

光学学报

基于 Himawari-8 卫星成像仪的深对流云 BRDF 特性建模

周为伟¹, 胡秀清^{2,3*}, 杨磊库¹

¹河南理工大学测绘与国土信息学院, 河南 焦作 454003;

²中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

³许健民气象卫星创新中心, 北京 100081

摘要 深对流云是卫星传感器可见光与近红外波段替代定标的地球稳定目标,其方向反射特性是影响场地定标精度的重要参数。为了提高定标的准确性,需要双向反射率(BRDF)模型进行各向异性因子校正。基于 Himawari-8 卫星成像仪,利用提取的 2016—2020 年期间深对流云数据,依据查找表方法实现 BRDF 特征建模。在同一角度下对比业务化 Hu 模型归一化后的各向异性因子,分析两种模型降低深对流云响应标准误差的校正效果,并将经本文模型校正的长时间序列深对流云反射率数据和定标系数方法计算的仪器衰减率进行比较。研究表明,在可见-近红外波段范围内 BRDF 特性差异较小,与 Hu 模型相比,该方法表现出较高的一致性,使用本文模型校正后的深对流云响应标准误差小于 Hu 模型,且计算衰减率数值基本一致。在短波红外通道,本文模型与 Hu 模型相比,各向异性特征差异较大,使用 Hu 模型校正后标准误差增大,而使用本文模型校正后,标准误差最高可减少 31%,在深对流云与定标系数计算衰减结果方面存在差异,这可能与短波红外通道的波动太大相关。因此,基于 Himawari-8 卫星成像仪对深对流云的 BRDF 特征建模是可行的。

关键词 传感器; 大气散射; 深对流云; 后向散射; 双向反射率函数

中图分类号 P407 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221771

1 引言

对地观测传感器在轨运行期间,受恶劣太空环境及仪器老化等影响,会发生仪器性能的衰减,需要进行准确的辐射定标^[1]。然而,一些星载仪器不携带星上校准装置,或即使携带,当暴露在太空环境和强太阳辐射环境下时,这些设备通常可能会失真。因此,需要通过各种替代校准手段频繁更新校准系数。根据是否在场测试现场进行替代校准,可分为基于场地和非基于场地的校准^[2-4]。场地校准往往需要大量的人力和财力资源且校准频率受到限制,很难对历史数据进行重新校准。基于地球稳定目标监测遥感仪器在轨辐射响应变化是一种低成本、日益被重视的定标跟踪方法。

位于非洲、南美洲以及我国西北沙漠目标(如敦煌戈壁)、南北极冰川目标(Dome C 和 Greenland)、深对流云(DCC)目标及月球目标是目前国内外应用最为广泛的遥感仪器定标跟踪的地球稳定目标^[5-10]。相比于沙漠、冰川等目标,深对流云在可见-近红外波段

(VIS/NIR)具有较高且稳定可靠的反射率,因此适合辐射定标。此外,深对流云发展深厚位于对流层顶部,受水汽吸收和气溶胶的影响较小。且深对流云主要分布于赤道地区,适合对极轨和静止卫星进行定标。

目前基于深对流云定标国内外已展开相关工作,Hu 等^[11]在 2005 年时首次注意到深对流云目标用于定标的潜力,依据红外亮温阈值与光学厚度识别深对流云目标,通过跟踪深对流云每月反照率的变化评估 MODIS、VIRS 和 AVHRR 稳定性。Minnis 等^[12]在亮温与光学厚度的识别条件下增加空间均一性阈值,即计算识别的深对流云像元与邻近像元之间的标准差,通过标准差大小判断像元的空间均一性,降低了薄云出现的概率,提高了定标的准确性。Doelling 等^[13]在前人对深对流云识别的基础上,基于 MODIS 数据中最稳定的 0.65 μm 通道,分析了深对流云识别方法在不同阈值条件下对深对流云数据稳定性影响,并分析了深对流云不同特征值(众数与均值)的稳定性,证明了特征值的选择与波长之间的相关性。随后,Bhatt

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-11-17; 录用日期: 2022-11-30; 网络首发日期: 2022-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902901,2018YFB0504901)

通信作者: *huxq@cma.cn

等^[6]使用深对流云目标和 Libya-4 沙漠目标,通过评估稳定目标的时间自然变量,发现 VIIRS 比 MODIS 更稳定。Bhatt 等^[14]利用深对流云与沙漠目标评估 MODIS 在轨 RSV 的性能变化,经过对比,验证了深对流云方法的稳健性。2019 年, Gong 等^[15]联合 CrIS 测量提高深对流云的识别效率,监测 VIIRS 的校准变化。同年, Bhatt 等^[16]改进了深对流云定标技术,监测搭载在 NOAA-16 和 NOAA-17 卫星上的 AVHRR 传感器时间校准漂移。随着深对流云定标技术的发展与成熟, 2021 年, Doelling 等^[17]提出依据深对流云目标方法,将 NOAA-20 VIIRS 仪器作为基准,与静止卫星传感器进行相互校准,为推进全球天基观测之间的辐射协调作出了重大贡献。

然而,深对流云并非真正的朗伯体目标,卫星从不同观测角度探测时,其存在的各向异性特征使得卫星观测产生偏差,从而带来定标误差。因此有必要分析深对流云的方向反射特性,并建立有效双向反射率 (BRDF) 模型来校正方向反射率和提高定标精度。

近年来,对 BRDF 特性的研究成为热门话题,李卓然等^[18]对近红外波段的 BRDF 特性进行研究,有效表征了材料特性。张景瑜等^[19]提出基于双向反射率函数光学成像模型的条纹调制参数,实现了投影条纹的像素级调制。隋春来等^[20]在物理机制上通过建立 Davis 模型模拟光谱 BRDF 曲线,实现了物证的有效判定。特别是深对流云的方向特性研究,更是备受关注。Hu 等^[11]根据 CERES 观测结果构建深对流云角度校正模型,利用非线性神经网络将 CERES 宽波段的角校正模型应用于窄波段,依据校正后的深对流云反照率证明了 MODIS、VIRS 和 AVHRR 的稳定性。Loeb 等^[21]根据 TRMM 卫星 CERES 观测值建立宽波段深对流云角度校正模型。Fougnie 等^[22]基于 PARASOL 卫星观测提取深对流云数据,依据深对流云数据平均反射率表征 BRDF 特征,与 Hu 模型和辐射传输计算对比验证,结果保持较高的一致性。2017 年, Bhatt 等^[23]研究了 Hu 模型对于短波红外通道校正效果较差的问题,对 MODIS 短波红外通道进行了重新建模,并且提出建立月模型以实现短波红外通道的去季节化。然而,业务化 Hu 模型不仅对于短波红外通道不适用,而且在可见-近红外通道,特征值选择为反射率均值时,数据稳定性近乎无影响。考虑到此前构造的模型相对于现在时间已经比较久,可能受到人类活动影响,深对流云的各向反射因子会产生一定变化。且业务化 Hu 模型与 CERES 厚冰云模型为宽波段模型。故此,本文利用最新数据对深对流云 BRDF 特征建模,能够更好地表征深对流云反射率的方向特性,对各个通道分别建模,能够弥补 Hu 模型与 CERES 厚冰云模型是宽波段模型的不足。而对于短波红外通道的建模,可以填补目前业务使用的 Hu 模型对短波红外通道不适用空白,对提高深对流云目标定标精度具有重大意义。

