

# 光学学报

## 星载气溶胶被动光学遥感仪器: 进展与未来展望

丁宁<sup>1,2</sup>, 于博<sup>1,2</sup>, 颜昌翔<sup>1,3\*</sup>, 李文杰<sup>1,2</sup>, 鞠学平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 气溶胶一直是环境气候、空气质量和公共卫生方面的重要影响因素。卫星遥感可以实现对地球大视场的观测, 已成为气溶胶探测的主流方式之一。为了解星载气溶胶被动光学遥感仪器发展现状和趋势, 以多光谱、多角度和偏振观测为立足点, 调研了历史上各国星载气溶胶光学遥感仪器的主要技术参数。首先, 详细介绍了国际上几款典型仪器的设计参数和其在气溶胶参数反演方面的具体应用情况。然后, 对将要发射的先进遥感仪器进行了分析。最后, 总结了未来星载气溶胶被动光学遥感仪器的发展方向。集多光谱、多角度、中等空间分辨率、大视场和高精度偏振测量于一体是未来星载气溶胶光学遥感仪器的发展趋势。

**关键词** 大气光学; 星载; 光学遥感仪器; 气溶胶; 多光谱; 多角度; 偏振

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1701002

### Spaceborne Aerosol Passive Optical Remote Sensing Instruments: Progress and Future Prospects

Ding Ning<sup>1,2</sup>, Yu Bo<sup>1,2</sup>, Yan Changxiang<sup>1,3\*</sup>, Li Wenjie<sup>1,2</sup>, Ju Xueping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aerosol has always been an important factor in environmental climate, air quality, and public health. Satellite remote sensing can realize the observation of the earth's large field of view and has become one of the mainstream methods of aerosol detection. In order to understand the development status and trend of spaceborne aerosol passive optical remote sensing instruments, this paper investigates the main technical parameters of spaceborne aerosol optical remote sensing instruments in different countries in history based on multi-spectral, multi-angle, and polarization observations. Firstly, the design parameters of several typical instruments in the world and their specific applications in aerosol parameter inversion are introduced in detail. Then, the advanced remote sensing instruments to be launched are analyzed. Finally, the development direction of spaceborne aerosol passive optical remote sensing instruments in the future is summarized. In addition, the paper points out that the integration of multi-spectral observation, multi-angle observation, medium spatial resolution, large field of view, and high-precision polarization measurement is the development trend of spaceborne aerosol optical remote sensing instruments in the future.

**Key words** atmospheric optics; spaceborne; optical remote sensing instrument; aerosol; multi-spectrum; multi-angle; polarization

## 1 引言

气溶胶是悬浮于大气中直径在 0.001~100  $\mu\text{m}$  范

围内的固态和液态微粒体构成的稳定混合体系, 其来源主要分为两大类, 即自然源(矿物沙尘、火山灰和海洋飞沫等)和人为源(生物质燃烧、化石能源燃烧和工

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2022-08-05; 录用日期: 2022-08-13

通信作者: \*yancx@ciomp.ac.cn

业排放等),如经常造成空气污染的雾霾,就是一种人为气溶胶<sup>[1-2]</sup>。气溶胶通过散射和吸收太阳辐射影响地球气候系统的能量收支,进而影响全球气候变化,并且气溶胶导致的恶劣天气会对人类的生活和健康造成影响。此外,气溶胶在大气、地表参数定量遥感中是一个重要的先决条件,故在全球范围内研究气溶胶的特性至关重要,但也具有挑战性。由于气溶胶来源广泛,较大的时空变化导致其光学特性(对太阳辐射的吸收和散射特性)较难获取,而气溶胶的光学特性受粒径大小、粒子形状、粒子浓度和化学组成等因素影响,因此世界各地的科学家对气溶胶特性在长时期内的物理化学特征和演化过程展开了研究<sup>[3-5]</sup>。

能实现多光谱通道、大空间覆盖、高时空分辨率的星载被动光学遥感探测技术(以下简称为光学遥感)已经成为气溶胶观测的主流方式<sup>[6]</sup>。气溶胶对太阳辐射的吸收或散射反映了全部颗粒物的光学特性。气溶胶反演的原理为:太阳辐射经过气溶胶粒子的散射和吸收作用后,其强度和偏振特性发生了变化,而光学遥感仪器探测到的光学信号(多角度、多谱段的强度和偏振测量)记录了变化后的辐射量,利用大气辐射传输模型<sup>[7]</sup>和气溶胶模型反向模拟辐射量,结合评价函数寻找最接近的探测信号的模拟辐射量,相应的气溶胶模型参数即为最接近实际的气溶胶参数。目前,可基于星载光学遥感仪器获得的气溶胶参数主要有气溶胶光学厚度(AOD,表征气溶胶含量)、单次散射反照率(SSA,反映气溶胶光学吸收-消光比例)、Angstrom指数(AE,代表AOD随波长变化的特征)、细模态比例(FMF,代表细粒子占总粒子数量的比例)、复折射指数(实部 $n$ 和虚部 $k$ 分别代表气溶胶的光学散射和吸收能力)、非球形比例(NS,代表非球形粒子所占的比例)和粒子体积谱分布 $[dV/(d \ln r)]$ ,反映不同粒径下气溶胶粒子体积的变化情况,其中 $V$ 为气溶胶分布体积, $r$ 为气溶胶粒子半径<sup>[6]</sup>。

