

含云大气单次散射参量极大相关 k 分布优选算法

张寅, 张少帅, 颜灏, 范亦唯, 朱桂熠, 闫钧华*

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

摘要 针对高精度遥感应用中含云大气波段辐射传输计算成本较高的问题, 提出单次散射参量极大相关 k 分布优选算法 (SSP-MCKD)。通过分析不同环境条件下含云大气消光系数、单次反照率和不对称因子等参量在光谱分布上的相关性, 将 CKD 理论从单一吸收系数扩展至多种光谱参量。根据对单次散射源函数的影响程度, 优选各条谱线的极大相关光谱参量并进行分组重排, 在组间和组内求解平均等效参量和求积权重。实验结果表明: 与 $\Delta \log k$ 算法和云层属性参数化的相关 k 分布算法相比, SSP-MCKD 适用于吸收、半吸收和透过等各类波段, 收敛速度最快; 在不同高度云层场景中, 辐射亮度平均误差低于 2%; 在不同类型云层场景中, 辐射亮度平均误差低于 6%。SSP-MCKD 在适用性、稳定性及计算精度方面均具有明显优势。

关键词 遥感; 含云大气; 波段辐射传输; 相关 k 分布; 单次散射源函数; 极大相关参量

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222030

1 引言

云对大气中光的传播具有巨大的影响, 云污染容易造成遥感卫星观测精度下降和大量观测信息损失^[1]。随着大气遥感科学的发展^[2-3], 含云大气的波段辐射传输 (BRT) 模型变得更加重要, 广泛应用于气候变化研究、环境监测、天气预报等领域^[4-5]。由于大气本身的非灰性, 如何高效、准确地一定波段范围内进行光谱辐射积分成为 BRT 计算的难点。

目前, 公认最精确的 BRT 计算方式是逐线 (LBL) 模式, 该模式将辐射波段划分为大量接近单色的窄带区间并进行离散求和^[6], 区间划分越细计算精度越高。但 LBL 过高的计算成本制约了其使用范围^[7-8], 通常作为其他 BRT 计算模型的验证标准^[9]。近年来, 相关 k 分布 (CKD) 方法在 BRT 计算方面得到了长足发展。该方法将积分域由气体吸收谱线剧烈波动的波数空间转换为平滑的累计概率密度空间, 选取少量求积点实现快速计算, 相比其他方法, 具有较好的精度与速度平衡, 在气体辐射计算^[10-13]、数值天气预报^[14]和气候模式研究^[15-16]等领域均取得了较好的成效。

然而, 绝大多数 CKD 方法在处理含云大气 BRT 计算时往往只对大气光谱进行求积参数优化, 采用波段平均的方式处理云层光学属性 (COPs), 忽略了 COP 本身的光谱分布的影响。当 COP 在波数空间内变化较大时, 这种处理方式将带来较大误差, 在计算热

加速率时误差可高达 60%^[17-18]。卢鹏^[19]分析了气体吸收和云层吸收间的相互作用, 指出气体和云层存在重叠吸收问题, 通常较强的水汽吸收会掩盖云层吸收。基于此, 提出一种适用于水云的 COP 参数化方法^[20], 在气体强吸收波段下, 该方法效果优异, 但无法有效处理透过波段或半透过波段。本文针对近红外与短波红外遥感应用中云层 BRT 计算问题, 提出单次散射参量极大相关 k 分布优选算法 (SSP-MCKD), 该算法在同等计算量的条件下有效提升了计算精度。

2 含云大气单次散射参量极大相关 k 分布优选算法

2.1 方法原理

在 CKD 理论^[21]中, 气体光谱辐射亮度在波数空间内与吸收系数强相关, 而与温度、气压等外部条件弱相关, 因此波段 $\Delta\nu$ 内的平均辐射亮度 L 可表示为

$$L = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} L[k(\nu)] d\nu = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} L[f(k)] dk = \int_0^1 L[k(g)] dg, \quad (1)$$

式中: $f(k)$ 为吸收系数 $k(\nu)$ 的概率分布函数; k_{\max} 和 k_{\min} 分别为 $k(\nu)$ 在波段区间内的最大值和最小值; $k(g)$ 是 k 在累计概率密度 g 空间上的分布函数, 可通过对累计概率密度分布函数 $g(x)$ 求逆得到。

对 CKD 理论进行扩展, 若大气光谱辐射亮度在波

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-01-19; 录用日期: 2023-02-07; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国防科技基础加强计划 (2021-JCJQ-JJ-0834)、国家自然科学基金 (61705104)

通信作者: *yjh9758@126.com

数空间内仅与某一光谱参量 x (消光系数、单次反照率、不对称因子、太阳辐射通量密度等) 强相关, 且 x 与高度、位置等条件弱相关, 此时波段 Δv 内的 L 可以表示为

$$L = \frac{1}{\Delta v} \int_{\Delta v} L[x(v)] dv = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} L[f(x)] dx = \int_0^1 L[x(g)] dg. \quad (2)$$

由于 $x(g)$ 具有单调递增特性, 可将 g 空间划分为多个区间, 利用离散求和运算实现波段内光谱辐射积分, 表达式为

$$L \approx \sum_{q=1}^Q L(\bar{x}'_q) w_q, \quad (3)$$

式中: Q 为 g 空间内的区间个数; \bar{x}'_q 和 w_q 分别为第 q 个

区间的平均等效参量和求积权重。

以近红外和短波红外波段为例, 在温度 (T)、气压 (P)、云层粒子有效半径 (r_e) 和含水量 (w_c) 变化条件下, 如图 1 所示, 含云大气消光系数 (k_c)、含云大气单次散射反照率 (ω) 主要受到大气吸收系数的影响, 其相关性主要由大气吸收系数引起, 在波数空间内保持极强的分布相关性。含云大气不对称因子 (g_i)^[22] 的表达式为

$$g_i(v) = \frac{k_{cs}(v) \times g_c(v)}{k_{cs}(v) + k_{as}(v)}, \quad (4)$$

式中: k_{cs} 为云层散射系数; k_{as} 为大气散射系数; g_c 为云层不对称因子。由于 k_{as} 较小, g_i 与 g_c 的光谱分布曲线基本一致, g_i 在波数空间内仍然具有极强的分布相关性, 完全适用于扩展 CKD 理论。

