

引用格式: ZHANG Yin, MA Jun, YAN Jun-hua, *et al.* Approximate Model of Three-dimensional Clouds Multiple Scattering Based on Finitely Adjacent-cloud Radiative Transfer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1229001

张寅, 马俊, 闫钧华, 等. 基于有限邻域辐射传输的三维云层多次散射近似模型[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1229001

## 基于有限邻域辐射传输的三维云层多次散射 近似模型

张寅<sup>1,2</sup>, 马俊<sup>1,2</sup>, 闫钧华<sup>1,2</sup>, 颜灏<sup>1,2</sup>, 智喜洋<sup>3</sup>, 巩晋南<sup>3</sup>

(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, 南京 211106)

(2 南京航空航天大学 航天学院, 南京 211106)

(3 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对高分辨率探测应用中三维云层辐射传输计算成本较高的问题, 提出了一种基于有限邻域的多次散射近似模型. 根据不同空间位置邻近云体间的辐射耦合规律, 将有限邻域分解为水平邻域和垂直邻域. 通过水平辐射通量密度变化方程, 计算水平方向辐射交换, 表征水平邻域产生的辐射效应. 针对辐射通量沿垂直方向误差, 利用辐射通量密度补偿函数加以修正, 更准确地表征垂直邻域产生的辐射效应. 选择三维积云场为实验场景, 以独立像元近似模型和结合了严格单次散射的爱丁顿多次散射模型作为比较对象. 实验结果表明: 当太阳天顶角小于 $60^\circ$ 时, 本文模型对上行和下行辐射源函数的精度提升优于 $8\%$ 和 $10\%$ , 最高可达 $47.39\%$ 和 $33.93\%$ ; 在不同光照和观测条件下, 辐射亮度计算精度优于 $40\%$ ; 在计算效率方面, 本文模型优势显著, 有助于研究大规模场景下的辐射传输快速求解.

**关键词:** 辐射传输; 多次散射; 辐射效应; 云层; 大气光学

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204912.1229001

### Approximate Model of Three-dimensional Clouds Multiple Scattering Based on Finitely Adjacent-cloud Radiative Transfer

ZHANG Yin<sup>1,2</sup>, MA Jun<sup>1,2</sup>, YAN Jun-hua<sup>1,2</sup>, YAN Hao<sup>1,2</sup>, ZHI Xi-yang<sup>3</sup>, GONG Jin-nan<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(2 College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(3 Research Center of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the high computational cost of radiative transfer for three-dimensional clouds in high-resolution detections, an approximate model of multiple scattering based on finitely adjacent-cloud was proposed. According to the radiative coupling law between adjacent clouds in different spatial positions, the finitely adjacent-cloud was divided into horizontally and vertically adjacent fields of clouds. The equation of variation for horizontal flux density was introduced to calculate the horizontal radiation exchange, thus characterize the radiative effects between horizontally adjacent fields of clouds. Regarding the error of flux along vertical direction, the function of compensation for flux density was used to correct it to more accurately characterize the radiative effect caused by vertically adjacent fields of clouds. A three-dimensional field of cumulus was selected as experimental scene, and the independent pixel approximation

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61705104), 江苏省自然科学基金(No. BK20170804), 中央高校基本科研业务费(No. NJ2020021)

第一作者: 张寅(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为天基光电探测信息处理与分析技术. Email: zhangyin1986@nuaa.edu.cn

通讯作者: 闫钧华(1972—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为多源信息融合、空间光电探测等. Email: yjh9758@126.com

收稿日期: 2020-08-06; 录用日期: 2020-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

and the multiple scattering (calculated by the Eddington's approximation) which combined with standard single scattering were compared. Experimental results show that the proposed model can improve the accuracies of upward and downward source functions by up to 47.39% and 33.93%, and the improvements are more than 8% and 10% when solar zenith angle is less than 60°; under different illuminating and observing conditions, mean relative errors of intensity for the proposed model are less than 40%; in terms of computational efficiency, the proposed model has significant advantage, which is helpful to research the rapid solution of radiative transfer in large-scale scenarios.

**Key words:** Radiative transfer; Multiple scattering; Radiative effects; Clouds; Atmospheric optics

**OCIS Codes:** 290.4210; 010.5620; 010.1615

## 0 引言

云在水平方向和垂直方向上均具有很强的非均匀性,其在大气中的细微变化都会对辐射传输产生影响<sup>[1-2]</sup>.传统云层辐射传输应用受制于计算成本,往往使用平面平行近似等一维模型,或独立像元近似(Independent Pixel Approximation, IPA)等扩展的一维模型,忽略了云侧的三维辐射效应<sup>[3]</sup>,在可见光和近红外波段的误差可达-25%至+100%<sup>[4]</sup>.三维云层内部复杂的多次散射是导致这一误差的主要原因<sup>[5-6]</sup>.

针对多次散射问题,以球谐离散坐标法<sup>[7]</sup>(Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method, SHDOM)为代表的显式计算方案基于辐射传输方程迭代求解,解算精度随迭代次数增加而提高,计算成本也随之增高;蒙特卡洛(Monte Carlo)法<sup>[8]</sup>通过大量光子模拟多次散射过程,计算精度直接受制于光子数量.为提高多次散射计算效率,国内外研究者相继开展了相关研究.MUKAIS等<sup>[9]</sup>研究了高密度气溶胶中的多次散射,在高光学厚度情况下利用逐次散射法反演了辐射场内气溶胶特性.GAOM等<sup>[10]</sup>通过研究均匀浑浊介质,阐明了多次散射角分布特性,并利用辐射传输理论求解.BELLISARIO C等<sup>[11]</sup>在开发用于目标探测的高空有云大气红外辐射模型时,建立了基于单次散射的多次散射经验模型.童广德等<sup>[12]</sup>将雷达方程和Mie散射理论结合,提出了一种激光多次散射计算方法,精确快速地仿真了雾的多次散射.SALIM M等<sup>[13]</sup>基于主动辐射和被动辐射理论,优化了多次散射数值计算.上述研究极大地推动和拓展了多次散射计算理论的发展和應用,但在三维云层辐射传输中,多次散射的高计算成本问题仍然突出.

