

云滴谱分布对 FY-4A/AGRI 水云光学厚度与有效粒子半径反演的影响

袁锦涵^{1,2}, 周永波^{1,2}, 刘玉宝^{1,2*}, 段婧³, 王新⁴

¹南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学精细化区域地球模拟和信息中心, 江苏 南京 210044;

³中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081;

⁴国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 为了定量评估对数正态谱分布假设对水云光学厚度(COT)与有效粒子半径(Re)反演的影响,利用欧洲中期数值天气预报中心建立的 RTTOV(Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder)模式,对比模拟了基于对数正态谱和修正 Gamma 谱两种云滴谱分布下 FY-4A/AGRI(Advanced Geosynchronous Radiation Imager)的第 2、5 通道液态水云的反射率,分析了这两个谱分布假设条件下水云反射率随 COT 以及 Re 的变化特征。在此基础上,建立了两种谱分布条件下的 COT 和 Re 查算表,并基于 2020 年夏季的一个初生对流云个例,定量分析了云滴谱分布类型对云参数反演结果的影响。结果表明,在第 2 通道,两个云滴谱类型假设下计算的反射率仅有 0.1%~2% 的差异,但在第 5 通道,采用修正 Gamma 云滴谱计算的反射率比采用对数正态云滴谱计算的反射率低 10%~20%。反演结果表明,采用对数正态云滴谱反演的有效粒子半径 Re 比采用修正 Gamma 云滴谱反演的 Re 整体偏大,前者反演的 Re 集中在 15~35 μm ,而后者反演的 Re 集中在 10~30 μm 。采用两种云滴谱反演的 COT 的空间一致性良好,相差-2%~5%。

关键词 遥感; 云滴谱; RTTOV; FY-4A; 云光学厚度; 有效粒子半径

中图分类号 O43; P407

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0628004

Effect of Cloud Droplet Spectrum Distribution on Retrievals of Water Cloud Optical Thickness and Effective Particle Radius by AGRI Onboard FY-4A Satellite

Yuan Jinhan^{1,2}, Zhou Yongbo^{1,2}, Liu Yubao^{1,2*}, Duan Jing³, Wang Xin⁴

¹School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

²Precision Regional Earth Modeling and Information Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

³CMA Weather Modification Center, Beijing 100081, China;

⁴National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract In order to quantitatively evaluate the effect of log-normal spectral distribution assumption on retrieval of cloud optical thickness (COT) and effective particle radius (Re), the reflectance of water clouds with log-normal spectrum and modified Gamma spectrum was simulated for the 2nd and 5th channels of the AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) onboard FY-4A satellite by the RTTOV (Radiative Transfer for the TIROS

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2022-01-06

基金项目: 中国气象局西北区域人工影响天气能力建设项目(ZQC-R19081)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金(BK20210665)、南京信息工程大学科研启动经费(2019r95)

通信作者: *ybliu@nuist.edu.cn

Operational Vertical Sounder) model developed by the European Center for Medium-Range Numerical Weather Forecasts. The variation characteristics of water cloud reflectivity with COT and Re under these spectral distribution assumptions were analyzed. On this basis, the look-up tables of COT and Re under two kinds of spectral distribution conditions are established, and the influence of cloud droplet spectral distribution type on cloud parameter inversion results is quantitatively analyzed based on a primary convective cloud in summer of 2020. The results indicate that for the 2nd channel, reflectance difference under the assumption of two cloud droplet spectra is within 0.1%–2%, whereas for the 5th channel, the reflectance calculated with the modified Gamma cloud droplet spectrum is 10%–20% lower than that calculated with the log-normal cloud droplet spectrum. The retrieval results show that the effective particle radius r_{eff} retrieved with the log-normal cloud droplet spectrum is larger than that retrieved with the modified Gamma cloud droplet spectrum. The former is concentrated in 15–35 μm , while the latter is within 10–30 μm . The differences of COT retrieved with the two cloud drop spectra are relatively small, ranging from –2% to 5%.

Key words remote sensing; cloud droplet spectrum; RTTOV; FY-4A; cloud optical thickness; effective particle radius

1 引言

云覆盖了 60%~70% 的地球表面,云对太阳短波辐射和地球长波辐射产生重要作用,成为影响天气系统的辐射平衡、气候系统和气候变化的重要因素之一^[1]。一方面,云对太阳短波辐射进行吸收和反射,反射效应能够降低地气系统的温度;另一方面,云对地表和云下大气的长波辐射进行吸收和反射,产生的温室效应对地气系统起到保温作用^[2]。中纬度地区的中低云一般为水云,对气候过程有重要影响。在人工影响天气方面,水云也是主要作业对象之一^[3]。目前,人们对云特性仍缺乏足够的了解,云和辐射相互作用的不确定性很大程度上影响气候变化预测和数值天气预报的准确性。

卫星遥感反演技术是获取云光学厚度(COT,其值为 τ_{COT})和云有效粒子半径(Re,其值为 r_{eff})的重要手段。卫星观测的时空分辨率高,不受海域、偏远山区等难以布设地基观测系统的区域的限制,其反演产品已被广泛应用于资料同化、气候模拟等领域^[4-5]。Twomey^[6]在 1980 年首次提出基于预先计算的双通道查算表反演云光学厚度 τ_{COT} 和有效粒子半径 r_{eff} 的算法。Nakajima 等^[7]对该算法进行了改进,构建了中分辨率成像光谱仪(MODIS)反演云参数的业务算法。

查算表法假设云滴谱分布符合某一预设模型,模拟辐射传输,构建云反射率与 τ_{COT} 和 r_{eff} 的关系,以实现反演计算^[8-11]。在 MODIS 云反演算法中采用的云粒子谱分布为对数正态分布^[7]。然而,自然云中云滴谱分布变化较大。理论和观测结果表明,云滴谱分布结构复杂,很难用单一结构加以描述^[12]。有大量观测表明云粒子的谱分布更贴近 Gamma 分布^[13-14],而且气象研究与预报模式

(WRF)中的许多云微物理模型都假定云滴谱服从 Gamma 分布^[15]。因此云滴谱分布假设会对卫星云反演结果带来一定的不确定性。

为了解不同云滴谱分布对 FY-4A/AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager)反演结果的影响,本文采用对数正态谱和修正 Gamma 谱两种云滴谱分布形式,分析不同云滴谱分布对云物理参数反演的影响。基于欧洲中期天气预报中心开发的 RTTOV(Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder)模式,计算并对比分析了两种云滴谱分布假设条件下, FY-4A/AGRI 的第 2 通道(可见光波段, 0.55~0.75 μm)和第 5 通道(短波近红外波段, 1.58~1.64 μm)的水云反射率随光学厚度 τ_{COT} 、云有效粒子半径 r_{eff} 、太阳-卫星几何角度,以及不同地表反射率的变化情况,并分别基于在这两种云滴谱分布假设条件下构建的 τ_{COT} 和 r_{eff} 反演查算表,分析不同谱分布假设条件下的 τ_{COT} 和 r_{eff} 反演结果的差异。

2 RTTOV 模式与 FY-4A/AGRI 概述

RTTOV 是一种大气快速辐射传输模式,该模式能够模拟全世界多种气象卫星探测器接收到的地球大气层顶红外、短波及微波辐射,也可模拟大气红外探测器等新一代红外高光谱分辨率卫星探测资料^[16]。RTTOV 是欧洲中期数值天气预报中心同化业务使用的辐射传输模式,可从欧洲中期数值天气预报中心官网(<https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/documentation>)下载,其优点是计算快速,并且有较为完善的气体吸收参数化方案。Matricardi^[17]详细讲述了 RTTOV 与其他的一些辐射传输模型的计算效率的比较。RTTOV 的核心是气体吸收导致的层光学厚度的快速参数化^[18]。

