

光学学报

基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云特性遥感

尚华哲¹, 胡斯勒图^{1*}, 李明^{1,2}, 陶金花¹, 陈良富^{1,2**}

¹中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100010;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 云是地球辐射收支、水循环和生物化学循环的主要调节者。自 1960 年人类第一颗气象卫星 (TIROS) 的发射起, 被动卫星遥感已经发展成为获取云观测资料最高效的手段之一。被动卫星具有观测范围大、时间跨度久的特点, 其中利用可见至红外波段 (0.40~15 μm) 的遥感成像仪相对高光谱成像仪、微波成像仪具有时空分辨率更高的观测优势。首先, 针对极轨卫星多光谱成像仪、多角度偏振成像仪和新一代静止卫星成像仪三类载荷概述了被动卫星基于可见至红外波段的观测特点。然后, 介绍了包括云检测、云相态、云顶参数、云光学和微物理参数的观测原理和应用方法。最后, 通过总结和展望为被动卫星可见至红外资料的云特性遥感研究提供一些思考。

关键词 遥感; 云遥感; 微观特性; 宏观特性; 被动光学卫星; 云反演算法

中图分类号 P412.27

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0600003

Remote Sensing of Cloud Properties Based on Visible-to-Infrared Channel Observation from Passive Remote Sensing Satellites

Shang Huazhe¹, Husi Letu^{1*}, Li Ming^{1,2}, Tao Jinghua¹, Chen Liangfu^{1,2**}

¹ State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Clouds are the main regulators of Earth's radiation budget, water cycle, and biochemical cycle. Since the launch of the first human meteorological satellite (TIROS) in 1960, passive satellite remote sensing has developed into one of the most efficient means to obtain cloud observation data. Passive satellites have the characteristics of large observation range and long time span, in which the remote sensing imagers using visible and infrared bands (0.40–15 μm) have higher spatial and temporal resolution than hyperspectral and microwave imagers. First, summarizes the observation characteristics of passive satellite observation sensors based on visible and infrared bands for three types of sensors (multispectral imagers, multi-angle polarization imagers onboard polar-orbiting satellites and multispectral imagers onboard the new generation geostationary satellites) are summarized. Then, the principles and application methods for cloud parameters such as cloud detection, cloud phase, cloud top parameters, cloud optical and microphysical parameters are introduced. Finally, some thoughts are provided for the remote sensing study of cloud characteristics of passive satellite visible and infrared data through summary and prospect.

Key words remote sensing; cloud remote sensing; microscopic properties; macroscopic properties; passive optical satellite; cloud inversion algorithm

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-01-30; 录用日期: 2022-02-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0603502)、国家自然科学基金 (42025504, 41771395, 41830109, 42175152)、中国科学院青年创新促进会 (2021122)

通信作者: *husiletu@radi.ac.cn; **chenlf@radi.ac.cn

1 引言

云覆盖 75% 的地表,几乎所有的天气现象都与云的产生、变化和消失息息相关^[1-2]。云在天气系统的辐射平衡及水循环过程中扮演着重要的角色。云对短期模式、气候模拟、人工降雨和污染沉降等领域的应用具有重要价值^[3-9]。一方面,云通过“反照率效应”散射及吸收太阳辐射,减少到达地面的短波辐射进而冷却天气系统。另一方面,云通过“温室效应”吸收地表和云下大气发射的长波辐射,同时向下发射长波辐射致使天气系统增温^[10-12]。准确描述云对气候造成的冷却和增温效应目前仍存在很大的挑战,其主要原因是云的分布随时间变化剧烈且对云特性描述的参数众多^[13]。例如,云特性参数可以分为宏观参数和微观参数。宏观参数包括云的几何厚度、云顶高度、云顶温度和云相态等^[14]。微观参数指云粒子的相态、大小、形状、谱分布和云粒子的消光特性等^[15-17]。云的宏观参数和微观参数的准确获取共同决定了云反照率效应和温室效应净效果的估算精度^[18]。此外,云的宏微观参数在时空尺度上的变化对天气系统有着深刻的影响^[19-23]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告中指出云仍然是气候反馈整体不确定性的最大来源^[24-26]。因此,进一步提高卫星云特性观测精度,对改善气候模式模拟、改善极端天气预报、分析云气溶胶相互作用和监测环境质量等具有长远意义^[26-29]。

被动卫星云遥感可以追溯到 20 世纪中叶,1960 年第一颗气象卫星 TRIOS 发射,1972 年 Landsat-1 发射,1986 年法国商业地球观测卫星 SPOT 发射,1988 年我国风云一号 A 星发射,1999 年美国 Terra 卫星发射,目前全球已经形成加密的极轨和静止轨道卫星网络,并且我国风云 3 号、风云 4 号和高分系列卫星在观测波段、时空分辨率等指标也达到世界先进水平^[30-33]。被动卫星载荷的云遥感逐步成为观测云的宏微观和辐射特性的最有效手段之一^[34-35]。目前,美国航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA)和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)、俄罗斯空间局(RFSA)、中国国家航天局(CNSA)、日本宇宙开发机构(JAXA),以及印度空间研究机构(ISRO)等已发射了诸多先进的被动卫星。本文将主要围绕可见和红外波段的云遥感载荷及原理展开介绍,高光谱云遥感虽然覆盖了该波段范围,限于篇幅本文没有介绍。

很多卫星载荷因其观测任务的不同而对云的关

注程度也不同。例如,Landsat 卫星主要对地物进行观测,主要关注云的空间分布特征,而风云 3 号卫星则在波段设置上覆盖了能够进行云的宏微观参数反演的主要波段。此外,由于观测方式存在差异,故对云特性遥感的主要手段也各不相同^[36-37]。例如,多波段成像仪和多角度偏振成像仪可以分别采用标量观测和矢量观测的方式反演云相态和云滴谱信息^[38-39]。云遥感的核心技术是云特性遥感算法的构建,而遥感算法的发展得益于光散射理论和辐射传输理论的发展^[34, 40-43]。光散射理论不但提供了云粒子(球形云滴和非规则形状冰晶)在不同波长的吸收和散射特征,也为大气中气溶胶粒子和气体分子吸收的精确计算提供了基础^[43-45]。辐射传输理论的完善促进了辐射传输模型的发展,为云特性定量遥感算法中前向模拟的精度提供了保障。例如,利用辐射传输模式可以计算不同大气条件下云特性和卫星观测电磁波信号的映射关系。基于该思路的算法代表是 Nakajima 等^[46-47]提出的基于可见光-近红外双波段对云光学厚度和云粒子有效半径进行同步反演的方法,该方法已被应用于国际国内众多载荷的云特性参数反演中。被动卫星云特性参数的检验方法较为有限,进而制约了云算法的改进和优化。近年来国内利用飞机观测、地基云雷达等仪器积累了有效的云精细观测结果,这些结果促进了卫星云特性产品的验证^[48-50]。此外,星载激光雷达和云雷达(如美国的 CALIPSO 和 CloudSat 卫星)观测的发展^[51]提供了与被动卫星共同视角的云顶参数和云层剖面观测数据,这极大推动了被动卫星云产品的优化和检验^[52-53]。

本文首先结合卫星观测轨道和观测方式,分类概述云特性遥感卫星载荷的观测特征。然后,对云特性参数遥感算法的原理和方法进行讨论,侧重研究云检测、云相态、云顶参数、云光学厚度和云滴谱等参数的不同反演方法之间的对比和机器学习在云遥感中的应用。最后,通过总结和展望为被动卫星可见和红外资料的云特性遥感研究提供一些思考。

2 载荷分类

结合卫星轨道特征和成像仪观测方式的异同,本节对极轨卫星多光谱成像仪、极轨卫星多角度偏振成像仪和新一代静止卫星成像仪进行了展开介绍,而对有些可以归属到多个类别的载荷不再进行详细介绍。例如:美国 Terra 卫星搭载的多角度成像光谱辐射计(MISR),虽然可以进行多角度观测,