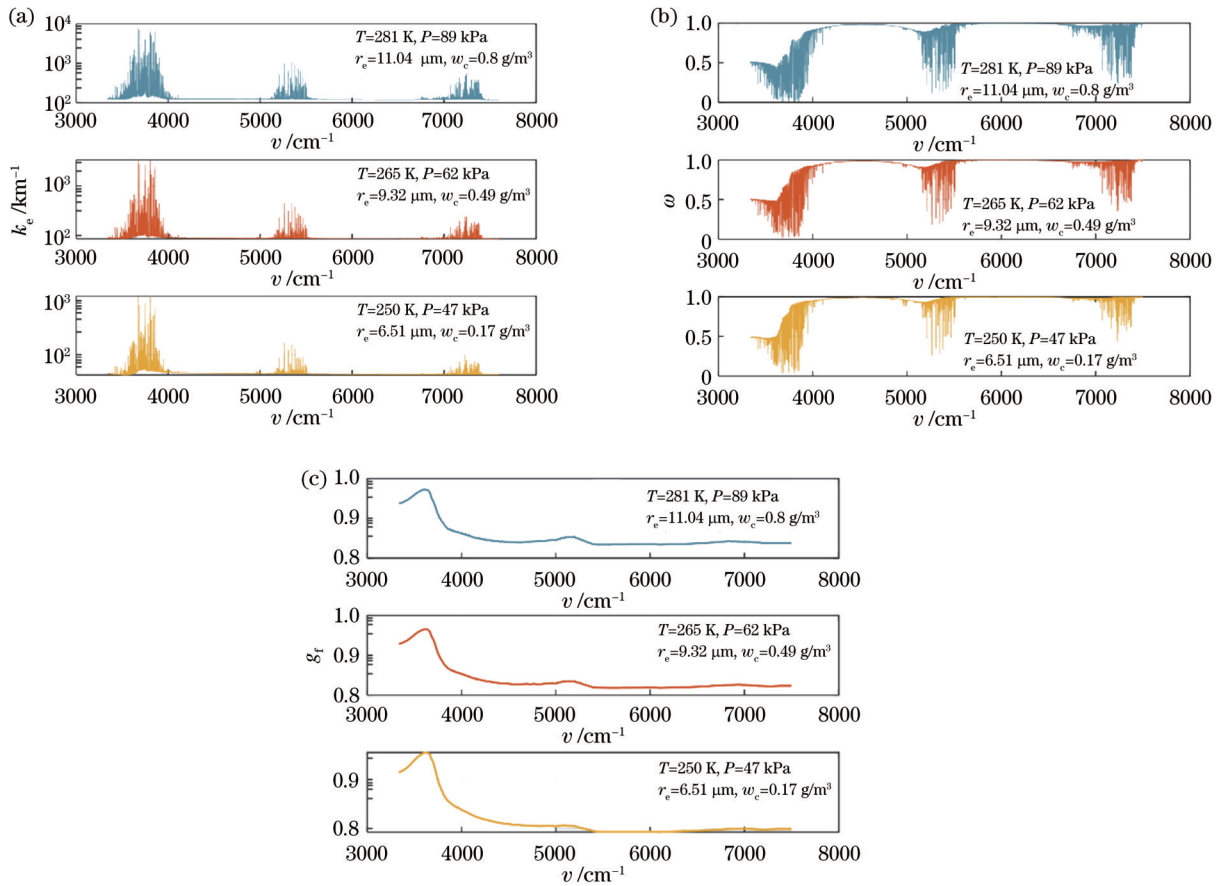


图 1 含云大气在不同温度、气压、粒子有效半径和含水量条件下的光谱参量分布曲线。(a) 含云大气消光系数; (b) 含云大气单次散射反照率; (c) 含云大气不对称因子

Fig. 1 Spectral parameter distribution curves of a cloudy atmosphere under different temperatures, atmospheric pressures, particle effective radii, and water contents. (a) Cloudy atmosphere extinction coefficient; (b) cloudy atmosphere single-scattering albedo; (c) cloudy atmosphere asymmetry factor

在给定的波段内, 含云大气可能同时包含以大气吸收为主的吸收谱线以及云层散射作用较强的谱线, 此时光谱辐射亮度在不同波数下与不同光谱参量 x 强相关。对波段内不同强相关参量谱线进行分组, 若分组数为 M , L 可进一步表示为

$$L = \sum_{m=1}^M \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} L[x_m(g_m)] dg_m \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{Q_m} L(\bar{x}'_{m,n}) w'_{m,n} w_m, \quad (5)$$

式中: $\bar{x}'_{m,n}$ 和 $w'_{m,n}$ 分别为第 m 组第 n 个区间内的平均等效参量和求积权重。

2.2 基于单次散射源函数的极大相关参量确定

在近红外到短波红外遥感波段, 单次散射是太阳辐射经传输衰减后在云层处发生的直接散射。同时根据逐次散射原理, 单次散射也是多次散射的产生来源, 能够较好地反映云层辐射传输过程中的吸收和散射作用。因此, 分析不同光谱参量对单次散射源函数(SSF)的影响, 能极大程度表征其对辐射亮度的影响。SSF 可表示为

$$J_{SS}(z, \Omega, \nu) = \frac{\omega(z, \nu)}{4\pi} F_{TOA}(\nu) \times \exp\left[-\int_z^{z_{TOA}} k_c(z', \nu) dz'\right] P(z; \Omega, \Omega'_0; \nu), \quad (6)$$

式中: $J_{SS}(z, \Omega, \nu)$ 为波数 ν 上高度 z 处沿 Ω 方向的 SSF; F_{TOA} 为到达大气层顶部(TOA)的太阳辐射通量密度。 $P(z; \Omega, \Omega'_0; \nu)$ 为波数 ν 上由太阳入射方向 Ω'_0 到辐射出射方向 Ω 的散射相函数, 可根据 Henyey-

Greenstein(H-G)散射相函数方案^[23], 由含云大气不对称因子 g_f 近似表示, 表达式为

$$P(z, \cos \Theta, \nu) = \frac{1 - g_f^2(z, \nu)}{\left[1 + g_f^2(z, \nu) - 2g_f(z, \nu) \times \cos \Theta\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (7)$$

式中: Θ 为散射角度, 是方向 Ω'_0 和方向 Ω 间的夹角。

根据式(6)和式(7), 在波数空间内直接影响 SSF 的光谱参量包括 F_{TOA} 、 k_c 、 ω 和 g_f 。其中, k_c 的性质主要受到大气吸收系数的影响, 其大小顺序与大气吸收系数的顺序基本一致, 由于处于积分号内, 会同时影响当前层以及低于这层单次散射源函数的计算结果。如图 2 所示, ω 的轮廓由 COP 决定, 细节由大气吸收系数决定, 而含云大气散射系数主要由云层散射系数决定, 相比含云大气散射系数, ω 更能综合考虑云层性质和大气性质的变化。

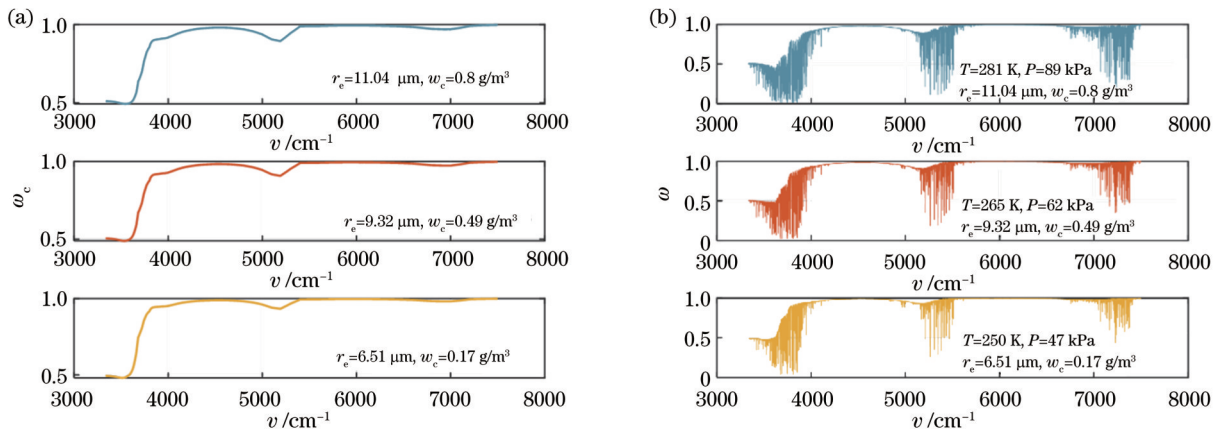


图 2 单次散射反照率的光谱分布曲线。(a) 云层单次散射反照率; (b) 含云大气单次散射反照率

Fig. 2 Spectral distribution curves of single-scattering albedo. (a) Cloud single-scattering albedo; (b) cloudy atmosphere single-scattering albedo

为后续表述方便, 用 x_1 到 x_4 分别代表 F_{TOA} 、 k_c 、 ω 和 g_f 这 4 个参量, 并构建参量集合 $Y_\nu = \{x_1(\nu), x_2(\nu), x_3(\nu), x_4(\nu)\}$ 。为了衡量给定波段内各

参量 x_i 对 SSF 的影响程度, 引入平均单次散射差函数 $\Delta \bar{J}_{SS,i}(\nu)$ 进行评估:

$$\Delta \bar{J}_{SS,i}(\nu) = \sqrt{\frac{1}{N_S N_L} \sum_{s=1}^{N_S} \sum_{l=1}^{N_L} \left[J_{SS}(z_l, \Theta_s, Y_\nu) - J_{SS}(z_l, \Theta_s, Y_{\nu,i}) \right]^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (8)$$

式中: N_L 为含云区域划分总层数; N_S 为散射角 Θ 离散个数; $Y_{\nu,i}$ 表示集合 Y_ν 中的第 i 个光谱参量值 $x_i(\nu)$ 由该参量的波段平均值 \bar{x}_i 替换而生成的参量集合, 例如 $Y_{\nu,3} = \{x_1(\nu), x_2(\nu), \bar{x}_3, x_4(\nu)\}$ 。