本文旨在基于 Himawari-8 卫星成像仪,提取深对流云数据,依据角度数据将深对流云反射率归类为不同区间,利用区间平均反射率来表征 BRDF 特征实现建模。将本文模型与 Hu 模型归一化到同一角度比较,并进一步分析了该模型与 Hu 模型降低深对流云响应的标准误差效果,最后将该模型用于长时间序列深对流云反射率数据计算仪器衰减,与定标系数方法计算衰减结果对比,结果证明了本文模型的优越性。

2 数据介绍

2.1 Himawari-8 卫星介绍

静止气象卫星是在赤道上空地球同步轨道上工作的气象卫星,其在地球赤道上空约 35800 km,与地球自转同步运行,相对地球静止,可以观测地球表面 1/3 的固定区域,对同一目标地区进行持续不断的气象观测。Himawari-8 是 2014 年 7 月日本发射的新一代日本地球静止气象卫星,搭载最先进的光学成像仪。成像仪包括 6 个反射波段及 10 个红外波段,见表 1。卫星具有 5 个扫描区域,包括全盘、日本地区、目标区域和两个地标区域,本次实验使用的是全盘扫描方式的 L1B 数据集。

表 1 Himawari-8/AHI 的详细参数
Table 1 Detailed parameters of Himawari-8/AHI

Light	Band	Central wavelength / μm	Spatial resolution / km
Visible light	1	0.47	1.0
	2	0.51	1.0
	3	0.64	0.5
Near infrared	4	0.86	1.0
	5	1.60	2.0
	6	2.30	2.0
	7	3.90	2.0
	8	6.20	2.0
	9	6.90	2.0
Infra-red	10	7.30	2.0
	11	8.60	2.0
	12	9.60	2.0
	13	10.40	2.0
	14	11.20	2.0
	15	12.40	2.0
	16	13.30	2.0

2.2 深对流云数据提取方法

云是悬浮在空中的大量小水滴或者小冰晶的聚合物,可以将云分为对流云、层状云和波状云。对流云是大气剧烈对流的产物,深对流云是一种发展深厚的对流云,它往往能发展到对流层顶之上,实现大气顶部与地面之间的能量传输。

深对流云位于热带辐合带。热带辐合带是一个靠近赤道的薄带,北部和南部气团在此处汇合,形成深对流云所必需的上升气流。深对流云是热带最亮目标,当集体分析深对流云反射特性时,深对流云是不变的地球目标。识别深对流云目标主要过程如下:1)11 μm 通道亮温小于 205 K 的像元被选定为深对流云;2)为了避免几何角过大导致的不确定性,只选择热带地区($\pm 20^\circ$ latitude)、太阳天顶角与观测天顶角在 $5^\circ\sim 40^\circ$ 、相对方位角在 $5^\circ\sim 175^\circ$ 之间的数据;3)为了避免选取到较小的深对流云或者深对流云的边缘部分,在深对流云的选取上加上反射率均一性与亮温均一性的判断,即 0.64 μm 通道 7×7 像元的反射率标准差小于 3%,11 μm 通道 7×7 像元的亮温标准差小于 1 K;4)加上太阳散射角限制,取较大的太阳散射角($\geq 36^\circ$)以避免海面上耀斑的影响。

3 BRDF 建模与结果

3.1 BRDF 模型建模方法

BRDF 又称双向反射率分布函数,目前广泛被接受的定义由 Nicodemus 等^[24]在 1977 年给出。严格定义如下式所示,表示的是反射辐亮度的微增量与辐射通量微增量的比值。

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_r(\theta_r, \phi_r)}, \quad (1)$$

式中: θ_i, θ_r 分别表示入射天顶角与反射天顶角,天顶角定义为光线与平面法线的夹角; ϕ_i, ϕ_r 分别表示入射方位角与反射方位角,即光线在平面投影与定义 0° 方位角直线的夹角。 L_r 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, E_r 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$, 因此 BRDF 的单位是 sr^{-1} (sr 为球面度单位)。

这一定义有一定优点,但在实际测量物体的 BRDF 特性,尤其是在遥感方面的应用时,若严格按照 BRDF 的定义去表征物体的各向异性,则会遇到一定的困难。因为无论是反射辐亮度的微增量还是辐射通量的微增量,实际实验中都难以测量。因此在实际测量中使用更多 MODIS 产品定义的 ADMs (通常称为角度校正因子)作为取代,表示为

$$R(\theta_0, \theta, \phi) = \frac{\pi L(\theta_0, \theta, \phi)}{M(\theta_0)}, \quad (2)$$

$$\alpha_p = \frac{\pi I(\mu_0, \mu, \phi)}{\mu_0 F_0 R(\mu_0, \mu, \phi) D(\mu_0)}, \quad (3)$$

$$D(\mu_0) = \frac{\bar{F}(\mu_0)}{\int_0^{\pi/2} \bar{F}(\mu') \mu' d\mu'}. \quad (4)$$

BRDF 校正因子表征的是物体各方向反射率与反照率之间比例系数。式(2)~(4)为 Hu 模型给出的角度校正因子计算公式与调用角度校正因子进行校正的公式。其中, α_p 为行星反照率,与太阳天顶角无关, μ 为

太阳天顶角余弦, R 为各向异性因子, D 为特定物体反照率对太阳天顶角的依赖性,如深对流云, μ_0 为太阳天顶角, I 为辐亮度, F 为辐射通量,可以通过各个角度方向上的辐亮度角度积分求取。也就是说,将不同方向辐照度归一化到辐射通量关于太阳天顶角的积分值,就可以得到其各向异性因子 R 与太阳天顶角依赖性 D 的乘积,即 Hu 模型的 BRDF 校正因子。其反映的是反射率与行星反照率之比。

