer B. A three-dimensional parallel radiative transfer model for atmospheric heating rates for use in cloud resolving models: the TenStream solver[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 163: 63-71.
- [11] Várnai T. Influence of three-dimensional radiative effects on the spatial distribution of shortwave cloud reflection[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, 57(2): 216-229.
- [12] Várnai T, Marshak A. A method for analyzing how various parts of clouds influence each other's brightness [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D22): 4706.
- [13] Shonk J K P, Hogan R J. Tripleclouds: an efficient method for representing horizontal cloud inhomogeneity in 1D radiation schemes by using three regions at each height[J]. Journal of Climate, 2008, 21(11): 2352-2370.
- [14] Hogan R J, Fielding M D, Barker H W, et al. Entrapment: an important mechanism to explain the shortwave 3D radiative effect of clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2019, 2019(1): 48-66.
- [15] Koren I, Oreopoulos L, Feingold G, et al. How small is a small cloud?[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(14): 3855-3864.
- [16] Xie Y, Sengupta M, Dudhia J. A fast all-sky radiation model for solar applications (FARMS): algorithm and performance evaluation [J]. Solar Energy, 2016, 135: 435-445.
- [17] Bohren C F, Clothiaux E E. Fundamentals of

- atmospheric radiation [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2006: 258-268.
- [18] Okata M, Nakajima T, Suzuki K, et al. A study on radiative transfer effects in 3-D cloudy atmosphere using satellite data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(1): 443-468.
- [19] Turkington R B, Cianciolo M E, Raffensberger M E. Development of an atmospheric scene simulation model[R]. America: DTIC Document, 1998.
- [20] Pincus R, Evans K F. Computational cost and accuracy in calculating three-dimensional radiative transfer: results for new implementations of Monte Carlo and SHDOM[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66(10): 3131-3146.
- [21] Zhang C. Numerical study of radiative in three-dimensional cloudy atmospheres [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016: 41-47.
- 章超. 有云大气三维辐射效应数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016: 41-47.
- [22] Chen M, Hu S, Gao T C, et al. Study on the effect of inhomogeneous aerosol fields on radiative transfer process in near-infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0101003.
- 陈鸣, 胡帅, 高太长, 等. 气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0101003.
- [23] Li S, Sun X B, Ti R F, et al. Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.
- 李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.