本文将历史上用于气溶胶探测的星载光学遥感仪器进行了汇总。为获取更多种类和更高精度的气溶胶参数,星载光学遥感仪器经历了从多谱段到多角度,再到偏振探测技术逐渐集成一体的发展历程。为了进一步了解各仪器的技术参数、比较其技术方案与可获取气溶胶参数的丰富程度,以及给未来星载气溶胶被动光学遥感仪器(为与雷达主动遥感仪器<sup>[8]</sup>进行区分,以下简称光学遥感仪器)的研制提供依据,下面主要介绍几款典型仪器的观测技术参数和这些仪器在气溶胶反演方面的具体应用情况。

## 2 多光谱遥感仪器

气溶胶光学遥感探测采用最多的是近紫外到短波红外(SWIR)光谱范围内的多个气溶胶敏感波段来探测全球或区域尺度内气溶胶的特性,借助气溶胶与地表的光谱散射和吸收特性,来从多光谱数据中提取出想要的信息。甚高分辨率辐射仪(AVHRR)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)和云与气溶胶成像仪(CAI)

等是目前典型的用于气溶胶反演的多光谱探测仪。

### 2.1 甚高分辨率辐射仪

AVHRR是较早用于气溶胶遥感观测的多光谱成像卫星载荷。1978年10月13日,AVHRR的4通道光学遥感仪器搭载于美国TIROS-N卫星上,开始了气溶胶遥感探测之旅。之后的NOAA7-19系列卫星均搭载了AVHRR/2(5通道)和AVHRR/3(6通道)<sup>[9]</sup>。AVHRR提供了40多年连续序列遥感观测数据,光谱覆盖 $0.58\sim 11.50\ \mu\text{m}$ 波段。 $0.615\ \mu\text{m}$ 波段处于可见红光波段中,地表反射率较低,并且不是大气强吸收波段,可以从中获取较多的气溶胶吸收和散射信息。 $0.912\ \mu\text{m}$ 波段处于水汽吸收带中,可用来校正水汽吸收散射部分,进而实现AOD反演。AVHRR/3中增加了 $1.61\ \mu\text{m}$ 波段,该波段的光基本不会被大气吸收或散射,可以近似认为来自地表,进而增强了地表信息的估算准确度<sup>[10]</sup>。AVHRR设置的 $3.74\ \mu\text{m}$ 与 $11\ \mu\text{m}$ 热红外通道,以及AVHRR/2和AVHRR/3增设的 $12.0\ \mu\text{m}$ 热红外通道通过检测云与地表温度,来区分像素是云还是晴空,云像素则不参与气溶胶反演。历代AVHRR的空间分辨率和幅宽均分别为 $1.1\ \text{km}\times 1.1\ \text{km}$ 和 $2900\ \text{km}$ ,实现了中等空间分辨率和大视场对地观测,可实现全球范围的气溶胶探测。

早期多位研究者基于单通道开发了对海洋气溶胶AOD的反演算法<sup>[11-15]</sup>,并实现了NOAA/AVHRR海洋气溶胶AOD产品的业务运营<sup>[15-16]</sup>。后来研究人员又发展了双通道海洋AOD反演算法<sup>[17]</sup>,但由于通道设置有限和AOD反演方法处于研究起步阶段,故AVHRR的陆地AOD反演一直是个挑战。随着AOD反演算法的发展,国内外研究者开始尝试基于AVHRR的陆地AOD反演研究。Hauser等<sup>[18-19]</sup>基于NOAA-16数据对欧洲地区(亮地表除外)的AOD进行了反演,与地基实测结果的相关系数为0.7。Riffler等<sup>[20]</sup>对Hauser等的方法进行了改进,提出了标准独立程序,并证明了该算法具有更高的精度。后来,研究者利用地表反射率在可见光与近红外波段之间的统计关系,实现了陆地AOD反演。李英杰<sup>[21]</sup>提出了适用于AVHRR的基于时间序列技术的陆地气溶胶卫星遥感反演算法,可实现地表二向性反射率分布函数和AOD的同时反演。何兴伟<sup>[22]</sup>提出了陆地上空AOD反演算法,生产了AVHRR在1983—2015年间的长时间序列AOD数据集。

### 2.2 中分辨率成像光谱仪

为了解全球气候变化情况和人类活动对气候的影响,美国国家航空航天局(NASA)研制了MODIS,并随Terra(上午卫星)和Aqua(下午卫星)卫星发射到705 km高的太阳同步轨道上。随着气溶胶反演研究的发展,研究者提出了探测更多气溶胶参数的要求,故MODIS设置了专门用于气溶胶光学特性研究的从蓝光到短波红外的7个通道。与AVHRR相比,MODIS增添了蓝光( $459\sim 479\ \text{nm}$ )、绿光( $545\sim 565\ \text{nm}$ )、近红外波段( $841\sim 890\ \text{nm}$ )、短波红外波段( $1230\sim$

