

王明,陈英英,周毓荃,等.2022.基于一次暴雨过程的风云四号A星三种云参数应用效果对比分析[J].暴雨灾害,41(4):396-404

WANG Ming, CHEN Yingying, ZHOU Yuquan, et al. 2022. Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(4):396-404

基于一次暴雨过程的风云四号A星三种云参数 应用效果对比分析

王明^{1,2}, 陈英英², 周毓荃³, 李琦³

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 2. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 3. 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081)

摘要:云宏观物理特征参数(简称“云参数”)是云和降水分析的重要依据,针对2020年6月27日发生在湖北的一次极端暴雨过程,选取风云四号A星(FY-4A)三个波段的原始数据及三种云参数产品与时空匹配的中分辨率光谱成像仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)资料进行对比,结果表明:(1)相比MODIS的窄光谱,FY-4A卫星光谱响应函数的波段普遍较宽,二者在三个通道中心波段的位置上均存在一定的偏移。(2)从原始数据来看,两颗卫星平面分布模态较为一致,FY-4A可见光波段反射率总体上小于MODIS,相关系数为0.91,平均偏差为-0.07;FY-4A近红外波段反射率比MODIS偏大近40%,平均偏差为0.05,相关系数仅为0.42;FY-4A红外波段亮温略高于MODIS,平均偏差为3.7 K,相关系数达0.93、线性拟合斜率接近1。(3)从云参数产品来看,FY-4A反演的云光学厚度(Cloud Optical Thickness, COT)小于MODIS,深厚密闭的云区差异明显,但相关性较好、二者的拟合呈非线性;与MODIS相比,FY-4A反演的云粒子有效半径(Cloud Effective Radius, CER)区间较窄,云顶温度(Cloud Top Temperature, CTT)略偏高、相关性最好。(4)随着雨强的增大,两颗卫星反演的COT、CER的偏差增大,CTT的偏差减小。

关键词:云参数;MODIS;FY-4A;反演;偏差

中图分类号:P405

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.004

Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case

WANG Ming^{1,2}, CHEN Yingying², ZHOU Yuquan³, LI Qi³

(1. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205; 2. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The parameters of cloud macro- and microphysical characteristics (referred to as "cloud parameters") are important basis for cloud and precipitation analysis. Aiming at an extreme rainstorm event that occurred in Hubei province on June 27, 2020, the original data of three band and three cloud parameter products of FY-4A were selected to compare with spatio-temporally coincident MODIS data. The results show that: (1) Compared with the narrow spectrum of MODIS, the spectral response function of the FY-4A satellite generally has a wider band. At the center band of the three channels, there is a certain offset in position between the two. (2) Judging from the original data, the plane distribution modes of the two satellites are relatively consistent. The reflectivity of FY-4A in the visible band is generally lower than that of MODIS, with a correlation coefficient of 0.91 and an average deviation of -0.07. The reflectivity of FY-4A in the near-infrared band is nearly 40% larger than MODIS, with an average deviation of 0.05 and a correlation coefficient of only 0.42. The brightness temperature of the FY-4A infrared band is slightly higher than that of MODIS, with an average deviation of 3.7 K, a correlation coefficient of 0.93, and a linear fitting slope close to 1. (3) From the perspective of cloud parameter products, the Cloud Optical Thickness (COT) of FY-4A retrieval is smaller than that of MODIS, and the deep closed cloud area has an obvious difference, but the correlation is good, and the fitting of the two is

收稿日期: 2020-12-22; 定稿日期: 2022-02-22

资助项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J036); 国家重点研发计划(2016YFA0601704)

第一作者: 王明, 主要从事卫星遥感与气候变化研究。E-mail: wangming@lasg.iap.ac.cn

通信作者: 陈英英, 主要从事大气物理与大气遥感研究。E-mail: brisk007@163.com

nonlinear. Compared with MODIS, Cloud Effective Radius (CER) obtained by FY-4A retrieval is narrower, Cloud Top Temperature (CTT) is slightly higher, and the correlation is the best. (4) With the increase of rain intensity, the deviation of COT and CER retrieved by the two satellites increases, and the deviation of CTT decreases.

Key words: cloud parameters; MODIS; FY-4A; retrieval; deviation

引言

作为大气圈层中最为重要的水成物,云在天气系统演变、全球水循环以及气候系统变化等方面发挥着极其重要的作用(卢乃锰等,2017),了解云的物理性质不仅有助于对天气系统的诊断分析和监测预报(杨磊等,2020),同时对空中云水资源的合理评估和利用也极为有利(蔡森,2013)。而云参数是建立各类云物理方案以改进模式预报能力的关键因素之一(梅钦等,2018),也是科学识别人影作业潜力区和评估作业效果的重要依据(范思睿和王维佳,2018),其准确性对于下游产品的生成至关重要。

目前,通过卫星原始数据计算反演得到的云参数主要包括云量、云检测、云分类、云相态、云顶温度/高度、云顶气压、云光学厚度、云粒子有效半径、云液水路径等。其中云光学厚度(Cloud Optical Thickness, COT)、云粒子有效半径(Cloud Effective Radius, CER)、云顶温度(Cloud Top Temperature, CTT)三个参数可用于降水云与非降水云的区分(刘建朝和周毓荃,2011;刘显通和刘奇,2013;谢磊和刘奇,2017;郭文昕等,2021)。COT表示云中水成物含量,降水强度较大的对流云都具有较大的COT(陈英英,2013);CER表示云中雨滴或冰晶的尺度,反映滴谱分布,CER较大时,地面出现降水的概率较大(蔡森等,2010),CER与雨强也存在明显相关(盛日锋等,2010;傅云飞,2014);CTT则是反映暴雨过程中云顶发展旺盛程度的重要参数(杨磊等,2020)。桂海林等(2019)结合 Himawari-8 卫星云产品,对中国东部地区2017年夏季降水进行分析,发现存在雨强随COT增加、CER增加、CTT减小而增加的趋势。可见,COT、CER、CTT这三个云参数对于分析降水的形成和演变过程有着重要意义。