本文针对三维云层辐射传输中多次散射解算复杂、计算成本较高问题,利用有限邻域表征邻近云体的三维辐射效应,实现了多次散射的快速有效计算.

## 1 基于有限邻域的多次散射近似模型

### 1.1 有限邻域

辐射能量在三维空间内的发射、吸收和散射效应,可以通过时间稳态的单色三维辐射传输标量方程描述<sup>[14]</sup>

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

式中, $s$ 为位置矢量, $\Omega$ 为从 $s$ 散射的角方向矢量, $k(s)$ 为 $s$ 处的消光系数, $I(s, \Omega)$ 和 $J(s, \Omega)$ 表示通过 $s$ 沿 $\Omega$ 传输的辐射强度和辐射源函数.光学厚度是消光系数沿辐射传输路径的积分,当云层光学厚度变化相等时,几何路径改变比消光系数改变产生的三维辐射效应更强<sup>[15]</sup>.因此,在研究多次散射问题时,应重点关注辐射传输路径的变化情况.

三维含云空间可均匀划分为若干单元,有限邻域即与目标云体单元辐射特性关系密切的单元组合.根据辐射传输原理,云体单元的多次散射主要由自身和相邻单元的辐射特性决定,因此有限邻域应优先包含距目标云体单元最近的单元.多次散射角分布特性沿垂直方向的变化规律同样是决定有限邻域的重要因素,当太阳光从云顶入射传输至云层内部时,散射前向性逐渐由强变弱,水平方向上的散射概率增大<sup>[6]</sup>.

#### 1.1.1 水平邻域

有限邻域根据方向不同分解为水平邻域和垂直邻域.水平邻域为水平方向上与目标云体单元直接相邻的4个单元,它们与目标云体辐射交换最强,同时包含了一部分从更远距离散射而来的辐射能量.基于水平邻域的辐射模型比传统一维模型更能体现因多次散射产生的辐射分布平滑化.图1(a)中传统一维辐射模型

沿列内近似路径逐层计算,相邻的水平单元辐射分布彼此较为独立,图 1(b)中水平邻域内单元存在辐射交换,辐射分布更符合真实情况.

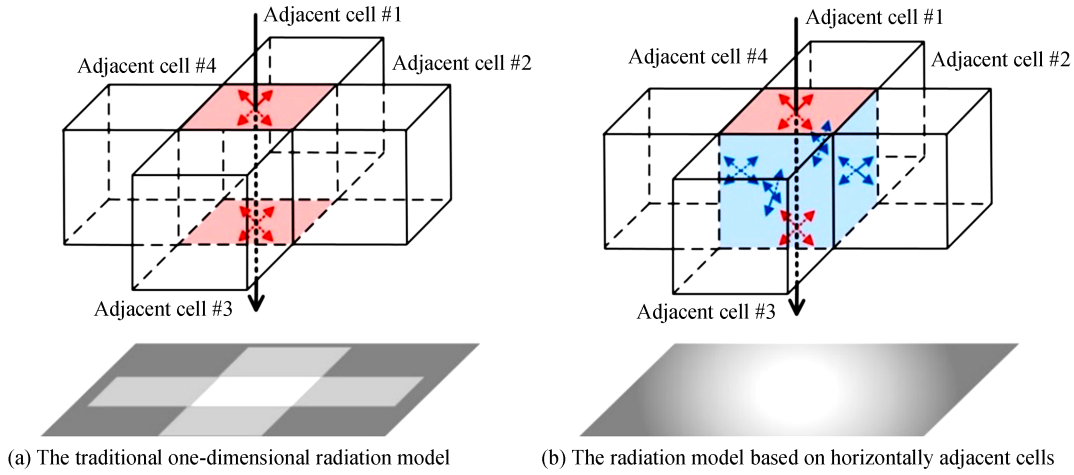


图 1 传统一维辐射模型与基于水平邻域的辐射模型对比

Fig.1 Contrastive diagrams of the traditional one-dimensional radiation model and the radiation model based on horizontally adjacent cells

### 1.1.2 垂直邻域

云层光学厚度、云顶高度和云底高度是影响云层辐射传输的重要因素<sup>[16]</sup>,从云顶到云层内部的垂直路径应被纳入有限邻域的研究范畴,垂直邻域即该路径上的云体单元,与水平邻域组合得到有限邻域.三维含云空间垂直剖面内的有限邻域如图 2 所示,图中展示了 4 组不同目标云体单元的有限邻域,其中垂直邻域内云体单元数量取决于云顶和目标云体单元之间距离以及单元高度.太阳直射光在一维模型中沿列内近似路径传输,是辐射能量的主要来源,故垂直邻域为同一列内不同高度的云体单元.