1250 nm)和中波红外波段(2105~2155 nm)。蓝光和绿光与红光类似,也是气溶胶敏感波段,并且蓝光因接近紫外波段,对吸收型气溶胶有较强的吸收性,故其可与近红外波段结合来区分吸收型和非吸收型气溶胶。利用近红外、短波和中波红外通道受大气影响较小,并且与可见光波段有线性关系的特点,可实现地表反射率更准确的估算<sup>[23]</sup>。另外,MODIS还设置了覆盖可见光到热红外的通道,可用于地表、大气、海洋和云特性等研究,如在气溶胶反演之前,对数据进行大气校正、海洋耀斑、沉淀物和云像素等必不可少的云处理,准确获取气溶胶参数才能保证气溶胶在海洋和陆地上的反演精度。MODIS具有250 m、500 m和1000 m亚千米级(在米以上和千米以下的量级)空间分辨率,推扫幅宽为2330 km,一天接近全球覆盖,可实现高时空分辨率和中等城市区域气溶胶观测。

在陆地表面,气溶胶反演的主要任务是从遥感数据中将地表和大气成分各自的贡献分离。1997年,Kaufman等<sup>[24]</sup>提出了浓密植被(DDV)法,利用植被等暗地表在红光和蓝光波段与短波红外波段的线性关系来估算地表反射率<sup>[25]</sup>,并将其用于MODIS数据,实现了C004和之前版本的气溶胶产品数据集的生产<sup>[26]</sup>。2007年,Levy等<sup>[27]</sup>改进了DDV法,扩展了暗目标的判别范围,并将新算法命名为暗目标(DT)算法,该算法是C005和C006气溶胶产品数据集中应用的算法之一<sup>[28]</sup>。2004年,Hsu等<sup>[29]</sup>开发的深蓝(DB)算法是C005和C006气溶胶产品数据集中应用的另一种算法,实现了在明亮地表上的气溶胶反演。利用MODIS反射率数据,DB算法成功生产了一系列气溶胶产品,包括AOD、Angstrom指数,以及城市地区、沙漠地区

和半沙漠地区的沙尘吸收。除此之外,MODIS气溶胶产品数据集还包含了AOD细粒子比、粒子谱分布等反演结果<sup>[30]</sup>。由于MODIS数据具有较高的空间分辨率和长时间序列内较高的定标精度,能够较精确地反应城市地区的气溶胶分布特征,故被诸多研究者用来进行AOD特性研究、算法开发和对比较验证<sup>[24, 31-34]</sup>。

### 2.3 云与气溶胶成像仪

为了探测全球温室气体对气候的影响,国内外研究者研制了一系列CO<sub>2</sub>检测卫星。有研究发现,气溶胶的存在导致了卫星测量数据覆盖范围的严重限制和对CO<sub>2</sub>量反演的巨大不确定性,因此需要排除气溶胶的干扰<sup>[35]</sup>。日本宇航局研发的GOAST(Greenhouse gases Observing Satellite)卫星上搭载的TANSO-CAI(Thermal and Near-infrared Sensor for carbon Observation-Cloud and Aerosol Imager)载荷和GOSAT-2(Greenhouse gases Observing Satellite-2)卫星上搭载的TANSO-CAI-2(Thermal and Near-infrared Sensor for carbon Observation-Cloud and Aerosol Imager-2)载荷分别于2009年和2018年发射运行,均用于为温室气体探测,可排除气溶胶和云像素干扰<sup>[36]</sup>。两款载荷相比于其他多光谱遥感仪器的优势是空间分辨率较高和配备了343~380 nm的近紫外波段。因为下垫面大多数在近紫外波段为暗场,并且气溶胶粒子在该波段有较强的吸收作用,所以可有效地用于区分吸收与非吸收型气溶胶种类。此外,这两款载荷在气溶胶遥感领域有独特优势,可以用于反演AOD和气溶胶粒子分布特性。CAI属于多光谱遥感仪器,CAI-2拥有前向和后向双观测角度,属于多角度遥感仪器。两仪器的设计参数如表1所示。

表1 CAI和CAI-2光谱通道参数

Table 1 Summary for spectral channel characteristics of CAI and CAI-2

TANSO-CAI			TANSO CAI-2			
Wavelength / $\mu\text{m}$	Spatial resolution / (km $\times$ km)	Width /km	Wavelength / $\mu\text{m}$	Spatial resolution / (m $\times$ m)	Width / km	Observation angle /( $^{\circ}$ )
0.380			0.343			
0.674			0.380			
	0.5 $\times$ 0.5 (VNIR),	1000 (VNIR),	0.443	460 $\times$ 460		
0.870	1.5 $\times$ 1.5 (SWIR)	750 (SWIR)	0.550	(VNIR),	920	20, -20
			0.674	920 $\times$ 920		
			0.869	(SWIR)		
1.600			1.630			