式(8)中, $\Delta \bar{J}_{SS,i}(\nu)$ 值越大, 相应的 $x_i(\nu)$ 对辐射亮度 $L(\nu)$ 的影响就越大。遍历 $i=1, 2, 3, 4$, 最大 $\Delta \bar{J}_{SS,i}(\nu)$ 对应的 x_i 即为波数 ν 的极大相关参量。将具有相同极大相关参量的谱线划分至同一组内, 分组方法如图 3 所示。图 3 中波数 ν_1 与波数 ν_3 的极大相关参

量均为 x_1 , 将其划分至极大相关参量组 1 中; 波数 ν_2 的极大相关参量为 x_4 , 将其划分至极大相关参量组 M 中, M 为给定波段极大相关参量的种类数量。由于仅考虑了对单次散射源函数影响较大的 4 种光谱参量, 极大相关参量分组最多为 $M=4$ 组。

地表反照率同样是大气辐射传输模型中的重要参量^[24], 但本文主要面向遥感应应用中的云层 BRT 计算, 更加关心大气顶部的上行辐射。在绝大部分含云场景中, 地表贡献的辐射经过云层大气会大幅衰减, 在大气层顶部上行辐射中占比很低, 影响十分有限。

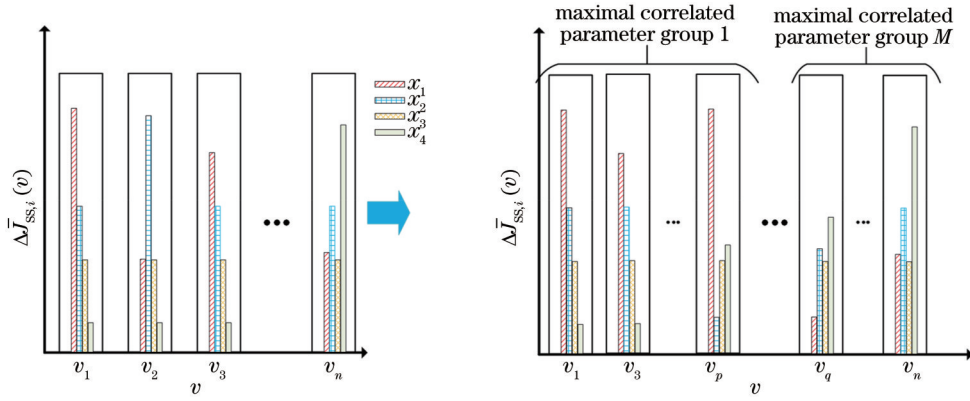


图3 极大相关参量分组方法示意图

Fig. 3 Schematic of the maximal correlated parameter grouping method

由 MODTRAN 软件计算得到的大气顶部短波红外与近红外波段地表辐射占总上行辐射的比例情况如表 1 所示。大气模型选择 1976 年美国无气溶胶模型；观测高度设置为 100 km，观测天顶角为 180°，太阳天顶角为 0°；波数设置为 3000~13000 cm⁻¹；地表温度为 300 K，地表反照率为 0.8。云层类型包括高层云 (As)、雨层云 (Ns)、层积云 (Sc)。从表 1 可以看出，当

云层光学厚度大于 2.12 时，地表波段辐射与总波段辐射相差 1 个数量级以上。通过对 ISCCP (<https://isccp.giss.nasa.gov/products/browsed2.html>) 提供的云数据进行分析，可以得到 1983—2009 年全球云层光学厚度的平均值为 4.3，其中 94.8% 区域的平均云层光学厚度大于 2.12。因此，为使所提算法效率更高和更具通用性，对地表反照率影响进行了忽略。

表 1 可见光与近红外波段地表辐射占总上行辐射的比例

Table 1 Visible and near-infrared surface radiation accounted for the proportion of total upward radiation

Cloud type	Base /km	Top /km	Cloud extinction coefficient /km ⁻¹	Optical thickness	Proportion
As	2.400	3.000	128.1	76.9	5.4 × 10 ⁻³⁵
Ns	0.160	0.660	92.6	46.3	2.6 × 10 ⁻²¹
Sc	0.660	1.000	38.7	13.2	9.5 × 10 ⁻⁷
Sc	0.660	0.860	38.7	7.74	2.7 × 10 ⁻⁴
Sc	0.660	0.760	38.7	3.87	1.6 × 10 ⁻²
Sc	0.660	0.715	38.7	2.12	1.0 × 10 ⁻¹

2.3 极大相关参量区间数量及求积参数求解

根据式(5)，确定波段内极大相关参量分组后，需要计算各组内的求积区间数量、权重及平均等效参量。若给定波段内的总谱线数目为 N_v，总求积区间个数为 Q；第 m 组极大相关参量组包含的谱线数目为 N_m，求积区间数目为 Q_m；均匀划分第 m 组内的求积区间数量应为 Q_m = N_mQ/N_v。实际为了保证 Q_m 取整数，同时考虑各组内谱线数量在总体中的占比，采用以下策略。

1) 当第 m 组内谱线数 N_m 占比非最大时，有

$$Q_m = \begin{cases} \left[\frac{N_m Q}{N_v} \right], & \frac{N_m Q}{N_v} \geq 0.5 \\ 1, & 0.1 < \frac{N_m Q}{N_v} < 0.5, \\ 0, & \frac{N_m Q}{N_v} \leq 0.1 \end{cases} \quad (9)$$

式中：[·] 为四舍五入操作。

2) 当第 m 组内谱线数 N_m 占比最大时，有

$$Q_m = Q - \sum_{i \neq m} Q_i, \quad (10)$$

若计算出的 Q_m 小于 1，则对所有极大相关参量组按组内谱线数从大到小排序，令前 Q 组的求积区间数量为 1，其余组的求积区间数量为 0。

3) 当 Q_m 为 0 且该组内谱线数 N_m 非零时，则将该组内的谱线按照次极大相关参量合并至其他同参量极大相关组内，并重复步骤 1) 和步骤 2)。

假设有 3 组极大相关参量组，波数的数量分别为 200、1、300，总区间数目为 5，如图 4 所示，经过步骤 1) 和步骤 2) 后，可以求出 3 组各自的求积区间数分别为 2、0、3。按照步骤 3)，将第 2 组包含的波数按照次极大相关参量合并至第 3 个极大相关参量组内，重新计算可以得到最终求积区间分配结果，第 1 组和第 2 组的求积区间数为 2 和 3。

第 m 组极大相关参量组积分权重 w_m 可根据最终组内谱线数计算得到：

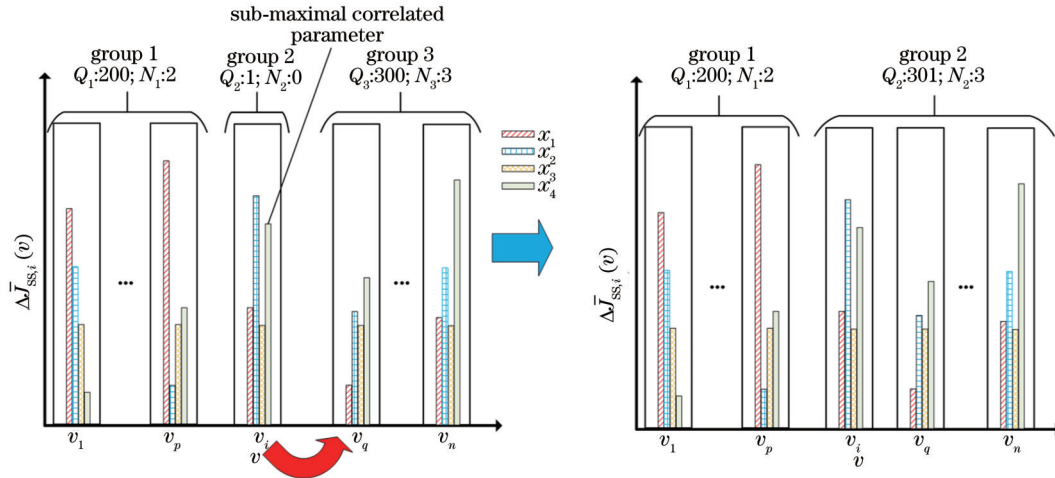


图 4 各组求积区间数量求解示意图

Fig. 4 Schematic of solving number of quadrature intervals in each group

$$w_m = \frac{N_m}{N_v}, m = 1, 2, \dots, M. \quad (11)$$

确定各极大相关参量组区间数量 Q_m 和积分权重 w_m 后, 需要求解组内各区间求积权重 $w'_{m,n}, n = 1, 2, \dots, Q_m$ 及对应的平均等效参量 $\bar{k}'_{e,m,n}, \bar{\omega}'_{m,n}, \bar{g}'_{t,m,n}$ 和 $\bar{F}'_{\text{TOA},m,n}$ 。根据各组极大相关参量的不同, 求解方法可分为 2 类。