风云四号系列的首发星FY-4A,于2016年12月14日成功发射,与风云二号系列卫星相比,其核心载荷的成像性能在光谱通道、时空分辨率等方面有显著提升(陆风等,2017),为我国及周边地区,特别是“一带一路”沿线国家和地区开展天气预报和灾害预警提供了重要的观测手段。作为科学试验星的FY-4A,其主要用途是验证新技术、发展新应用,为了更好地将FY-4A产品应用于天气分析、数值预报及人工影响天气等各领域,对其产品的精度检验很有必要。中分辨率光谱成像仪(moderate-resolution imaging spectroradiom-

eter, MODIS)作为搭载在地球观测系统计划Terra和Aqua极轨卫星上重要的传感器,同样具有波段范围广、空间分辨率高、探测灵敏度高等特点,其反演算法多年经过不断优化相对成熟,经检验MODIS云参数与地面观测有较好的一致性(吴晓等,2016)。崔林丽等(2020)曾针对3次台风过程,开展FY-4A云顶温度、云顶高度、云顶气压产品与MODIS和Himawari-8同类产品的交叉检验,发现二者精度相当;吴硕秋和马晓燕(2020)利用MODIS/AOD产品及FY-4A沙尘强度产品分析了我国西北地区的两次典型沙尘过程,发现二者具有较好的空间一致性。但目前FY-4A云参数在科研业务中的应用并不多见,尤其是其在降水分析中的应用研究较少。

本文以2020年6月27日造成湖北宜昌城区“看海”的极端暴雨过程为例,首先选取典型时次从平面分布、纬向分布和统计特征分析的角度,将FY-4A卫星可见光、近红外和红外三个波段与EOS/MODIS相近波段的原始数据进行对比检验,然后进一步对两类卫星的三种对降水敏感的云参数COT、CER和CTT进行对比,并分析产生偏差的可能原因。在此基础上,初步评估了FY-4A卫星云参数的精度及其在不同雨强条件下的适用性和可靠性,为云参数产品反演技术的改进优化提供反馈和参考,以提高FY-4A卫星在防灾减灾、生态修复等各领域的定量应用水平。

1 资料和方法

1.1 资料说明

选取2020年6月27日发生在湖北境内的一次暴雨过程进行分析。由于MODIS极轨卫星当日白天过境湖北区域的时次为03:40(世界时,下同),且这一时段出现雨强峰值,具有代表性,因此选取时间上最为接近的03:38的FY-4A数据与MODIS数据进行对比分析。同时,选取了2020年6月27日03—04时湖北省2747个气象站(国家站+区域站)的小时降雨资料,探究不同雨强条件下卫星产品的差异性。下面简要介绍两类卫星资料。

(1) FY-4A卫星资料。在时间频次上,FY-4A卫星全天共计进行40次全圆盘(包含8次测风的16张全圆盘)观测及56次北半球观测(陆风等,2017)。数据采用国际气象卫星合作组织(Co-ordination Group of Meteorological Satellites, CGMS)的LRIT/HRIT (Low Rate

Information Transmission/High Rate Information Transmission)全球规范定义静止轨道标称投影,地理坐标可基于WGS84参考椭球计算或通过FY-4A标称网格文件查找表获取。FY-4A卫星多通道扫描成像辐射计的原始数据(AGRI)和二级云产品均来自国家卫星气象中心。本文选取的原始数据主要是反演所需的可见光波段(b2-0.65 μm)反射率(VL)、近红外波段(b6-2.25 μm)反射率(NIR)和红外波段(b12-10.7 μm)亮温(IR)以及云参数产品。原始数据空间分辨率0.5~4 km不等,为保证各波段数据协同一致,统一取4 km分辨率,云参数产品空间分辨率也是4 km。

(2) MODIS卫星资料。EOS/Terra卫星MODIS轨道原始数据(MOD021km)、地理信息数据(MOD03)、云参数产品数据(MOD06)均来自MODIS官方网站,数据版本为6.1版,原始数据可见光波段(b1-0.62~0.67 μm)反射率、近红外波段(b7-2.105~2.135 μm)反射率、红外波段(b31-10.78~11.28 μm)亮温及云参数产品,与FY-4A卫星基本对应。空间分辨率为1 km,同一观测轨道相邻文件时间间隔为5 min。MOD06 6.1版的COT和CER产品为采用可见光波段(b1-0.65 μm 或b2-0.86 μm 或b5-1.2 μm)与近红外波段(b7-2.1 μm)反射率联合反演得到,经查产品标志位信息,本个例反演主要采用b1通道,波段选取上与FY-4A一致。

1.2 研究方法

由于FY-4A卫星与MODIS资料空间分辨率不同,首先,对卫星数据进行插值处理,使二者之间具有可比性;其次,在对比卫星原始数据时,考虑光谱响应函数带来的影响;另外,为了使云参数更好地应用于定量降水估算,按照雨强大小,分类讨论云参数产品的偏差;最后,采用统计分析的方法研究卫星原始数据和云参数产品的差异性。

(1) 卫星数据处理。为保证统计分析结果之间具有可比性,首先两颗卫星在观测时间高度接近,其次,利用双线性插值法对FY-4A的原始数据和云参数产品进行空间格网重采样,生成与MODIS一致的1 km空间分辨率,裁剪成湖北及周边的空间范围(108°—117°E、28°—34°N)。

(2) 光谱响应函数。多光谱传感器获取的图像具有多个波段,受硬件限制,传感器在某个预定波长范围内的响应不可能是100%,每个波段记录的能量值与光谱响应函数有关,不同卫星光谱响应函数的差异能造成卫星原始数据的差异,因此本文利用光谱响应函数(张勇等,2011)分析了两套卫星原始数据精度差异的原因。

(3) 雨强分类。降雨强度是指单位时段内的降雨

量,以 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 或 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 计,以下称为雨强(RI)。参照姚莉等(2009)雨强的分类方法,本文将雨强分为[0, 1) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、[1, 5) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、[5, 20) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、[20, 50) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和[50, 100) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 等五个区间。

(4) 统计分析方法。在统计分析FY-4A和MODIS原始数据和云参数产品的差异时,用到的统计物理量有平均偏差(B_{ias})、相关系数(C_{ORR})等(中国气象局,2011)。其中 B_{ias} 和 C_{ORR} 的计算公式分别为

$$B_{\text{ias}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (1)$$

$$C_{\text{ORR}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

2 卫星原始数据的对比分析

由于卫星可见光、近红外、红外波段的原始数据与云参数的反演密切相关,卫星原始数据的差异会影响云参数的反演结果。因此,需要从平面分布特征、纬向平均分布特征和统计特征三个方面,对FY-4A和MODIS两类卫星观测资料的原始数据进行对比分析。