CAI、CAI-2没有相应的气溶胶运营产品,其数据被官方用于识别云像素干扰和判断气溶胶类型,来直接辅助提高CO<sub>2</sub>反演精度。国际上学者针对它们开发了相应的气溶胶反演算法,并取得了理想的结果。2014年, Lee等<sup>[37]</sup>针对CAI开发了东亚地区气溶胶反演算法,利用2、3通道反射率数据反演出地表反射率。同时,利用2012年3月发射的通信、海洋和气象卫星(COMS)上的地球静止海洋彩色成像仪(GOCI)的蓝色信道和TANSO-CAI信道1的单次散射反照率法对

气溶胶吸收度进行了区分,进而实现了AOD反演,将所得结果与AERONET比较后发现该算法的性能较好。随后, Lee等<sup>[38]</sup>针对CAI开发了另一种气溶胶反演算法,为了区分气溶胶的吸收性,使用紫外(波段1)和可见光(波段2)波段进行了反射率差测试。TANSO-CAI气溶胶算法提供了东北亚地区2009年6月—2013年12月的AOD、气溶胶粒径分布和气溶胶类型等特征。2010年, Sano等<sup>[39]</sup>基于CAI提出了一种生物质燃烧气溶胶(BBA)光学特性提取算法,该算法

主要基于大气中各种气溶胶的辐射传输计算,并已被用于几次森林火灾事件中,得到了 0.55  $\mu\text{m}$  波段的 AOD 和 SSA。Zhong 等<sup>[32,40]</sup>分别于 2016 年和 2017 年针对 CAI 和 CAI-2 提出了两种暗目标 AOD 反演算法,两种算法分别基于两种免气溶胶影响的植被指数构建地表反射率估算模型,进而实现了高精度 AOD 反演。

综上所述,近紫外到短波红外波段中的气溶胶敏感波段在气溶胶探测领域具有独特的优势,覆盖近紫外波段到短波红外波段的多光谱探测技术必将成为未来气溶胶光学遥感仪器的基本技术特征之一。虽然只基于单角度强度辐射量反演气溶胶的技术得到了广泛且长期的应用,但是其也有局限性:1) 单角度强度数据只能够进行 AOD 反演,以及粒子谱分布和 SSA 的粗略反演,不能实现对气溶胶复折射率、粒子谱分布、粒子形状和 SSA 等用于全球气候环境研究参数的高精度反演<sup>[41]</sup>;2) 单角度强度数据反演方法容易受到地面反射率的影响,进而对下垫面情况分类的要求较严格<sup>[25,42]</sup>。因此,需要拓展气溶胶探测技术,来增加气溶胶信息获取维度。

### 3 多角度遥感仪器

由于单角度传感器观测数据的信息维度有限,往往仅能获得 AOD 这种气溶胶总量参数,故对气溶胶形状、粒径等物理特征难以有效反演。许多研究发现,在不同观测角度下,几乎所有地表的辐射值都是变化的,这种现象被称为二相性反射<sup>[43-44]</sup>。由此,研究者们研制了多角度传感器来获取更为丰富的地表观测信息,为气溶胶参数的探测提供了新的思路。多角度探测技术已成为当前气溶胶遥感领域的主要研究方向之一<sup>[45]</sup>。

#### 3.1 沿轨扫描辐射计

为实现多角度遥感探测,研究者研制出了第二代沿轨扫描辐射计(ATSR-2),于 1995 年随欧洲航天局的欧洲遥感卫星(ERS)-2 卫星发射升空,主要用于气溶胶、水汽、臭氧和云探测。ATSR-2 从天底( $0^\circ$ )和前向( $55^\circ$ )两个方向同步观测地面,避免因成像时间不同而引进误差<sup>[46]</sup>。前向观测方向的空间分辨率为 1.5 km $\times$ 2 km,天底观测方向的空间分辨率为 1 km $\times$ 1 km,扫面幅宽为 500 km。高级沿轨扫描辐射计(AATSR)搭载于 ENVISAT (Environment satellite) 卫星上,在 2002 年 3 月—2012 年 4 月期间提供双角度遥感数据<sup>[47-48]</sup>。AATSR 退役后,研究者研制出了 AATSR 的升级版——海洋和陆地表面温度辐射计(SLSTR)分别在 2016 年 2 月和 2019 年 8 月随哨兵 3A/3B (Sentinel-3A/3B) 发射升空<sup>[49]</sup>,继承了 AATSR 的双角度设计,并在原基础上增添了两个红外通道(1.38  $\mu\text{m}$  和 2.25  $\mu\text{m}$ ),最终可实现地表温度、海洋温度和植被特征等更多参数的获取。当采用 SLSTR 时,前向视场空间分辨率提高到了 0.5 km,幅宽扩展到了 750 km,且底向视场空间分辨率提高到了 1 km,幅宽扩展到了 1675 km。三代双角度遥感仪器均配备