但是没有偏振观测;日本 GCOM-C 卫星搭载的第二代全球成像仪(SGLI)除了能够实现高时空分辨率(250~1000 m)、多波段(0.38~12.00 μm)的标量观测外,其搭载的波长为 670 nm 和 865 nm 的两个偏振通道能够对前向和后向进行成像^[42]。由于不同国际机构发射的卫星数量和命名体系各有不同,

故本文对典型的载荷进行展开讲解,比较有代表性的是我国的风云气象卫星体系和 A-Train 大气科学卫星星座计划,如图 1 所示。(图 1 来源:http://english.iap.cas.cn/news/201907/t20190708_212706.html 和 https://atrain.nasa.gov/historical_graphics.php)

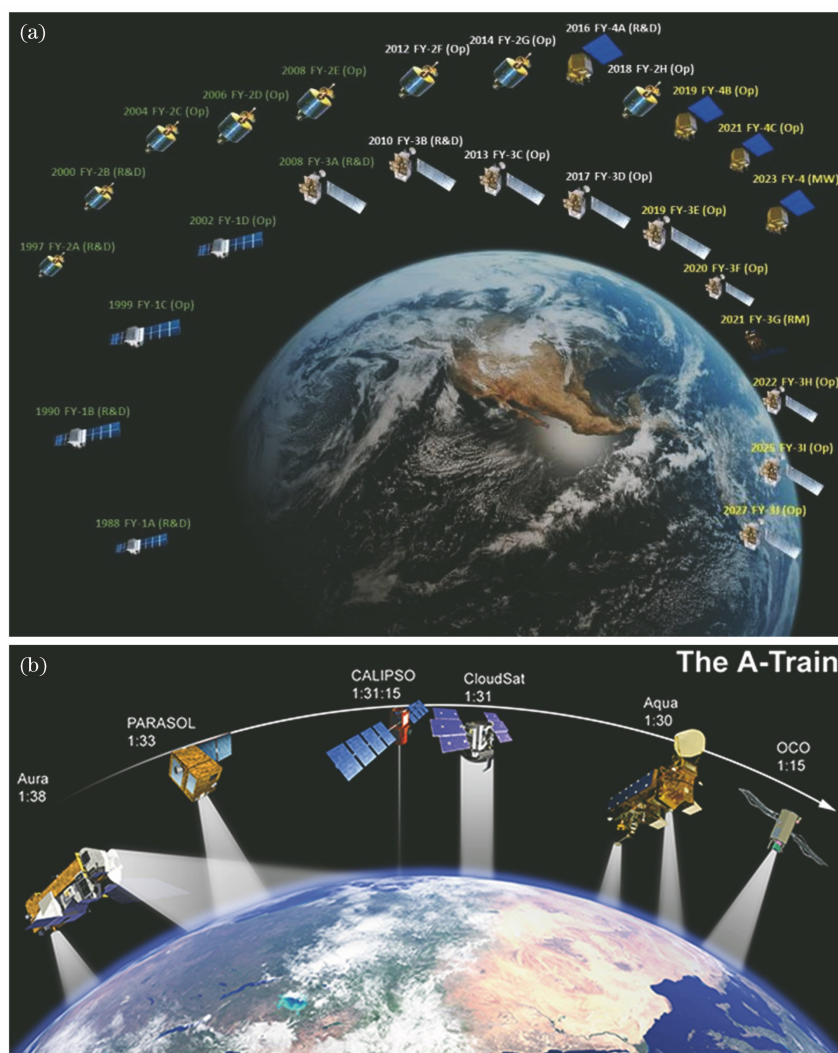


图 1 国际国内的云观测卫星计划。(a) 17 颗中国自主研发的风云(FY)气象卫星;(b) A-Train 大气科学观测卫星星座计划
Fig. 1 International and domestic cloud observing satellite missions. (a) Seventeen Chinese self-developed FengYun (FY) meteorological satellites; (b) atmospheric scientific observation satellite constellation program named A-Train

2.1 极轨卫星多光谱成像仪

本节选取 3 个载荷进行介绍,包括美国国家海洋和大气管理局(NOAA)卫星上搭载的高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)、NASA 发射的 Terra 和 Aqua 卫星所搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)以及我国新一代极轨气象卫星风云 3 号 D 星(FY-3D)搭载的中分辨光谱成像仪(MERSI-II)。NOAA 系列极轨气象卫星自 1970 年发射第一颗以来,已经连续发射了 19 颗。相关卫星高度范围为

870~883 km,轨道倾角范围为 $98.6^{\circ}\sim 99.1^{\circ}$,成像周期为 12 h^[54]。NOAA 卫星搭载的 AVHRR 是以观测云、地表(主要海洋)温度分布等目标的传感器。AVHRR 的扫描角范围为 $-53.4^{\circ}\sim 53.4^{\circ}$,扫描带宽为 2800 km,故成像面积大,这有利于获得宏观同步数据,选用可见至红外波段(0.58~12.50 μm)中的 5 个波段通道。在 NOAA-11 中将波段通道数量增加至 6 个,新增的通道波长为 1.58~1.68 μm ,其中 3.55~3.93 μm 波段和

10.30~11.30 μm 波段可分别用于夜间云检测和云顶温度的反演。

美国 NASA 发射的 Terra/MODIS 和 Aqua/MODIS 每 1 到 2 天观测一次地球表面,能够获取 36 个波段的数据。其中,Aqua 也是 A-Train 星座计划成员之一。Terra 和 Aqua 的轨道高度约为 705 km,Terra 的升交点时刻为当地时间的 10:30,Aqua 的降交点时刻为当地时间的 13:30。波段的空间分辨率因波段而异,波段 1 和 2 的空间分辨率为 250 m,波段 3~7 的空间分辨率为 500 m,波段 8~36 的空间分辨率为 1000 m。

我国 FY-3D 卫星于 2017 年 11 月 15 日发射,星上搭载了 MERSI-II。MERSI-II 将观测通道数从 MERSI-I 的 20 个提升至 25 个,补充了对识别卷云敏感的 1.38 μm 通道和对云相态敏感的 10.8 μm 通道等。25 个观测通道包括 16 个可见光-近红外通道、3 个短波红外通道和 6 个中长波红外通道。在空间分辨率方面,25 个观测通道中 6 个通道的空间分辨率可达到 250 m,其余通道的空间分辨率为 1000 m。

2.2 极轨卫星多角度偏振成像仪

国际上发射的多角度偏振成像仪非常有限,而这类载荷的观测方式和偏振测量等观测信息对云特性遥感探测非常敏感,且不易受到地表信号的干扰^[55-56]。该类载荷的云卫星遥感算法也明显区别于获取单一角度、标量观测的载荷,为全球云特性遥感观测提供了必要的补充。因此,本节主要讨论法国 PARASOL 卫星搭载的地表反射偏振和方向性测量仪(POLDER-3)和我国高分五号(GF-5)卫星所搭载的多角度偏振相机(DPC)。

我国 GF-5 卫星所搭载的 DPC 具有多谱段、多角度和多偏振的成像能力,可以获得云和气溶胶的微物理参数信息。DPC 的设计借鉴了法国 POLDER-3 的宝贵经验,POLDER-3/PARASOL 连续运行了近 10 年(2004—2013 年),获取了丰富的大气探测和应用数据^[57-60]。DPC 采用超广角镜头和滤光片-偏振片组合的方式获取多波段偏振辐射数据,8 个波段中 490,670,865 nm 波段为偏振探测波段,沿轨最多可获得 12 个观测角度,星下点空间分辨率为 3.5 km。DPC 的 433,490,565,670,865 nm 波段主要用来进行云和气溶胶的参数反演;763,765 nm 氧气 A 吸收带($\text{O}_2\text{-A}$) 波段主要用于云顶高度、云顶气压以及气溶胶参数的修正;910 nm 和 865 nm 波段结合能够用来反演

大气水汽柱总量。DPC 在波段设置(包括偏振波段)和成像机制方面和 POLDER 相同,空间分辨率优于 POLDER(6 km),较高空间分辨率的测量可提供更详细的大气和地面信息。我国 GF-5 号 02 星将搭载 DPC 与偏振扫描仪(POS)两个载荷构成偏振多角度组合探测^[61]。