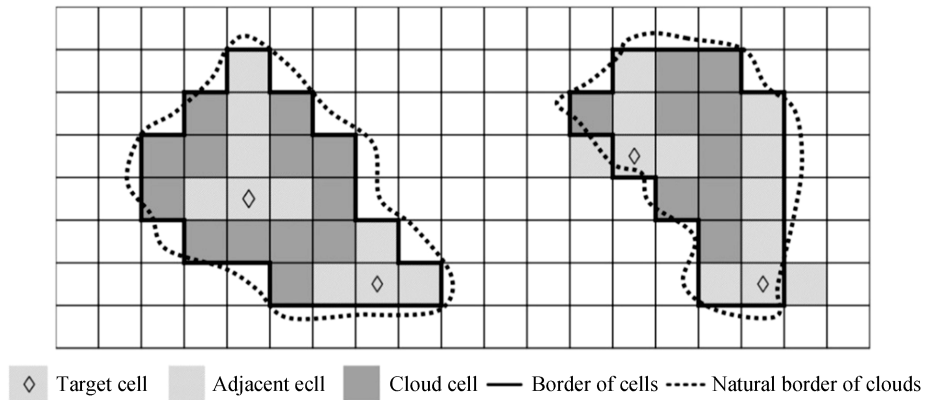


图 2 三维含云空间垂直剖面内的有限邻域示意图

Fig.2 Schematic diagram of finitely adjacent-cloud in a vertical section of a three-dimensional space which contained clouds

## 1.2 基于辐射通量密度的多次散射近似计算

辐射源函数  $J(s, \Omega)$  由单次散射项、多次散射项和发射(或热辐射)项组成,其中多次散射项<sup>[14]</sup>为

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

式中,  $\omega(s)$  为单次散射反照率,  $P(s; \Omega, \Omega')$  为从  $\Omega'$  方向到  $\Omega$  方向的散射相函数,可利用 Mie 散射模型结合 Delta-M 法计算得到,该方法已被证明对辐射通量计算十分有效<sup>[17]</sup>.如式(2)所示,计算多次散射需要积分三维空间内的辐射强度,若采用迭代计算方法求解多次散射,则计算成本巨大.针对该问题,根据三维云层空间结构非均匀性,结合一维辐射模型计算特点,将多次散射分为两部分,构建近似模型

$$\begin{cases} I(s, \Omega) \approx I_{SS}(s, \Omega) + \tilde{I}_{MS}(s, \Omega) + I_E(s, \Omega) \\ \tilde{I}_{MS}(s, \Omega) = I_{ICMS}(s, \Omega) + I_{CE}(s, \Omega) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $I_{SS}(s, \Omega)$  为单次散射强度, 可通过太阳直射辐射强度和散射参数直接计算;  $\tilde{I}_{MS}(s, \Omega)$  为多次散射强度近似值;  $I_E(s, \Omega)$  为发射 (或热辐射) 强度, 可通过普朗克公式和温度参数直接计算;  $I_{ICMS}(s, \Omega)$  为独立列多次散射强度, 表示二流法等传统一维辐射传输模型的多次散射强度近似值, 是一种基于均匀水平结构的云层辐射分布;  $I_{CE}(s, \Omega)$  为水平邻域辐射效应产生的辐射强度变化, 表征针对非均匀水平结构的水平方向云层辐射交换.

邻近云体的三维辐射效应可被解释为对目标云体辐射强度的增强或减弱 (同一维模式相比)<sup>[18]</sup>. 目标云体单元的侧面在客观上将通过该处的辐射强度角分布空间一分为二, 因此可通过辐射通量或通量密度来计算辐射强度.  $I_{CE}(s, \Omega)$  的近似计算式为

$$\begin{cases} I_{CE}(s, \Omega) \approx \frac{P(s; \Omega, \Omega'')}{\pi} [F_{CE}^+(s, \Omega'') - F_{CE}^-(s, \Omega'')] \\ F_{CE}^+(s, \Omega'') = [1 + M_{CE}(\theta_0)] [R_B F(s, -\Omega'') \delta + R_F F(s_F, -\Omega'') + (1 - R_B) F(s_B, \Omega'') \delta] \\ F_{CE}^-(s, \Omega'') = [1 - M_{CE}(\theta_0)] [R_F F(s, \Omega'') + R_B F(s_B, \Omega'') + (1 - R_B) F(s_B, \Omega'') (1 - \delta)] \\ M_{CE}(\theta_0) = \frac{\sin^2(\theta_0)(C_{max} - C_{min})}{\sin^2(\theta_{max}) - \sin^2(\theta_{min})} + C_{min} \\ \delta = \exp[-k(s)H] \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $M_{CE}(\theta_0)$  为以太阳天顶角  $\theta_0$  为变量的函数,  $H$  为单元水平方向边长,  $F$  为水平辐射通量密度,  $R$  为  $F$  在单元相邻面处的反射率. 对于可见光和近红外波段, 太阳天顶角变化对云辐射的影响大约在  $-25\%$  至  $+100\%$  之间, 当  $\theta_0$  为  $80^\circ$  时, 影响值可达一倍<sup>[4]</sup>, 故设置  $C_{min} = -0.25$ ,  $C_{max} = 1$ ,  $\theta_{min} = 0^\circ$ ,  $\theta_{max} = 80^\circ$ . 水平辐射通量密度  $F$  的位置与方向如图 3 所示, 下标  $F$  和  $B$  分别代表沿  $\Omega''$  和  $-\Omega''$  与目标云体单元相邻的单元.

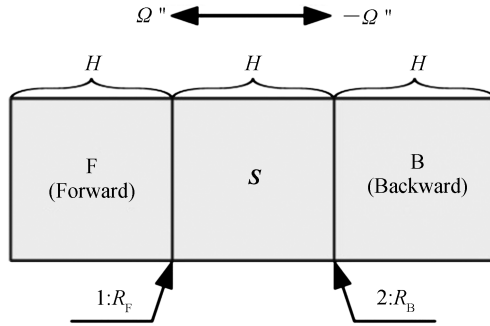


图 3 水平辐射通量密度的位置与方向示意图  
Fig.3 Schematic diagram of position and direction for the horizontal flux density