的波段有 0.550、0.659、0.865、1.610、3.700、10.850、12.000  $\mu\text{m}$ 。

1998 年, Veefkind 和 de Leeuw<sup>[50]</sup>提出了经典的 ADV (ATSR Dual View) 算法,经过发展,形成了包括迭代反演和 k 比值反演两种方法的算法<sup>[51]</sup>。两种方法都是利用在不同观测角度下大气顶反射率和地表反射率不同的原理,并基于同一像元地表的两个观测方向地表反射率的比值不变这个基础假设,来反演气溶胶粒径大小和光学厚度参数的。该算法无需提前估算地表反射率信息,能够解决亮地表气溶胶反演问题,为气溶胶遥感提供新方法<sup>[52]</sup>。除此之外, Grey 等<sup>[53]</sup>在 2006 年提出了一种 AOD 反演算法,该方法使用光散射物理模型,不需要陆地表面的先验信息,允许从 11 年全球范围 ATSR 数据中反演 AOD,验证表明该反演值与 550 nm 处 AOD 的太阳光度计测量值高度相关。2009 年,英国牛津大学和卢瑟福·阿普尔顿实验室(RAL)共同提出了 ORAC 算法,该算法从 ATSR-2 算法改进而来,可以基于 AATSR 数据开展 AOD、粒子有效半径和地表反射率等参数的反演<sup>[54]</sup>。

#### 3.2 多角度成像分光辐射计

1999 年底,多角度成像分光辐射计(MISR)搭载于美国 Terra 卫星上发射升空,是用于气溶胶反演的多角度遥感器中的典型代表<sup>[55]</sup>。MISR 的设计目的是研究太阳光散射、云的高度、云的类型、大气气溶胶的类型和大气气溶胶的总量等地球生态和气候信息。MISR 在 4 个通道(0.4464、0.5575、0.6717、0.8664  $\mu\text{m}$ )和 9 个观测角度( $\pm 26.1^\circ$ 、 $\pm 45.6^\circ$ 、 $\pm 60.0^\circ$ 、 $\pm 70.5^\circ$  和最低点)下进行对地观测<sup>[56]</sup>,在相机最低点处的空间分辨率为 250 m $\times$ 250 m,在相机非最低点处的空间分辨率为 275 m $\times$ 275 m,扫描幅宽为 380 km。

由于 MISR 具有获取多角度观测数据的能力,因此能够实现亮地表(如沙漠)的气溶胶反演。2002 年, Diner 等<sup>[57-58]</sup>提出了 MISR 多角度气溶胶反演算法,通过对气溶胶粒子谱分布和成分进行合理的假设,将 9 个角度观测得到的表观反射率表示为地表和大气程辐射贡献两部分,利用经验正交函数(EOF)实现地气的分离,进而反演得到 AOD 等参数。

MISR 与 MODIS 搭载在同一卫星平台上,而 MISR 的特点是同时获取多角度和多光谱的信息,对陆地和海面的 AOD 和气溶胶粒子类型等参数的反演效果较好,因此 MISR 多角度反演 AOD 产品和 MODIS 的 AOD 产品同样被公认为是<sup>[59]</sup>最准确的。2010 年, Kahn 等<sup>[59]</sup>利用 MISR 观测信号的角度变化特性和空间对比度,对地表双向反射分布特性进行建模,进而分离地表和大气成分信号,实现 AOD、粒子谱分布(大、中、小)、吸收型或非吸收型粒子和球形或非球形粒子的反演,进而实现气溶胶分类,该方法被用于 MISR 版本 22 气溶胶产品运营中。

从诸多研究中总结得出,在沙漠、城市等地表反射率较高的地区,利用气溶胶多角度强度数据在大气的空间分布、地表反射率的角度差异,能够提取 AOD、粒

子谱分布和非球形比例等属性,因此多角度遥感观测被证明是今后继续沿用的气溶胶遥感技术。

## 4 偏振遥感仪器

随着对气溶胶和地表特性的研究推进,研究者发现了偏振测量信息的有利作用。有研究表明,不同于强度辐射信号,卫星接收到的偏振辐射信号的主要贡献来自于大气,偏振信号能体现大气的变化,而对地表变化不敏感。除此之外,在一定散射角下观测到的偏振信号主要来自于细粒子气溶胶<sup>[60]</sup>,以生物质燃烧等污染型气溶胶为主。天空中线偏振度的分布与气溶胶紧密相关<sup>[23, 61]</sup>,可用于反演气溶胶非球形比例、复折射指数和粒子谱分布等气溶胶光学和微物理参数<sup>[62-63]</sup>。通过对瑞利散射和地表反射偏振贡献部分的进一步订正,可实现陆地上空更多更精准的气溶胶参数反演<sup>[64-69]</sup>。