目前最新版 RTTOV12 包含了云散射模块 (RTTOV_SCATT), 能够更好地模拟有云条件下的短波和红外辐射^[19]。

FY-4A 卫星对地球区域大气和地表进行高频次观测, 为提高天气预报准确率提供监测数据和产品^[20]。FY-4A 数据自 2018 年 3 月起提供, 可从风云卫星遥感数据服务网 (<http://data.nsmc.org.cn>) 下载。FY-4A 星的扫描成像辐射计 (AGRI) 一共有 14 个通道, 包括 6 个可见/近红外波段、2 个中波红外波段、2 个水蒸气波段和 4 个长波红外波段。AGRI 的全盘扫描时间是 15 min, 对于可见光和近红外通道的空间分辨率是 0.5~1.0 km, 对于红外通道的空间分辨率是 2~4 km, 它的高时空分辨率特性有助于识别和跟踪初生对流这类小尺度、快速演变系统。FY-4A 产品已被用于闪电监测^[21], 反演多层云、火山灰高度等^[22-23] 科学产品。

基于卫星遥感反演 τ_{COT} 和 r_{eff} 的基本原理是: 云在可见光波段的反射率主要取决于 COT 的值, 而在近红外波段, 其反射率主要依赖于云滴有效半径^[9-11]。所以需要选取双通道进行联合反演。根据 AGRI 在水汽窗口的短波光谱特征主要集中在 0.470, 0.650, 0.825, 1.375, 1.610 μm ^[24]。本文基于 AGRI 第 2 (0.55~0.75 μm) 和第 5 (1.58~1.64 μm) 通道, 研究云滴谱分布对有云天气情况下这两个通道的辐射传输特性, 并构建查算表用来反演 τ_{COT} 和 r_{eff} 。所用数据包括 AGRI 的第 2、5 通道的反射率一级数据, 以及 AGRI 云类型二级产品。云类型产品将云分为暖 (液态) 水云、过冷水云、混合云、不透明冰云、卷云 (即半透明冰云) 和多层云 (上层半透明, 下层不透明)。由于本文只研究水云, 因此使用该产品剔除其他云类的影响。

3 水云辐射特性模拟计算的理论与方法

3.1 云滴谱分布特征

云的微物理特性^[25] 包括云粒子的相态、大小、形状和浓度等, 云滴谱分布是最重要的云微物理特性之一。在 MODIS 云反演算法中^[7], 云粒子谱分布形式采用对数正态函数:

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} r \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \quad (1)$$

式中: N 为单位体积内所有云滴的总数; r 为云滴半径; r_g 和 σ_g 分别为云滴几何平均半径和几何标准

差, 它们的取值确定了云滴谱的形状。在 MODIS 云反演算法中 σ_g 为定值, 取 $\ln \sigma_g = 0.13$ 。

而在 WRF NSSL-2mom 参数化方案中^[26], 粒子谱分布形式服从修正 Gamma 函数:

$$n(r) = 3N \frac{r^2}{r_g^3} \exp \left[-\left(\frac{r}{r_g} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

在给定谱分布下, 有效粒子半径 r_{eff} 可以定义为

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} n(r) r^3 dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} n(r) r^2 dr}, \quad (3)$$

式中: r_{max} 、 r_{min} 分别为云滴半径的最大、最小值。

将(1)式代入(3)式可得

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \cdot \frac{1}{r} r^3 \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \cdot \frac{1}{r} r^2 \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] dr}. \quad (4)$$

由(4)式可知

$$r_g = G(r_{\text{eff}}), \quad (5)$$

即 r_g 为 r_{eff} 的函数。同理, 粒子谱分布形式服从修正 Gamma 函数时, r_g 也是 r_{eff} 的函数。综合(1)~(5)式可知

$$n(r) = F(N, r_{\text{eff}}, r). \quad (6)$$

当给定云滴总数 N 和 r_{eff} 时, 可以得到云滴数浓度随云滴半径的变化。图 1 为不同 r_{eff} 取值下的两种云滴尺度谱分布经归一化处理 [$\int_0^\infty n(r) dr = 1$] 后的示意图, 图 1(a) 为对数正态谱分布, 图 1(b) 为修正 Gamma 函数谱分布。云滴谱通常表现为云滴浓度随 r_{eff} 迅速增加, 到某个极大值后又随 r_{eff} 缓慢地减小^[27]。可以看出: r_{eff} 越大, 谱形越宽, 随 r_{eff} 增大时, 服从修正 Gamma 函数分布的尺度谱的谱形比服从对数正态函数分布的尺度谱的谱形要宽, 峰值更小。这说明, 随着云滴粒子有效半径 r_{eff} 的增大, 采用修正 Gamma 函数来拟合云滴谱时的云滴浓度比采用对数正态函数来拟合云滴谱时的云滴浓度更低, 云滴尺度更大。

3.2 水云反射率计算原理

本文使用 RTTOV 模式模拟 AGRI 第 2 (0.55~0.75 μm) 和第 5 (1.58~1.64 μm) 通道的大气水云反射率, 并构建云微物理参数 r_{eff} 和 τ_{COT} 反演的查算表库。利用 RTTOV 构建查算表的过程, 实际上是用 RTTOV 模拟计算不同 r_{eff} 和 τ_{COT}

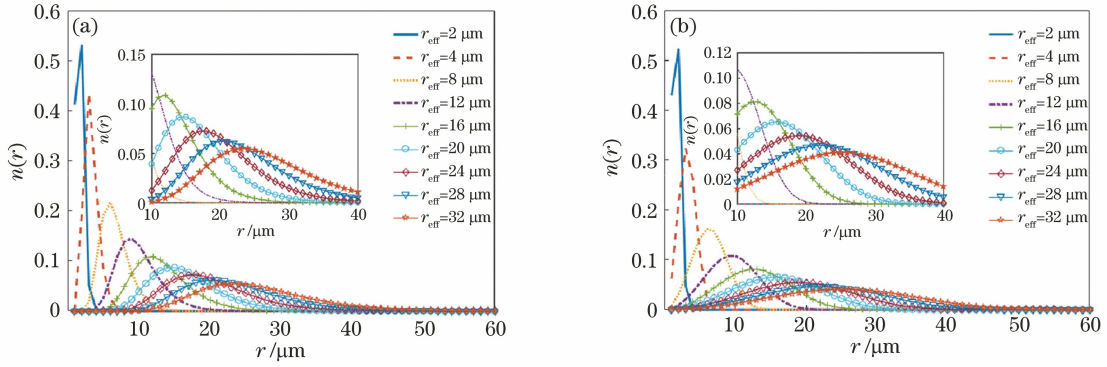


图 1 两个云滴粒子谱分布 $n(r)$ 的对比。(a) MODIS 反演算法的对数正态谱分布;(b) WRF NSSL-2mom 参数化方案的修正 Gamma 谱分布

Fig. 1 Comparison of two cloud droplet spectral distributions $n(r)$. (a) Log-normal spectral distribution of MODIS inversion algorithm; (b) modified Gamma spectral distribution of WRF NSSL-2mom parameterization scheme

在不同地表覆盖、卫星观测角度、太阳高度角等条件下的天顶反射率。

根据短波辐射传输方程表达式^[28]：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I(z; \mu, \phi)}{\Delta z / \mu} = & -\hat{\sigma}_{\text{ext}} I(z; \mu, \phi) + \\ & \hat{\sigma}_{\text{sca}} F_{\theta} \exp\left(-\frac{\Delta z \hat{\sigma}_{\text{ext}}}{\mu}\right) \frac{\hat{P}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0)}{4\pi} + \\ & \hat{\sigma}_{\text{sca}} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 I(z; \mu_0, \phi_0) \frac{\hat{P}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0)}{4\pi} d\mu_0 d\phi_0 + \\ & \hat{\sigma}_{\text{abs}} B[T(z)], \end{aligned} \quad (7)$$

式中： z 为高度； Δz 为微分厚度； μ 和 μ_0 分别为观测天顶角和太阳天顶角(SZA)的余弦； ϕ 和 ϕ_0 分别为观测方位角和太阳方位角的余弦； $I(z; \mu, \phi)$ 为 z 高度处方向 (μ, ϕ) 上大气顶向上的辐射强度； $\Delta I(z; \mu, \phi)$ 为 z 高度处方向 (μ, ϕ) 上大气顶向上的辐射强度的微分变化； F_{θ} 为波长为 λ 时的入射太阳