本文对深对流云各个通道的 BRDF 建模参照 Suttle 等^[25]与 Loeb 等^[21]将深对流云反射率数据归类到角度区间,建立查找表方法。考虑到仪器自身衰减较低并且为了保持充足的数据使得建立的查找表区间较为光滑,采用 2016—2020 年期间数据,提取深对流云方法与 2.2 节描述相同,但是将天顶角的范围扩大至 50° 范围,以产生更多的角度数据。关于归一化对象的选取,不影响 BRDF 因子的相对值,仅仅会影响 BRDF 因子的绝对值,影响校正后的反射率值的绝对量而非相对量,对相对定标与衰减分析并无影响。本文 BRDF 建模归一化对象选取 35° 太阳天顶角、 0° 观测天顶角、 0° 相对方位角方向的反射率值,将其作为标准观测几何。其作为归一化对象的原因如下:1)对于物体的 BRDF 测定,由于反照率需要各个角度数据进行方向积分,过于复杂,常取对应天顶角垂直方向反射率作为替代;2)这个角度所对应的区间深对流云的数据量最多,作为归一化对象,能够使 BRDF 模型分布较均匀。从理论上说,区间划分得越细致,越能更好地说明深对流云目标的各向异性。但基于统计模型原理,为了确保各个角度区间都有一定的数据量分布,根据已有数据,对于每一通道,将天顶角按 5° 区间的数归为一类,构造了一个 5° 区间的查找表。即太阳天顶角取 $0^\circ\sim 5^\circ, 5^\circ\sim 10^\circ, \dots, 45^\circ\sim 50^\circ$, 观测天顶角取 $0^\circ\sim 5^\circ, 5^\circ\sim 10^\circ, \dots, 45^\circ\sim 50^\circ$, 相对方位角每 10° 区间的数归为一类,即 $5^\circ\sim 15^\circ, \dots, 165^\circ\sim 175^\circ$, 总共划分为 $10\times 10\times 17=1700$ 个区间,统计每个区间范围内的反射率的均值、标准差及像素点数量。最后统一计算为各向异性因子 (ANIF), 公式为

$$F_{\text{ANIF}}(\theta_0, \theta, \phi) = \frac{R_{\text{BRDF}}(A_{\text{SZA}}, A_{\text{VZA}}, A_{\text{RAA}})}{R_{\text{BRDF}}(35, 0, 0)}, \quad (5)$$

式中: $R_{\text{BRDF}}(A_{\text{SZA}}, A_{\text{VZA}}, A_{\text{RAA}})$ 和 $R_{\text{BRDF}}(35, 0, 0)$ 分别表示观测区间对应反射率均值和太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角在 $35^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ 对应区间的反射率均值。

3.2 结果

选择 2016—2020 年期间提取的深对流云数据,通过建立查找表方式对 BRDF 特征建模。计算 2.3 节所建的查找表各个区间深对流云数据反射率平均值,将结果除以 35° 太阳天顶角、 30° 观测天顶角、 135° 相对方位角所对应区间的反射率均值,进行归一化处理,得到 BRDF 的各向异性因子。统计通道在不同太阳天顶角、

观测天顶角与相对方位角范围内的各向异性因子。为了便于展示,将结果绘制成极坐标图像。图 1 展示了太阳天顶角在 15°~20°范围内极坐标图像,极轴表示观测天顶角,极角表示相对方位角,颜色表示各向异性因子的大小。极坐标图像相对方位角等于 0°的位置称之为前向散射方位,180°的位置称之为后向散射方位,空白区域表示数据缺失。结果表明,可见-近红外通道 BRDF 特性近乎无差别,最低反射率出现在较大观测天顶角位置,最高反射率出现在近地点方向。与之相反,短波红外通道最低反射率出现在近地点附近,最高反射

率出现在前向散射观测天顶角较大的位置,与 Bhatt 等所建模型规律保持了较高的一致性^[20]。Hu BRDF 模型选择在太阳天顶角 15°~20°中间的 17.5°条件下,将不同观测天顶角与相对方位角对应的各向异性因子同样归一到 35°太阳天顶角、30°观测天顶角、135°相对方位角下。将结果绘制成极坐标图像,与 3.1 节建模结果进行比较。相比 Hu 模型,在可见光-近红外波段,总体各向异性表现出较高的一致性,证明了本文模型的可靠性。在短波红外通道,Hu 模型与其表现出了较大的差异性,这与 Hu 模型对于短波红外通道不适用性相关。

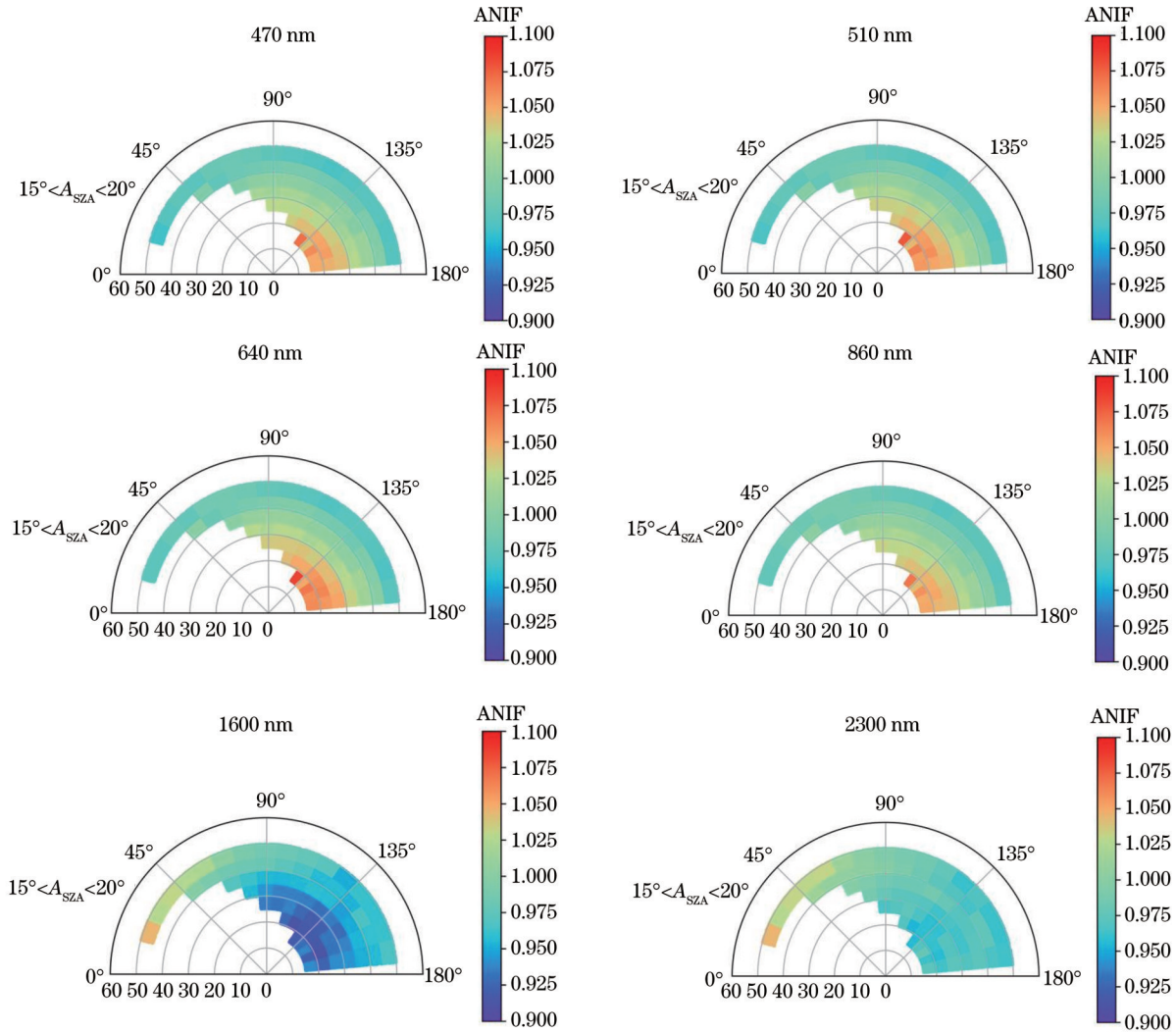


图 1 不同波段在天顶角 15°~20°的反射率的 BRDF 极坐标图
Fig. 1 BRDF polar map of reflectivity at zenith angle of 15°~20° for different bands