2.3 新一代静止卫星成像仪

近几年成功发射的新一代静止卫星(如 FY-4、Himawari-8 和 GOES-R 等)在时空分辨率和波谱分辨率方面有了显著的改进,有力推动了被动卫星云特性遥感产品在环保、灾害和气象领域的深入应用。因此,本节就近年来中国气象局的风云四号 A 星(FY-4A)搭载的多通道扫描成像辐射计(AGRI)、日本气象厅的 Himawari-8 卫星搭载的先进葵花成像仪(AHI)和美国 NOAA 的 GOES-R 卫星所搭载的先进基准成像仪(ABI)展开介绍。

FY-4A 星于 2016 年 12 月 11 日成功发射,其搭载的 AGRI 具有覆盖 0.47~13.60 μm 波长范围的 14 个波段,包括 3 个可见光与近红外波段、3 个短波红外波段、2 个中红外波段、2 个水汽波段和 4 个长波红外波段。可见光和近红外波段图像的分辨率为 0.5 km,短波和中红外波段图像的分辨率达到了 2.0 km,热红外波段图像的分辨率为 4.0 km,全盘观测频率为 15 min^[62]。FY-4B 星于 2021 年 6 月 3 日成功发射,搭载的 AGRI 载荷在上一代基础上增加了波长为 7.4 μm 的低层水汽观测通道,延长了设计寿命^[63]。

Himawari-8 号卫星是日本气象厅于 2014 年 10 月 7 日成功发射的新一代地球同步轨道对地静止气象卫星,是“葵花”系列气象卫星之一。Himawari-8 号卫星搭载的 AHI 具有覆盖 0.47~13.30 μm 波长范围的 16 个波段,包括 3 个可见光波段(蓝、绿、红)、10 个红外波段和 3 个近红外波段。可见光图像的分辨率达到 0.5 km,近红外和红外波段图像的分辨率为 1 km。其中,各可见光波段和热红外波段常被用于云检测,波长为 1.6 μm 的近红外通道可用于云相态反演,波长为 2.3 μm 的近红外通道可用于云滴有效半径观测。全盘观测频率为 10 min^[33, 64]。Himawari-9 号卫星于 2016 年 11 月 2 日发射,其搭载的传感器与 Himawari-8 号卫星一致,主要进行在轨备份工作。此外,韩国新一代静止卫星 GK-2A 于 2018 年 12 月 5 日发射,其搭载的传感器具有 16 个观测波段,可见光波段的空间分辨率为 0.5~1.0 km,近红外到红外波段的空间

分辨率为 2 km^[65]。

静止环境观测卫星(GOES)是美国的系列静止卫星计划,其新一代观测载荷[先进基线成像仪(ABI)]搭载于 2016 年 10 月 19 日发射的 GOES-16 和 2018 年 3 月 1 日发射的 GOES-17 上。ABI 与前文所述的 AHI 的波段设置和空间分辨率类似,区别在于可见光近红外波段中 AHI 新加入了波长为 0.51 μm 的通道,进而 AHI 可呈现出真正的全彩云图^[66-67]。相对应地,ESA 和 EUMETSAT 也在第二代静止气象卫星(MSG)的系列上计划第三代(新一代)静止气象卫星(MTG),其搭载的组合成像仪(FCI)具有 16 个通道,可见光波段的空间分辨率为 0.5~1.0 km,红外波段的空间分辨率为 1.0~2.0 km^[68]。

3 方法及进展

卫星云产品生产流程如图 2 所示。在卫星一级资料的基础上,首先进行云识别以获取云分布的范围,识别结果一般以掩码的形式输出,云识别结果也

是云量估算的主要数据来源。云像元确定之后是云相态的识别,目的是将云区归类到水云、冰云和混合云等不同类型中。由于冰云和水云的光学和微物理特性参数反演算法不同,因此云分布和云相态的准确识别是下游云参数反演精度的重要保障。有些云顶参数的反演算法需要输入云相态,而有些则在直接输入云识别结果后便可得到云顶的高度、温度、压强和辐射率等信息。接下来的流程是云的光学和微物理参数的反演。一般将混合云当作冰云,采用非球形粒子假设反演得到光学厚度和冰晶有效半径;水云则基于球形粒子假设反演得到光学厚度和云滴有效半径。对于水云,利用偏振的方法可以同时得到云滴有效半径和方差,进而得到完整的谱分布,而在标量观测中通常假设云滴有效方差为常数。在上述参数反演的基础上,可以通过一些云类型的判定标准,结合相态、云顶高度和云光学厚度等参数综合对云类型进行判别,也可以基于云微物理和光学参数进一步估算云水路径和云滴数浓度。

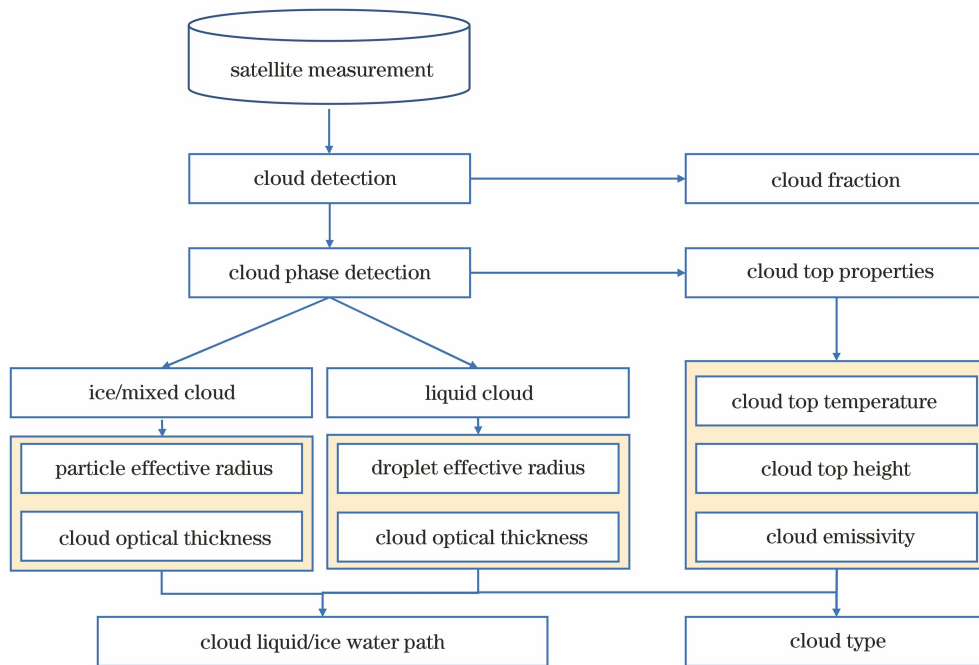


图 2 卫星云产品生产流程

Fig. 2 Production process of cloud products for satellite

3.1 云检测算法

被动卫星云识别算法中最常用的方法是阈值法^[69],该方法假设在云区和非云区得到的卫星观测数据(反射率、亮温或者基于基本物理量构造的识别指数)会落入不同的值域空间。若 $f_{cloud}(t, x, y)$ 代表用于检测云的判据,其中 t, x 和 y 分别代表该判据所处的时间和空间位置, $f_{clear}(t, x, y)$ 代表该判