辐照度； $B[T(z)]$ 为 z 高度的普朗克辐射， $T(z)$ 为 z 高度处的绝对温度； \hat{P} 为相函数； $\hat{\sigma}_{\text{ext}}$ 为消光系数； $\hat{\sigma}_{\text{sca}}$ 为散射系数； $\hat{\sigma}_{\text{abs}}$ 为吸收系数。由(7)式可知，反射率是相函数 \hat{P} 、消光系数 $\hat{\sigma}_{\text{ext}}$ 、散射系数 $\hat{\sigma}_{\text{sca}}$ 的函数。其中：

$$\hat{\sigma}_{\text{ext}} = \frac{\int \sigma_{\text{ext}}(\lambda) F_s(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

式中： $F_s(\lambda)$ 为 AGRI 第 2 与第 5 通道的光谱响应函数^[25](图 2)； $\sigma_{\text{ext}}(\lambda)$ 可计算为

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \int \sigma_{\text{ext}}(\lambda, r) n(r) dr, \quad (9)$$

式中： $\sigma_{\text{ext}}(\lambda, r)$ 由 Mie 散射定律计算^[29]。由(6)式可知谱分布 $n(r)$ 与 N 、 r_{eff} 、 r 有关。因此，(9)式可以表示为 $\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = F_1(N, r_{\text{eff}}, \lambda)$ 。

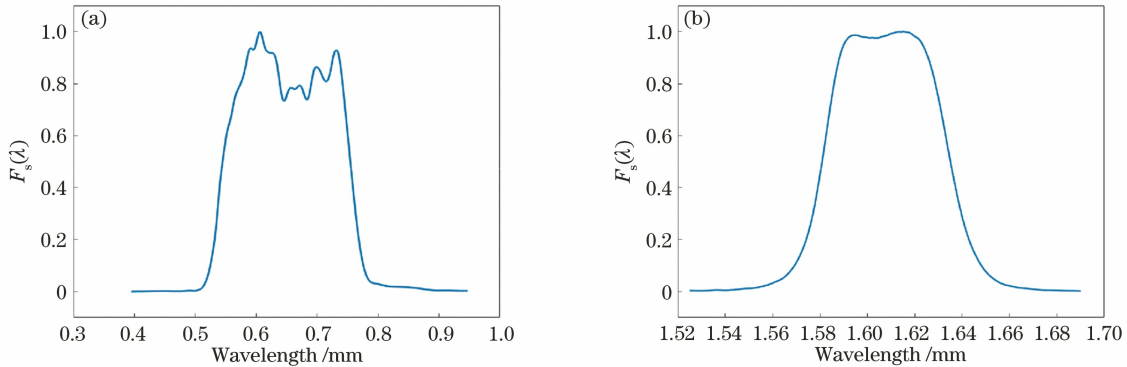


图 2 FY4A/AGRI 的第 2 和第 5 通道的光谱响应函数 $F_s(\lambda)$ 。(a) 第 2 通道的光谱响应函数, 波长范围为 0.55~0.75 μm ；(b) 第 5 通道的光谱响应函数, 波长范围为 1.58~1.64 μm

Fig. 2 Spectral response function $F_s(\lambda)$ of 2nd and 5th channels of FY4A/AGRI. (a) Spectral response function of 2nd channel, with wavelength range of 0.55~0.75 μm ; (b) spectral response function of 5th channel, with wavelength range of 1.58~1.64 μm

τ_{COT} 是消光系数沿辐射传输路径 Z 的积分:

$$\tau_{\text{COT}} = \int \hat{\sigma}_{\text{ext}} dz = \Delta z \hat{\sigma}_{\text{ext}} = F_2(N, r_{\text{eff}}). \quad (10)$$

(10)式中蕴含了查算表构造过程中云在 Δz 高度范围内均匀分布的假设。由(5)式和(10)式可知,根据 τ_{COT} 和 r_{eff} 可以确定云滴谱分布 $n(r)$ 的参数 N 和 r_g , 进而确定 $\hat{\sigma}_{\text{ext}}$ 。同理可确定与辐射传输过程相关的散

射系数 $\hat{\sigma}_{\text{sca}}$ 以及相函数 \hat{P} 。因此,通过辐射模式模拟不同 τ_{COT} 和 r_{eff} 在其他组合条件下的反射率,即可构建从 τ_{COT} 和 r_{eff} 到反射率的映射关系(查算表)。

3.3 云滴谱分布假设对水云的光散射特性的影响

相函数 \hat{P} 与单散射反照率 $\hat{\omega}_0$ 是很重要的水云光学参量。图 3 为两种谱分布方案下计算得到的通

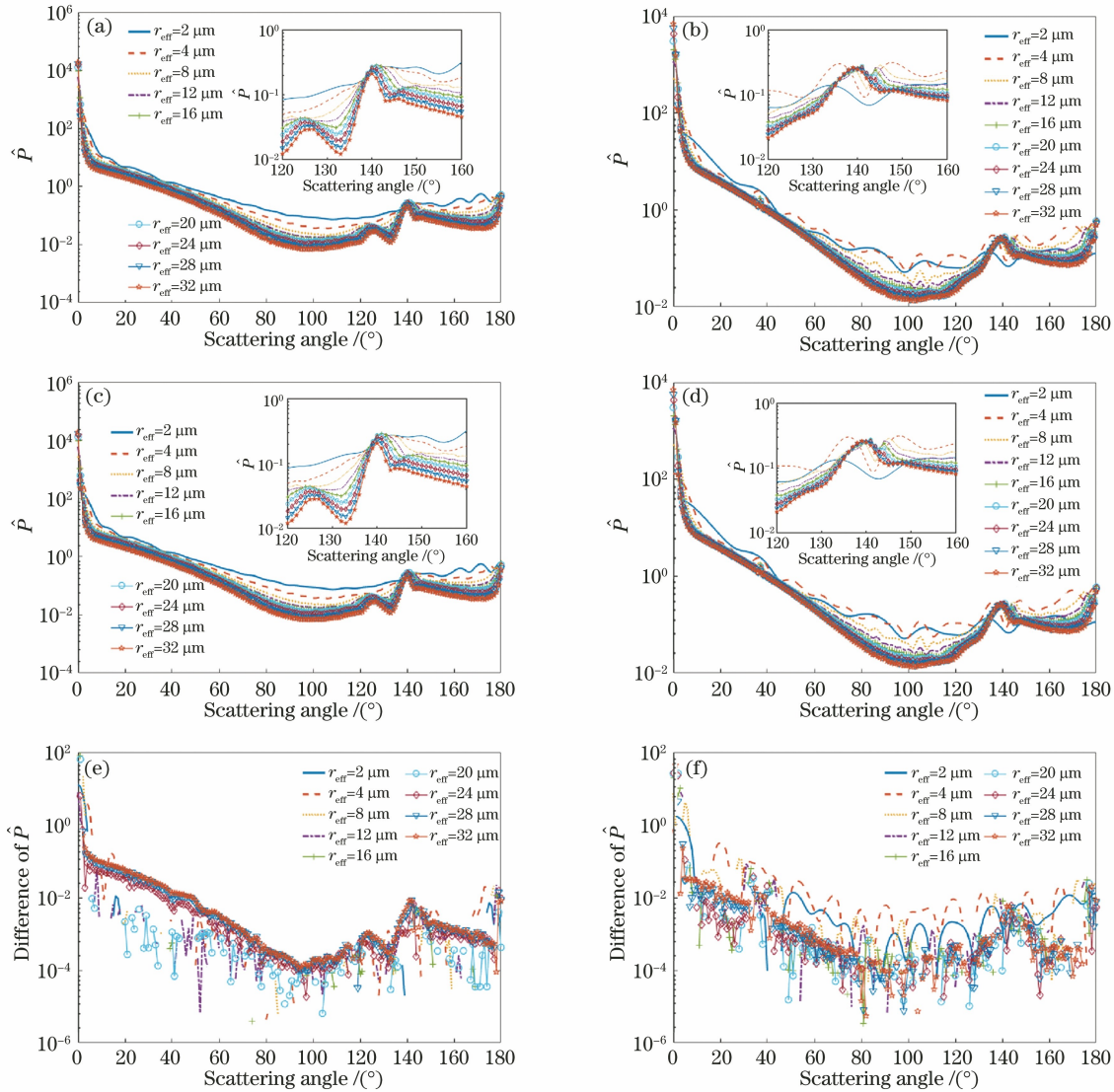


图 3 基于 FY-4A/AGRI 通道 2、5 的响应函数计算的关于响应函数积分的相函数对比。(a)对数正态谱分布假设下计算的可见光波段的相函数;(b)对数正态谱分布假设下计算的短波近红外波段的相函数;(c)修正 Gamma 谱分布假设下计算的可见光波段的相函数;(d)修正 Gamma 谱分布假设下计算的短波近红外波段的相函数;(e)两种谱分布假设下可见光通道的相函数差值;(f)两种谱分布假设下短波近红外通道的相函数差值