对于可见-近红外波段,深对流云的反射率与云光学厚度相关,而短波红外通道还与粒子的吸收特性相关,这是短波红外通道与可见光-近红外通道各向异性差异较大的根本原因。即使在短波红外通道中,不同波长各向异性特征也差异较大,如 1600 nm 和 2300 nm 通道。因此,对于不同的短波红外通道分别建模是十分必要的。

对于建好的 BRDF 模型,观测反射率的值 ρ 使用

以下公式进行各向异性因子校正:

$$\rho_{\text{correct}} = \rho_{\text{observed}} \left[\frac{R_{\text{BRDF}}(35, 0, 0)}{R_{\text{BRDF}}(A_{\text{SZA}}, A_{\text{VZA}}, A_{\text{RAA}})} \right]. \quad (6)$$

4 模型的定标应用效果检验

为了证明本文模型的可靠性,将本文模型与业务化的 Hu 模型进行对比,分析两种 BRDF 模型对降低深对流云响应的标准误差的效果。并通过本文模型校正各

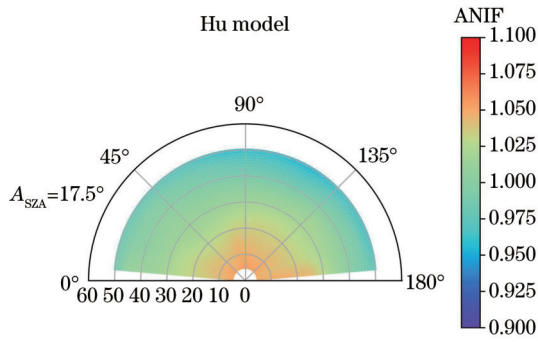


图 2 Hu 模型在天顶角 17.5° 的反射率的 BRDF 极坐标图
Fig. 2 BRDF polar plot of reflectivity of Hu model at zenith angle of 17.5°

向异性因子,分析长时间序列 H8 仪器衰减状况,将衰减结果与时间序列定标系数方法计算结果进行比较。

4.1 Hu 模型与本文模型降低数据响应标准误差效果对比

选择 2016—2020 年期间提取的深对流云数据,将每月反射率众数经两种 BRDF 模型校正,拟合后进行归一化,计算归一化月反射率众数长时间序列标准误差。归一化月反射率众数是将观测的月反射率众数归一化到第一天拟合的反射率。结果如图 3 所示。横坐标代表仪器运行时间,纵坐标表示归一化反射率。不同颜色表示未经过和经两种模型校正的归一化月反射率众数时间序列及计算的响应标准误差,具体标准误差结果统计在表 2 中。

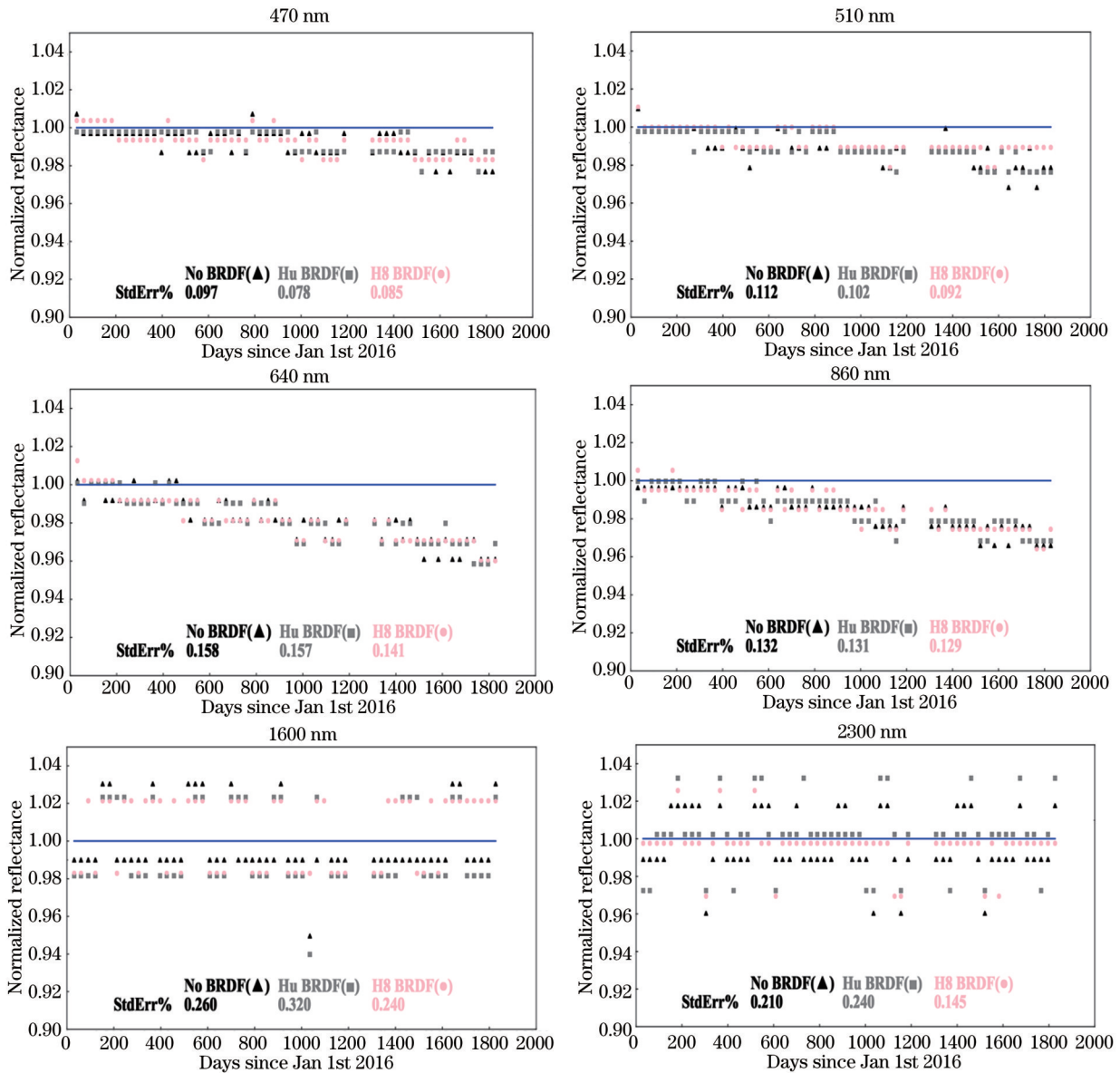


图 3 归一化深对流云每月反射率众数时间序列
Fig. 3 Normalized time series of monthly reflectance mode of deep convective clouds