2.1 平面分布特征对比

2020年6月27日03:38 FY-4A与03:40 MODIS可见光、近红外和红外波段平面分布如图1所示。可以看出,两颗卫星可见光波段反射率的分布模态相同,高低值中心吻合。图1a、d显示FY-4A在高反射率像元区小于MODIS观测值,FY-4A反射率极值在0.7~0.8的区间,而MODIS在0.8~0.9。图1b、e显示两颗卫星近红外波段反射率虽然高低值分布基本吻合,但除暖云区少量像元基本一致外,大部分像元定量差异较大,表现在色谱上相差几个色阶。而图1c、f红外波段亮温的对比则显示二者相似性很高。

2.2 纬向平均分布特征对比

图2给出FY-4A与MODIS可见光、近红外和红外波段原始数据纬向平均分布的对比,纬度平均范围是30°—31°N(宜昌暴雨云团中心所在纬度范围),即图1中两条灰色虚线中间的区域。图2a可见光波段反射率对比显示,MODIS曲线特征整体上比FY-4A略右移,相差约0.25个经度,证实二者在观测时间上的基本协同。其中在高反射率区,MODIS可见光波段反射率高于FY-4A,最大差值可达0.16;低反射率区二者基本一致。这主要是由FY-4A和MODIS两颗卫星在可见光的波段设置及其光谱响应函数的不同引起,另一方面也与卫星天顶角有关,将在下文中说明。图2b近红外波段反射率对比显示,FY-4A变化区间(0.13~0.25)与MODIS(0.09~0.21)存在差异且差值大小西高

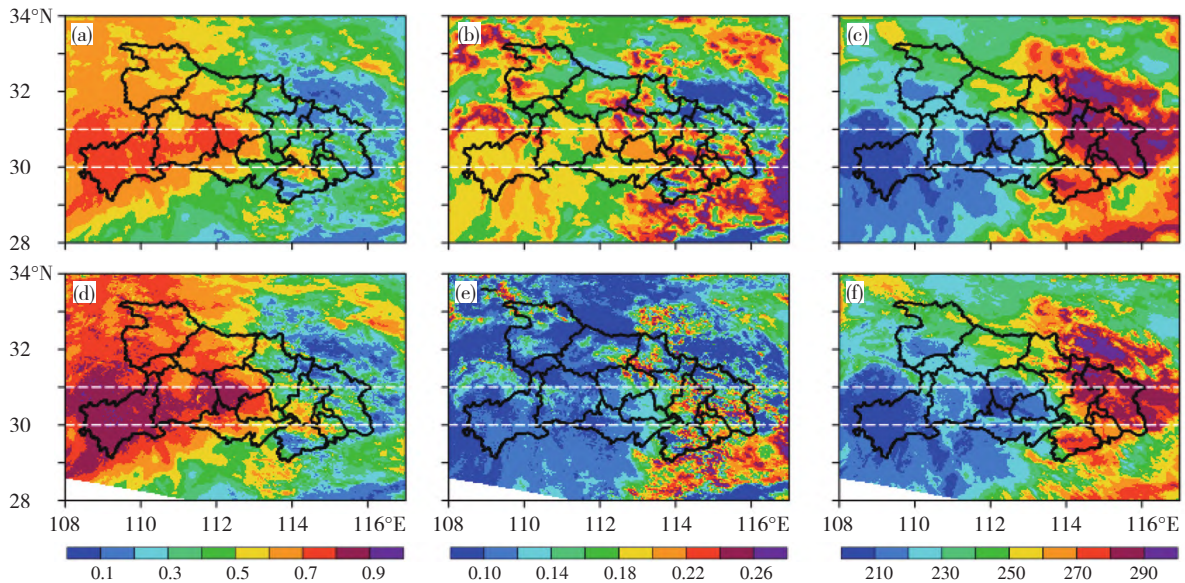


图1 2020年6月27日03:38 FY-4A (a、b、c)与03:40 MODIS (d、e、f)可见光波段反射率VL (a、d)、近红外波段反射率NIR (b、e)和红外波段亮温IR (单位: K) (c、f)平面分布(白色虚线表示30°N和31°N,即纬向平均所选取的纬度范围)

Fig.1 Distribution of (a, d) VL, (b, e) NIR and (c, f) IR (unit: K) bands in (a, b, c) FY-4A at 03:38 UTC and (d, e, f) MODIS at 03:40 UTC on 27 June 2020 (White dotted lines denote 30°N and 31°N, namely the latitude range selected by the zonal mean)

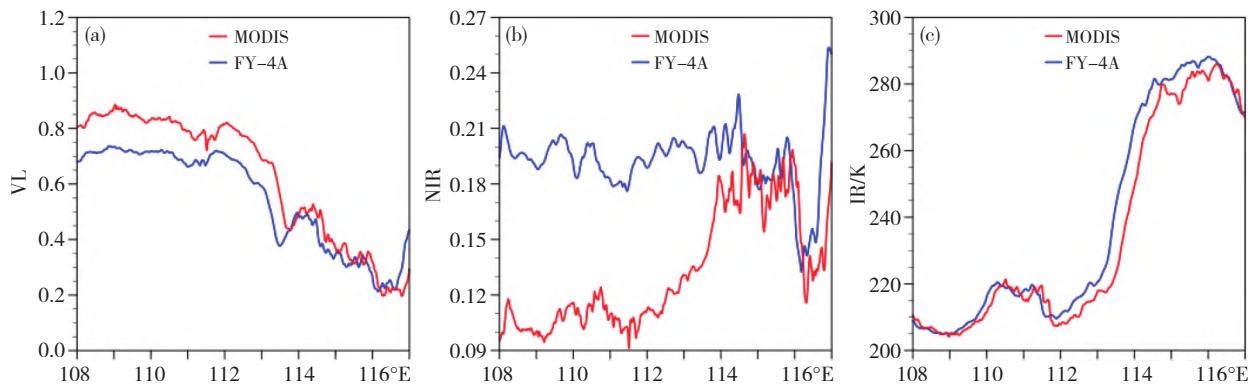


图2 FY-4A与MODIS可见光波段反射率VL (a)、近红外波段反射率NIR (b)和红外波段亮温IR (c,单位: K)纬向平均分布的对比(蓝色实线代表FY-4A,红色实线代表MODIS,下同)

Fig.2 Comparison of zonal observation values of (a) VL, (b) NIR and (c) IR (unit: K) channels between FY-4A and MODIS (Blue solid line denotes FY-4A, red solid line denotes MODIS, the same below)