Fig. 3 Comparison of phase functions of response function integral computed based on response functions of 2nd and 5th channels of FY-4A/AGRI. (a) Phase function of visible band calculated under assumption of log-normal spectral distribution; (b) phase function of short-wave near-infrared band under assumption of log-normal spectral distribution; (c) phase function of visible band under assumption of modified Gamma spectral distribution; (d) phase function of short-wave near-infrared band under assumption of modified Gamma spectral distribution; (e) difference of phase function of visible channel under two spectral distribution assumptions; (f) difference of phase function of short-wave near-infrared channel under two spectral distribution assumptions

道 2、5 的相函数,图 4 为两种谱分布方案下 AGRI 的通道 2 和通道 5 的单散射反照率,二者均考虑

AGRI 的光谱响应函数积分。

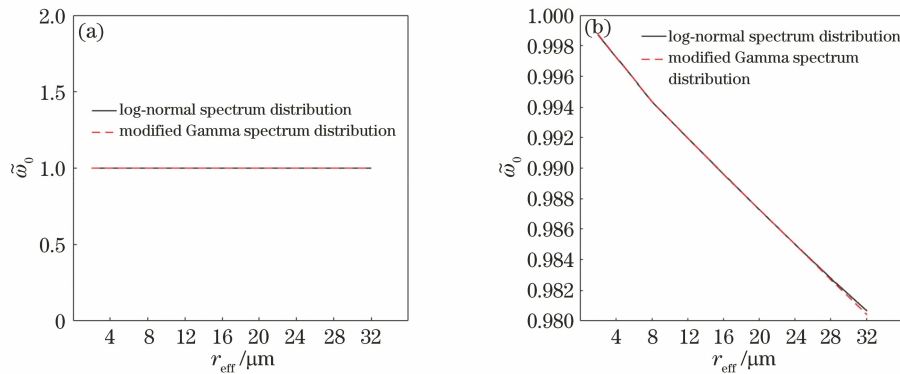


图 4 基于 FY-4A/AGRI 的通道 2、5 的响应函数计算的关于响应函数积分的单散射反照率。(a)可见光波段的单散射反照率; (b)短波近红外波段的单散射反照率

Fig. 4 Comparison of single scattering albedo with respect to integral of response function computed based on response functions of 2nd and 5th channels of FY-4A/AGRI. (a) Single scattering albedo in visible band; (b) single scattering albedo in short-wave near-infrared band

图 3(a)~(d)是在 $0.65 \mu\text{m}$ 、 $1.61 \mu\text{m}$ 波长入射下水云粒子的散射相函数 \hat{P} 随散射角的变化情况,图 3(e)、(f)是采用对数正态谱分布计算的 \hat{P} 与采用修正 Gamma 谱分布计算的 \hat{P} 的差值,即对数正态谱分布对应的结果减去修正 Gamma 谱分布对应的结果。差值存在不连续的情况是因为差值为 0,在对数坐标轴上无法反映。可以看出:不同 r_{eff} 下,云滴的相函数差异明显,且相函数的前向和后向峰值均随 r_{eff} 的增大而增大。随着云滴 r_{eff} 的增大,振荡更加显著,这是由光的干涉效应引起的^[29]。对于两种云滴谱分布分别计算的结果来说,虽然图 1 反映的尺度谱分布差异较明显,但是积分后的相函数与单散射反照率差异很小。在可见光波段与短波近红外波段,相函数差异仅为 $0.01\% \sim 2.00\%$ 。

如图 4(a)所示,基于不同云滴谱分布计算的单散射反照率在可见光波段的差异可以忽略不计,且都近似为 1.0。其主要原因是液态水云在可见光波段几乎没有吸收。这与已建立的基本的反演原理一致,即在可见光波段,云反射率主要是 τ_{COT} 的函数^[30]。然而,在短波近红外波段,液态水云粒子有吸收作用。由图 4(b)可以看出,在短波近红外波段,随着 r_{eff} 的增大,单散射反照率减小,采用对数正态谱假设计算的 ω_0 与采用修正 Gamma 谱假设计算的 ω_0 差异变大。在 $r_{\text{eff}} = 32 \mu\text{m}$ 时,采用修正 Gamma 谱假设计算的 ω_0 与采用对数正态谱假设计算的 ω_0 差值占采用对数正态谱假设计算结果的

0.1% 。由辐射传输基本规律可知,单散射反照率的微弱差异在云内光子发生多次散射作用时,会引起天顶反射率的显著差异^[31]。

4 模拟结果及分析

4.1 不同波段水云反射率敏感性分析

为研究不同云滴谱分布假设下的水云辐射特性变化及其与其他影响因子之间的关系,针对云粒子谱分布形式,采用双对数正态函数和修正 Gamma 函数,利用 RTTOV 计算两种谱分布假设下 AGRI 可见光波段(第 2 通道)和短波近红外(第 5 通道)的反射率随 r_{eff} 和 τ_{COT} 的变化情况。图 5 为水云反射率随 r_{eff} 和 τ_{COT} 的变化情况,地表反射率设为 0.13,选取的角度为: SZA 为 20° ,卫星天顶角(VZA)为 30° ,相对方位角(AZ)为 60° 。由图 5(a)~(d)可得,在 $0.65 \mu\text{m}$ 可见光通道和 $1.61 \mu\text{m}$ 短波近红外通道处,反射率都随 COT 的增大而增大。相对而言,在可见光波段($0.65 \mu\text{m}$),水云反射率基本不依赖于 r_{eff} 。在短波近红外波段处,虽然在 $\tau_{\text{COT}} < 45$ 时, $r_{\text{eff}} = 4 \mu\text{m}$ 的云粒子反射率比 $r_{\text{eff}} = 2 \mu\text{m}$ 的云粒子反射率更高,但总体而言云粒子反射率随 r_{eff} 的增大而减小。这一结果与文献^[32-35]的结论一致。

图 5(e)、(f)为两种谱分布假设下可见光通道与短波近红外通道的反射率差值。在 $0.65 \mu\text{m}$ 可见光波段,采用对数正态分布的云滴谱计算的反射率与采用修正 Gamma 函数分布的云滴谱计算的反射率仅相差 $0.1\% \sim 2.0\%$ 。在 $1.61 \mu\text{m}$ 短波近红外