表 2 不同模型校正及未校正标准误差

Table 2 Corrected and uncorrected standard errors of different models

Band /nm	No BRDF /%	Hu BRDF /%	H8 BRDF /%
470	0.097	0.078	0.085
510	0.112	0.102	0.092
640	0.158	0.157	0.141
860	0.132	0.131	0.129
1600	0.260	0.320	0.240
2300	0.210	0.240	0.145

对于 470 nm 波段,与未经 BRDF 模型校正相比, Hu 模型的标准误差降低了约 20%。对于 640 nm 和 860 nm 波段, Hu 模型的标准误差降低得并不明显。在 510 nm 波段, Hu 模型校正后降低约 9% 的标准误差。但是对于短波红外通道,明显可以看出 Hu 模型的不适用性,经过 Hu 模型校正后,1600 nm 和 2300 nm

通道的标准误差变得更大。与未校正相比,本文模型降低了可见-近红外和短波红外通道时间序列标准误差。除了 860 nm 和 1600 nm 波段标准误差降低较少外,其他波段误差降低均超过 10%,尤其对于 2300 nm 波段,达到了 31%,显示了本文模型的优越性。与 Hu 相比,本文模型除 470 nm 波段除外,均体现出了更好的校正效果。

4.2 仪器衰减分析

选择 2018 年深对流云数据,经本文模型校正后,利用月频率分布函数(PDF)展示每月深对流云反射率分布情况。图 4 展示了 2018 年 12 个月 6 个反射波段的每月频率分布函数图,横坐标表示反射率,纵坐标表示频率,峰值所对应反射率称之为每月反射率众数。在可见-近红外波段(1~4),图像呈现出带长尾的高斯分布,深对流云月反射率众数的均大于 0.9,体现出深对流云高反射率特性。在近红外波段(5~6),深对流云月反射率众数较小,这与红外通道深对流云粒子吸收

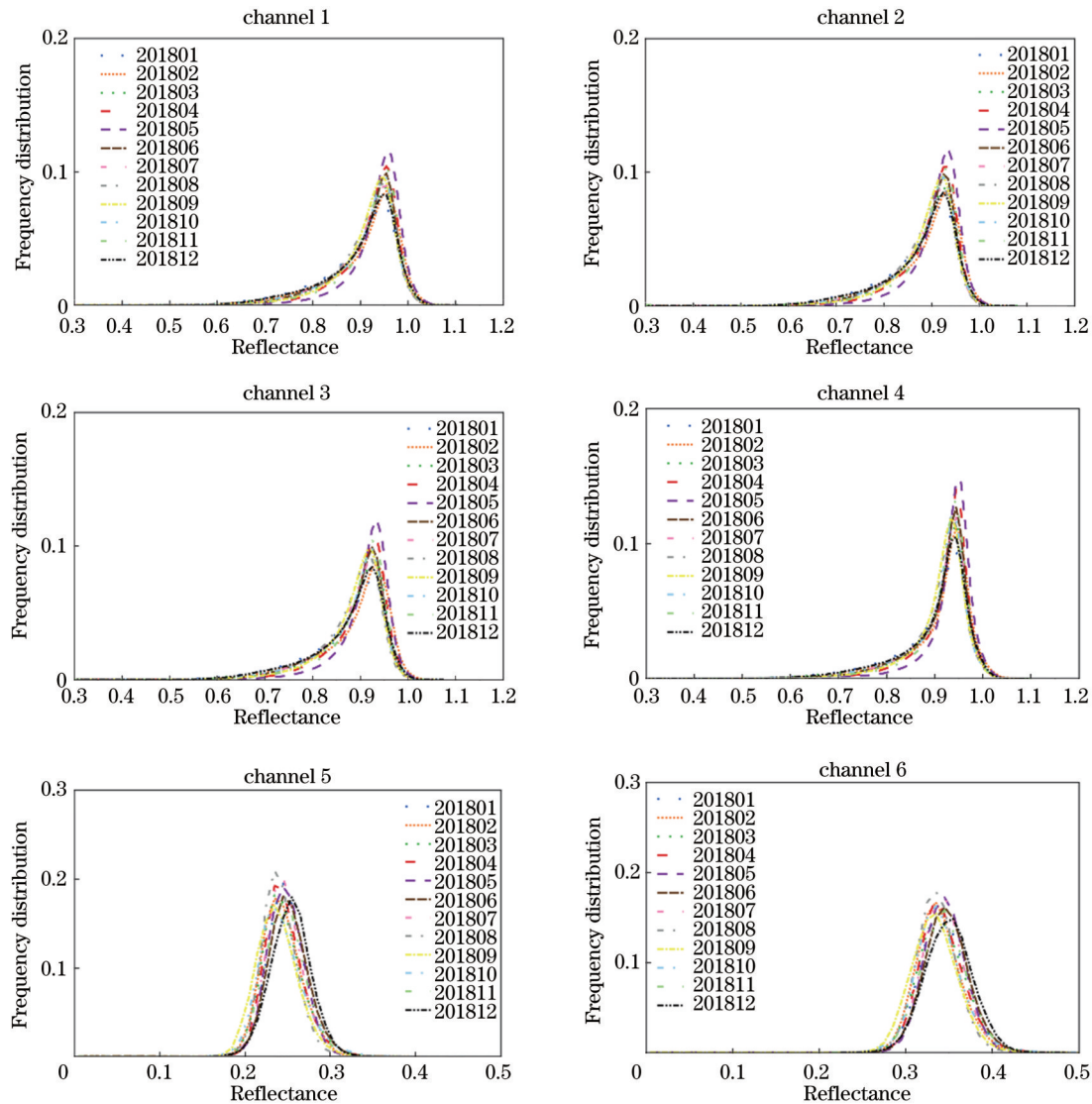


图 4 2018 年 1~6 通道月频率分布函数

Fig. 4 Monthly frequency distribution function of channels 1-6 in 2018

特性相关。通过跟踪每月反射率众数变化可以监测仪器的衰减。结果显示,2018年通道每月反射率众数变化基本保持一致,证明了2018年仪器的稳定性。

为了定量分析 2016—2022 年期间仪器的衰减情况,将经过本文模型校正的深对流云反射率数据采用滑动 30 天数据取中数方法,滑动是为了产生更多的数据量,使时间序列图像更为光滑。并将时间序列结果与 Himawari-8 的定标系数产品比较验证 (https://www.data.jma.go.jp/mscweb/data/monitoring/gasics/vis/monit_visvical.html)。图 5 展示了长时间序列反射率和定标系数变化图像,横坐标表示仪器运行时间,纵坐标表示归一化数值。可以看出,长时间序列定标系数呈上升趋势,与深对流云下降趋势相反,但均反映出仪器的衰减,且程度较为接近。分别采用线性函数对反射率和定标系数进行拟合,利用拟合公式计算 Himawari-8 卫星成像仪的总衰减与年衰减率。