据在无云覆盖时的值,则二者差值 T 的表达式为

$$T = f_{cloud}(t, x, y) - f_{clear}(t, x, y), \quad (1)$$

由(1)式可知: T 值越大,越易于设置阈值检测;反之,则越难准确识别云。

对于 MODIS、AHI 和 AGRI 等波段覆盖可见红外波段的载荷,云识别的判据非常丰富。判据可以是可见光反射率、近红外的反射率、红外亮温、

反射率构造的指数和亮温差等^[70-73]。不同的判据会随着 t 、 x 和 y 的不同具有不一样的表现,例如:当将可见光反射率这类判据用于夜晚时刻时,识别效果会大打折扣;当将亮温这类判据用于海拔很高的区域或者冰雪表面时,载荷对云的识别能力会受到较大影响^[74-75]。可见,基于被动卫星的云检测难点在于判据的适用情况有限以及充分考虑研究区和载荷特征有效的组合判据的获取。此外,对于给定的云识别判据,阈值的确定也是一个难点,确定云识别阈值的方法多种多样,如采样统计的方法、辐射传输模拟的方法或者机器学习模型的方法^[76-78],或者综合利用上述方法进行判据和阈值的构建。由于阈值的设定缺乏灵活性,故针对不同的载荷需采用不同的解决方法。对于 MODIS,当利用其在同一判据下进行云识别时,可在水体、陆地等不同情况下设置可变阈值^[79-80]。对于静止卫星载荷 AHI,在其阈值设定中可以引入太阳天顶角信息,从而可使得可见光反射率判据的阈值在不同日照情况下能够动态调整^[81]。对于 DPC 和 POLDER 这类缺乏红外波段观测的载荷,其判据侧重利用表观压强指数来识别云区、利用多角度观测来判断云边缘像元以及利用偏振反射率来提高海面耀斑区的云识别精度^[82]。虽然云识别经历了长时间的发展,但是夜晚、晨昏、冰雪、污染、沙尘和火山喷发等场景下的判据设置和阈值选择仍然很难达到理想的效果。

3.2 云相态识别算法

根据使用的观测波段及传感器特征可以将被动卫星的云相态识别划分成三类^[83]:1)短波红外和可见光反射率比值法;2)热红外亮温差法;3)多角度偏振法。前两个方法分别适用于 AGRI 和 MODIS,第三种方法是适用于以 POLDER-3 和 DPC 为代表的多角度偏振传感器所特有的云相态识别方法。

由于短波红外 $1.6\ \mu\text{m}$ 和 $2.2\ \mu\text{m}$ 波段的辐射信息受冰云和水云的吸收性不同,故二者可用于云相态的区分^[84]。AGRI 利用这两个通道可以有效区分单层的冰云和水云。MODIS 区分云相态采用的是热红外双波段方法^[14,85],即在 $8.5\ \mu\text{m}$ 波段处冰云和水云的复折射指数的虚部相等,进而两者具有一致的吸收特性,但冰云在 $11\ \mu\text{m}$ 波段的吸收性强于水云,这会被反映到观测亮温上。这一方法的优势是与太阳入射无关,故可被用于白天和黑夜的云相态识别中^[40,86]。辐射传输模拟也表明,当冰云光学厚度超过 0.5 时, $8.5\ \mu\text{m}$ 和 $11\ \mu\text{m}$ 波段的亮温差(BTD)为正值,而较厚的水云的 BTD 通常小于

—2。BTD 随着水云云粒子尺寸的增大以及水汽含量的增加而减小。对于偏振观测而言,水云和冰云的多角度偏振反射率随着散射角的变化呈现出不同特征,这是区分冰云和水云的基础^[41,87-88],例如:水云在 140° 散射角处的偏振反射率具有峰值(虹效应);当散射角范围为 $100^\circ\sim 140^\circ$ 时,水云和冰云的偏振反射率随着散射角的增加分别增大和减小。综合利用这些信息构造判据可以对 POLDER 和 DPC 进行云相态识别^[87,89]。

3.3 云顶参数算法

云顶参数包括云顶的温度、压强和高度,被动卫星进行云压反演的的方法包括 CO_2 切片法、偏振反射率方法和氧 A 通道方法等。

红外波段(波长范围为 $13\sim 15\ \mu\text{m}$)为 CO_2 的吸收波段,且随着波长的增大, CO_2 对红外光的吸收能力不断增强,进而在该波段范围内不同波长下 CO_2 气体的吸收峰值高度会在大气中错开。当大气中有云层出现时,这些波段的信号会受到不同程度的影响,将这些信号与无云情况下的信号进行对比可以对云顶的高度信息进行探测,MODIS 载荷正是利用该方法反演云顶参数^[90]。类似地,新一代静止卫星 Himawari-8/AHI 云顶参数反演算法^[91]通过热红外波段和再分析资料中的温压廓线信息获得云顶温度等参数。神经网络算法也可以对被动卫星红外多波段与云顶参数的真值进行训练^[92],进而实现云顶参数的反演。

偏振反射率法主要依据云层上方分子散射的偏振辐射与瑞利压强成正比的定律,通过转换公式将偏振辐射转换成云层上方的气压^[93]。氧 A 云压的反演是基于氧 A 波段(波长范围为 $755\sim 775\ \text{nm}$)的大气吸收特性逐渐增强这一特征,在该波长范围内设置宽窄两个波段的观测,两个波段的辐亮度差值对云顶高度较敏感。例如,GF-5 号卫星的 DPC 载荷利用 $758\sim 768\ \text{nm}$ 和 $745\sim 785\ \text{nm}$ 两个通道对云顶压强进行反演。此外,也有研究表明,结合一定假设,利用偏振反射率法可以获得云层的几何厚度^[94-95]。

3.4 光学厚度和粒子谱分布反演算法

云粒子有效半径和云光学厚度决定了云的辐射特性,二者构成了云辐射参数化的基础。该节主要介绍基于标量观测同时反演云光学厚度和粒子半径的方法,以及基于偏振观测反演云滴谱分布的方法。

水云由球形水滴组成,冰云由形状复杂的冰晶组成。水滴和冰晶的光吸收性质是由水和冰的复折

射指数确定的。例如,在 $1.6 \mu\text{m}$ 波长处,冰具有较强的吸收,而水的吸收较弱^[96]。图 3(e)描述了基于可见光波段和近红外波段同时反演云光学厚度和有效半径的主要思想,虚线表示固定光学厚度的反射函数,实线表示固定有效半径的反射函数^[47]。反演原理为云在吸收较弱的可见光波段的观测反射率是云光学厚度的函数,而在近红外波长范围内云中水汽的吸收比较小,波段的观测反射率主要取决于云中云粒子有效半径的尺度^[46]。冰晶光散射模型的

开发是云微物理参数反演的难点,国际上 MODIS 算法中采用不同形状配比的冰晶光散射方案、AHI 算法中采用泰森多边形 (Voronoi) 冰晶模型、POLDER-3 算法中采用内含气泡的六棱柱 (IHM) 冰晶模型来构建冰晶光散射数据库以服务于冰云反演算法中查找表的构建^[40, 97-101]。云光学和微物理特性参数是地表辐射估算的重要输入参数^[102-103],基于 AHI 云微物理参数的精确反演被证实能够有效提高云下地表短波辐射的估算精度^[104-105]。

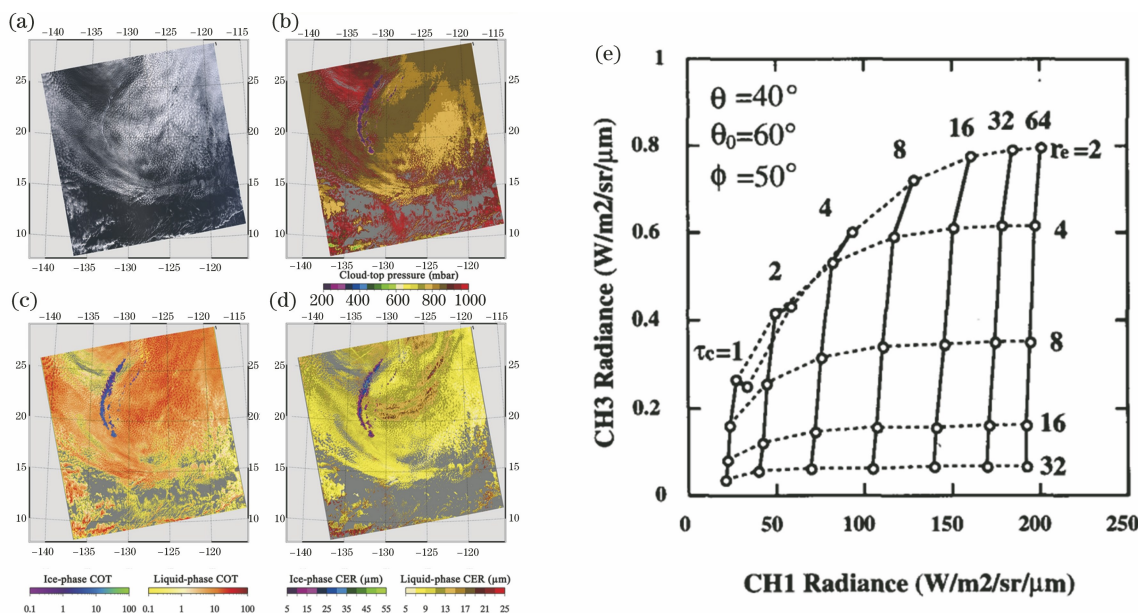


图 3 云微光学和微物理反演原理和结果示例^[47, 106]。(a) MODIS C6 版本的云真彩图;(b) 云顶压强;(c) 云光学厚度;(d) 云粒子有效半径;(e) 双波段云光学厚度和云有效半径反演原理图。固定太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角下冰云在 $0.64 \mu\text{m}$ 和 $2.20 \mu\text{m}$ 波长处不同云光学厚度(虚线)和有效半径(实线)的不同云顶反射率值