KOREN I 等<sup>[19]</sup>给出了在光学厚度为 0 到 20 之间时的云层反射率表达式

$$r_1 = \frac{\tau B}{2 + \tau B} \quad (5)$$

式中,  $\tau$  为云层垂直光学厚度, 参数  $B$  数值取决于太阳天顶角、 $\omega$  和散射相函数非对称因子  $g$ . 本文基于式 (5), 参考 IRVINE 反射率模型<sup>[20]</sup> 和 BOHREN 在  $\tau$  接近于无穷大时所给出的反射率计算式<sup>[21]</sup>, 引入太阳方向因素, 构建出一种适用于水平辐射通量密度的反射率计算模型

$$\begin{cases} R(s') = \left( \frac{\alpha}{2 + \alpha} \right) \left[ \frac{\beta - \sqrt{1 - \omega(s')}}{\beta + \sqrt{1 - \omega(s')}} \right] \\ \alpha = \frac{\sqrt{\omega(s')} [1 - g(s')] k(s') H}{\cos(\Delta\phi_0) \gamma_0} \quad (\theta_0 \geq 6^\circ) \\ \beta = \sqrt{1 - \omega(s') g(s')} \\ \gamma_0 = \sin(\theta_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $s'$  为单元相邻面位置,  $\Delta\phi_0$  为太阳方位角方向与距其最近的  $F$  之间的夹角, 取值范围为  $0^\circ \leq \Delta\phi_0 \leq 45^\circ$ . 当  $\theta_0 < 6^\circ$  时,  $\gamma_0$  为 0.1.

水平辐射通量密度  $F$  可通过三维高斯积分计算<sup>[22]</sup>, 计算式为

$$F(s, \Omega^n) \approx \sum_{i=1}^{N_G} a_i \sin(\theta_i) \cos(\Delta\phi_i) I_0(s, \Omega_i) \quad (7)$$

式中,  $a_i$  为三维高斯积分权重,  $\Omega_i$  为三维高斯方向,  $\theta_i$  为  $\Omega_i$  的天顶角, 与  $\Delta\phi_0$  类似,  $\Delta\phi_i$  为  $\Omega_i$  的水平投影与距其最近的  $F$  之间的夹角, 取值范围为  $0^\circ \leq \Delta\phi_i \leq 45^\circ$ .  $I_0(s, \Omega_i)$  在本文中被称为初始辐射强度, 可通过一维方法计算的源函数求得.  $N_G$  为计算  $F(s, \Omega^n)$  所需的  $\Omega_i$  数量, 由于云体单元 4 个侧面的面积相等, 故  $N_G$  为完整三维高斯网格(全立体角空间)内  $\Omega_i$  总数量的四分之一.

### 1.3 基于有限邻域的辐射通量密度修正

根据短波遮蔽降温效应修正辐射通量密度, 该效应与云层三维结构和太阳光入射方向有关, 具体表现为当太阳光斜射时, 位于太阳辐射传输路径投影一侧的目标云体存在明显的辐射减弱<sup>[6]</sup>, 由此产生显著的辐射计算误差. 该误差和云层光学厚度空间分布强相关, 可通过垂直邻域和水平邻域光学厚度的相对关系加以表征. 因此, 将  $k(s)$  沿太阳辐射传输路径递减的云体单元区域作为该路径的投影  $P$ , 并对式(4)中位于  $P$  内的  $F_{CE}^-(s, \Omega^n)$  进行修正, 计算式为

$$\hat{F}_{CE}^-(s_P, \Omega^n) = F_{CE}^-(s_P, \Omega^n) \cos(\eta) \exp\left[ \frac{\tau_V}{\tau_H \cos(\theta_0)} \right] \quad (8)$$

式中,  $\eta$  为太阳辐射方向水平分量与  $F_{CE}^-(s_P, \Omega^n)$  方向的夹角,  $\tau_V$  和  $\tau_H$  为垂直邻域和水平邻域的光学厚度, 如图 4, 二者分别通过沿垂直方向和水平方向累加有限邻域单元的光学厚度求得.

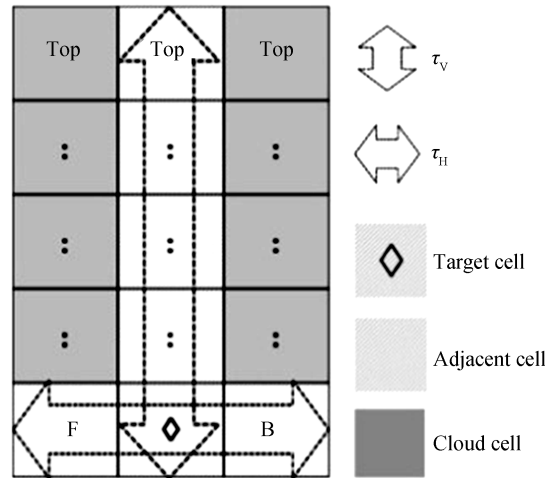


图 4 垂直邻域和水平邻域的光学厚度示意图

Fig.4 Schematic diagram of optical thicknesses for the vertically and horizontally adjacent cells



$I_0(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}_i)$ 的计算过程基于耦合了上行与下行辐射通量的源函数,因散射相函数前向峰值极高,云层辐射能量主要分布在下行方向范围内,导致 $F_{CE}^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}^n)$ 的误差与下行辐射通量误差类似.一维辐射模型和三维辐射模型计算的下行辐射通量都遵循比尔定律变化,随着层数积累,光学厚度逐渐增加,二者之差也逐渐增大<sup>[4,23]</sup>,这是下行辐射通量误差的主要特点.比尔定律指出,穿过均匀消光介质的辐射强度的衰减,符合简单的指数函数形式<sup>[24]</sup>.因此基于上述误差在垂直方向上的分布特点,结合太阳天顶角表征辐射传输近似路径,通过指数函数对所有云体单元的 $F_{CE}^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}^n)$ 进行修正,计算式为

$$\hat{F}_{CE}^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}^n) = F_{CE}^-(\mathbf{s}, \boldsymbol{\Omega}^n) \left[ \frac{2 - \exp(-\tau_v)}{\cos(\theta_0)} \right] \quad (9)$$