### 4.1 多角度偏振测量仪

法国国家空间研究中心研制的 POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 系列遥感仪器获得了全球大气研究者的广泛关注,其多角度偏振探测能力为获取更多的气溶胶参数提供了可能。POLDER-1 和 POLDER-2 遥感仪器分别在 1996 年和 2002 年搭载于日本国家空间发展局发射的 ADEOS (Advance Earth Observing Satellite) I 和 II 卫星上进入轨道观测,致力于气溶胶特性的遥感,在连续获取 8 个月的观测数据后均因故障而停止工作。2004 年,遥感仪器 POLDER-3 搭载于 PARASOL 卫星上成功升空,2005 年正式提供质量稳定的探测数据,直到 2013 年 10 月观测任务结束,在轨工作了 9 年。POLDER-3 遥感仪器是 A-train (太空列车计划卫星编队,用于地球观测) 的组成成员之一,是气溶胶遥感领域非常重要的偏振数据源。原计划由美国的 Glory 卫星填补 PARASOL 卫星脱离 A-train 轨道后的位置,该卫星携带了气溶胶偏振传感器 (APS)。然而,由于运载火箭故障,导致该卫星发射失败。这一事故严重延缓了气溶胶偏振遥感的发展。POLDER-1/-2 均拥有 0.44~0.91  $\mu\text{m}$  之间的 8 个探测波段, POLDER-3 拥有 0.44~1.02  $\mu\text{m}$  之间的 9 个探测波段, POLDER-1/-2/-3 均拥有三个偏振探测通道,可提供沿轨方向 14~16 个观测角度数据,偏振测量精度为  $\pm 2\%$  至  $\pm 3\%$ 。APS 拥有 9 个偏振波段,相比 POLDER-1 增加了一个近紫外波段 (412 nm)、一个水汽吸收带 (1378 nm)、一个短波红外波段 (1610 nm) 和一个中波红外波段 (2250 nm),去掉了 490、763、765 nm 波段,拥有 250 个观测角度,偏振测量精度为  $\pm 0.2\%$ 。具体参数和各波段主要用途如表 2 所示,其中 490(P)、670(P)、865(P) 代表 490、670、865 nm 波段有偏振通道。

法国 POLDER 团队最先使用偏振遥感数据进行陆地气溶胶反演<sup>[70]</sup>。POLDER 的偏振数据观测研究表明,在一定的散射角范围内,在 670 nm 和 865 nm 两

个波段处的偏振辐射主要来自细粒子气溶胶的贡献,可忽略粗粒子气溶胶的贡献。据此,POLDER 团队基于 POLDER-3 数据进行陆地上空的细粒子气溶胶 AOD 反演,并基于此算法发展了 POLDER 官方算法,开展了 AOD 和细粒子气溶胶光学厚度 ( $\text{AOD}_i$ )、粒子谱分布、复折射指数和地表模型等参数产品的运营,该产品被作为其他基于偏振数据开发的算法的参考。

2011 年, Dubovik 等<sup>[71-72]</sup> 提出了适用于 POLDER 的基于统计最优化方法的 GRASP (Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties) 反演算法。该算法首先反演出气溶胶粒子谱分布参数,通过该参数可以推导出大部分其他气溶胶光学参数,如粗细粒子光学厚度、单次散射反照率和气溶胶 Angstrom 指数等,因此该算法是目前前沿的气溶胶卫星遥感算法。除此之外,在基于最优估计反演框架的基础上, Zheng 等<sup>[73]</sup> 利用 POLDER 多角度偏振观测数据反演了粗细模态气溶胶体积柱浓度和 AOD,反演结果与 POLDER 官方产品具有较好的一致性。Chen 等<sup>[74]</sup> 使用 POLDER 观测资料,利用 GRASP 算法计算了非洲上空沙尘和碳质的 AOD 和吸收型 AOD (AAOD),最终结果与 AERONET、MODIS 气溶胶产品的一致性良好。Zhang 等<sup>[68]</sup> 利用 POLDER 偏振和标量数据建立了新的气溶胶细粒子比体系,通过引入经验正交函数方法,获得了气溶胶总光学厚度。同时,建立新型评价函数方案——分组残差排序 (GRES),提高了气溶胶细粒子光学厚度的反演精度。Ge 等<sup>[75]</sup> 利用地表偏振反射率基本不随波长变化的特性,发展了一种新的  $\text{AOD}_i$  反演算法,有效地避免了使用二向偏振反射分布函数 (BPDF) 模型带来的估算误差,实现了  $\text{AOD}_i$ 、气溶胶 Angstrom 指数和地表偏振反射率的同时反演。高鑫等<sup>[76]</sup> 将多角度偏振数据作为一个群组,提出了群组残差最优化算法,反演了亚太地区的 AOD。

POLDER 数据的应用证明了多角度偏振遥感在气溶胶参数反演中的独特优势,也表明偏振观测确实能够比强度观测获取更多的气溶胶信息<sup>[7, 77]</sup>。

### 4.2 高分辨率多角度偏振遥感相机

由于 POLDER 的偏振测量精度和空间分辨率较低,国内外研究者致力于在 POLDER 的基础上进行扩展和改进,如欧洲机载太阳红外光谱偏振观测系统 (OSIRIS)<sup>[77]</sup>、紫外-可见近红外 (VNIR)-短波红外气溶胶偏振测量仪 (MAUVE/SWIPE) 等<sup>[78]</sup>。