东低,在冷云区FY-4A反射率偏大一倍,这主要源于光谱响应函数的不同。图2c红外亮温对比显示,二者具有极高的相似度,在108°—109°E的区间两条曲线基本重叠,109°—117°E的区间由于观测时间差导致的云系移动,曲线之间存在些许错位。

2.3 统计特征分析

选取图1中FY-4A和MODIS卫星各531321个有效样本进行统计分析,表1给出FY-4A与MODIS卫星三个波段的原始数据统计特征,从中可见:(1)FY-4A可见光波段平均反射率为0.474,MODIS为0.548,二者相关系数达0.91,平均偏差为-0.07,FY-4A可见光波段反射率总体上小于MODIS。(2)FY-4A近红外波段平均反射率为0.183,比MODIS均值0.131偏大近

40%,平均偏差为0.05,相关系数仅为0.42。(3)FY-4A红外波段平均亮温为243.1K,MODIS为239.5K,相关系数达0.93,线性拟合斜率为0.979,平均偏差为3.70K,FY-4A观测的红外波段亮温略偏高。

表1 FY-4A与MODIS卫星三个波段的物理量统计

Table1 Statistical characteristics of FY-4A and MODIS satellite channel data

物理量	样本数量	FY-4A平均值	MODIS平均值	偏差	相关系数	拟合斜率
VL	531321	0.474	0.548	-0.07	0.91	0.739
NIR	531321	0.183	0.131	0.05	0.42	0.357
IR	531321	243.1/K	239.5/K	3.70/K	0.93	0.979

注:VL表示可见光波段反射率,NIR表示近红外波段反射率,IR表示红外波段亮温。

通过对较大样本、多种云型的综合统计显示, FY-4A与MODIS卫星对比的三个波段中, 红外波段亮温相关性最高且线性拟合斜率接近1, 与崔林丽等(2020)结果一致; 可见光波段反射率相关性与红外波段相当, 但线性拟合斜率为0.739, 说明二者分布趋势吻合、但定量上存在差异; 而近红外波段反射率相关性一般, 线性拟合斜率仅为0.357, 差异明显。

图3所示的FY-4A与MODIS可见光波段反射率、近红外波段反射率和红外波段亮温的概率密度函数(PDF)也验证了如上结论。在可见光反射率低值区, FY-4A与MODIS的占比较为一致; 在可见光反射率高

值区, FY-4A占比偏小, MODIS可见光反射率区间分布更广、高值区占比更大(图3a), 这表明MODIS观测的可见光通道反射率总体大于FY-4A的观测结果。图3b中FY-4A与MODIS的近红外波段反射率PDF变化趋势较为一致、均为单峰分布, 但错位明显, 在反射率大值区间内, FY-4A占比更大, 说明FY-4A观测的近红外通道反射率整体偏大。图3c中FY-4A与MODIS的PDF分布基本吻合, 无论是亮温分布区间还是峰值位置都基本一致, 仅MODIS的红外波段亮温在低温区占比略偏多、高温区略偏少, 整体上低于FY-4A的结果。

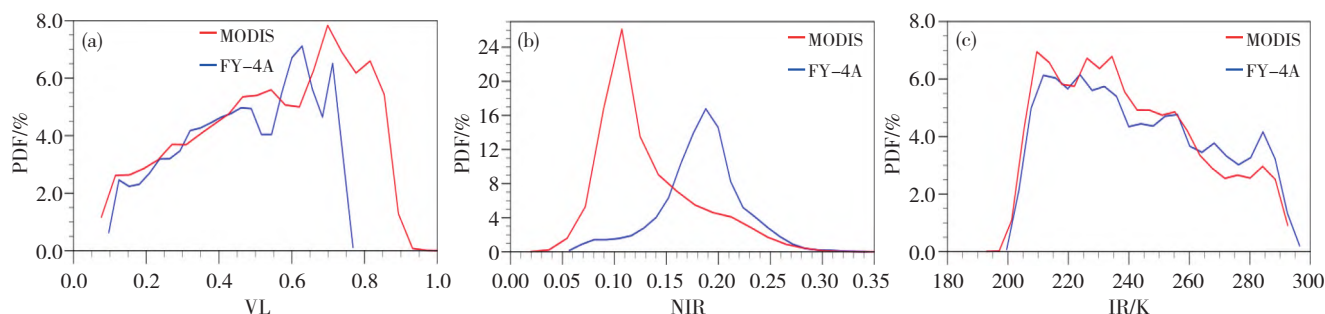


图3 FY-4A与MODIS可见光波段反射率VL(a)、近红外波段反射率NIR(b)和红外波段亮温IR(c,单位: K)的概率密度函数(PDF)

Fig.3 Probability density function (PDF) of (a) VL, (b) NIR and (c) IR (unit: K) channels for both FY-4A and MODIS

3 卫星原始数据的偏差原因分析

不同卫星光谱响应函数的差异能造成卫星原始数据的差异(张勇等, 2011)。此外, 不同卫星观测角度的不同也会对原始数据的差异造成影响。因此, 本节分别从光谱响应函数的差异和卫星观测角度的差异两个方面来分析FY-4A和MODIS两类卫星原始数据的偏差原因。

3.1 光谱响应函数的差异性

图4给出FY-4A和MODIS卫星原始数据可见光、

近红外和红外波段光谱响应函数, 可以看出, 相比MODIS的窄光谱, FY-4A的波段普遍较宽。两颗卫星在三个通道的中心波段位置上均存在一定的偏移, 尤其是图4b近红外波段, FY-4A可见光波段(图4a)的光谱响应函数呈双峰结构、正态特征不显著。相比而言, 二者红外波段的光谱响应函数差异较小(图4c)。光谱响应函数的差异一定程度上造成FY-4A和MODIS观测的原始数据不同, 光谱响应函数差异最明显的近红外波段, 原始数据偏差最为显著。