总响应衰减 D_{total} 公式为

$$D_{total} = \frac{f(x_1) - f(x_{end})}{f(x_1)} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: f 为拟合公式; x_1 为序列第一天; x_{end} 为序列最后一天。

响应年衰减 D_{annual} 公式为

$$D_{annual} = \frac{D_{total}}{x_{end} - x_1} \times 365, \quad (8)$$

式中: x_i 表示某一天; $f(x_i)$ 表示这一天拟合的反射率。结果如表 3 所示。深对流云和定标系数方法计算衰减结果在可见-近红外波段表现出较高的一致性,这也证明了本文模型的可靠性。在短波红外通道差异较大,这可能与深对流云反射率在短波红外通道波动较大相关,由于短波红外通道衰减很小,而大的波动可能在拟合时掩盖了衰减趋势,导致结果产生误差。对于可见光波段,蓝色波段(470 nm)衰减最小,衰减率不超过 2%,红色波段(640 nm)衰减最大,波长越长,衰减率越高。对于近红外(860 nm)波段,其总衰减率达到 3.80%。对于短波红外通道,其衰减率远远低于可见光-近红外通道。整体来看,各个通道的总衰减率均较低,体现出了仪器性能的稳定性。

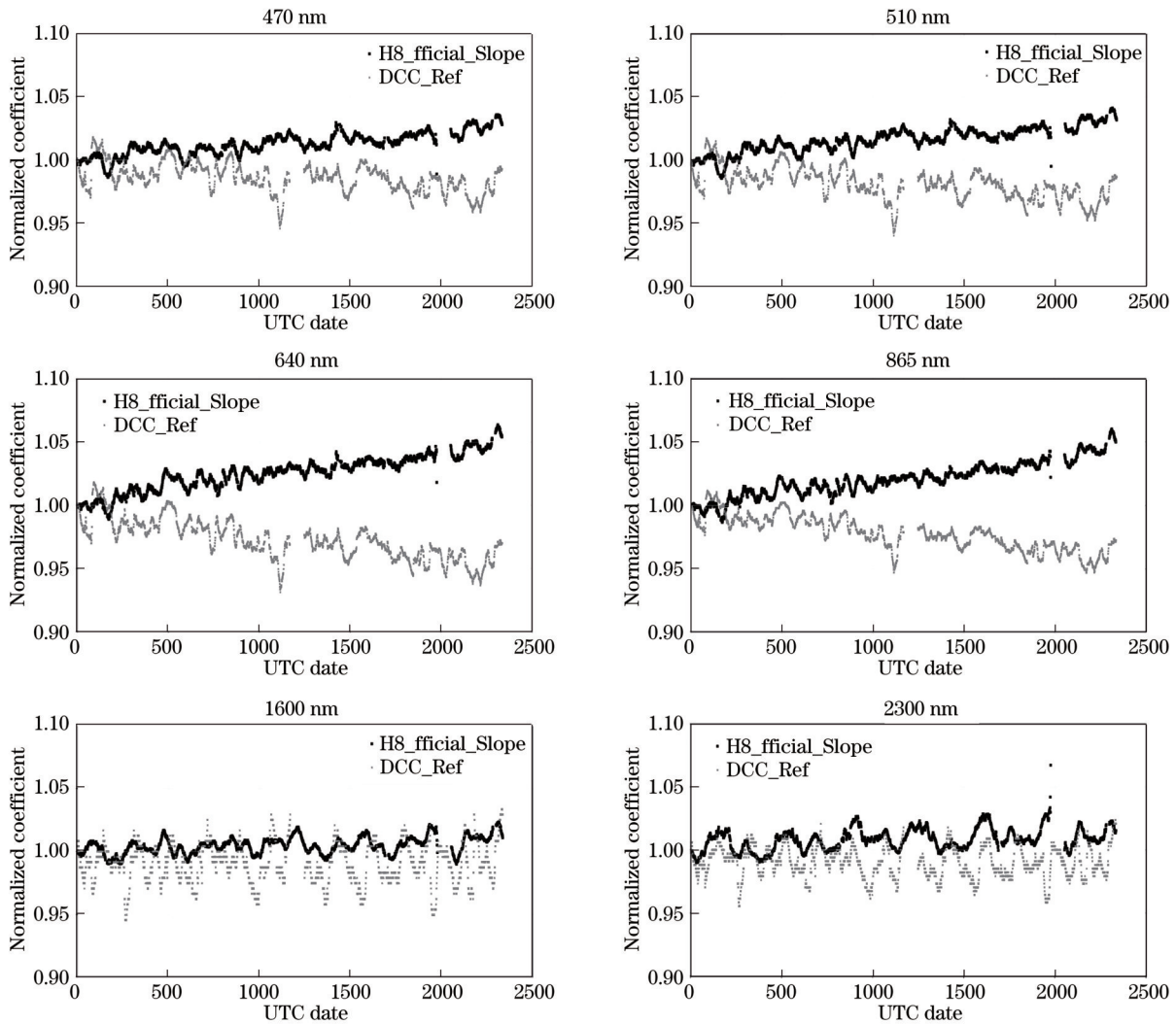


图 5 2016—2022 年各通道深对流云反射率响应变化

Fig. 5 Response change of deep tropic cloud reflectivity of each channel from 2016 to 2022

表 3 深对流云方法和定标系数方法计算仪器各通道总衰减率和年衰减率

Table 3 Total degradation rate and annual degradation rate of each channel of the instrument calculated by the deep convective cloud method and the calibration coefficient method

Band /nm	Total degradation /% (DCC)	Annual Degradation /%(DCC)	Total degradation /% (slope)	Annual degradation /%(slope)
470	1.94	0.310	2.50	0.39
510	2.52	0.400	3.00	0.47
640	4.16	0.650	4.51	0.70
865	3.80	0.600	4.31	0.67
1600	-0.21	-0.032	1.00	0.16
2300	0.26	0.041	1.30	0.21

5 结 论

本文主要基于 Himawari-8 卫星成像仪,提取深对流云数据对 BRDF 特征建模。首先分析了深对流云年与不同月份的地理分布。结果显示,深对流云的每年分布区域基本一致,集中分布于菲律宾及南海区域,而在不同的月份,其分布存在差异性。