当第 m 组的极大相关参量为 ω, g_t 或 F_{TOA} 时, 如图 5 所示, 根据该参量在含云大气区域平均值 \bar{x}_i 的大小次序, 对谱线位置进行重排并将结果转换至累积概率密度 g 空间^[25]。依据 \bar{x}_i 的变化范围, 将 g 空间均匀划分为 Q_m 个区间, 计算各区间求积权重 $w'_{m,n}$; 利用谱带平均法^[20] 计算平均等效参量 $\bar{\omega}'_{m,n}, \bar{g}'_{t,m,n}$ 和 $\bar{F}'_{\text{TOA},m,n}$; 利用 $\Delta \log k$ 法^[26] 计算区间内平均等效消光系数 $\bar{k}'_{e,m,n}$ 。它们的公式分别为

$$w'_{m,n} = \frac{N_{m,n}}{N_m}, \quad (12)$$

$$\bar{\omega}'_{m,n} = \frac{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} \omega(v_a) k_e(v_a) F_c(v_a)}{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} k_e(v_a) F_c(v_a)}, \quad (13)$$

$$\bar{g}'_{t,m,n} = \frac{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} \omega(v_a) k_e(v_a) F_c(v_a) g_t(v_a)}{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} \omega(v_a) k_e(v_a) F_c(v_a)}, \quad (14)$$

$$\bar{F}'_{\text{TOA},m,n} = \frac{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} F_{\text{TOA}}(v_a)}{N_{m,n}}, \quad (15)$$

$$\bar{k}'_{e,m,n} = \exp \left\{ \frac{\sum_{a=1}^{N_{m,n}} \ln[k_e(v_a)]}{N_{m,n}} \right\}, \quad (16)$$

式中: $N_{m,n}$ 为第 m 组第 n 个区间内的谱线数; F_c 为大气气压为 50 kPa 处的太阳辐射通量密度。

当第 m 组的极大相关参量为 k_e 时, 考虑到通常情况下消光系数值在组内可能会跨越数个量级, 一般取对数后再转换到 g 空间, 采用 $\Delta \log k$ 法计算求积权重。含云大气的消光系数包含云层和大气两部分, 其中云

层消光系数具有灰体特征, 在波数空间内变化平缓。当谱段内云层消光占比较大时, 含云大气消光系数产生数量级断层, 如图 6(a) 所示。直接采用 $\Delta \log k$ 法会导致区间权重失衡, 如图 6(b) 所示, 此时区间 1 所占权重过大, 而区间 2 与区间 3 权重过低, 极大影响了波段辐射亮度计算精度。因此, 需要对含云大气平均消光系数 $\bar{k}_e(v)$ 的量级变化进行放大处理, 表达式为

$$\bar{k}_{es}(v) = \bar{k}_e(v) - \min[\bar{k}_e(v)], \quad (17)$$

式中: \bar{k}_e 为云层平均消光系数。放大处理后的结果如图 6(c) 所示, 此时再使用 $\Delta \log k$ 法确定组内各区间积分权重 $w'_{m,n}$, 如图 6(d) 所示。当谱段内大气吸收作用均占据主导地位时, 仍然可以使用式 (17) 进行优化处理, 使 $w'_{m,n}$ 结果更加均衡。各区间内的平均等效参量值由式 (13)~(16) 确定。

本文面向遥感应应用中的云层 BRT 计算, 选取了 $F_{\text{TOA}}, k_e, \omega$ 和 g_t 4 种参量, 忽略其他影响较小的光谱参量。如果将算法扩展至其他辐射计算应用中, 需要根据具体分析, 考虑是否在集合 Y_v 中引入其他重要光谱参量。此时在极大相关参量确定与分组以及平均等效参量计算中, 计算量随着光谱参量种类的增加而线性增加, 但是并不会增加后续的辐射传输计算成本, 仍然具有较大的计算效率优势。

3 实验与分析

构建平行平面含云大气场景, 分析与验证 SSP-MCKD 的性能, 实验采用美国标准大气, 云层采用 I3RC Phase II 提供的淡积云 (Cu) 数据 (<https://i3rc.gsfc.nasa.gov/>), 具体参数如表 2 所示。云层消光系数、单次散射反照率、散射相函数等参量根据文献 [27] 中的公式进行计算, 可认为水云的光学性质仅依赖于含水量分布和粒子有效半径。散射相函数使用米氏散射计算, 并使用 H-G 散射相函数方案近似替代^[23]。气

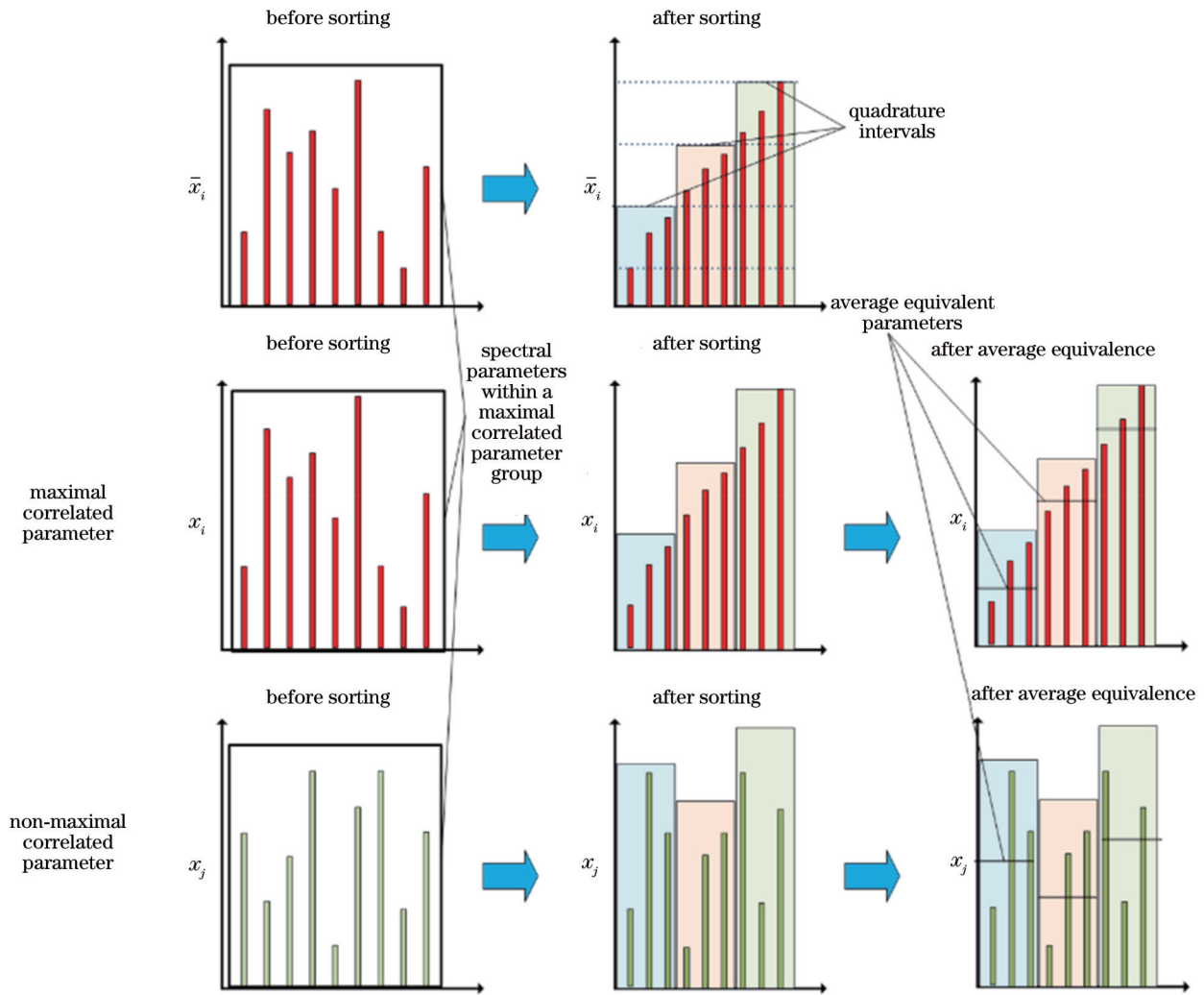


图 5 光谱参量的重排和平均等效参量的求解示意图

Fig. 5 Schematic of the rearrangement of spectral parameters and the solution of average equivalent parameters