Fig. 3 Examples of cloud micro-optics and microphysics inversion principles and results^[47, 106]. (a) True color image of cloud in MODIS C6 version; (b) cloud top pressure; (c) cloud optical thickness; (d) cloud particle effective radius; (e) schematic diagram of retrieving cloud top pressure and cloud effective radius from two bands. Different cloud top reflectance values of different cloud optical thickness (dashed line) and effective radius (solid line) of ice cloud at wavelengths of $0.64 \mu\text{m}$ and $2.20 \mu\text{m}$ under fixed solar zenith angle, satellite zenith angle and relative azimuth

多角度偏振载荷获取的偏振反射率特征对水云的云滴谱分布敏感,相较上述标量方法,偏振信息具有同时估算云滴有效半径和有效方差的独特优势。偏振云滴谱反演原理如图 4(a) 所示^[107]。可以发现,当散射角在 $145^\circ \sim 165^\circ$ 范围内时,可见光通道的偏振反射率呈现规律的波峰波谷分布,波峰值的散射角位置对云粒子有效半径敏感,而振幅的大小对云粒子有效方差敏感。

在反演当中,云粒子有效半径和有效方差可以通过对比卫星观测得到的云虹曲线的波特性与预先计算的偏振相函数的查找表得到。POLDER 是最早应用该方法进行云滴谱反演的载荷,其官方算法

表明,该载荷是将 $145^\circ \sim 165^\circ$ 散射角范围内的偏振反射率(多余虹)作为输入数据的^[109]。研究结果显示,官方算法中没有使用 $137^\circ \sim 145^\circ$ 散射角范围的偏振反射率(主虹),这将会导致反演得到的大云滴结果不可靠^[107]。有研究指出,联合主虹和多余虹的反演能够提高反演精度,改善反演分辨率且抑制云非均一性导致的误差,并将改进的方案应用于 POLDER 云滴谱的新算法当中^[110]。云虹是由云层顶部的单次散射决定的,当云层的光学厚度大于 5 时,信号将饱和^[39]。因此,地面反照率这一参数在反演当中可以不予考虑。一些敏感性分析的研究表明,三维辐射效应、观测几何信息以及覆盖的气溶胶

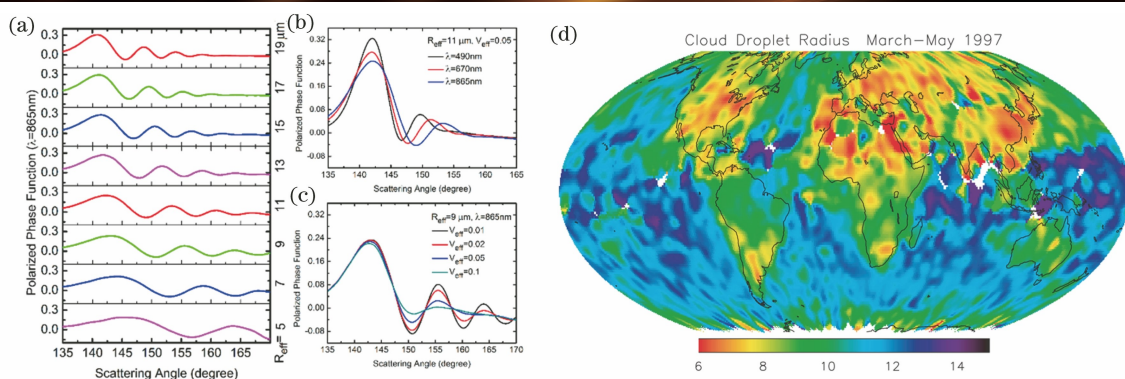


图 4 偏振云滴谱反演原理及 POLDER 全球云滴有效半径分布图^[107-108]。(a)偏振相函数随云滴有效半径的变化;

(b)偏振相函数随波长的变化;(c)偏振相函数随有效方差的变化;(d) POLDER 全球云滴有效半径分布图

Fig. 4 Principle of cloud droplet spectra retrieval from polarized measurements and global cloud droplet effective radius derived from POLDER^[107-108].

(a) Polarization phase function varying with cloud droplet effective radius;

(b) polarization phase function varying with wavelength; (c) polarization phase function varying with effective

variance; (d) global cloud droplet effective radius derived from POLDER

层对多角度偏振反射率方法引入的误差非常有限^[111]。这种方法还可以借助傅里叶变换应对多粒子谱分布的反演情况^[112]。由于偏振多角度成像仪的载荷相对有限,且前述的水云反演方法对观测具有严格的角(散射角范围为 137°~175°)和精度要求,故该算法的应用具有较高的要求。

3.5 云水含量反演算法

云水含量是描述云中水储量的重要参数,与降水、云湍流状态和云类型息息相关。根据云的相态将描述特定位置的云水含量的参数分为液水含量(LWC)和冰水含量(IWC),物理单位可以是每单位体积内的含水量(单位为 g/m^3)或者每单位质量空气的含水量(单位为 g/kg)。由于目前被动卫星的观测通道对云层内部特性的敏感性有限,故基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云含水量的探测难以给出云中任意一点的云水含量信息(LWC 或者 IWC 廓线信息)。较为多见的是利用一定的云水含量廓线假设给出云水的柱总量信息,即液水路径(LWP, M_{LWP} , 单位为 g/m^2)或者冰水路径(IWP, 单位为 g/m^2)的反演结果。因为水云的粒子形状单一,所以更容易通过云滴有效半径廓线假设的方法反演得到云水含量^[113]。利用云光学厚度和云有效粒子半径的反演估算 LWP 的方法的数学表达式为

$$M_{LWP} = C\rho\tau r, \quad (2)$$

式中: ρ 为水密度; τ 为云光学厚度; r 为云粒子有效半径; C 为常数。当假设云粒子半径和其消光能力在云不同高度均匀分布时, $C = 2/3$;当假设云粒子半径从云底到云顶服从绝热增长理论时, $C =$

$5/9$ ^[114]。当将这种方法应用于 MODIS 的云水路径反演当中时,存在较大的不确定性^[115-116]。由于冰云中冰晶的形状各异,故冰晶形状的假设是反演的不确定性来源之一。此外,冰云下面经常覆盖水云。因此,(2)式所示方法在实际应用中不适用于 IWP 的反演。反演 IWP 和 LWP 更准确的方法是借助雷达观测的云廓线信息给出冰云或者水云云粒子数浓度和有效半径的垂直变化信息^[117]。

3.6 机器学习在云特性反演中的应用

随着技术创新的快速发展,机器学习方法已被广泛应用到云检测、云分类,以及云光学和微观物理参数反演中。基于不同的机器学习模型[如模糊逻辑方法^[118]、人工神经网络^[119]、支持向量机(SVM)分类器和随机森林(RF)分类器^[120]等]结合实际云特性反演需求的工作近年来大量涌现。Liu 等^[121-122]利用 Himawari-8 号卫星 AHI 传感器开发了一种基于机器学习的单层云和多层云检测算法,并采用 CloudSat 和 CALIPSO 数据进行了验证。Min 等^[123]基于 CALIPSO 和 Himawari-8 号卫星数据,采用机器学习方法发展了高时空分辨率和高精度的云顶参数算法。Zhang 等^[124]提出了一个新的卷积神经网络模型(CloudNet)用于精确地进行气象云分类。