其次实现了深对流云 BRDF 特征建模,对提取的 2016—2020 年期间深对流云数据利用角度划分区间,采用每个区间计算反射率均值的方法表征 BRDF 特性。实验结果发现,可见-近红外波段的 BRDF 特性基本相同,最低反射率出现在较大观测天顶角位置,最高反射率出现在近地点方向,短波红外通道与其相反,最低反射率出现在近地点附近,最高反射率出现在前向散射观测天顶角较大的位置。短波红外通道中不同波段 BRDF 特征差异较大。将模型与 Hu 模型归一化到同一角度下比较差异,Hu 模型在可见-近红外波段与建模结果较为相似,短波红外通道存在较大差异性。并进一步分析了 BRDF 模型减轻深对流云响应的标准误差效果,与未经 BRDF 校正相比,Hu 模型与本文模型均降低了可见-近红外波段响应的标准误差。对于短波红外通道,Hu 模型并不适用,而本文模型最高可降低 31% 的标准误差。与 Hu 模型相比,除 470 nm 波段本文模型校正效果较差外,其他波段均表现出了更好的校正效果。最后利用本文模型对 2016—2022 年的 H8 深对流云反射率数据进行方向校正,计算其衰减情况,与定标系数方法衰减结果比较后发现,其在可见-近红外波段具有较高的一致性,短波红外波段差异存在差异,这与深对流云在短波红外通道衰减率较低且自身波动较大相关,侧面证明了本文模型的可靠性。

综上,本文提出了一种基于 Himawari-8 卫星成像仪数据的 BRDF 特征建模方法。经过对比验证,证明了该方法的可靠性,对深对流云的各向异性带来的误差有着较好的校正效果,且可以弥补业务化模型 Hu 模型在短波红外通道的不足,值得应用与推广。

限于文章的篇幅与实验数据,本文没有详细探讨深对流云提取条件对数据稳定性的影响问题。在后续研

究中,需要采用控制变量的方法逐个变化筛选条件,讨论不同条件对数据稳定性的影响,找出最优的筛选条件。

此外,本次实验采用的 BRDF 模型为查找表形式,受到深对流云数据限制,大部分角度数据缺失。仅能实现已知区域的内插。如果能够找到某一函数将已知 BRDF 特性进行拟合,就可以外推缺失角度区间的 BRDF 特性。虽然尝试过使用多种线性半经验模型进行拟合,但未取得很好的效果。因此实现函数形式的表达对于将新建 BRDF 模型应用于其他卫星的数据校正将有很大的帮助。在未来的实验中,会对数据质量进行严格把控,尝试函数形式对 BRDF 特性建模,这也是自己未来的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 陈林,胡秀清,徐娜,等.基于深对流云目标的气象卫星可见-近红外辐射定标跟踪[C]//第 28 届中国气象学会年会——S2 风云卫星定量应用与数值.北京:中国气象学会,2011:50-57.
Chen L, Hu X Q, Xu N, et al. Visible near-infrared radiometric calibration and tracking of meteorological satellite based on deep convective cloud target[C]//The 28th Annual Meeting of China Meteorological Society-Quantitative Application and Value of S2 Fengyun Satellite. Beijing: China Meteorological Society, 2011: 50-57.
- [2] Dingirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 194-205.
- [3] 胡秀清,张玉香,邱康睦.采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J].遥感学报,2003,7(6): 458-464.
Qing H X, Xiang Z Y, Mu Q K. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2003, 7(6): 458-464.
- [4] Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 69-79.
- [5] 徐娜,吴荣华,胡秀清,等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J].光学学报,2015,35(12): 1228001.
Xu N, Wu R H, Hu X Q, et al. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
- [6] Bhatt R, Doelling D, Wu A S, et al. Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets[J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 2809-2826.

- [7] Hu X Q, Liu J J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 566-582.
- [8] Xiong X X, Wu A S, Wenny B. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 50-56.
- [9] Masonis S J, Warren S G. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(8): 1495-1520.
- [10] Tan K, Wang X, Niu C, et al. Vicarious calibration for the AHSI instrument of Gaofen-5 with reference to the CRCS Dunhuang test site[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, PP(99):1-11.
- [11] Hu Y X, Wielicki B A, Yang P, et al. Application of deep convective cloud albedo observation to satellite-based study of the terrestrial atmosphere: monitoring the stability of spaceborne measurements and assessing absorption anomaly[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2594-2599.
- [12] Minnis P, Doelling D R, Nguyen L, et al. Assessment of the visible channel calibrations of the VIRS on TRMM and MODIS on aqua and terra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(3): 385-400.
- [13] Doelling D R, Morstad D, Scarino B R, et al. The characterization of deep convective clouds as an invariant calibration target and as a visible calibration technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1147-1159.
- [14] Bhatt R, Doelling D R, Angal A, et al. Characterizing response versus scan-angle for MODIS reflective solar bands using deep convective clouds[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(1): 016014.
- [15] Gong X Y, Li Z L, Li J, et al. Monitoring the VIIRS sensor data records reflective solar band calibrations using DCC with collocated CrIS measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(15): 8688-8706.
- [16] Bhatt R, Doelling D R, Scarino B R, et al. Advances in utilizing tropical deep convective clouds as a stable target for on-orbit calibration of satellite imager reflective solar bands[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11127: 111271H.
- [17] Doelling D R, Phinn S, Bhatt R, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for deep convective cloud (DCC) method of inter-calibrating geostationary imagers with a polar-orbiting reference instrument [EB/OL]. [2022-08-09]. http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/20210909/DCC_ATBD_2021a.pdf.
- [18] 李卓然, 李雨霄, 刘子龙. 近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1212002.
Li Z R, Li Y X, Liu Z L. High-precision BRDF measurement system in near infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1212002.
- [19] 张景瑜, 任杰骥, 李霏, 等. 基于双向反射分布函数模型的结构光投影自适应调制方法[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912001.
Zhang J Y, Ren J J, Li F, et al. Adaptive structured light projection modulation method based on BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0912001.
- [20] 隋春来, 谭勇, 张焯, 等. 基于光谱双向反射分布函数的纤维物证鉴别[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0930001.
Sui C L, Tan Y, Zhang Y, et al. Fiber evidence identification based on spectral bidirectional reflectance distribution function [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0930001.
- [21] Loeb N G, Kato S, Loukachine K, et al. Angular distribution models for top-of-atmosphere radiative flux estimation from the clouds and the earth's radiant energy system instrument on the terra satellite. part I: methodology[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(4): 338-351.
- [22] Fougnie B, Doelling D, Crespín A, et al. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of deep convective clouds (DCC) derived from PARASOL measurements and compared to radiative transfer computation and model[EB/OL]. [2022-05-08]. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?httpsredir=1&article=1094&context=calcon>.
- [23] Bhatt R, Doelling D, Scarino B, et al. Development of seasonal BRDF models to extend the use of deep convective clouds as invariant targets for satellite SWIR-band calibration[J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 1061.
- [24] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. Washington, D.C.: Government Printing Office, 1977.
- [25] Suttles J T, Green R N, Smith G L, et al. Angular radiation models for earth-atmosphere system volume 1-shortwave radiation[EB/OL]. [2022-09-08]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19880018293>.