2018 年,由中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所研发的高分辨率多角度偏振遥感相机 (DPC) 被搭载于高分 5 号卫星上投入使用。于 POLDER 相比, DPC 在空间分辨率 (3.29 km) 上得到了提升,可实现 1850 km 幅宽、沿轨 9 个角度的对地观测,视场角为  $\pm 50^\circ$ 。同时, DPC 能够获取不同光谱通道上的标量和偏振数据,光谱范围为 443~920 nm,包含 3 个偏振波段 (490、670、865 nm) 和 5 个非偏振波段 (443、565、763、765、910 nm), DPC 偏振测量精度为

表 2 POLDER-1/-2/-3 和 APS 光谱通道参数

Table 2 Summary for spectral channel characteristics of POLDER-1/-2/-3 and APS

POLDER-1/-2/-3			APS		
Main Application	Wavelength / $\mu\text{m}$	Performance indicator	Main Application	Wavelength / $\mu\text{m}$	Performance indicator
Ocean color	443		Aerosols	412	
Ocean color, aerosols, Earth's radiation budget	490(P)		Ocean color	443	
Ocean color	565		Ocean color	555	
Vegetation, aerosols, Earth's radiation budget	670(P)		Vegetation, aerosols, Earth's radiation budget	672	
Genting pressure	763	Spatial resolution of POLDER-1/-2: 7.1 km $\times$ 6.0 km; spatial resolution of POLDER-3: 5.3 km $\times$ 6.2 km; total field of view: 102° $\times$ 86°; width: 2100 km $\times$ 1600 km	Vegetation, aerosols, Earth's radiation budget	865	Spatial resolution: 10 km $\times$ 20 km; total field of view: -63° - 50.5°
Aerosols, Genting pressure	765		Moisture content	910	
Vegetation, aerosols, Earth's radiation budget	865(P)		Cloud	1378	
Moisture content	910		Aerosols, Earth's radiation budget	1610	
Aerosols, Earth's radiation budget	1020 (POLDER-3)		Vegetation, aerosols, Earth's radiation budget	2250	

2%<sup>[79]</sup>。2021年9月发射的高分五号02卫星继续搭载了这台载荷,并搭配POSP载荷,来为气溶胶反演提供多角度偏振组合数据。

DPC 和 POLDER 参数设置相似度高,目前针对 POLDER 开发的算法,均能适用于 DPC。高鑫等<sup>[76]</sup>成功地将针对 POLDER 设计的群组残差最优化算法应用于 DPC 中,并实现了亚太地区的 AOD 反演,反演结果与 MODIS 得到的结果有很高的一致性。Fan 等<sup>[80]</sup>基于多角度偏振观测和神经网络模型对海洋上空的气溶胶参数进行了反演处理和结果验证,阐明了神经网络可用于海洋上空气溶胶的业务化反演。提汝芳等<sup>[81]</sup>针对 DPC 的在轨观测数据特征,利用多波段多角度的标量和偏振信息,基于查找表方法反演了中国区域的 AOD。王永前等<sup>[82]</sup>基于 DPC 的多角度偏振观测数据开展了全球陆地上空的 AOD<sub>i</sub>反演研究,通过结合地表 BPDF 模型和评价函数获得了最佳气溶胶模型和 AOD<sub>i</sub>反演结果,通过与 AERONET 对比,验证了所提方法的可行性。针对气溶胶的微物理参数,Li 等<sup>[83]</sup>和郑逢勋等<sup>[84]</sup>基于气溶胶物理参数的先验估计和协方差矩阵,通过最优化方法成功反演了气溶胶体积谱分布、单次散射反照率和复折射指数。谢一淞等<sup>[85]</sup>根据细粒子气溶胶偏振信息集中于散射角特定范围内(80°~120°)的原理,认为在该散射角范围内 DPC 反演的是

AOD<sub>i</sub>参数,基于粒子的偏振特性原理可实现雾霾的区分<sup>[86]</sup>。

### 4.3 云与气溶胶偏振成像仪

为了探测全球温室气体对气候的影响,2016年12月,中国发射了一颗碳卫星(TANSAT),该卫星上搭载了一台云与气溶胶偏振成像仪(CAPI),用于为温室气体探测排除气溶胶和云像素的干扰。这是国内首颗用于云与气溶胶探测的多光谱偏振遥感器,于2020年1月停止运行。CAPI为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制,借鉴了CAI和CAI-2的设计理念,CAPI与两代CAI的主要区别为:CAPI增加了偏振探测功能以增强气溶胶参数反演能力,偏振测量精度为2%;具备较高的250 m亚千米级空间分辨率;增加了1375 nm水汽吸收波段来提高云识别能力,并且配备了380 nm近紫外波段,可用于区分吸收与非吸收型气溶胶种类<sup>[87]</sup>。CAPI设备参数如表3所示。

CAPI没有相应的气溶胶运营产品,其数据被官方用于识别云像素干扰和判断气溶胶类型,以直接辅助提高CO<sub>2</sub>反演精度。有研究者研发了CAPI气溶胶反演算法。Chen等<sup>[88]</sup>基于最优化估计算法,发现:利用CPAI数据可反演出气溶胶部分光学参数(AOD、气溶胶细粒子比、气溶胶粗模态折射率虚部);相比于反射率,线性偏振度对气溶胶光学特性更加敏感<sup>[89]</sup>。