式(9)即为辐射通量密度补偿函数,用以修正垂直邻域内由辐射通量沿垂直方向传输产生的误差.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验条件与评价指标

积云中三维辐射效应较为明显<sup>[2]</sup>,故选取大涡流模式<sup>[25]</sup>(A Large-eddy Simulation, LES)生成的三维积云(<https://i3rc.gsfc.nasa.gov/>)为实验场景,该场景消光系数空间分布如图5所示.表1为三维积云场主要参数,该积云场高为1.4 km,长和宽均为6.7 km,云顶高度为2.42 km,水平分辨率和垂直分辨率为66.7 m和40 m.由于在可见光波段,单次散射反照率较大,多次散射显著<sup>[26]</sup>,故将波长设置为0.67  $\mu\text{m}$ .为检验本文模型与其它多次散射近似方法的性能提升效果,选择独立像元近似IPA模型和结合了严格单次散射的爱丁顿多次散射(Eddington's Multiple Scattering With Single-scattering, EMSS)模型作为比较对象.

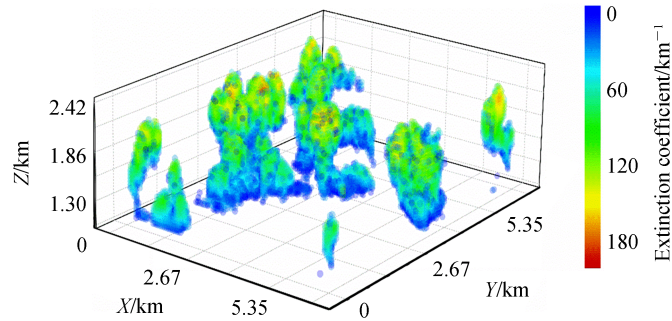


图5 三维积云场消光系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of extinction coefficient for three-dimensional cumulus field

表1 三维积云场主要参数

Table 1 Main parameters for three-dimensional cumulus field

Parameter	Numerical value
Grid size	100×100×36
Grid resolution/m	66.7×66.7×40.0
Horizontal domain size/km <sup>2</sup>	6.7×6.7
Vertical domain range/km	1.02~2.42
Average extinction coefficient/km <sup>-1</sup>	73.9
Cloud coverage/%	5.7

辐射源函数可以有效表征不同传输方向范围内的辐射信息.定义上行辐射源函数(Upward Source Function, USF)和下行辐射源函数(Downward Source Function, DSF)的平均相对误差 $E_{SFMR}$ (Mean Relative Error of Source Function)<sup>[27-28]</sup>为

$$E_{SFMR} = \frac{1}{N_H N_S} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_S} \frac{|J_{Exact}(\mathbf{s}_j, \boldsymbol{\Omega}_i) - J_{Approximate}(\mathbf{s}_j, \boldsymbol{\Omega}_i)|}{J_{Exact}(\mathbf{s}_j, \boldsymbol{\Omega}_i)} \quad (10)$$

式中,  $N_H$  为角空间上半球或下半球内三维高斯方向的数量,  $N_s$  为云体单元总数量,  $J_{\text{Exact}}(s_j, \Omega_i)$  和  $J_{\text{Approximate}}(s_j, \Omega_i)$  代表辐射源函数的准确值和近似值.

辐射亮度可以有效表征探测器实际获取的辐射信息. 与式(10)类似, 定义辐射亮度的平均相对误差  $E_{\text{IMR}}$  (Mean Relative Error of Intensity)<sup>[27-28]</sup> 为

$$E_{\text{IMR}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \frac{|L_{\text{Exact}}(x, y) - L_{\text{Approximate}}(x, y)|}{L_{\text{Exact}}(x, y)} \quad (11)$$

式中,  $N_x$  和  $N_y$  为辐射亮度图像内水平和垂直方向上的像素数量,  $L_{\text{Exact}}(x, y)$  和  $L_{\text{Approximate}}(x, y)$  代表辐射亮度的准确值和近似值. 实验采用 SHDOM 计算结果作为准确值的高置信度参考.

## 2.2 辐射源函数对比实验

为验证近似模型在不同辐射传输方向上的性能表现, 比较 IPA、EMSS 和本文模型在不同太阳天顶角下的 USF 和 DSF 误差, 实验结果如表 2 所示. 当太阳天顶角小于  $45^\circ$  时, 本文模型 USF 和 DSF 的精度提升在 25% 和 15% 以上, 当太阳光显著斜射 (太阳天顶角为  $60^\circ$ ) 时, 辐射源函数计算精度仍然较优, 模型稳定性较好. 表 3 为实验中所有模型的源函数计算时间, 计算机配置为 64 位 Win 7 操作系统、3.6GHz Intel i7 处理器和 8GB 内存. 在计算成本方面, 本文模型计算时间量级与 IPA 和 EMSS 相当. 同 SHDOM 相比, 本文模型基于辐射通量密度计算辐射交换, 避免多次散射求解过程中的大量迭代计算, 大幅提高了计算效率.

表 2 不同太阳天顶角下 IPA、EMSS 和本文模型的 USF 和 DSF 平均相对误差

Solar zenith angle/ $^\circ$	Source function	Mean relative error			
		IPA/%	EMSS/%	The proposed model /%	Improvement with EMSS/%
0	USF	58.76	53.38	28.27	25.11
	DSF	34.03	32.75	17.36	15.39
15	USF	93.97	87.99	40.60	47.39
	DSF	67.50	63.35	30.46	32.89
30	USF	120.85	111.60	67.56	44.04
	DSF	100.27	90.97	57.04	33.93
45	USF	136.52	121.54	93.27	28.27
	DSF	126.34	109.98	83.47	26.51
60	USF	120.05	103.41	95.21	8.20
	DSF	120.54	99.77	89.12	10.65