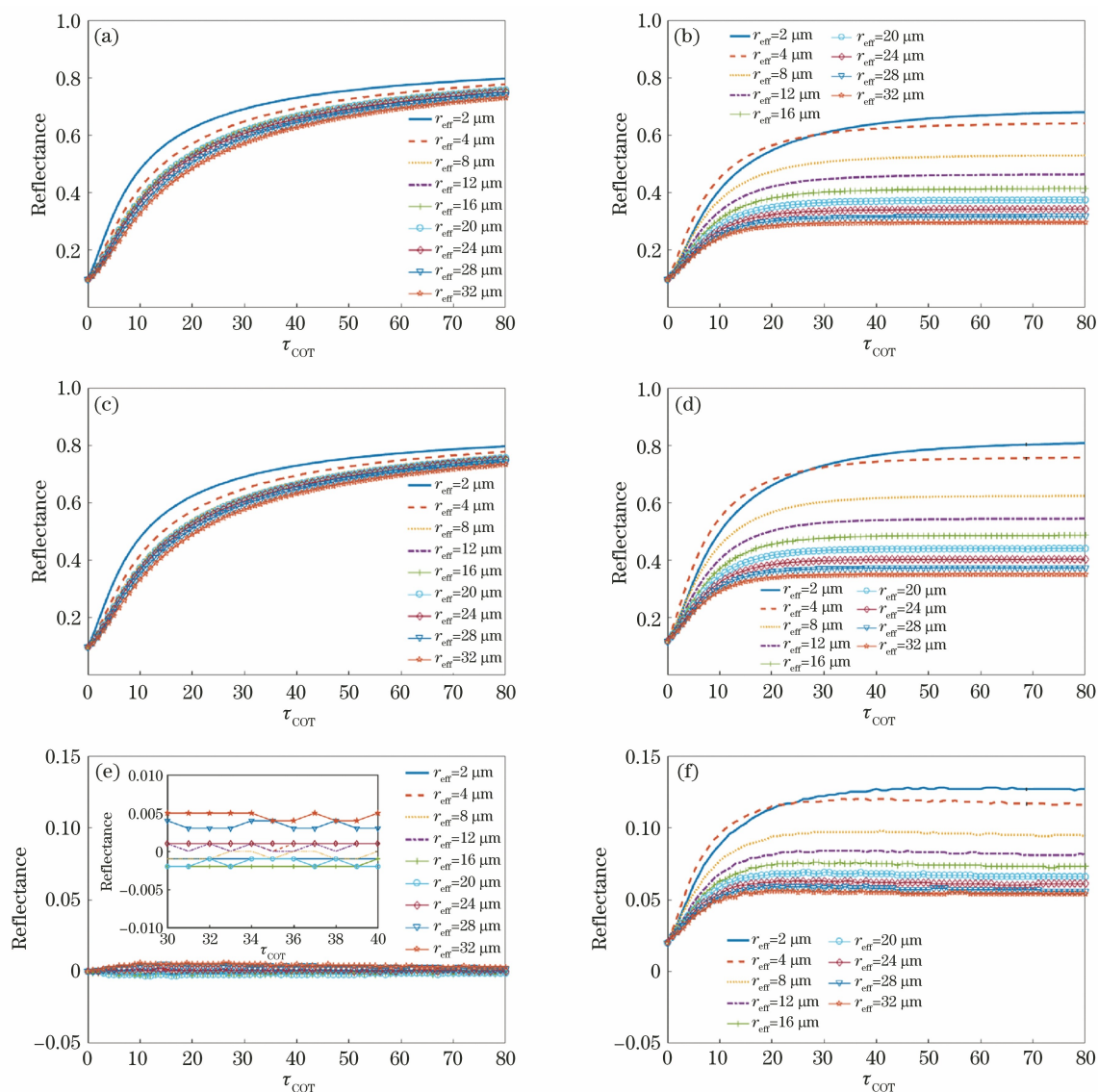


图 5 FY-4A/AGRI 的通道 2(0.55~0.75 μm)、通道 5(1.58~1.64 μm) 的反射率随 τ_{COT} 与 r_{eff} 的变化情况。(a)对数正态谱分布假设下计算的可见光波段的反射率;(b)对数正态谱分布假设下计算的短波近红外波段的反射率;(c)修正 Gamma 谱分布假设下计算的可见光波段的反射率;(d)修正 Gamma 谱分布假设下计算的短波近红外波段的反射率;(e)两种谱分布假设下可见光通道的反射率差值;(f)两种谱分布假设下短波近红外通道的反射率差值

Fig. 5 Variation of reflectance with τ_{COT} and r_{eff} for 2nd channel (0.55–0.75 μm) and 5th channel (1.58–1.64 μm) of FY-4A/AGRI. (a) Calculated reflectance of visible band under assumption of log-normal spectral distribution; (b) calculated reflectance of short-wave near-infrared band under assumption of log-normal spectral distribution; (c) calculated reflectance of visible band under assumption of modified Gamma spectral distribution; (d) calculated reflectance of short-wave near-infrared band under assumption of modified Gamma spectral distribution; (e) reflectance difference of visible channel under two spectral distribution assumptions; (f) reflectivity difference of short-wave near-infrared channel under two spectral distribution assumptions

波段,采用对数正态分布计算的云滴谱的反射率比采用修正 Gamma 函数计算的反射率高,差值达到占采用对数正态云滴谱计算的反射率结果的 10%~20%。在可见光波段,两种谱分布形式假设下计算的相函数差异仅为 0.01%~2.00%,单散射反照率都为 1[图 3(e),图 4(a)],而在短波近红外波

段,采用对数正态谱假设计算的 $\bar{\omega}_0$ 比采用修正 Gamma 谱假设下计算的 $\bar{\omega}_0$ 大 0.1% 左右 [图 4(b)]。单散射反照率越低,说明云的吸收越强,光子就越不容易从云顶逃逸,反射率也就越低^[31],所以采用对数正态函数计算的反射率比采用修正 Gamma 函数计算的反射率高。

图 6 为几个典型下垫面^[36]和卫星观测角度^[37-38]下,采用对数正态分布和修正 Gamma 分布的云滴谱的查算表示例图。由图 6 可以看出,0.65 μm 和 1.61 μm 波段的水云大气反射率都依赖于水云的 r_{eff} 和 τ_{COT} 。给定水云大气反射率,可以查算(即反演)出水云粒子的 r_{eff} 和 τ_{COT} 。如图 6 所示,两个云滴粒子谱假设下的大气反射率、 r_{eff} 和 τ_{COT} 之间的关系具有明显差异。在 0.65 μm 的可见光波段,采

用对数正态分布的云滴谱计算的反射率与采用修正 Gamma 分布的云滴谱计算的反射率差异很小。而在 1.61 μm 的短波近红外波段,采用对数正态分布的云滴谱计算的反射率比采用修正 Gamma 函数分布的云滴谱计算的反射率大,且差异最大达 20%。不同云滴谱分布假设所建立的查算表会使反演结果有明显差异。

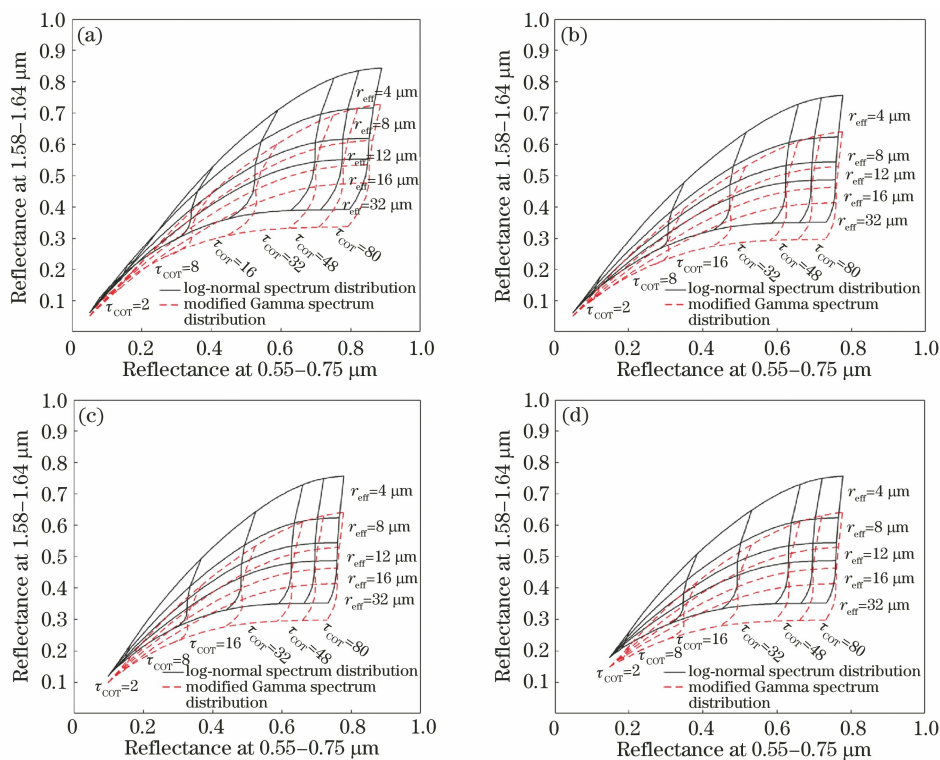


图 6 FY-4A/AGRI 的双通道水云反射率查找表。(a)地表反射率设为 0.07,选取的角度为: SZA 为 5°, VZA 为 5°, AZ 为 10°; (b)地表反射率设为 0.07,选取的角度为: SZA 为 20°, VZA 为 30°, AZ 为 60°; (c)地表反射率设为 0.13,选取的角度为: SZA 为 20°, VZA 为 30°, AZ 为 60°; (d)地表反射率设为 0.19,选取的角度为: SZA 为 20°, VZA 为 30°, AZ 为 60°