体的光谱吸收数据由逐线辐射传输模型 RFM(<http://www.atm.ox.ac.uk/RFM/>)生成,对于多气体混合情况,将其处理为“单一气体”^[20,28]。

本文采用 SHDOMPP 作为辐射传输求解器^[29],以

谱线宽度为 0.5 cm^{-1} 的 LBL 计算结果作为参考标准解,选择云层属性参数化 CKD 算法 (PCOP-CKD)^[20] 和广泛应用的算法 $\Delta \log k$ ^[26] 作为对比算法。

以不同天基相机观测角度下的波段辐射亮度的平

表 2 含云大气场景参数

Table 2 Parameters of the cloudy atmosphere scene

Parameter	Content
Atmospheric model	1976 U. S. standard atmosphere
Atmospheric altitude range/km	0-100
Absorber	H ₂ O, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, O ₃ , CO, N ₂ , O ₂
Scattering phase function model	H-G model
Ground temperature /K	288
Ground albedo	0.03
Cloud type	Cu
Altitude range of cloud /km	4.02-5.22
Vertical resolution /km	0.04
Average liquid water content of cloud /($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.16
Average particle effective radius of cloud / μm	6.10

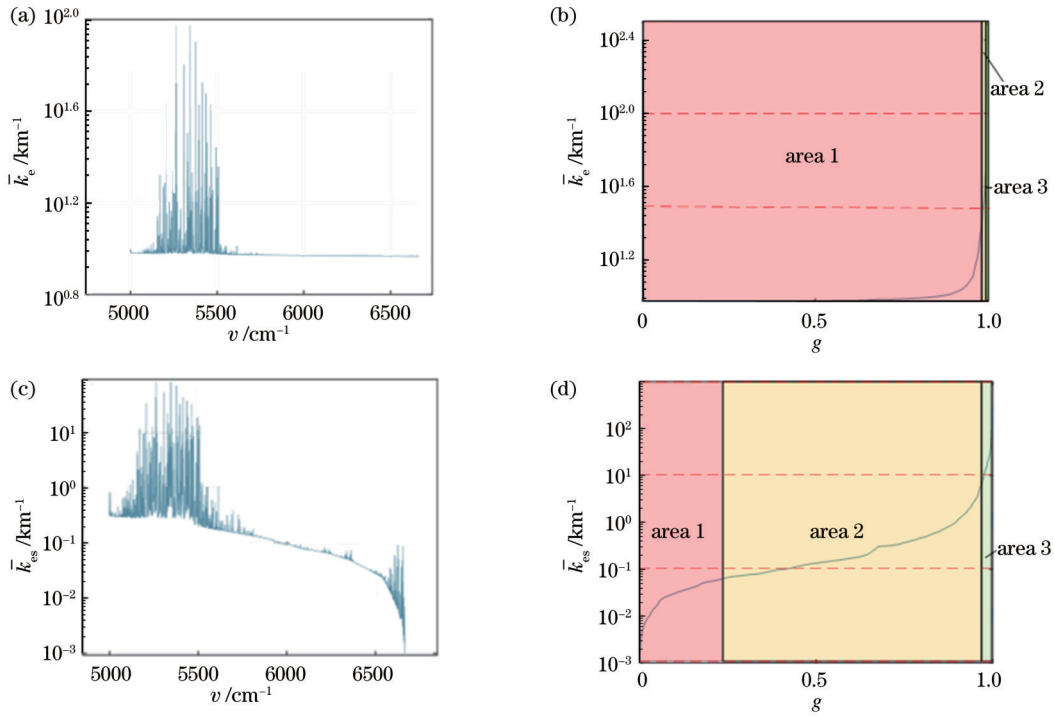


图 6 含云区域平均消光系数和处理后的平均消光系数示意图。(a)含云区域平均消光系数光谱分布;(b) g 空间下含云区域平均消光系数;(c)处理后的含云区域平均消光系数;(d) g 空间下处理后的平均消光系数

Fig. 6 Schematic of average extinction coefficient and processed average extinction coefficient in cloudy areas. (a) Spectral distribution of cloudy average extinction coefficient; (b) cloudy average extinction coefficient in g space; (c) cloudy average extinction coefficient after scaling; (d) average extinction coefficient after scaling in g space

均相对误差(MRE)衡量所提算法在遥感应应用中的计算精度。波段辐射亮度的MRE的表达式为

$$E_L = \frac{\sum_{d=1}^{N_{\psi,\theta}} \left| \bar{L}_{\text{LBL}}(\psi, \theta) - \bar{L}_{\text{CKD}}(\psi, \theta) \right|}{N_{\psi,\theta} \bar{L}_{\text{LBL}}(\psi, \theta)}, \quad (18)$$

式中: ψ 为相机观测天顶角,实验中取 $0^\circ \sim 60^\circ$,间隔为 5° ; θ 为太阳天顶角,取 $0^\circ \sim 30^\circ$,间隔为 10° ; $N_{\psi,\theta}$ 为观测方向数目与太阳方向数目的乘积; \bar{L}_{LBL} 为LBL法计算得到的波段平均辐射亮度; \bar{L}_{CKD} 为各CKD法计算得到的波段平均辐射亮度。

3.1 波段及计算量变化实验

为衡量所提 SSP-MCKD 在不同波段条件下的适用情况,比较相同区间数量下不同 CKD 算法的计算精度。波段设置和星下点观测时对应的平均大气透过率如表 3 所示。其中, b1 波段气体吸收较弱; b2 为 $1.8 \mu\text{m}$ 附近的 H_2O 吸收带; b3 和 b4 为部分透过带。

图 7 给出了 $\Delta \log k$ 、PCOP-CKD 和所提 SSP-MCKD 在不同区间数量下的 MRE。可以看出:随着区间数量增加,3 种方法计算出的上行辐射亮度结果均逐渐收敛于 LBL 计算结果; $\Delta \log k$ 法主要考虑消光系数对波段辐射的影响,收敛曲线相对平稳,但当波段内消光系数并非辐射的极大相关参量时效果较差,如图 7(c) 所示; PCOP-CKD 中云层光谱属性随大气吸收谱线排序,确保了云层和大气的光谱一致性,但未将含

表 3 波段设置和对应的平均大气透过率

Table 3 Band setting and the corresponding average atmospheric transmittance

Band No.	Band range / μm	Wavenumber range / cm^{-1}	Average transmittance
b1	2.20-2.40	4165-4545	0.8847
b2	1.80-1.95	5125-5555	0.0293
b3	1.50-2.00	5000-6665	0.6537
b4	2.30-2.60	384-4350	0.4281

云大气视作一个整体,同时忽略了云层自身散射变化对辐射计算结果的重要影响,在区间数较少时,结果相对较好,但是当区间数增多时,收敛速度缓慢,难以满足高精度计算需求;所提 SSP-MCKD 综合考虑了含云大气消光系数和其他参量对波段辐射的影响情况,收敛速度最快,计算精度具有明显优势。

以 b3 波段为例,分析所提 SSP-MCKD 的内在运行机制。b3 波段内存在 2 个极大相关参量组 F_{TOA} 和 ω ,各自包含的谱线数量分别为 1628 和 1703。当求积区间数为 1 时, F_{TOA} 和 ω 组分到的区间数量分别为 0 和 1, F_{TOA} 组谱线被合并至 ω 组,计算误差较大;区间数为 2 时,如图 8 所示, F_{TOA} 和 ω 组区间数量均为 1,组间积分权重 w'_m 分别为 0.4887 和 0.5113。所提 SSP-MCKD 综合考虑了不同波数极大相关参量的影响,计算精度得到大幅提高。当区间数继续增大,极大相关