表 3 不同太阳天顶角下 IPA、EMSS、本文模型和 SHDOM 的源函数计算时间

Solar zenith angle/ $^\circ$	Computational time			
	IPA/s	EMSS/s	The proposed model/s	SHDOM/s
0	5.9	8.7	8.6	147.4
15	6.3	8.9	9.0	155.1
30	6.4	9.2	9.1	155.0
45	6.6	9.2	9.5	160.0
60	6.7	9.5	9.4	108.9
Mean	6.4	9.1	9.1	145.3

### 2.3 辐射亮度对比实验

为验证近似模型在高分辨率探测应用中的性能表现,比较IPA、EMSS和本文模型在不同太阳天顶角和探测器观测条件的辐射亮度计算结果.探测器的视场角、观测方向和三维空间位置(坐标轴与积云场相同)如表4所示,条件U-1和U-2可以仿真观测位置在云层之上的探测应用,如天基遥感;条件D-1和D-2可以仿真观测位置在云层之下或云层内部的探测应用,如地基遥感.

表4 探测器观测条件  
Table 4 Observing conditions of the detector

Condition	Field of view/ $^{\circ}$	Zenith/ $^{\circ}$	Azimuth/ $^{\circ}$	X coordinate /km	Y coordinate /km	Altitude/km
U-1	1.441	0	180	3.375	3.375	402.420
U-2		40		-253.740		308.838
D-1	15.363	180	180	3.375	3.375	0.050
D-2		140		2.752		0.277

太阳天顶角为 $30^{\circ}$ 时,从云上向下观测(U-2)和从云下向上观测(D-2)的光谱辐射亮度对比实验结果如图6和图7所示,IPA和EMSS在一定程度上高估了辐射增强作用.本文模型考虑了有限邻域内云体单元之间的辐射交换与耦合,通过辐射通量密度补偿函数加以修正,使辐射亮度更接近SHDOM的计算结果.如图7(a)中虚线矩形框区域所示,本文模型能更好地表现三维积云场景中的阴影.三种近似模型的 $E_{\text{IMR}}$ 曲线如图8所示,本文模型计算精度明显提升,对不同光照和观测条件的适应性更好, $E_{\text{IMR}}$ 保持在40%以下,优于其它两种近似模型.

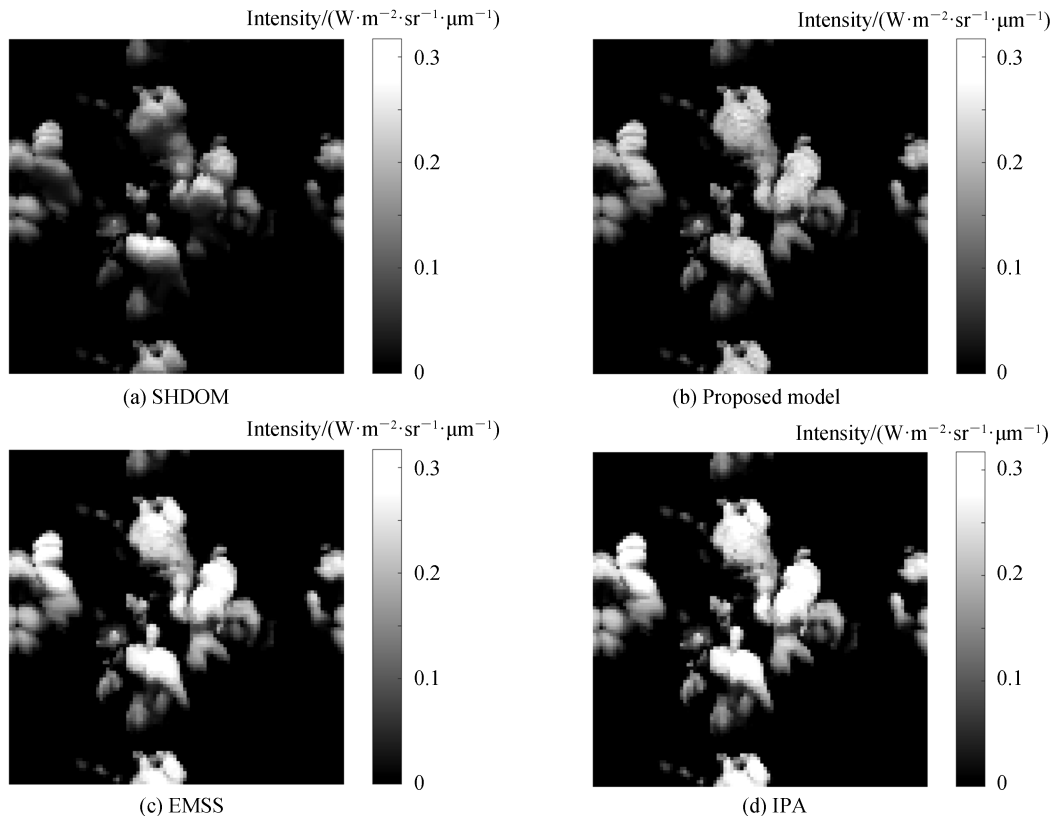


图6 太阳天顶角 $30^{\circ}$ 时从云上向下观测(U-2)的光谱辐射亮度仿真图像  
Fig.6 Spectral radiance image under observing condition U-2 at solar zenith angle  $30^{\circ}$