4.2 查算表参数设置

水云反射率是 τ_{COT} 、 r_{eff} 、地表反照率、SZA、VZA、AZ 的函数。设置每个参数的范围(表 1),即构成基于云反射率查算 r_{eff} 和 τ_{COT} 的查算表,然后

进行云辐射计算。地表反照率设置范围参考我国陆地地区 2000—2015 年地表反照率月平均值^[36]。分别假设云滴谱为对数正态谱分布和修正 Gamma 谱分布,建立各自的查算表。

表 1 查算表参数范围与分档设置

Table 1 Ranges and classification of parameters of look-up table

Parameter	Number of points	Grid point value
τ_{COT}	81	[0, 80] equally spaced with increment of 1
r_{eff}	9	2, 4, 8, 12, 16, 22, 28, 32, 36 μm
Surface albedo	6	[0.07, 0.22] equally spaced with increment of 0.03
SZA	15	[0°, 70°] equally spaced with increment of 5°
VZA	15	[0°, 70°] equally spaced with increment of 5°
AZ	19	[0°, 180°] equally spaced with increment of 10°

4.3 云滴谱分布假设对云参数反演结果的影响

选取 2020-08-20T02:00—12:00 位于我国中东部陆地区域一初生对流云个例,测试和分析基于对数正态分布和修正 Gamma 分布的云滴谱假设下,反演的水云光学厚度与 r_{eff} 所产生的差异。由于本文只研究水云,所以依据 FY-4A 的云类型数据,只

保留水云。图 7 为该个例 FY-4A/AGRI 的 $0.65 \mu\text{m}$ [图(7a)]和 $1.61 \mu\text{m}$ [图(7b)]通道的反射率,以及 SZA[图(7c)]、太阳方位角[图(7d)]、VZA[图(7e)]、卫星方位角[图(7f)]示意图。这些参数是使用查算表检索 τ_{COT} 与 r_{eff} 的条件。

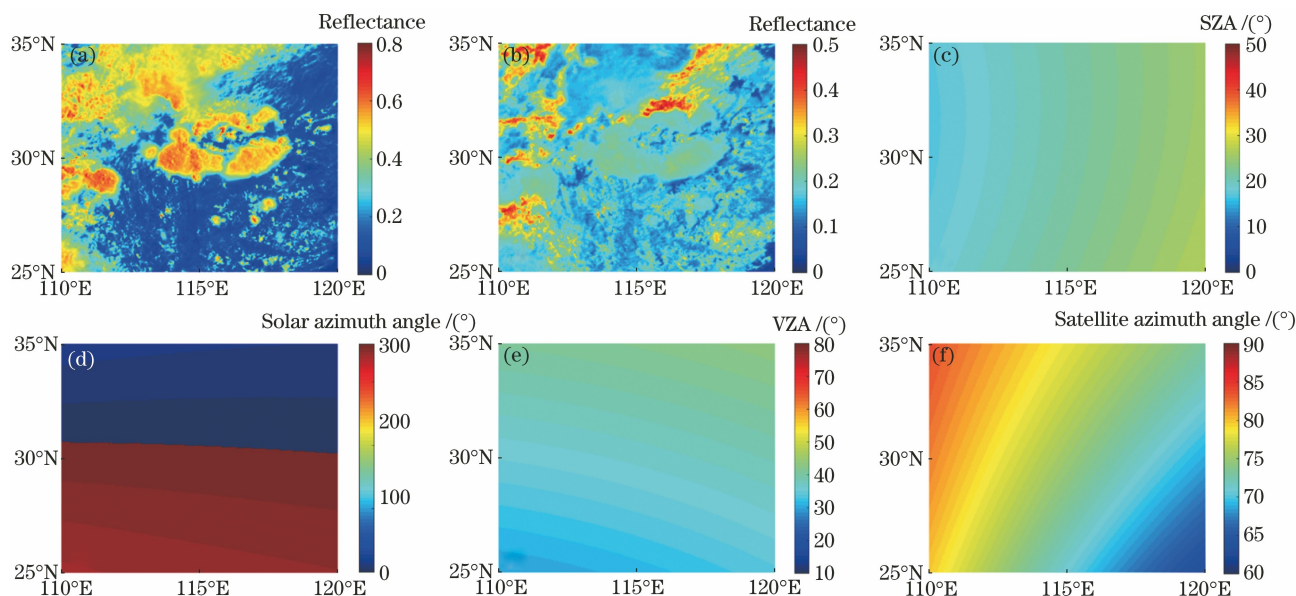


图 7 2020-08-20T07:00—07:15 FY-4A/AGRI 全员盘扫描和地理定位结果。(a) $0.65 \mu\text{m}$ 通道反射率; (b) $1.61 \mu\text{m}$ 通道反射率;(c) SZA;(d)太阳方位角;(e) VZA;(f)卫星方位角

Fig. 7 Disk scans and geolocation of FY-4A/AGRI at 07:00—07:15 on 20 August, 2020. (a) Reflectance at $0.65 \mu\text{m}$; (b) reflectance at $1.61 \mu\text{m}$; (c) SZA; (d) solar azimuth angle; (e) VZA; (f) satellite azimuth angle

图 8 为 FY-4A 反演的 τ_{COT} 与 r_{eff} 结果,反演过程中只考虑内插值,并根据 FY-4A 云类型结果剔除了含冰晶的云,只考虑水云。如图 8 所示,基于两种云滴谱分布得到的反演结果表现出良好的空间一致性,但采用对数正态分布的云滴谱反演的 r_{eff} 整体比采用修正 Gamma 分布的云滴谱反演的 r_{eff} 要大,采用对数正态分布的云滴谱反演的 τ_{COT} 与采用修正 Gamma 分布的云滴谱反演的 τ_{COT} 差异较小。由图 8(d)、(e)可见,对数正态谱分布和修正 Gamma 谱分布假设下反演的 τ_{COT} 结果在大部分区域都很吻合。相对而言, τ_{COT} 差异较小,采用对数正态分布的云滴谱反演的 τ_{COT} 与修正 Gamma 分布的云滴谱假设下反演的 τ_{COT} 差值仅占采用对数分布的正态云滴谱反演结果的一 $2\% \sim 5\%$ 。而对于二者反演的水云 r_{eff} [图 8(a)、(b)] 来说,采用对数正态分布的云滴谱反演的 r_{eff} 结果明显更大,但采用修正 Gamma 分布的云滴谱反演的 r_{eff} 有效值更多。产生该结果的原因是基于不同分布的云滴谱假设得到的短波红外波段反射率差异较大(图 6),而将 FY-

4A 测得的反射率内插到采用修正 Gamma 谱分布假设的查算表中时,得到的有效值更多。两种谱分布假设下,计算的短波红外波段反射率的差异是由云滴谱差异导致的单散射反照率 $\bar{\omega}_0$ 差异引起的,采用对数正态谱假设计算的 $\bar{\omega}_0$ 比采用修正 Gamma 谱假设下计算的 $\bar{\omega}_0$ 大[图 4(b)],而单散射反照率越大,反射率也就越大^[31]。

图 9 为采用对数正态云滴谱假设和修正 Gamma 分布的云滴谱假设反演的 τ_{COT} 与 r_{eff} 的概率分布直方图。可以看出,采用不同的云滴谱分布假设得到的 r_{eff} 和 τ_{COT} 的分布是相似的。但对于 r_{eff} [图 9(a)、(b)]来说,云滴谱采用对数正态分布假设时, r_{eff} 集中在 $15 \sim 35 \mu\text{m}$,而采用修正 Gamma 分布假设时, r_{eff} 集中在 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 。且当 $r_{\text{eff}} < 10 \mu\text{m}$ 时,采用对数正态分布假设反演的 r_{eff} 比采用修正 Gamma 分布假设反演的概率密度小 8% 左右。对于二者反演的 τ_{COT} [图 9(c)、(d)]来说,当 $\tau_{\text{COT}} > 5$ 时,两者的概率分布一致性良好。但 $\tau_{\text{COT}} < 5$ 时,采用对数正态分布的云滴谱反演得到