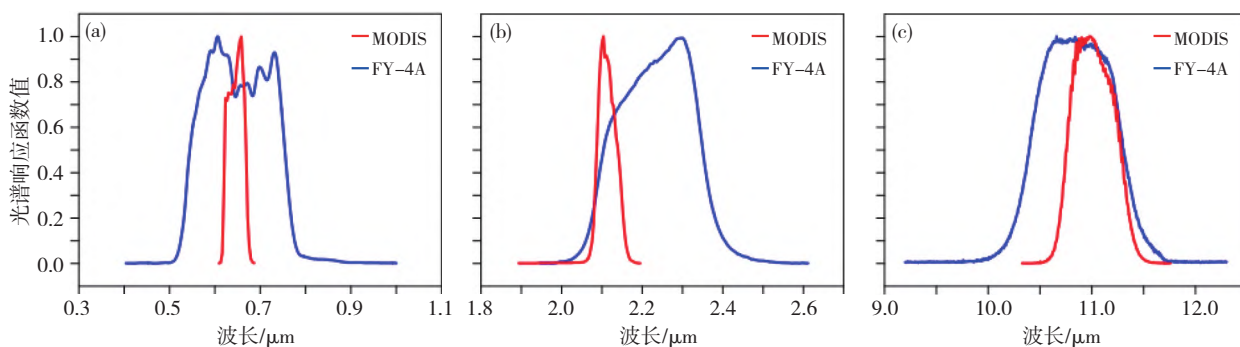


图4 FY-4A与MODIS卫星原始数据可见光(a)、近红外(b)和红外(c)波段的光谱响应函数

Fig.4 Spectral response function for (a) visible band, (b) near-infrared band and (c) infrared band in FY-4A (black line) and MODIS (red line)

3.2 卫星观测角度的差异性

影响观测到的反射辐射值的几何角度包括太阳天顶角、卫星天顶角以及太阳和卫星之间的相对方位

角(以下简称相对方位角), 对于同一时间同一位置的分析对象来说, 太阳天顶角是固定的, 不同的是FY-4A和MODIS两颗卫星由于在轨位置差异所产生

的不同卫星观测角度。SBDART辐射传输模式的敏感性试验表明(陈英英,2007),相对方位角对可见光波段反射函数影响较小,而卫星天顶角则存在一定影响,表现在:当卫星天顶角大于60°时,可见光波段反射函数对卫星天顶角比较敏感;当卫星天顶角小于60°时则不敏感。

图5给出FY-4A和MODIS卫星天顶角的平面分

布,可以看出FY-4A与MODIS卫星的卫星天顶角的分布区间分别为34°~40°和27°~57°,最大值均小于60°,依据陈英英(2007)的研究可知,两种卫星的卫星天顶角对可见光波段反射率的影响均较小。因此,尽管两种卫星天顶角的空间分布存在差异,但是这种差异对可见光波段反射率影响并不大,故两类卫星的卫星天顶角空间分布差异引起的原始数据的偏差可以忽略不计。

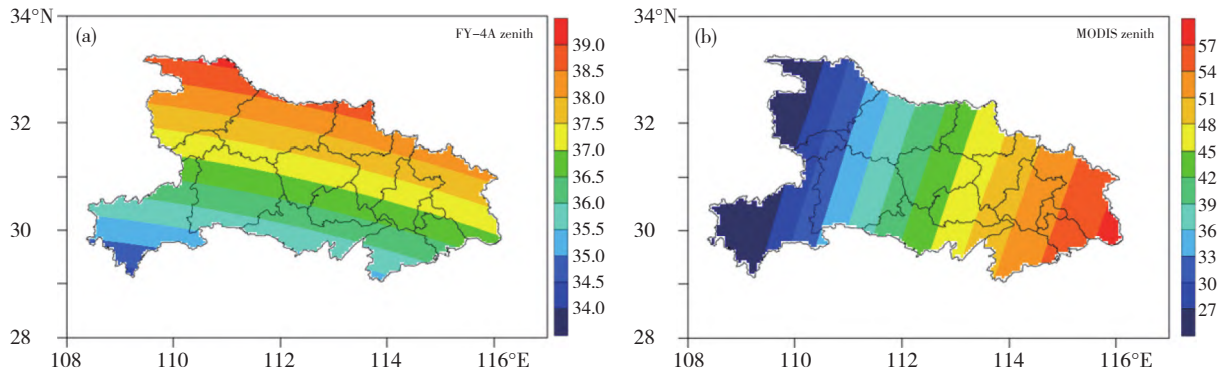


图5 FY-4A (a)与MODIS (b)卫星天顶角的空间分布
Fig.5 Comparison of (a) FY-4A and (b) MODIS satellite zenith angle

4 卫星云参数的对比分析

卫星原始数据是云参数反演的基础,而云参数则在云和降水分析中具有更明确的物理意义,可建立与降水的定量估算关系。因此,在两类卫星原始数据的对比分析及偏差原因分析的基础上,进一步从平面分布特征、纬向平均分布特征和统计分析特征三个方面

对FY-4A和MODIS卫星产品云参数(COT、CER和CTT)进行对比分析。

4.1 平面分布特征对比

2020年6月27日03:38FY-4A反演的COT、CER和CTT与03:40MODIS相应产品的平面分布如图6所示。总体来看,FY-4A与MODIS反演的COT和CER两个参数分布模态相同,高低值中心基本吻合,但定