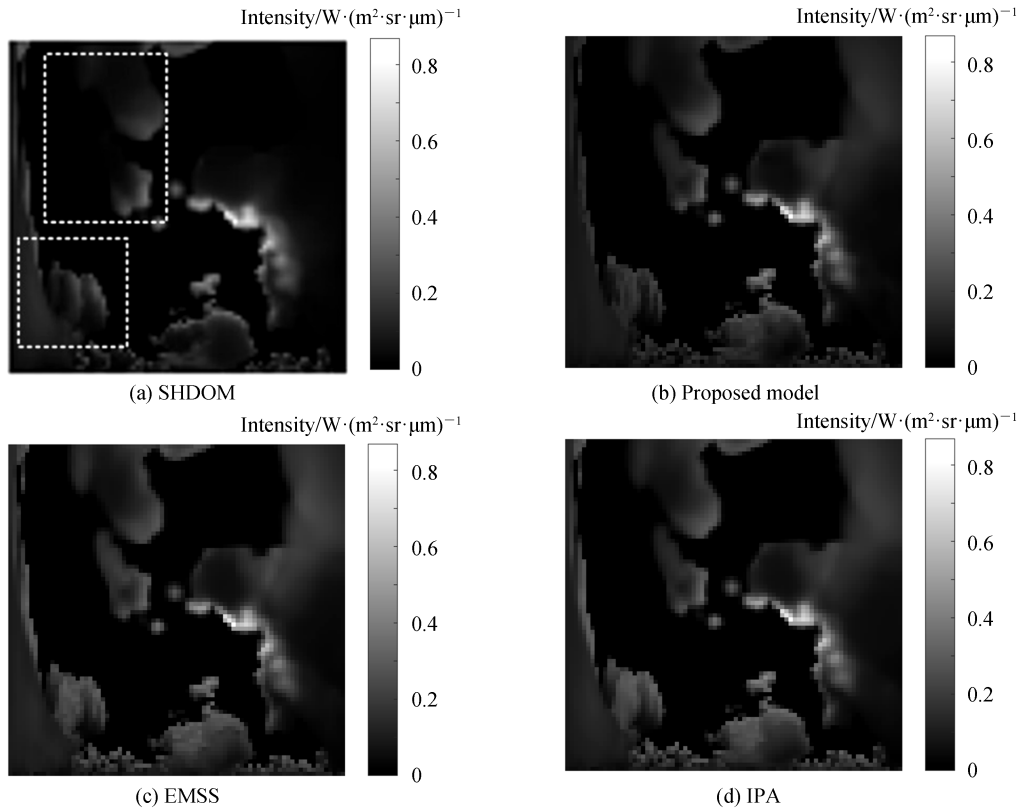


图7 太阳天顶角 $30^\circ$ 时从云下向上观测(D-2)的光谱辐射亮度仿真图像  
Fig.7 Spectral radiance image under observing condition D-2 at solar zenith angle  $30^\circ$

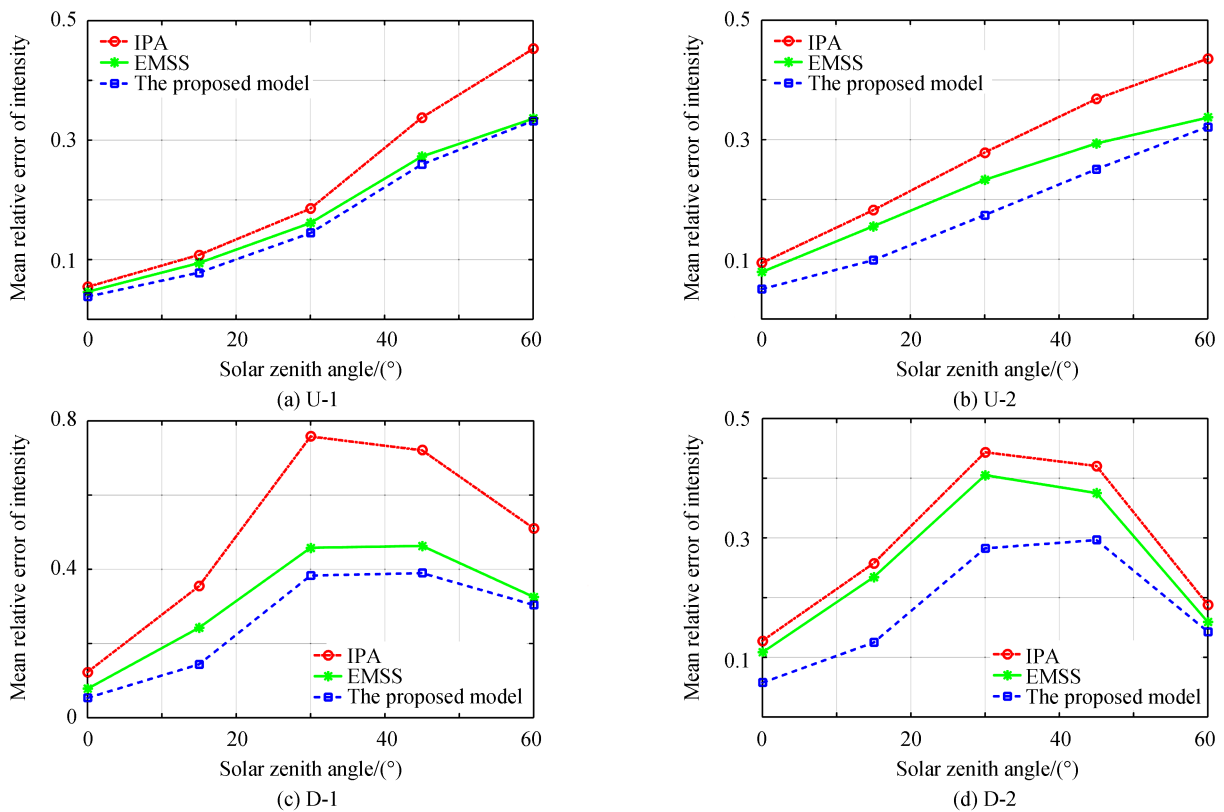


图8 不同太阳天顶角和观测条件下IPA、EMSS和本文模型的辐射亮度平均相对误差  
Fig.8 Mean relative errors of intensity for IPA, EMSS and the proposed model under different solar zenith angles and observing conditions

### 3 结论

本文提出了基于有限邻域辐射传输的三维云层多次散射近似模型,通过水平辐射通量密度变化方程和辐射通量密度补偿函数,计算水平邻域和垂直邻域产生的辐射交换效应.实验表明:同IPA和EMSS相比,本文模型在计算准确性方面具有明显优势,对上行和下行辐射源函数的精度提升最高可达47.39%和33.93%,辐射亮度计算精度优于40%,能更好地适应不同光照和观测条件;在多次散射计算效率方面,SH-DOM在不同太阳天顶角下需迭代计算35~56次,本文模型计算时间仅为单次散射的2~3倍,计算效率可提高大约18倍.本文模型可作为高分辨率遥感应用中,快速求解三维云层辐射传输的有效方法,也可为进一步研究非均匀介质中的辐射传输问题提供参考.