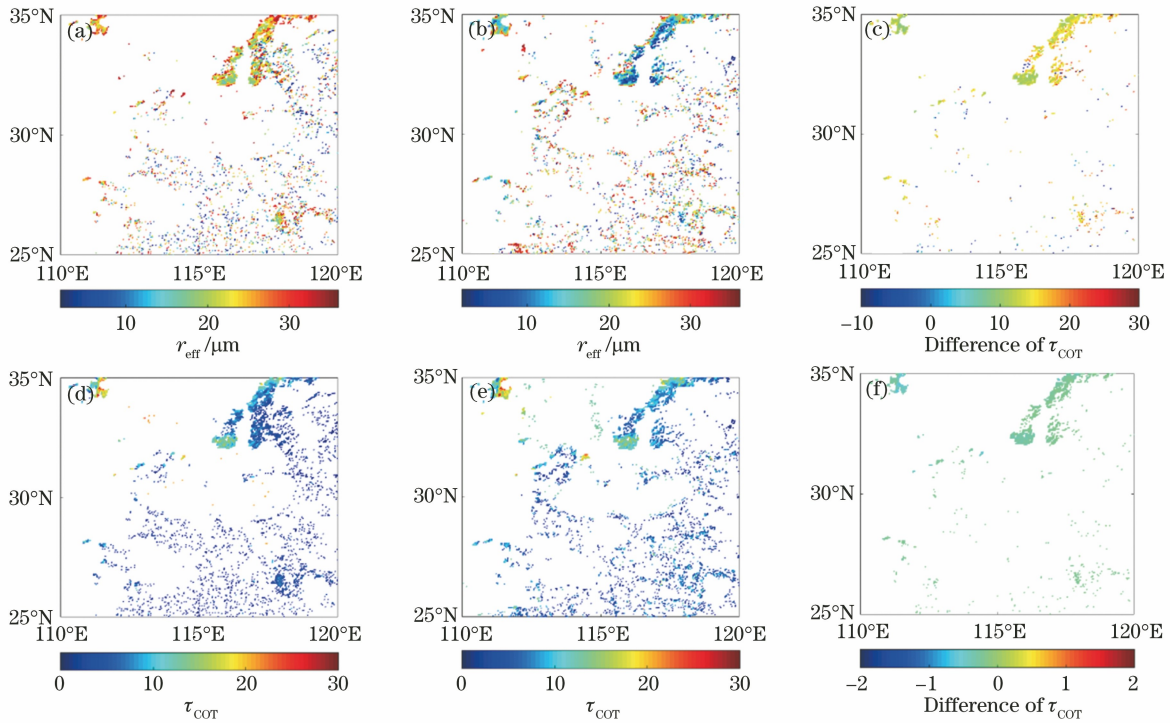


图 8 两种谱分布假设情况下 FY-4A/AGRI 云属性检索值比较, FY-4A/AGRI 观测时间为 2020-08-20T07:00—07:15。(a)对数正态谱分布假设下反演的 r_{eff} 结果;(b)修正 Gamma 谱分布假设下反演的 r_{eff} 结果;(c)两种谱分布假设下反演的 r_{eff} 差值;(d)对数正态谱分布假设下反演的 τ_{COT} 结果;(e)修正 Gamma 谱分布假设下反演的 τ_{COT} 结果;(f)两种谱分布假设下反演的 τ_{COT} 差值

Fig. 8 Comparison of FY-4A/AGRI cloud property retrievals under two cloud droplet spectral distribution assumptions, and observation time of FY-4A/AGRI is 07:00—07:15 on 20 August, 2020. (a) r_{eff} retrieved under assumption of log-normal spectral distribution; (b) r_{eff} retrieved under assumption of modified Gamma spectral distribution; (c) difference of retrieved r_{eff} under two spectral distribution assumptions; (d) τ_{COT} retrieved under assumption of log-normal spectral distribution; (e) τ_{COT} retrieved under assumption of modified Gamma spectral distribution; (f) difference of τ_{COT} retrieved under two spectral distribution assumptions

的 τ_{COT} 集中在 0~5, 而采用修正 Gamma 分布的云滴谱反演得到的 τ_{COT} 集中在 0~2, 显示出单峰分布。综上所述, 两种谱分布假设下反演的 r_{eff} 差异较大, 而 τ_{COT} 差异相对而言比较小, 这与前文得到的在 0.65 μm 可见光波段基于两种云滴谱计算的反射率仅相差 0.1%~2.0%、而在 1.61 μm 短波近红外波段基于对数正态分布的云滴谱计算的反射率比基于修正 Gamma 分布的云滴谱计算的反射率大 10%~20% 的结果吻合。

5 结 论

基于 FY-4A/AGRI 的第 2 和第 5 通道参数设置, 利用 RTTOV 辐射模式模拟计算了两种云滴谱分布假设条件下水云的反射率随云光学厚度 τ_{COT} 以及有效粒子半径 r_{eff} 的变化情况, 并分析了这两个云滴谱分布假设对反演 τ_{COT} 与 r_{eff} 的影响。结果

表明:

1) 云滴谱分布差异对短波近红外波段 (1.61 μm) 的反射率模拟结果影响较大。在 0.65 μm 可见光波段, 采用对数正态云滴谱计算的反射率与采用修正 Gamma 云滴谱计算的反射率仅相差 0.1%~2.0%。在 1.61 μm 短波近红外波段, 采用对数正态函数计算的反射率比采用修正 Gamma 函数计算的反射率高 10%~20%。

2) 不同的云滴谱分布假设对 r_{eff} 反演结果产生较大影响。采用对数正态云滴谱反演的 r_{eff} 集中在 15~35 μm , 而采用修正 Gamma 云滴谱反演的 r_{eff} 集中在 10~30 μm , 采用对数正态云滴谱反演的 τ_{COT} 与采用修正 Gamma 云滴谱反演的 τ_{COT} 相差 -2%~5%。

由于模式中采用的水云粒子为球形粒子, 水云可视单层云, 大气可视平行大气, 但实际上这些

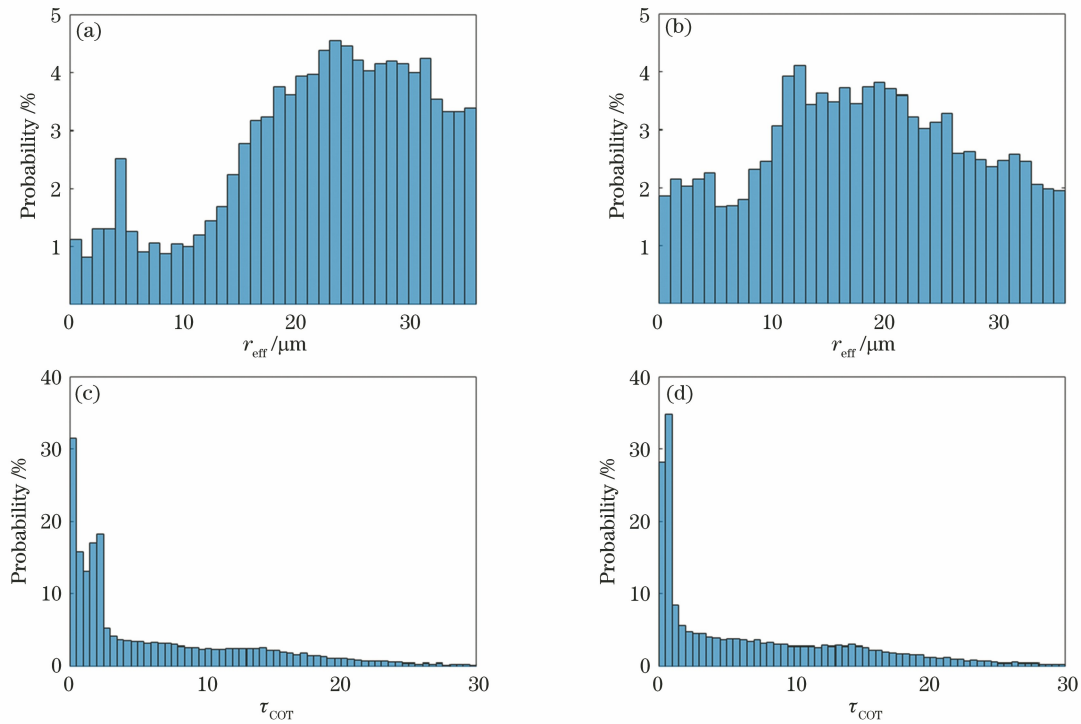


图 9 两种谱分布情况下 FY-4A/AGRI 云属性检索值的概率密度分布。(a)对数正态谱分布假设下反演的 r_{eff} 概率密度分布;(b)修正 Gamma 谱分布假设下反演的 r_{eff} 概率密度分布;(c)对数正态谱分布假设下反演的 τ_{cot} 概率密度分布;(d)修正 Gamma 谱分布假设下反演的 τ_{cot} 概率密度分布