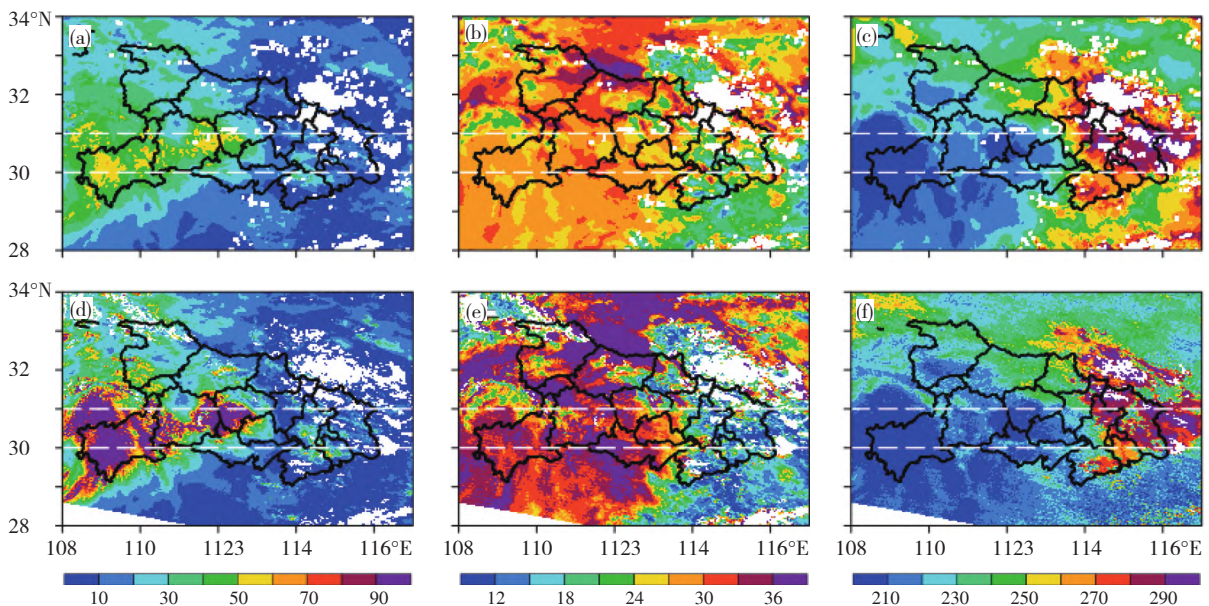


图6 2020年6月27日03:38FY-4A (a、b、c)与03:40MODIS (d、e、f)云参数产品COT (a、d)、CER (b、e,单位: μm)和CTT (c、f,单位: K)的平面分布(白色虚线分别为30°N和31°N,即纬向平均所选取的纬度范围)

Fig.6 Distribution of (a, d) COT, (b, e) CER (unit: μm) and (c, f) CTT (unit: K) retrieval cloud products of (a, b, c) FY-4A at 03:38 UTC and (d, e, f) MODIS at 03:40 UTC on 27 June 2020 (white dotted lines denote 30°N and 31°N, namely the latitude range selected by the zonal mean)

量差异较大,与图1反映的特征一致。与MODIS相比,FY-4A反演的鄂西南地区COT结果明显小于MODIS(图6a、d);对于CER产品,FY-4A的反演结果与MODIS相比,小值偏大、大值偏小,表现为CER分布区间较窄(图6b、e),这也解释了表2中两颗卫星CER的均值接近但相关系数不高的原因。图6c、f的CTT对比特征则显示,CTT低值区十分匹配,但对于CTT较高的区域,二者则在云区判识、CTT定量反演上存在较大差异,其中图片的右下角区域二者甚至呈反相,对比分析图1c、f,可认为该区域是MODIS的反演出现偏差。

4.2 纬向平均分布特征对比

云参数反演算法由于采用的是对应几何角度条件下的辐射值进行推算,因此卫星天顶角所带来的影响可剔除,二者的差异主要是由光谱响应函数所带来的原始数据的差异及反演算法的差异所组成。选取与图2相同的纬度范围做纬向平均,得到图7的FY-4A与MODIS云参数云COT、CER和CTT的纬向平均分布曲线。

从图7a可以看出,对于COT值较小的像元,二者

反演结果基本一致,对于COT较大的像元,FY-4A的反演结果明显小于MODIS,且偏差幅度与COT的大小呈正相关。与图2a对比发现,两颗卫星反演计算后的COT差值要大于可见光波段原始数据的差值,这一方面是COT对可见光波段反射率的影响为非线性关系的原因,另一方面是反演算法中冰云粒子谱分布的选择、冰云相函数的准确计算等都会带来影响(刘健,2015)。从图7b可以看出,FY-4A反演的CER大值偏小、小值偏大,针对不同云型,CER整体变幅为15.76~30.64 μm ,小于MODIS 12.51~38.32 μm 的变幅,由于CER与近红外波段反射率呈负相关,FY-4A反演的CER大值偏小的原因是由近红外波段原始数据偏大而引起,但对于114.5°E以东的区域,对比图2b可以看出,在原始数据差异不大的情况下,FY-4A反演的CER小值偏大,可能是受卫星天顶角订正的影响。图7c中CTT曲线的分布特征与图2c红外波段亮温基本一致,主要差异体现在MODIS的CTT曲线在115.2°E附近存在一个明显的谷值,幅度大于红外波段的原始数据所带来的偏差。

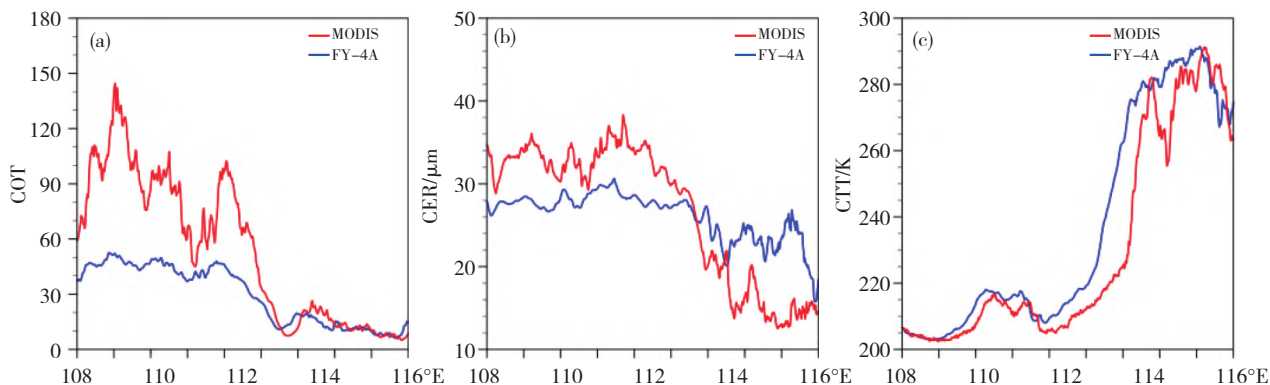


图7 FY-4A与MODIS云参数COT(a)、CER(b,单位: μm)和CTT(c,单位: K)的纬向平均分布

Fig.7 Zonal means of (a) COT, (b) CER (unit: μm) and (c) CTT (unit: K) of both FY-4A and MODIS retrieval product

4.3 云参数统计特征分析

表2给出了FY-4A与MODIS卫星产品的三种云参数统计特征(从图6中可见,MODIS反演的COT、CER产品与CTT产品的有效像素数量不同,引起样本

表2 FY-4A与MODIS卫星产品的三种云参数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of three cloud parameters of FY-4A and MODIS satellite products

云参数	样本数	FY-4A 平均值	MODIS 平均值	偏差	相关 系数	拟合 斜率
COT	491 524	20.9	28.7	-7.7	0.83	0.350
CER	491 524	27.0/ μm	28.2/ μm	-1.7/ μm	0.68	0.320
CTT	501 278	238.2/K	229.4/K	9.8/K	0.73	0.789