Modeling of BRDF Characteristics of Deep Convective Cloud Based on Himawari-8 Satellite Imager

Zhou Weiwei¹, Hu Xiuqing^{2,3*}, Yang Leiku¹

¹School of Survey and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;

²Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China

Abstract

Objective Deep convective cloud has high, stable, and reliable reflectivity in the visible-near infrared (VIS/NIR) band, which is suitable for radiometric calibration. In addition, the development of deep convective clouds is deeply located at the

top of the troposphere and is less affected by water vapor absorption and aerosols. The deep convective cloud is mainly distributed in the equatorial region, which is suitable for the calibration of polar orbit and geostationary satellites. However, the deep convective cloud is not a real Lambertian target. When the satellite detects from different observation angles, the anisotropy characteristics of the deep convective cloud make the satellite observation biased, which leads to calibration errors. Therefore, it is necessary to analyze the directional reflectance characteristics of deep convective clouds and establish an effective bidirectional reflectance distribution function (BRDF) to correct the directional reflectance and improve the calibration accuracy. The operational Hu model is not only inapplicable to the shortwave infrared channel but also has a slight influence on the data stability in the VIS/NIR channel when the eigenvalue is selected as the mean reflectivity. Since the previously constructed model has been relatively long compared with the current one and may be affected by human activities, the anisotropic reflection factors of deep convective clouds will change to some extent. The operational Hu model and CERES thick ice cloud model are broadband models. Therefore, we use the latest data to model the BRDF characteristics of deep convective clouds, which can better characterize the directional characteristics of deep convective cloud reflectivity. Modeling each channel separately can make up for the deficiency that the Hu model and CERES thick ice cloud model are broadband models. For the modeling of the shortwave infrared channel, it can fill the gap that the Hu model used by the current business is not applicable to the shortwave infrared channel, and it is of great significance to improve the calibration accuracy of the deep convective cloud target.

Methods The BRDF modeling of each channel of deep convective clouds in this paper classifies the deep convective cloud reflectivity data into angle intervals and establishes a look-up table method. In view of the low attenuation of the instrument itself and in order to maintain sufficient data to make the interval of the look-up table established more smoothly, the data from 2016 to 2020 are used. With regard to the selection of normalized objects, it does not affect the relative value of the BRDF factor but only the absolute value of the BRDF factor. It affects the absolute rather than relative quantity of corrected reflectivity value and does not affect the relative calibration and attenuation analysis. The BRDF modeling normalization object in this paper selects a solar zenith angle of 35° , observation zenith angle of 0° , and relative azimuth direction reflectivity of 0° as standard observation geometry. The reasons why they are used as the normalized objects are as follows: 1) for BRDF measurement of objects, since the albedo requires directional integration of data from all angles, which is too complex, the reflectivity in the vertical direction corresponding to the zenith angle is often used as a substitute; 2) the data volume of the interval deep convective cloud corresponding to this angle is the largest. As a normalized object, it can make the BRDF model more evenly distributed. Theoretically, as the interval division gets detailed, the anisotropy of the deep convective cloud target can be explained better. However, according to the principle of statistical model, in order to ensure that each angle interval has a certain amount of data distribution, for each channel, the zenith angle is classified as interval data of 5° , and an interval look-up table of 5° is constructed based on the existing data. In other words, the solar zenith angle is taken as $0^\circ-5^\circ$, $5^\circ-10^\circ$, ..., and $45^\circ-50^\circ$, and the observation zenith angle is taken as $0^\circ-5^\circ$, $5^\circ-10^\circ$, ..., and $45^\circ-50^\circ$. The data of every interval of 10° of the relative azimuth angle are classified into one category, that is, $5^\circ-15^\circ$, ..., $165^\circ-175^\circ$, which is divided into intervals of $10 \times 10 \times 17 = 1700$ in total, and the mean value, standard deviation, and number of pixel points within each interval are calculated and counted.

Results and Discussions The results show that the BRDF characteristics of the VIS/NIR channels are almost the same. The lowest reflectivity appears at the larger observation zenith angle, and the highest reflectivity appears in the perigee direction. On the contrary, the lowest reflectivity of the shortwave infrared channel appears near the perigee, and the highest reflectivity appears at the location where the zenith angle of the forward scattering observation is large (Fig. 1). Hu BRDF model chooses 17.5° between $15^\circ - 20^\circ$ of solar zenith angle to normalize the anisotropy factor corresponding to different observation zenith angle and relative azimuth, with solar zenith angle of 35° , observation zenith angle of 30° , and relative azimuth of 135° . The results are plotted as a polar image (Fig. 2) and compared with the modeling results. Compared with that of the Hu model, in the VIS/NIR band, the overall anisotropy of the proposed model shows a high consistency, which proves the reliability of the model. In the shortwave infrared channel, the Hu model shows a great difference, which is related to the inapplicability of the Hu model to the shortwave infrared channel. For the VIS/NIR band, the reflectivity of deep convective clouds is related to the cloud optical thickness, while the shortwave infrared channel is related to the absorption characteristics of particles, which is the fundamental reason for the large difference in anisotropy between the shortwave infrared channel and the VIS/NIR channel.

Conclusions In this paper, BRDF feature modeling of deep convective clouds is realized. The extracted data of deep convective clouds during 2016–2020 are divided into intervals by angles, and the BRDF characteristics are characterized by calculating the mean reflectivity of each interval. The experimental results show that the BRDF characteristics of the VIS/NIR band are basically the same. The lowest reflectivity appears at the location of the larger observation zenith angle, and the highest reflectivity appears in the perigee direction. For the shortwave infrared channel, the situation is the

opposite. The lowest reflectivity appears near the perigee, and the highest reflectivity appears at the location of the larger forward scattering observation zenith angle. The BRDF characteristics of different bands in the shortwave infrared channel are quite different. When the model and Hu model are normalized to the same angle, the difference is compared. The results of the Hu model in the VIS/NIR band are similar to those of modeling, and the shortwave infrared channel is quite different. The effect of the BRDF model on reducing the standard error of deep convective cloud responses is further analyzed. Compared with the model without BRDF correction, the Hu model and the proposed model both reduce the standard error of the response in the VIS/NIR band. For the shortwave infrared channel, the Hu model is not applicable, and the standard error of this model can be reduced by 31% at most. Compared with the Hu model, except for the poor correction effect of the model in the band of 460 nm, other bands show a better correction effect. Finally, the model in this paper is used to correct the direction of deep convective cloud reflectivity data based on Himawari-8 from 2016 to 2022, calculate its attenuation, and compare it with the attenuation results of the calibration coefficient method. It is found that it has a high consistency in the VIS/NIR band, and there are differences in the shortwave infrared band, which is related to the low attenuation rate of deep convective clouds in the shortwave infrared channel and its large fluctuations. This thus proves the reliability of the model in this paper.

Key words sensors; atmospheric scattering; deep convective cloud; backscattering; bidirectional reflectance distribution function