4 总结和展望

对基于被动卫星可见和红外观测资料云特性遥感中载荷、观测原理和反演方法等进行了总结。首先,按照轨道和观测特点依次介绍了极轨多通道成像仪、多角度偏振成像仪和新一代静止卫星成像仪

的通道设置和观测优势等。然后,分析了云特性遥感算法的主要原理和方法,具体算法包括云识别、云相态、云顶参数、云光学参数和微物理参数。主要结论和展望包括:

1) 现有云识别、云相态算法所基于的主要思想虽然一致,但是在实际应用中根据研究区域、适用场景和载荷观测的不同需要投入大量的时间和精力进行判断和阈值的调整。解决该问题的思路之一是构建系列、有继承性的载荷计划,如风云气象卫星系列的 MERSI 传感器,这样可以有效的利用已有算法进行迭代更新^[32]。此外,也可以通过发展通用的算法来应对该问题。例如:美国威斯康星大学发展的云特性反演模块,支持根据波段响应函数的不同,对相似载荷进行算法移植^[125];日本 JAXA 也发展了云光学观测的综合分析系统,可以便捷地对多个载荷进行算法推广^[73]。除此之外,在特定场景下的云识别仍然没有很好地被解决。例如:仅利用近红外和红外波段在夜间进行云识别和晨昏的云识别;在高寒、两极和沙尘等环境下准确区分云和晴空。

2) 云相态和云顶高度参数的反演方面,载荷的波段设置支持多种算法的实施,不同算法之间得到的信息不一致的问题需要关注。此外,在反演中,多层云、过冷水云、混合云以及云几何形态的影响较大^[122,126-129]。该问题一方面需要进一步了解同参数不同算法的优缺点和精度特征,另一方面可以通过引入对多层云、混合云和过冷水云的检测范围以特别处理该区域的云反演。机器学习方法可以协同不同算法的反演优势,且随着更多高精度云观测数据的获取将迎来蓬勃发展^[130]。

3) 云微物理特性反演方面,现有研究的主要问题是进一步提供模式改进、灾害监测更直接的观测量^[131-134]。例如,通过被动卫星获取更高精度的云水含量、降雨等信息。已有学者利用云光学和微物理参数估算云水含量、云滴数浓度,未来的一个发展趋势是结合主被动观测和最优估计理论,对传统的云光学和微物理参数、云几何形态、湍流状态,以及含水量等信息进行同步反演^[135-136]。

4) 被动卫星云特性参数的遥感观测除了依赖遥感算法的优化和革新,也依赖载荷的观测能力和观测手段的创新。被誉为开启新征程“黎明星”的全球首颗民用晨昏轨道气象卫星风云三号 E 星于 2021 年 7 月 5 日成功发射^[137],给晨昏时刻的云探测提供了全新的视角。2022 年计划发射的多视角、多通道、多偏振成像仪 3MI,作为欧洲气象卫星组织

第二代极地系统(EPS-SG)的主要成像仪之一,增加了近红外波段的偏振观测通道和双相机结合观测模式,将有效拓宽多角度偏振云观测资料的应用范围^[13,138]。新的卫星计划正在不断涌现,可以预见的是云特性的卫星观测将迎来更广阔的发展空间。

致谢 在撰写本文的过程中,非常感谢团队各成员为本文做出的努力和贡献。旭日收集提供了云高的反演方法介绍,伟乐斯收集提供了云检测和云压的偏振算法介绍,安妮收集提供了风云云产品的介绍,邵江琦收集提供了 CALIPSO 卫星的云产品介绍,王宇彤收集提供了 3MI 卫星相关信息,汪文武收集提供了 EarthCARE 卫星的相关介绍,吴来兄收集提供了 Himawari-8 号卫星和 NOAA 卫星载荷和云产品相关介绍。

参 考 文 献

- [1] Wylie D, Jackson D L, Menzel W P, et al. Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(15): 3021-3031.
- [2] Zeng S, Parol F, Riedi J, et al. Examination of POLDER/PARASOL and MODIS/Aqua cloud fractions and properties representativeness [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(16): 4435-4450.
- [3] Rosenfeld D. Aerosols, clouds, and climate [J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1323-1324.
- [4] Rosenfeld D, Zhu Y N, Wang M H, et al. Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds[J]. *Science*, 2019, 363(6427): eaav0566.
- [5] Myers T A, Scott R C, Zelinka M D, et al. Observational constraints on low cloud feedback reduce uncertainty of climate sensitivity[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 501-507.
- [6] Yin Y, Carslaw K S, Feingold G. Vertical transport and processing of aerosols in a mixed-phase convective cloud and the feedback on cloud development [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(605): 221-245.
- [7] Fu Y F, Yu R C, Xu Y P, et al. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and IMI[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(4): 421-431, 513.
傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究 [J]. *气象学报*, 2003, 61(4): 421-431, 513.

- [8] Xu X D, Zhou L, Zhou X J, et al. Influence region of surrounding sources in the process of heavy air pollution in urban environment [J]. SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences, 2004, 34(10): 958-966.
徐祥德, 周丽, 周秀骥, 等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域 [J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(10): 958-966.
- [9] Liu Y M, Yan Y F, Lü J H, et al. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 847-858.
刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 等. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展 [J]. 大气科学, 2018, 42(4): 847-858.
- [10] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1977, 34(7): 1149-1152.
- [11] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, et al. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption [J]. Nature, 2007, 448 (7153): 575-578.
- [12] Sun Y, Ding Y H. Responses of South and East Asian summer monsoons to different land-sea temperature increases under a warming scenario [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(25): 2718-2726.
- [13] Merlin G, Riedi J, Labonnote L C, et al. Cloud information content analysis of multi-angular measurements in the oxygen A-band: application to 3MI and MSPI [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(10): 4977-4995.
- [14] Baum B A, Frey R A, Mace G G, et al. Nighttime multilayered cloud detection using MODIS and ARM data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42 (7): 905-919.
- [15] Chen Q, Zhang H. Effects of ice crystal habit weight on ice cloud optical properties and radiation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(2): 279-288.
陈琪, 张华. 不同形状冰晶权重假定对冰云光学和辐射特性的影响 [J]. 气象学报, 2018, 76(2): 279-288.
- [16] van Diedenhoven B. Remote sensing of crystal shapes in ice clouds [M]//Kokhanovsky A. Springer series in light scattering. Cham: Springer, 2018: 197-250.
- [17] Chen H B, Bian J C, Lü D R. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 813-820.
陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望 [J]. 大气科学, 2006, 30 (5): 813-820.
- [18] Zhao C F, Liu L P, Wang Q Q, et al. Toward understanding the properties of high ice clouds at the Naqu site on the Tibetan Plateau using ground-based active remote sensing measurements obtained during a short period in July 2014 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(11): 2493-2507.
- [19] Baker M B, Peter T. Small-scale cloud processes and climate [J]. Nature, 2008, 451 (7176): 299-300.
- [20] Fu Y F, Pan X, Xian T, et al. Precipitation characteristics over the steep slope of the Himalayas in rainy season observed by TRMM PR and VIRS [J]. Climate Dynamics, 2018, 51 (5/6): 1971-1989.
- [21] Qu Y W, Han Y, Wu Y H, et al. Study of PBLH and its correlation with particulate matter from one-year observation over Nanjing, southeast China [J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 668.
- [22] Gong W, Li W L. Simulation of severe storm rainfall event in 1991 over Changjiang Huaihe River valley with a Chinese regional climate model [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8 (3): 70-79.
龚威, 李维亮. 中国区域气候模式对 1991 年江淮流域特大暴雨过程的模拟 [J]. 应用气象学报, 1997, 8(3): 70-79.
- [23] Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: climate and climate change [J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(10): 1607-1640.
黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1607-1640.
- [24] Zhang H, Wang F, Zhao S Y, et al. Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 691-698.
张华, 王菲, 赵树云, 等. IPCC AR6 报告解读: 地球能量收支、气候反馈和气候敏感度 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 691-698.
- [25] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Towards the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [C]//Proceedings of the 2016 AGU Fall Meeting, December 12-16, 2016, Moscone. New York: AGU, 2016.
- [26] Liu Y Z, Wu C Q, Jia R, et al. An overview of the

- influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(9): 1183-1194.
- [27] Yu H P, Huang J P, Li W J, et al. Development of the analogue-dynamical method for error correction of numerical forecasts[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 934-947.
- [28] Wang M H, Ghan S, Liu X H, et al. Constraining cloud lifetime effects of aerosols using A-Train satellite observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(15): L15709.
- [29] Zhu L, Lu C S, Gao S N, et al. Spectral width of cloud droplet spectra and its impact factors in marine stratocumulus [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(3): 575-590.
朱磊, 陆春松, 高思楠, 等. 海洋层积云中的云滴谱宽度及其影响因子[J]. *大气科学*, 2020, 44(3): 575-590.
- [30] Dongfang X. A brief analysis of high resolution satellite and its application in China [J]. *Satellite Application*, 2015(3): 44-48.
东方星. 我国高分卫星与应用简析[J]. *卫星应用*, 2015(3): 44-48.
- [31] Jiang X W, Lin M S, Zhang Y G. Progress and prospect of Chinese ocean satellites [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1185-1198.
蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1185-1198.
- [32] Yang J, Dong C H, Lu N M, et al. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 501-509.
杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星: 风云三号[J]. *气象学报*, 2009, 67(4): 501-509.
- [33] Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(1): 72-75.
张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 72-75.
- [34] Yang P, Hioki S, Saito M, et al. A review of ice cloud optical property models for passive satellite remote sensing [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(12): 499.
- [35] Congalton R G. Remote sensing: an overview [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2010, 47(4): 443-459.
- [36] Stephens G L, Kummerow C D. The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 3742-3765.
- [37] Zhao C F, Yang Y K. Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2021, 40(3): 243-258.
赵传峰, 杨以坤. 地基云遥感反演进展及挑战 [J]. *暴雨灾害*, 2021, 40(3): 243-258.
- [38] Riedi J, Marchant B, Platnick S, et al. Cloud thermodynamic phase inferred from merged POLDER and MODIS data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(23): 11851-11865.
- [39] Breon F M, Doutriaux-Boucher M. A comparison of cloud droplet radii measured from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1796-1805.
- [40] Platnick S, Meyer K G, King M D, et al. The MODIS cloud optical and microphysical products: Collection 6 updates and examples from Terra and Aqua [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 502-525.
- [41] Labonnote L C, Brogniez G, Buriez J C, et al. Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals: validation with ADEOS-POLDER measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 12139-12153.
- [42] Letu H S, Ishimoto H, Riedi J, et al. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(18): 12287-12303.
- [43] Plass G N, Kattawar G W, Catchings F E. Matrix operator theory of radiative transfer. 1: Rayleigh scattering [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(2): 314-329.
- [44] Thalman R, Zarzana K J, Tolbert M A, et al. Rayleigh scattering cross-section measurements of nitrogen, argon, oxygen and air [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 147: 171-177.
- [45] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(9/10): 533-572.
- [46] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: theory [J]. *Journal of the Atmospheric*

- Sciences, 1990, 47(15): 1878-1893.
- [47] Nakajima T Y, Nakajima T. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(23): 4043-4059.
- [48] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947-973.
- [49] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 21-27.
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
- [50] Mao F Y, Gong W, Li J, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3097-3102.
毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演 [J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3097-3102.
- [51] Li J, Huang J, Stamnes K, et al. A global survey of cloud overlap based on CALIPSO and CloudSat measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(1): 519-536.
- [52] Yang B Y, Zhang H, Peng J, et al. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(4): 1105-1118.
- [53] Stein T H M, Delanoë J, Hogan R J. A comparison among four different retrieval methods for ice-cloud properties using data from CloudSat, CALIPSO, and MODIS [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(9): 1952-1969.
- [54] Saunders R W, Kriebel K T. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(1): 123-150.
- [55] Duan M Z, Lü D R. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements II: a case study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 27-35.
- [56] Alexandrov M D, Miller D J, Rajapakse C, et al. Vertical profiles of droplet size distributions derived from cloud-side observations by the research scanning polarimeter: tests on simulated data [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 239: 104924.
- [57] Buriez J C. An improved derivation of the top-of-atmosphere albedo from POLDER/ADEOS-2: narrowband albedos [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D5): D05202.
- [58] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 598-615.
- [59] Fougnie B, Bracco G, Lafrance B, et al. PARASOL in-flight calibration and performance [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5435-5451.
- [60] Chen L F, Shang H Z, Fan M, et al. Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1917-1931.
陈良富, 尚华哲, 范萌, 等. 高分五号卫星大气参数探测综述 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(9): 1917-1931.
- [61] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21-37.
- [62] Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(8): 1637-1658.
- [63] Zhang P, Zhu L, Tang S H, et al. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 6: 224.
- [64] Bessho K, Date K J, Hayashi M, et al. An introduction to Himawari-8/9: Japan's new-generation geostationary meteorological satellites [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2016, 94(2): 151-183.
- [65] Lee K S, Chung S R, Lee C, et al. Development of land surface albedo algorithm for the GK-2A/AMI instrument [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2500.
- [66] Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, et al. A closer look at the ABI on the GOES-R series [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(4): 681-698.
- [67] Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al. Introducing the next-generation advanced baseline imager on Goes-R [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(8): 1079-1096.
- [68] He X W, Feng X H, Han Q, et al. Advances of the

- geostationary meteorological satellite in the world: a review[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(1): 22-29, 41.
- 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 世界各国静止气象卫星发展综述[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(1): 22-29, 41.
- [69] Goodman A H, Henderson-Sellers A. Cloud detection and analysis: a review of recent progress [J]. *Atmospheric Research*, 1988, 21(3/4): 203-228.
- [70] Bréon F M, Colzy S. Cloud detection from the spaceborne POLDER instrument and validation against surface synoptic observations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(6): 777-785.
- [71] Frey R A, Ackerman S A, Liu Y H, et al. Cloud detection with MODIS. Part I: improvements in the MODIS cloud mask for Collection 5 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(7): 1057-1072.
- [72] Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. Discriminating clear sky from clouds with MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D24): 32141-32157.
- [73] Nakajima T Y, Ishida H, Nagao T M, et al. Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the GCOM-C (Shikisai) SGLI cloud products [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6: 52.
- [74] Li X, Pinker R T, Wonsick M M, et al. Toward improved satellite estimates of short-wave radiative fluxes: focus on cloud detection over snow: 1. methodology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D7): D07208.
- [75] Pinker R T, Li X, Meng W, et al. Toward improved satellite estimates of short-wave radiative fluxes: focus on cloud detection over snow: 2. results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D9): D09204.
- [76] Jeppesen J H, Jacobsen R H, Inceoglu F, et al. A cloud detection algorithm for satellite imagery based on deep learning [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 229: 247-259.
- [77] 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.
- [78] Derrien M, Farki B, Harang L, et al. Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 46(3): 246-267.
- [79] Platnick S, Wind G, King M D, et al. Comparison of the MODIS Collection 5 multilayer cloud detection product with CALIPSO [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1100(1): 416-419.
- [80] Hu X Q, Lu N M, Zhang P. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(3): 266-275.
- 胡秀清, 卢乃锰, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴 [J]. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 266-275.
- [81] Shang H Z, Chen L F, Letu H S, et al. Development of a daytime cloud and haze detection algorithm for Himawari-8 satellite measurements over central and eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(6): 3528-3543.
- [82] Wei L S, Shang H Z, Husi L T, et al. Cloud detection algorithm based on GF-5 DPC data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(10): 2053-2066.
- 伟乐斯, 尚华哲, 胡斯勒图, 等. GF-5 DPC 数据的云检测方法研究 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2053-2066.
- [83] Shang H Z, Letu H S, Chen L F, et al. Cloud thermodynamic phase detection using a directional polarimetric camera (DPC) [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 253: 107179.
- [84] Pilewskie P, Twomey S. Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2 μm [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(22): 3419-3420.
- [85] Platnick S, King M D, Ackerman S A, et al. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 459-473.
- [86] Mouri K, Izumi T, Suzue H, et al. Algorithm theoretical basis document of cloud type/phase product [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2016, 61: 19-31.
- [87] Goloub P, Herman M, Chepfer H, et al. Cloud thermodynamical phase classification from the POLDER spaceborne instrument [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D11): 14747-14759.
- [88] Doutriaux-Boucher M, Buriez J C, Brogniez G, et al. Sensitivity of retrieved POLDER directional cloud optical thickness to various ice particle models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(1): 109-112.