注: COT表示云光学厚度, CER表示云粒子有效半径, CTT表示云顶温度。

数不同),主要结论为:(1)FY-4A反演的COT均值为20.9,小于MODIS的COT均值28.7,二者平均偏差为-7.7,相关系数为0.83,说明二者趋势吻合、仅在定量数值上存在一定差异,尤其是云顶相态为固态的像素,应建立更符合冰云模态的正演查算表(刘健,2015)。(2)FY-4A反演的CER均值为27.0 μm ,略低于MODIS的CER均值28.2 μm ,偏差仅-1.7 μm ,但相关性较差(相关系数为0.68),并且FY-4A反演的CER的区间分布较窄。(3)FY-4A反演的CTT均值为238.2 K,大于MODIS的CTT均值229.4 K,二者平均偏差为9.8 K,相关系数为0.73,明显低于红外波段原始数据的相关性,线性拟合斜率为0.789。部分像素CTT偏差较大,FY-4A反演更具优势,多为低云样本或云与晴空的分界。

图8给出了COT、CER和CTT的概率密度函数,验证了如上结论。图8a中在COT小值区,FY-4A与MODIS一致,在COT>60的区间,FY-4A占比几乎为0,MODIS反演的COT值分布更广、在COT>60的区间仍有一定占比、直至150(上限),因此在利用COT这一参数定量分析深厚降水云系的云特征时应注意FY-4A与MODIS产品的差异。图8b中CER的PDF曲线均呈较为对称的单峰分布,但MODIS在小值区和大大

值区均有延展,其CER区间分布为6~56 μm,明显宽于FY-4A的12~40 μm的区间,且MODIS曲线PDF峰值右移,峰值所在的CER值为34 μm,大于FY-4A所对应的28 μm。图8c中CTT的PDF曲线特征与红外波段亮温的PDF分布(图3c)基本一致,表现为MODIS的CTT在低温区占比略偏多、高温区略偏少,但差异幅度比MODIS红外波段亮温的PDF(图3c)要大,这主要是因为MODIS对低云的CTT反演出现偏差的缘故。

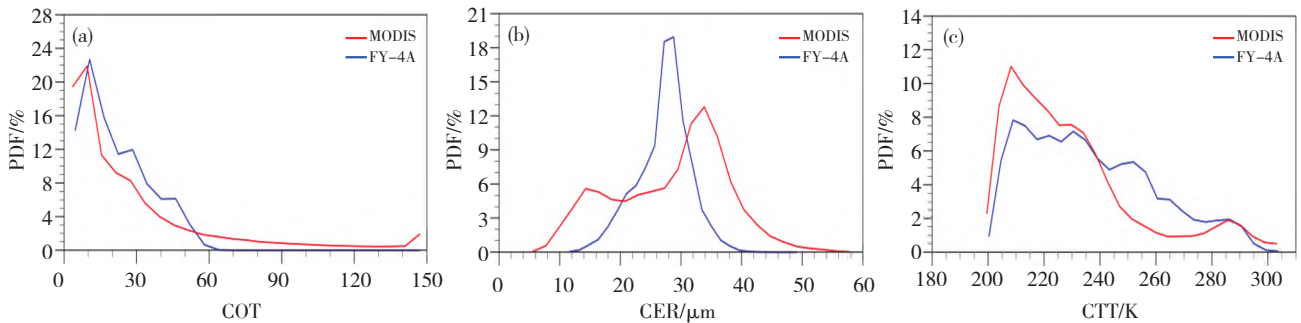


图8 FY-4A与MODIS云参数产品COT(a)、CER(b)和CTT(c)的概率密度函数

Fig.8 Probability density function of FY-4A and MODIS retrieval cloud products (a) COT, (b) CER, and (c) CTT

5 不同雨强条件下的云参数精度比较

研究表明,云参数与降水关系密切(桂海林,2019),不仅定性上与降水概率存在较好的相关性,还可以明显提高小时雨量的估计精度。此外,微波亮温的模拟计算(顾成明等,2016)、WRF模式云参数化方案的设计(曹蓓等,2019)等也都需要云参数的定量观测真值。为了更好的利用FY-4A卫星反演的云参数建立遥感定量降水估算模型,改进模式参数化方案,在分析FY-4A与MODIS卫星云参数的差异基础上,进一步分类对比研究十分必要。

按照雨强(RI)大小分级开展FY-4A与MODIS卫星反演云参数的对比分析,根据湖北地面站观测的降水资料,按照不同等级的雨强将降水云系进行分类统计。选取与各个气象站最为邻近的卫星像元,按雨强分级统计了分FY-4A与MODIS卫星反演的云参数的

偏差及相关性,如表3所示。从表3可以看出,对于降水云,各个雨强区间都有足量样本,随着 R_i 的增大,样本数减少、三个参数的相关系数也总体呈减少趋势。其中COT和CTT的相关系数较高,在 $RI < 50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的四个区间, C_{ORR} 均大于0.5,CER的相关性略差。从不同参数来看,FY-4A反演的COT普遍小于MODIS的结果,且在 $[0, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间,COT的差值随雨强的增大而增大,其中在 $[20, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间,COT的平均偏差达到57.1;而对于雨强 $[50, 100] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水区间,二者之间的差值未进一步增加。FY-4A反演的CER同样小于MODIS的结果,偏差也在雨强为 $[20, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的区间达到最大,而FY-4A反演的CTT大于MODIS的结果,与COT、CER不同的是,CTT的差值在雨强 $[0, 1] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的区间中最大,随着雨强的增加持续递减,在 $[50, 100] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间中,二者的平均偏差仅为0.4 K。

表3 不同雨强条件下FY-4A与MODIS卫星反演的云参数的偏差及相关性

Table 3 The deviation and correlation of cloud parameters retrieved by FY-4A and MODIS satellite under different rain intensities

RI/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	COT			CER/ μm			CTT/K		
	样本数	偏差	相关系数	样本数	偏差	相关系数	样本数	偏差	相关系数
[0, 1)	1 260	-5.5	0.75	1 260	0.1	0.69	1 319	12.4	0.79
[1, 5)	591	-14.6	0.72	591	-1.9	0.54	620	8.8	0.78
[5, 20)	381	-45.6	0.51	381	-5.2	0.37	382	3.8	0.67
[20, 50)	110	-57.1	0.64	110	-5.9	0.30	110	2.3	0.80
[50, 100)	26	-29.2	0.39	26	-4.3	-0.32	26	0.4	0.16