Fig. 9 Probability density distributions of FY-4A/AGRI cloud property retrievals under two spectral distributions. (a) Probability density distribution of r_{eff} retrieved under assumption of log-normal spectral distribution; (b) probability density distribution of r_{eff} retrieved under assumption of modified Gamma spectral distribution; (c) probability density distribution of τ_{cot} retrieved under assumption of log-normal spectral distribution; (d) probability density distribution of τ_{cot} retrieved under assumption of modified Gamma spectral distribution

条件都不是固定的,而且辐射传输方程不存在唯一解,这些都会造成理论计算的查算表存在误差。而将实际的卫星反射率观测值插值到理论计算的查算表,虽然该过程存在误差,但实验结果仍然具有一定参考性。研究了两种云滴谱类型,在以后的工作中将进一步研究更多类型的云滴谱分布的影响,并通过大量案例的反演、分析,评估不同谱型的适用性。同时本文的研究对象只选水云,且将其视为单层云,但在自然情况下,很多云都是多层云,并且含有冰晶,这将在后续工作中被进一步研究。

参 考 文 献

[1] Quante M. The role of clouds in the climate system [J]. *Journal de Physique IV*, 2004, 121: 61-86.
 [2] Zhao M Y. Research on cloud optical transmission characteristics based on satellite data [D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 1-5.
 赵梦月. 基于卫星数据的云光学传输特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 1-5.

[3] Zhou Y Q, Cai M, Ou J J, et al. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(6): 641-652.
 周毓荃, 蔡森, 欧建军, 等. 云特征参数与降水相关性的研究 [J]. *大气科学学报*, 2011, 34(6): 641-652.
 [4] Roeckner E, Schlese U, Biercamp J, et al. Cloud optical depth feedbacks and climate modelling [J]. *Nature*, 1987, 329(6135): 138-140.
 [5] Mitchell J F B, Senior C A, Ingram W J. CO₂ and climate: a missing feedback? [J]. *Nature*, 1989, 341(6238): 132-134.
 [6] Twomey S. Cloud nucleation in the atmosphere and influence of nucleus concentration levels in atmospheric physics [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1980, 84(12): 1459-1463.
 [7] Nakajima T, King M D, Spinhirne J D, et al. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: marine stratocumulus

- observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48(5): 728-751.
- [8] Baum B A, Kratz D P, Yang P, et al. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS: 1. Data and models [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D9): 11767-11780.
- [9] Kawamoto K, Nakajima T, Nakajima T Y. A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 2054-2068.
- [10] Fu Y F. Cloud parameters retrieved by the bispectral reflectance algorithm and associated applications[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 965-982.
- [11] Letu H S, Nagao T M, Nakajima T Y, et al. Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: capability of the AHI to monitor the DC cloud generation process[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3229-3239.
- [12] Deng Z Z, Zhao C S, Zhang Q, et al. Statistical analysis of microphysical properties and the parameterization of effective radius of warm clouds in Beijing area [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93(4): 888-896.
- [13] Sedunov Y S, Marlow W H. Physics of drop formation in the atmosphere [J]. *Physics Today*, 1975, 28(5): 56.
- [14] Pruppacher H R, Klett J D, Wang P K. Microphysics of clouds and precipitation[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 28(4): 381-382.
- [15] Jones K F, Thompson G, Claffey K J, et al. Gamma distribution parameters for cloud drop distributions from multicylinder measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(6): 1606-1617.
- [16] Saunders R, Brunel P. RTTOV-7 technical report [R]. Birmingham: NWP-SAF, 2002.
- [17] Matricardi M. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(652): 1823-1835.
- [18] Hocking J, Rayer H, Raye P, et al. RTTOV v12 users guide[R]. Birmingham: NWP-SAF, 2019.
- [19] Hocking J, Saunders R, Raye P, et al. RTTOV development status [C]//The 22nd International TOVS Study Conference, October 30-November 6, 2019, Saint-Sauveur, Canada. [S.l.: s.n.], 2019.
- [20] Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al. Application and development of FY-4 meteorological satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 8-19.
- 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展[J]. *上海航天*, 2017, 34(4): 8-19.
- [21] Gao H T, Bao S L, Liang H, et al. Filtering algorithm for nonlightning events using the FY-4 lightning mapping imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0911001.
- 高慧婷, 鲍书龙, 梁华, 等. 风云四号卫星闪电成像仪虚警滤除方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0911001.
- [22] Min M, Wu C Q, Li C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(4): 708-719.
- [23] Zhu L, Li J, Zhao Y Y, et al. Retrieval of volcanic ash height from satellite-based infrared measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(10): 5364-5379.
- [24] Yang J, Chen B J, Yin Y. Physics of clouds and precipitation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.
- 杨军, 陈宝君, 银燕. 云降水物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [25] Tong J J. The study on synthesis radiometric calibration methods for satellite sensors[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2004: 8-22.
- 童进军. 遥感卫星传感器综合辐射定标方法研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2004: 8-22.
- [26] Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(1): 171-194.
- [27] Chen W M. Satellite meteorology [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- 陈渭民. 卫星气象学 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2003.
- [28] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. Guo C L, Zhou S J, Transl. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- (美)K. N. Liou. 大气辐射导论 [M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2 版. 北京: 气象出版社, 2004.
- [29] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [30] Chen Y L, Chen G C, Cui C G, et al. Retrieval of the vertical evolution of the cloud effective radius from the Chinese FY-4 (Feng Yun 4) next-generation geostationary satellites [J]. *Atmospheric Chemistry*

- and Physics, 2020, 20(2): 1131-1145.
- [31] Petty G W. Atmospheric radiation [M]. 2nd ed. Wisconsin: Sundog, 2006: 74-109.
- [32] Zhao F S, Ding Q, Sun T M, et al. An iterative algorithm for the retrieval of cloud properties from NOAA-AVHRR imagery [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 594-601.
赵凤生, 丁强, 孙同明, 等. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 594-601.
- [33] Liu J, Dong C H, Zhang W J. Determination of the optical thickness and effective radius of water clouds by FY-1C data [J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2003, 22(6): 436-440.
刘健, 董超华, 张文建. 利用 FY-1C 资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 436-440.
- [34] Chen Y Y, Zhou Y Q, Mao J T, et al. Experimental research of the retrieval of cloud effective particle radius by FY-2C geostationary satellite data [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(4): 29-34.
陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究 [J]. 气象, 2007, 33(4): 29-34.
- [35] Zhou Q, Zhao F S, Gao W H. Retrieval of cloud radiative properties from FY-2C satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(4): 827-842.
周青, 赵凤生, 高文华. 利用 FY-2C 卫星数据反演云辐射特性 [J]. 大气科学, 2010, 34(4): 827-842.
- [36] Zheng Y H, Huang L, Zhai J. Impacts of land cover changes on surface albedo in China, the United States, India and Brazil [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(7): 917-932.
郑瑜晗, 黄麟, 翟俊. 陆地表层覆盖变化对地表反照率影响的四国对比 [J]. 遥感学报, 2020, 24(7): 917-932.
- [37] Du S D, Zhang Y J, Wei W, et al. Analysis of influence of solar zenith angle on reconstruction of hyperspectral surface reflectance [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0229001.
杜沈达, 张运杰, 韦玮, 等. 太阳天顶角对反演高光谱地表反射率影响分析 [J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0229001.
- [38] Tang F Y, Zhou H J, Wang W H, et al. Absorbing aerosol index inversion algorithm of TROPOMI and its application [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1601001.
汤付颖, 周海金, 王维和, 等. TROPOMI 吸收性气溶胶指数反演算法及其应用 [J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1601001.