#### 参考文献

- [1] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, *et al.* Climate change 2013: The physical science basis[R]. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: 593.
- [2] SASSEN K, WANG Z. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **34**(4): L04805.
- [3] SCHÄFER S A K, HOGAN R J, KLINGER C, *et al.* Representing 3-D cloud radiation effects in two-stream schemes: 1. Longwave considerations and effective cloud edge length[J]. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres*, 2016, **121**(14): 8567–8582.
- [4] 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.
- [5] GORYACHEV B V, GRIGORIEV G Y, AVERKIEV A A. Influence of radiation interaction of clouds on fluxes of radiation in the atmosphere[C]. Proceedings of the SPIE, United States: SPIE, 2018: 108330F-1.
- [6] ZHANG Chao, WANG Zhen, YANG Jun, *et al.* A numerical study of radiative heating rate in the three-dimensional cloudy atmosphere: Adjacent-cloud-induced radiative effect[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(4): 598–612.  
章超, 王震, 杨军, 等. 三维有云大气辐射变温率数值模拟研究——邻云辐射效应[J]. *气象学报*, 2016, **74**(4): 598–612.
- [7] 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.
- [8] JONES A L. Development of an accurate 3d monte carlo broadband atmospheric radiative transfer model[D]. Urbana-Champaign: Atmospheric Sciences in the Graduate College, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016: 24–28.
- [9] MUKAI S, YOKOMAE T, SANO I, *et al.* Multiple scattering in a dense aerosol atmosphere [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2012, **5**(1): 881–907.
- [10] GAO M, HUANG X, YANG P, *et al.* Angular distribution of diffuse reflectance from incoherent multiple scattering in turbid media[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(24): 5869–5879.
- [11] BELLISARIO C, MALHERBE C, SCHWEITZER C, *et al.* Development of an atmospheric infrared radiation model with high clouds for target detection[C]. Proceedings of the SPIE, United States: SPIE, 2016: 99970R.
- [12] TONG Guang-de, WANG Zhan-shan, SHEN Zheng-xiang, *et al.* Laser multiple scattering simulation for fog with closed distance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8): 0829001.  
童广德, 王占山, 沈正祥, 等. 近距离雾的激光多次散射模拟[J]. *光子学报*, 2017, **46**(8): 0829001.
- [13] SALIM M, TAN S, TSANG L. Multiple scattering solution of radiative transfer equations of active and passive configuration for forests applications [C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), United States: IEEE, 2019: 1–3.
- [14] ZDUNKOWSKI W, TRAUTMANN T, BOTT A. Radiation in the atmosphere — A course in theoretical meteorology [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007: 32–34.
- [15] VÁRNAI T, DAVIES R. Effects of cloud heterogeneities on shortwave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, **56**(24): 4206–4224.
- [16] CAO Yan-an, WEI He-li, XU Qing-shan, *et al.* Simulation of atmospheric radiative properties at IR bands under water clouds based on MODIS data[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0601001.  
曹亚楠, 魏合理, 徐青山, 等. 利用MODIS资料模拟计算水云大气红外辐射特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0601001.
- [17] LUO Shuang, YIN Qiu. Comparison and analysis of scattering phase-function truncation approximations in radiative transfer calculation[J]. *Acta Optica Sinica*. 2017, **37**(2): 0229002.  
罗双, 尹球. 辐射传输计算中散射相函数截断近似方法对比分析[J]. *光学学报*, 2017, **37**(2): 0229002.
- [18] 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.
- [19] KOREN I, OREOPOULOS L, FEINGOLD G, *et al.* How small is a small cloud? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(14): 3855-3864.
- [20] IRVINE W M. Multiple scattering by large particles. II. Optically thick layers [J]. *Astrophysical Journal*, 1968, **152**: 823-834.
- [21] BOHREN C F, CLOTHIAUX E E. Fundamentals of atmospheric radiation: An introduction with 400 problems [M]. Germany: Wiley-VCH, 2006: 258-268.
- [22] NIU Xiao-lei, PINKER R T. Revisiting satellite radiative flux computations at the top of the atmosphere [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(5): 1383 - 1399.
- [23] 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.
- [24] LIOU K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. United States: Academic Press, 2002: 27-33.
- [25] HINKELMAN L M, STEVENS B, EVANS K F. A large-eddy simulation study of anisotropy in fair-weather cumulus cloud fields [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62**(7): 2155-2171.
- [26] EWALD F. Retrieval of vertical profiles of cloud droplet effective radius using solar reflectance from cloud sides [D]. Munich: Faculty of Physics, Ludwig - Maximilians - University Munich, 2016: 26-30.
- [27] NIANG A, BADRAN F, MOULIN C, *et al.* Retrieval of aerosol type and optical thickness over the Mediterranean from SeaWiFS images using an automatic neural classification method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **100**(1): 82-94.
- [28] WANG Ying-jie, GRIMALDI J, LANDIER L, *et al.* Introduction of clouds in DART model [C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020 XXIV ISPRS Congress (2020 edition), France: ISPRS, 2020: 843-848.