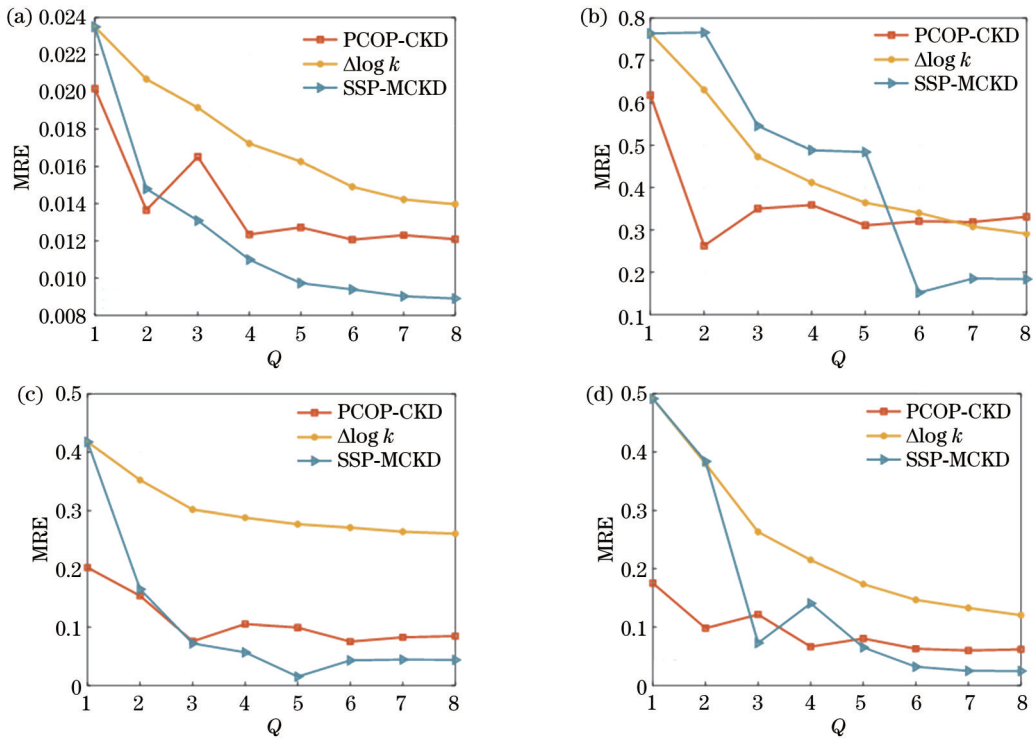


图 7 不同波段条件下不同 CKD 法在计算含云大气波段上行辐射亮度时, MRE 随区间数目增加的变化情况。(a) b1 波段; (b) b2 波段; (c) b3 波段; (d) b4 波段

Fig. 7 MRE changing with the increasing interval amount when calculating upwelling radiance for the cloudy atmosphere using different CKD methods. (a) Band b1; (b) band b2; (c) band b3; (d) band b4

参量组不再增加, 组间积分权重 ω'_m 保持不变, 精度提升速度趋于平缓。

当求积区间数等于 8 时, 组内区间数目及求积权重如表 4 所示。图 9 给出了各参量光谱分布、 g 空间分

布和区间内平均等效参量求解结果。当 g 小于 0.4887 时, 其余参量按照极大相关参量 F_{TOA} 排序结果进行光谱排序, 此时 F_{TOA} 曲线光滑, 其他参量曲线相对起伏; 当 g 位于 0.4887 到 1 范围内时, 其余参量按照 ω 排序结果进行光谱排序, 此时 ω 曲线光滑, 其他参量曲线较为起伏。

3.2 云层高度变化实验

大气气体吸收在垂直结构上随高度变化而变化, 在水平结构上相对均匀, 通常高云附近的气体吸收较弱, 低云附近的气体吸收更强^[30]。改变表 2 中的云层高度, 设计不同高度云层场景评估所提 SSP-MCKD 的应用效果。实验设计如表 5 所示, 其中波段选择表 3 中的 b3, 区间数量 Q 设置为 6。

表 6 给出了 3 种方法对不同高度云层的 MRE 计算结果。PCOP-CKD 将含云大气视作大气与云层两个部分, 对大气部分有着较为精确的等效结果, 在云层更低、气体吸收效果更强的场景 1 中相对较好。所提 SSP-MCKD 误差水平始终保持最低, 平均精度相较 $\Delta \log k$ 法提升 26.92 个百分点, 相较 PCOP-CKD 提升

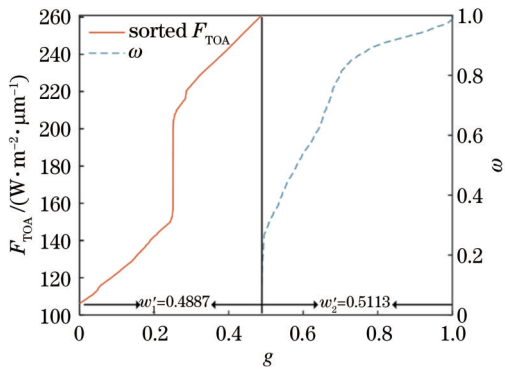


图 8 求积区间数量大于 2 时 b3 波段极大相关参量分组情况示意图

Fig. 8 Scheme of the maximal correlated parameter grouping situation in band b3 when number of the quadrature intervals is greater than two

表 4 求积区间数量为 8 时 b3 波段各组权重及组内求积权重

Table 4 Group and intra-group quadrature weights in band b3 at number of quadrature intervals equaling to eight

Group	Maximal correlated parameter	Integral weight between groups	Quadrature weight			
1	F_{TOA}	0.4887	0.4380	0.0756	0.0885	0.3980
2	ω	0.5113	0.0505	0.1756	0.1609	0.6130