注: RI表示雨强, COT表示云光学厚度, CER表示云粒子有效半径, CTT表示云顶温度。

6 结论与讨论

通过对比分析2020年6月27日湖北宜昌城区一次极端暴雨过程近同时次的FY-4A与MODIS卫星原始数据及云参数(COT、CER、CTT),评估了FY-4A卫星云参数产品的精度及其在不同雨强条件下的适用性和可靠性,初步得到以下结论:

(1) FY-4A可见光波段反射率总体上小于MODIS,二者的相关系数为0.91,平均偏差为-0.07,说明二者分布趋势吻合、但存在定量差异;FY-4A近红外波段反射率比MODIS偏大近40%,平均偏差为0.05,相关系数仅为0.42;FY-4A红外波段亮温略高于MODIS,平均偏差为3.70 K,相关系数达0.93、线性拟合斜率为0.979。卫星原始数据的偏差原因分析发现光谱响应函数的差异一定程度上造成FY-4A和MODIS观测的原始数据不同,这种差异最明显的是近红外波段;尽管两种卫星天顶角的空间分布存在差异,但是这种差异对可见光波段反射率影响并不大,因此两类卫星的卫星天顶角空间分布差异引起的原始数据的偏差可以忽略不计。

(2) FY-4A反演的COT均值为20.9,小于MODIS的COT均值28.7,二者平均偏差为-7.7,相关系数为0.83,说明二者趋势吻合、仅在定量数值上存在一定差异;FY-4A反演的CER均值为27.0 μm ,略低于MODIS的CER均值28.1 μm ,偏差仅-1.7 μm ,相关系数为0.68;FY-4A反演的CTT均值为238.2 K,大于MODIS的CTT均值229.4 K,二者平均偏差为9.8 K,相关系数为0.73,线性拟合斜率为0.789,FY-4A反演更具优势。

(3) 对不同雨强的云参数反演精度而言,FY-4A反演的COT普遍小于MODIS的结果,在 $[0, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间,COT的差值随雨强增大而增大,其中在 $[20, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间,COT平均偏差达57.1;而对于 $[50, 100] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强区间,二者之间的差值未进一步增加。FY-4A反演的CER同样小于MODIS的结果,偏差差值也在雨强为 $[20, 50] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时达到最大。FY-4A反演的CTT大于MODIS的结果,在雨强 $[0, 1) \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的区间最大,随着雨强的增加持续递减,在 $[50, 100] \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强条件下,二者平均偏差仅为0.4 K。

引起卫星反演偏差的原因有很多,除了因光谱响应函数不同而导致的卫星原始数据差异外,FY-4A与MODIS观测的视角差异、反演算法的不同(包括对薄云、冰云的处理等)和不同仪器空间分辨率的插值计算方法、两颗卫星观测时间上的不完全匹配等也有可能对二者的相关性产生影响。但较大样本的统计分析,仍能在一定程度上反映FY-4A与MODIS卫星在原始

数据及反演产品对比方面的普遍特性,可为建立卫星参数化阈值指标、数值模式资料同化和卫星资料融合应用等研究提供参考。

参考文献:

- 蔡森.2013.中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D].南京:南京信息工程大学
- 蔡森,周毓荃,朱彬.2010.FY2C/D卫星反演云特征参数与地面雨滴谱降水观测初步分析[J].气象与环境科学,33(1):1-6
- 曹蓓,赵震,白爱娟.2019.WRF模式云参数化方案对一次深对流系统模拟的验证和改进[J].气候与环境研究,24(5):626-638
- 陈英英.2013.利用FY-3A卫星云图对一次暴雨过程的特征云参数分析[J].暴雨灾害,32(1):24-31
- 陈英英.2007.利用FY-2C静止卫星资料反演云微物理参数的试验研究[D].南京:南京信息工程大学
- 崔林丽,郭巍,葛伟强,等.2020.FY-4A卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J].高原气象,39(1):196-203
- 范思睿,王维佳.2018.利用FY-4A卫星反演产品对飞机增雨作业的分析[J].高原山地气象研究,38(4):60-66
- 傅云飞.2014.利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用[J].气象学报,72(5):1039-1053
- 顾成明,王云峰,张晓辉,等.2016.云参数对微博亮温模拟计算的影响试验[J].应用气象学报,27(3):380-384
- 桂海林,诸葛小勇,韦晓澄,等.2019.基于Himawari-8卫星的云参数和降水关系研究[J].气象,5(11):1579-1588
- 郭文昕,车慧正,陈权亮,等.2021.北京地区地基辐射计与卫星云特性参数对比研究[J].沙漠与绿洲气象,15(6):95-102
- 刘健.2015.风云二号卫星的冰云光学厚度反演偏差分析[J].气象学报,73(6):1121-1130
- 刘建朝,周毓荃.2011.基于支持向量机和FY静止卫星云参数的降水预测技术[J].气象与环境科学,34(2):59-63
- 刘显通,刘奇.2013.红外亮温和云参数信息对降水识别能力的研究[J].遥感技术与应用,28(1):1-11
- 陆风,张晓虎,陈博洋,等.2017.风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J].海洋气象学报,37(2):1-12
- 卢乃锰,方翔,刘健,等.2017.气象卫星的云观测[J].气象,42(3):257-267
- 梅钦,智协飞,王佳.2018.WRF模式不同云参数化方案的暴雨预报能力检验及集成试验[J].大气科学学报,41(6):731-742
- 吴硕秋,马晓燕.2020.利用风云四、MODIS及CALIPSO卫星资料分析西北沙尘过程的垂直和水平分布特征[J].环境科学学报,40(8):2892-2901
- 吴晓,游然,王旻燕,等.2016.基于MODIS云宏观特性的卫星云分类方法[J].应用气象学报,27(2):201-208
- 谢磊,刘奇.2017.基于卫星遥感的全球洋面降水暖云与非降水暖云的云参数差异[J].中国科学技术大学学报,47(12):1006-1014
- 杨磊,才奎志,孙丽,等.2020.基于葵花8号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析[J].暴雨灾害,39(2):125-135
- 姚莉,薛峰,周兵,等.2009.我国一小时雨强的时空分布特征分析[C]//中国气象学会年会
- 张勇,李元,戎志国.2010.FY-2E与FY-2C红外分裂窗通道光谱响应差异的对比分析[J].光谱学与光谱分析,30(6):196-199
- 中国气象局.2011.气象卫星定量产品质量评价指标和评估报告要求[S].中华人民共和国气象行业标准, QX/T 127-201

(责任编辑 唐永兰)