- [89] Riedi J, Doutriaux-Boucher M, Goloub P, et al. Global distribution of cloud top phase from POLDER/ADEOS I [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1707-1710.
- [90] Wylie D P, Menzel W P. Eight years of high cloud statistics using HIRS[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(1): 170-184.
- [91] Nakajima T Y, Ishida H, Nagao T M, et al. Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the GCOM-C (Shikisai) SGLI cloud products [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6: 52.
- [92] Håkansson N, Adok C, Thoss A, et al. Neural network cloud top pressure and height for MODIS [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(5): 3177-3196.
- [93] Parol F, Buriez J C, Vanbauce C, et al. First results of the POLDER “Earth radiation budget and clouds” operational algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1597-1612.
- [94] Ferlay N, Thieuleux F, Cornet C, et al. Toward new inferences about cloud structures from multidirectional measurements in the oxygen a band: middle-of-cloud pressure and cloud geometrical thickness from POLDER-3/PARASOL [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(12): 2492-2507.
- [95] Vanbauce C, Buriez J C, Parol F, et al. Apparent pressure derived from ADEOS-POLDER observations in the oxygen A-band over ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(16): 3159-3162.
- [96] Pilewskie P, Twomey S. Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2 μm [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(22): 3419-3420.
- [97] Zhang Z B, Platnick S, Yang P, et al. Effects of ice particle size vertical inhomogeneity on the passive remote sensing of ice clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D17): D17203.
- [98] Letu H S, Nakajima T Y, Matsui T N. Development of an ice crystal scattering database for the global change observation mission/second generation global imager satellite mission: investigating the refractive index grid system and potential retrieval error [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6172-6178.
- [99] Husi L, Nakajima T Y, Nagao T M, et al. Comparison of the ice cloud properties from Himawari-8/AHI and MODIS C6 product [C] // AGU Fall Meeting, December 10-14, 2018, Washington, D.C.. New York: AGU, 2018.
- [100] Labonnote L C, Brogniez G, Doutriaux-Boucher M, et al. Modeling of light scattering in cirrus clouds with inhomogeneous hexagonal monocrystals. Comparison with *in situ* and ADEOS-POLDER measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(1): 113-116.
- [101] Bi L, Yang P, Liu C, et al. Optical properties of ice clouds: new modeling capabilities and relevant applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9259: 92591A.
- [102] Liang S L, Zhao X, Liu S H, et al. A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(sup1): 5-33.
- [103] Chen H B. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 229-241. 陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 229-241.
- [104] Letu H S, Yang K, Nakajima T Y, et al. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111583.
- [105] Letu H S, Nakajima T Y, Wang T X, et al. A new benchmark for surface radiation products over the East Asia-Pacific region retrieved from the Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021: 1-40.
- [106] Rausch J, Meyer K, Bennartz R, et al. Differences in liquid cloud droplet effective radius and number concentration estimates between MODIS Collections 5.1 and 6 over global oceans [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(6): 2105-2116.
- [107] Shang H, Chen L, Bréon F M, et al. Impact of cloud horizontal inhomogeneity and directional sampling on the retrieval of cloud droplet size by the POLDER instrument [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4931-4945.
- [108] Bréon F M, Tanré D, Generoso S. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite [J]. *Science*, 2002, 295(5556): 834-838.
- [109] Bréon F M, Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(11): 1879-1882.

- [110] Shang H Z, Letu H S, Bréon F M, et al. An improved algorithm of cloud droplet size distribution from POLDER polarized measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 228: 61-74.
- [111] Alexandrov M D, Cairns B, Emde C, et al. Accuracy assessments of cloud droplet size retrievals from polarized reflectance measurements by the research scanning polarimeter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 92-111.
- [112] Alexandrov M D, Cairns B, Wasilewski A P, et al. Liquid water cloud properties during the Polarimeter Definition Experiment (PODEX) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 20-36.
- [113] Seethala C, Horváth Á. Global assessment of AMSR-E and MODIS cloud liquid water path retrievals in warm oceanic clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D13): D13202.
- [114] Miller D J, Zhang Z B, Ackerman A S, et al. The impact of cloud vertical profile on liquid water path retrieval based on the bispectral method: a theoretical study based on large-eddy simulations of shallow marine boundary layer clouds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(8): 4122-4141.
- [115] Hu Y X, Rodier S, Xu K M, et al. Occurrence, liquid water content, and fraction of supercooled water clouds from combined CALIOP/IIR/MODIS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D00H34.
- [116] Lee J, Yang P, Dessler A E, et al. The influence of thermodynamic phase on the retrieval of mixed-phase cloud microphysical and optical properties in the visible and near-infrared region [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3 (3): 287-291.
- [117] Delanoë J, Hogan R J. Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D4): D00H29.
- [118] Baum B A, Tovinkere V, Titlow J, et al. Automated cloud classification of global AVHRR data using a fuzzy logic approach [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(11): 1519-1540.
- [119] Liu Y, Xia J, Shi C X, et al. An improved cloud classification algorithm for China's FY-2C multi-channel images using artificial neural network[J]. *Sensors*, 2009, 9(7): 5558-5579.
- [120] Zhang C W, Zhuge X Y, Yu F. Development of a high spatiotemporal resolution cloud-type classification approach using Himawari-8 and CloudSat [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(16): 6464-6481.
- [121] Liu C, Yang S, Di D, et al. A machine learning-based cloud detection algorithm for the Himawari-8 spectral image [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021: 1-14.
- [122] Tan Z H, Liu C, Ma S, et al. Detecting multilayer clouds from the geostationary advanced Himawari imager using machine learning techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-12.
- [123] Min M, Li J, Wang F, et al. Retrieval of cloud top properties from advanced geostationary satellite imager measurements based on machine learning algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111616.
- [124] Zhang J L, Liu P, Zhang F, et al. CloudNet: ground-based cloud classification with deep convolutional neural network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8665-8672.
- [125] Li J M, Lü Q Y, Zhang M, et al. Effects of atmospheric dynamics and aerosols on the fraction of supercooled water clouds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(3): 1847-1863.
- [126] Fu H L, Shen Y, Liu J, et al. Cloud detection for FY meteorology satellite based on ensemble thresholds and random forests approach[J]. *Remote Sensing*, 2018, 11(1): 44.
- [127] Wang Z M, Letu H S, Shang H Z, et al. A supercooled water cloud detection algorithm using Himawari-8 satellite measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(5): 2724-2738.
- [128] Teng S W, Liu C, Zhang Z B, et al. Retrieval of ice-over-water cloud microphysical and optical properties using passive radiometers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (16): e2020GL088941.
- [129] Huang J P. Advanced retrievals of multilayered cloud properties using multispectral measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (D15): D15S18.
- [130] Matsui T N, Suzuki K, Nakajima T Y, et al. Interpretation of multi-wavelength-retrieved cloud droplet effective radii in terms of cloud vertical inhomogeneity using a spectral-bin microphysics cloud model and the radiative transfer computation [C] // 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 24-29, 2011, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2011: 3229-3232.
- [131] Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.

- [132] Wu G, Liu Y, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 404.
- [133] Lu C S, Liu Y G, Yum S S, et al. A new approach for estimating entrainment rate in cumulus clouds [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(4): L04802.
- [134] 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.
- [135] Kokhanovsky A A, Painemal D, Rozanov V V. The intercomparison of satellite-derived and *in situ* profiles of droplet effective radii in marine stratocumulus clouds [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5): 1147-1151.
- [136] Chen H L, Chen L, Hu X Q, et al. Effect of external stray light on low-light imager loaded in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050101.
陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050101.
- [137] Fougnie B, Marbach T, Lacan A, et al. The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager-overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 219: 23-32.