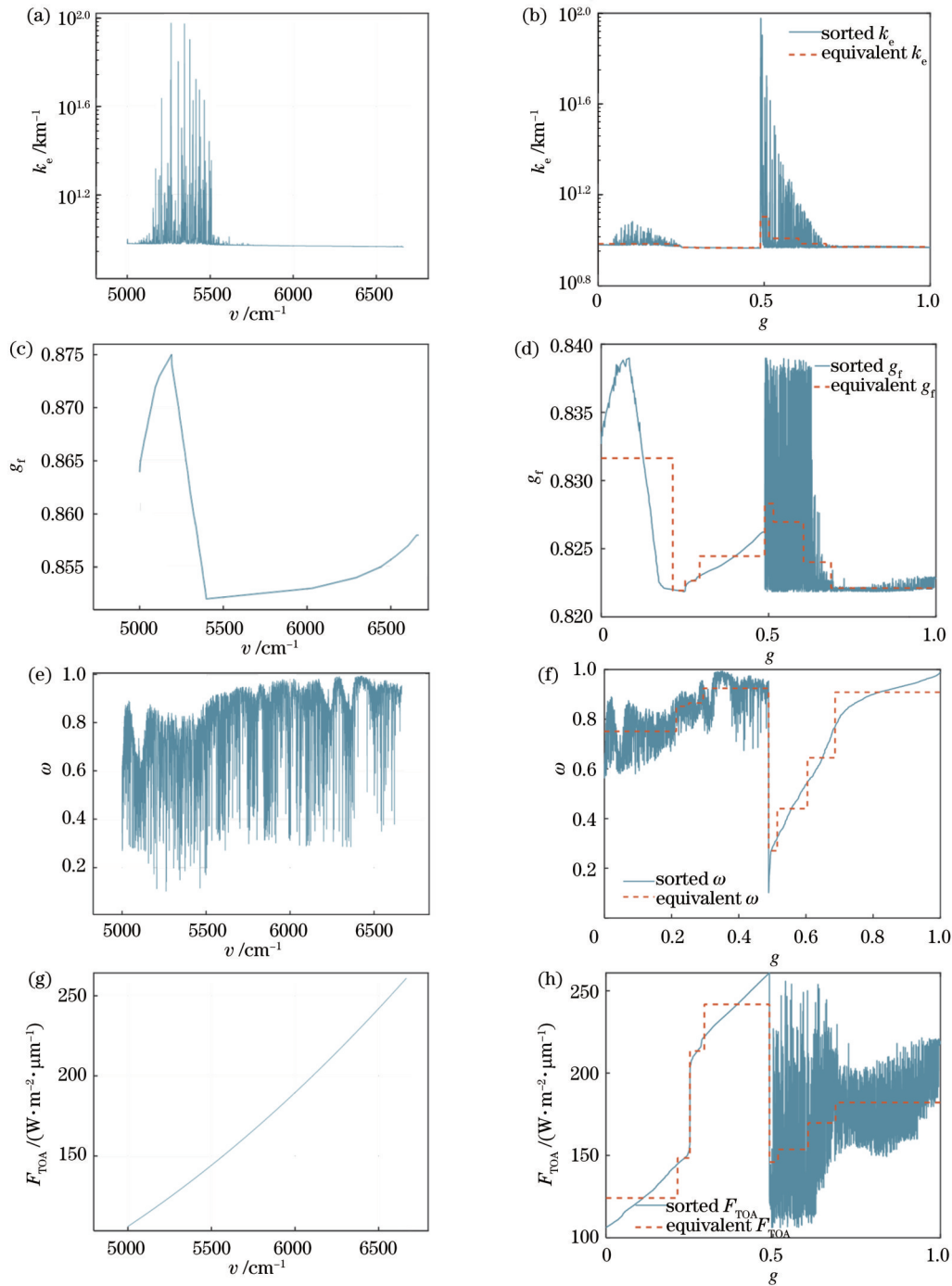


图9 求积区间数量为8时b3波段含云大气参量光谱分布曲线及各区间参量的重排和平均等效结果。(a)(b)消光系数;(c)(d)不对称因子;(e)(f)单次散射反照率;(g)(h)太阳辐射通量密度

Fig. 9 In band b3, spectrum distribution curves of parameters in a cloudy atmosphere, rearrangement of these parameters and average equivalent parameters in each interval when number of quadrature intervals is eight. (a)(b) Extinction coefficient; (c)(d) asymmetry factor; (e)(f) single-scattering albedo; (g)(h) solar flux density

表5 不同高度云层场景实验设计

Table 5 Experimental design of clouds at different heights

Scene No.	Band number	Altitude range of cloud /km
1		1.02—2.22
2	b3	4.02—5.22
3		9.02—10.22

5.63个百分点,适用于不同高度含云大气的波段辐射计算情况。

3.3 云层属性变化实验

云层散射特性主要由粒子有效半径和含水量决定^[27],为了验证所提SSP-MCKD在不同散射特性云层中的效果,增加基于实测修正的仿真层积云数据和高

表 6 不同方法在不同高度云层场景中计算得到的 MRE
Table 6 MRE calculated by different methods in cloud scenes at different altitudes

Scene No.	MRE of radiance / %		
	$\Delta \log k$	PCOP-CKD	SSP-MCKD
1	32.69	5.30	0.47
2	27.07	7.53	4.30
3	26.05	9.10	0.26
Average error	28.60	7.31	1.68

积云 (Ac) 数据^[31]。云层场景设计如表 7 所示, 同样选择 b3 波段, 求积区间数设置为 6。

表 7 在不同粒子有效半径和含水量条件下的云层场景实验设计
Table 7 Experimental design of cloud scenes with different particle effective radii and water content

Cloud scene	Scene No.	Average particle effective radius of cloud / μm	Average liquid water content of cloud / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Average cloud extinction coefficient / km^{-1}	Standard deviation of cloud extinction coefficient / km^{-1}
Cu	S1	6.10	0.16	45.38	21.75
	S2	12.42	0.23	30.27	14.32
Sc	S3	14.72	0.52	57.20	37.42
	S4	16.05	0.68	67.18	5.60
Ac	S5	13.72	0.36	42.64	11.53
	S6	15.52	0.50	52.02	13.32
	S7	16.02	0.58	58.37	17.46

表 8 不同方法在不同属性云层场景下计算得到的 MRE
Table 8 MRE calculated by different methods in cloud scenes with different optical properties

Scene No.	MRE of radiance / %		
	$\Delta \log k$	PCOP-CKD	SSP-MCKD
S1	27.07	7.53	4.30
S2	14.68	3.32	2.03
S3	31.23	18.32	13.67
S4	21.98	5.79	3.51
S5	16.32	6.86	1.54
S6	23.89	8.17	6.32
S7	27.75	11.96	7.44
Average error	23.27	8.85	5.54

4 结 论

所提 SSP-MCKD 能够有效应用于含云大气波段辐射传输计算方面, 在保证计算效率的同时提升计算精度。与 $\Delta \log k$ 法和 PCOP-CKD 相比, SSP-MCKD 在吸收、半吸收和透过波段均具有收敛优势; 在云层消光系数低于 45 km^{-1} 且垂直分布标准差低于 15 km^{-1} 的条件下, 计算精度较高; 在云层消光系数或者云层垂直非均性显著增大的情况下, 计算精度下降, 但相比同类算法, 依旧具有较明显的优势。所提 SSP-MCKD 中使

表 8 为不同类型云层的 MRE 计算结果。根据单次散射反照率与粒子有效半径的关系, 将光学厚度小于 15 的云层视作薄云, 大于 15 的云层视作厚云^[32]。S4 场景的光学厚度达到 80.16, 其大部分辐射来自于多次散射, 由于多次散射和单次散射具有较强的相关性, 所提 SSP-MCKD 在该场景下依旧具有较好的效果, MRE 为 3.51%。总体来看, 所提 SSP-MCKD 的平均误差为 5.54%, 计算精度相较 $\Delta \log k$ 法提升 17.73 个百分点, 相较 PCOP-CKD 提升 3.31 个百分点, 具有较明显优势。但在 S3 场景中, 由于云层粒子垂直分布起伏较大, 3 种方法的计算精度都有所下降, 所提 SSP-MCKD 的误差也高达 13.67%。

用的极大相关参量优选与分组思想具有一定的普适性, 可作为解决其他气体与粒子混合物波段辐射传输问题的参考手段。

参 考 文 献

- [1] 池果黎, 汪杰君, 李孟凡, 等. 云相机绝对辐射定标技术研究 [J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0612001.
Chi G J, Wang J J, Li M F, et al. Absolute radiometric calibration technique of cloud camera [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0612001.
- [2] 陈凡胜, 胡璋悦, 李潇雁, 等. 宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1210002.
Chen F S, Hu Z Y, Li X Y, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1210002.
- [3] 尚华哲, 胡斯勒图, 李明, 等. 基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云特性遥感 [J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600003.
Shang H Z, Husi L T, Li M, et al. Remote sensing of cloud properties based on visible-to-infrared channel observation from passive remote sensing satellites [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600003.
- [4] Hogan R J, Matricardi M. Evaluating and improving the treatment of gases in radiation schemes: the Correlated K-Distribution Model Intercomparison Project (CKDMIP) [J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(12): 6501-6521.
- [5] Zhang H, Zhu S H, Zhao S Y, et al. Establishment of high-resolution aerosol parameterization and its influence on radiation calculations [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 243: 106802.
- [6] Centeno F R, Brittes R, França F H R, et al. Evaluation of gas

- radiation heat transfer in a 2D axisymmetric geometry using the line-by-line integration and WSGG models[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 156: 1-11.
- [7] Chu H Q, Ren F, Feng Y, et al. A comprehensive evaluation of the non gray gas thermal radiation using the line-by-line model in one- and two-dimensional enclosures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 362-370.
- [8] Centeno F R, Brittes R, Rodrigues L G P, et al. Evaluation of the WSGG model against line-by-line calculation of thermal radiation in a non-gray sooting medium representing an axisymmetric laminar jet flame[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 475-483.
- [9] Li H X, Zhang J, Cheng Y, et al. Calculations of radiative intensity in one-dimensional gaseous media with black boundaries using the statistical narrow band model[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 240: 106691.
- [10] Shi G Y, Xu N, Wang B, et al. An improved treatment of overlapping absorption bands based on the correlated k distribution model for thermal infrared radiative transfer calculations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(8): 435-451.
- [11] Zhu M W, Jin S G, Tao J, et al. Automatic methods for gas absorption calculation based on correlated k -distribution[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 270: 107697.
- [12] Zhang F, Zhu M W, Li J N, et al. Alternate mapping correlated k -distribution method for infrared radiative transfer forward simulation[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 994.
- [13] Hu H Y, Wang Q. Improved spectral absorption coefficient grouping strategy of wide band k -distribution model used for calculation of infrared remote sensing signal of hot exhaust systems[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 213: 17-34.
- [14] André F, Cornet C, Galtier M, et al. Radiative transfer in the O_2 A-band - a fast and accurate forward model based on the ℓ -distribution approach[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 260: 107470.
- [15] Zhang H, Nakajima T, Shi G, et al. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D20): 4641.
- [16] von Salzen K, Scinocca J F, McFarlane N A, et al. The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). part I: representation of physical processes[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2013, 51(1): 104-125.
- [17] Slingo A. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(10): 1419-1427.
- [18] Lindner T H, Li J. Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(10): 1797-1805.
- [19] 卢鹏. 大气辐射模式的改进及其在气候模拟中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 43-49.
- Lu P. Improvement of the atmospheric radiation model and its application in climate modeling[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012: 43-49.
- [20] Lu P, Zhang H, Li J. Correlated k -distribution treatment of cloud optical properties and related radiative impact[J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 2011, 68(11): 2671-2688.
- [21] Goody R, West R, Chen L K, et al. The correlated- k method for radiation calculations in nonhomogeneous atmospheres[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1989, 42(6): 539-550.
- [22] Nakajima T, Tsukamoto M, Tsushima Y, et al. Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4869-4878.
- [23] Henyey L C, Greenstein J L. Diffuse radiation in the galaxy[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1941, 93: 70-83.
- [24] Choudhury B J, Chang A T C. The albedo of snow for partially cloudy skies[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1981, 20(3): 371-389.
- [25] Zhang Y, Hao S J, Yu K, et al. A new k -interval optimization technique for atmospheric upwelling radiance calculation in infrared absorption bands[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 160: 75-84.
- [26] Zhong W Y, Haigh J D. An efficient and accurate correlated- k parameterization of infrared radiative transfer for troposphere - stratosphere-mesosphere GCMs[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2000, 1(2): 125-135.
- [27] Dobbie J S, Li J N, Chýlek P. Two- and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D2): 2067-2079.
- [28] Cao Y M, Zhang W, Zhang Y, et al. A new k -interval selection technique for fast atmospheric radiance calculation in remote sensing applications[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(9): 1479-1485.
- [29] Evans K F. SHDOMPPDA: a radiative transfer model for cloudy sky data assimilation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 3854-3864.
- [30] Fomin B. A k -distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 2. FKDM, fast k -distribution model for the shortwave[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D2): D02106.
- [31] Turkington R B, Cianciolo M E, Raffensberger M E. Development of an atmospheric scene simulation model[R]. America: DTIC Document, 1998: 1-172.
- [32] Lohmann U, Tselioudis G, Tyler C. Why is the cloud albedo-particle size relationship different in optically thick and optically thin clouds? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(8): 1099-1102.

Maximum Correlated k -Distribution Optimal Algorithm for Single-Scattering Parameters in Cloudy Atmospheres

Zhang Yin, Zhang Shaoshuai, Yan Hao, Fan Yiwei, Zhu Guiyi, Yan Junhua*

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

Abstract

Objective Clouds have a significant influence on radiation propagation in atmospheres. In atmospheric remote sensing, band radiative transfer (BRT) models in cloudy atmospheres are crucial and are widely used in climate change, environmental monitoring, weather forecasting, and other research fields. Although the line-by-line (LBL) model is widely acknowledged as the most accurate BRT calculation method, its widespread usage is constrained by its high cost. Recently, correlated k -distribution (CKD) methods have progressed significantly and have emerged as the most promising alternatives in BRT calculations. They provide a better balance of accuracy and efficiency compared to other methods. However, most CKD methods tend to optimize quadrature parameters based on spectral distributions of absorption coefficients in clear atmospheres and use band-averaged cloud optical properties (COPs), ignoring the influence of COP changing with wavenumber. When COPs vary greatly in the wavenumber space, such treatment will cause significant errors. This paper proposes a CKD method suitable for BRT calculation in cloudy atmospheres that takes into account the effect of spectral parameters other than absorption coefficient on radiation.

Methods Given the high cost of band radiative transfer calculations for cloudy atmospheres in remote sensing applications, a maximum correlated k -distribution optimal algorithm for single-scattering parameters (SSP-MCKD) is proposed. First, the CKD theory is extended to multiple spectral parameters for cloudy atmospheres, such as single albedos, asymmetry factors, etc., after analyzing the correlation of their spectral distributions under different environmental conditions. Further, based on the influence of spectral parameters on the single-scattering source function, the maximum correlated parameter of each spectral line is confirmed. A maximum correlation parameter group is formed by spectral lines with the same maximum correlated parameter. Based on the proportion of spectral lines within groups, the quadrature intervals are divided into each maximum correlation parameter group. Further, spectral parameters within the group are rearranged in the order of the maximum correlated parameter. The average equivalent parameters and quadrature weights are then calculated between and within groups. Finally, experiments were conducted to verify the applicability of the proposed method under different conditions.

Results and Discussions Fig. 7 shows the mean relative errors of radiation calculated using the $\Delta \log k$ method, correlated k -distribution with parameterization of cloud optical properties (PCOP-CKD), and the SSP-MCKD method under different number of quadrature intervals. With increasing quadrature intervals, the results of the three methods gradually converge to those calculated using the LBL model. The $\Delta \log k$ method mainly considers the influence of the extinction coefficient, and the convergence curves are relatively stable. However, when the extinction coefficient is not the maximum correlated parameter in a given band, poor results are obtained, as shown in Fig. 7(c). The PCOP-CKD method ranks COPs based on the atmospheric absorption coefficients, where the correlation in the spectral distributions between the atmospheric absorption coefficients and COPs is maintained. This method ignores the influence of cloud scattering on BRT calculations. When the number of quadrature intervals is small, considerably desirable results are obtained. However, when the number of quadrature intervals increases, its calculation accuracy improves slowly. Hence, this method cannot meet the demand for practical engineering. The method proposed herein comprehensively considers the influence of spectral parameters on BRT calculations. As the number of quadrature intervals increases, its calculation accuracy has the fastest convergence speed.

Table 6 lists the mean relative errors of radiation calculated using the $\Delta \log k$, PCOP-CKD, and SSP-MCKD methods in clouds with different heights. The PCOP-CKD method considers cloud atmosphere as two parts: cloud and atmosphere. This method is more accurate in the atmosphere part. This method in scene 1 is more accurate because of the lower cloud and stronger gas absorption. The average error obtained using the SSP-MCKD method is 1.68%, which is improved by 26.92 percentage points and 5.63 percentage points compared with that of the $\Delta \log k$ and PCOP-CKD methods, respectively. Thus, the proposed method is suitable for BRT calculations in clouds at different heights.

Table 8 lists the mean relative errors of radiation calculated using the three methods for different cloud types. The average error calculated using the SSP-MCKD method is 5.54%, which is improved by 17.73 percentage points and 3.31

percentage points compared with that of the $\Delta \log k$ and PCOP-CKD methods, respectively.

Conclusions The proposed SSP-MCKD method can be effectively employed in BRT calculations for cloudy atmospheres in remote sensing applications. This method has faster convergence in absorption, semi-absorption, and transmission bands compared with the other two methods. When the cloud average extinction coefficient and standard deviation are lower than 45 and 15 km^{-1} , respectively, the proposed method shows good results. Even when the cloud extinction coefficients or its standard deviation increase significantly, this method still outperforms the other two methods. The idea of optimizing and grouping according to maximum correlation parameters can be used as a reference to solve BRT calculation problems in other mixtures containing both gases and particles.

Key words remote sensing; cloudy atmosphere; band radiative transfer; correlated k -distribution; single-scattering source function; maximum correlated parameter