表 3 CAPI 光谱通道参数汇总

Table 3 Summary for spectral channel parameters of CAPI

Wavelength	Central wavelength / $\mu\text{m}$	Spatial resolution / m
Near ultraviolet	0.380 (band 1)	250
Visible	0.670 (P, band 2)	250
Near infrared	0.870 (band 3)	250
Short wave infrared	1.375 (band 4)	1000
	1.640 (P, band 5)	1000

Ding 等<sup>[90]</sup>针对 CAPI 提出了基于近紫外到短波红外光谱阈值检测 (NNDT) 的云识别算法和基于双植被指数地表反射率估算模型 (EMSDV) 的 AOD 反演算法, 实现了暗地表 (浓密植被) 与亮地表 (沙漠、稀疏植被和城市) 上空 AOD 的准确估算。这些算法研究证明了 CAPI 数据的应用价值, 在云与气溶胶探测、污染监测、气象与气候分析领域中具有重要意义。

#### 4.4 第二代全球成像仪

2002 年, 肩负全球气候变化观测任务的日本全球成像仪 (GLI) 被搭载于 ADEOS-2 卫星上, 具有从近紫外到热红外共 36 个通道, 负责云特性、水汽、海洋特性和溢油监测等多项任务, 并随卫星在轨工作 8 个月后结束旅程<sup>[91]</sup>。2017 年, 日本宇航局研制的第二代全球成像仪 (SGLI) 随全球变化观测任务-气候 (GCOM-C) 卫星发射升空<sup>[92]</sup>。与 GLI 相比, SGLI 的波段配置得到了缩减, 留下从近紫外到热红外的 19 个通道, 且增加了红光和近红外 2 个偏振通道, 进而空间分辨率得到了提高。GLI 和 SGLI 的仪器参数如表 4 所示, 其中 0.460 (10/70) 代表在 0.460  $\mu\text{m}$  中心波长处具有两个带宽分别为 10 nm 和 70 nm 的光谱通道, SGLI 在 0.6735  $\mu\text{m}$  和 0.8685  $\mu\text{m}$  波长处对应两个不同信噪比的通道。

在以前的工作中, Mukai 等<sup>[91]</sup>根据 GLI 探测数据对全球范围内吸收型气溶胶 [生物质燃烧气溶胶、矿物沙尘颗粒 (DUST) 等] 进行了分析, 提出了吸收气溶胶指数 (AAI, 定义为 412 nm 和 380 nm 波段处卫星观测辐射度之比) 和沙尘检测指数 (DDI, 定义为 2210 nm 与 380 nm 波段处卫星观测辐射度之比), 可用 AAI 和 DDI 来区分 BBA 和 DUST, 并对 AAI 和 DDI 值进行了评估以检测厚云, 最终得到了 DUST、BBA、其他类型气溶胶和云的分类标准。2019 年, Mukai 等<sup>[93]</sup>将基于 GLI 数据的算法应用于 SGLI 中, 发现气溶胶分类结果与实际的森林火灾实况吻合较好, 验证了算法的适用性。2021 年, Mukai 等<sup>[94]</sup>将气溶胶分类算法扩展到了严重生物质燃烧气溶胶事件 (SBBA) 中, 一旦确定了生物质燃烧事件, 就可以采用合适的辐射模拟方法对 SBBA 进行表征, 证明了 SGLI 偏振信息和非偏振辐射亮度测量之间的互补性在生物质燃烧气溶胶反演的辐射模拟中是有效的。

日本遥感技术中心和日本宇宙航空研究开发机构

联合开展了 SGLI 数据官方算法研究。2018 年, Yoshida<sup>[95]</sup>基于 Higurashi 和 Nakajima 于 1998 开发的方法, 以及 Fukuda 等于 2013 年开发的方法, 设计了一种针对各种星载光学遥感仪器的气溶胶光学特性的通用反演算法。该算法被应用于 SGLI 非偏振通道中, 实现了 AOD、气溶胶细粒子比、气溶胶粒子谱分布、复折射指数、Angstrom 指数和单次散射反照率等气溶胶参数的业务生产运行。2020 年, 在 Version2 算法中, Yoshida<sup>[96]</sup>利用气溶胶传输模型的预测对反演进行了先验估计。基于同化系统, 他利用卫星观测同化改进了大气模式的气溶胶预报结果。相比于独立算法, 各种星载光学遥感仪器的通用算法针对不同地面目标 (海洋/陆地) 在全球范围内提供了更一致的气溶胶反演结果。2021 年, 在 Version3 算法中, 除了非偏振观测外, Yoshida 和 Murakami<sup>[97]</sup>还使用了偏振观测, 由于偏振反射率中陆地表面反射的贡献相对于气溶胶而言只占很小一部分, 即陆地表面偏振反射的估算误差也较小, 故可以利用偏振信息较准确地估算陆地气溶胶。此外, 由于偏振反射率对小粒径气溶胶很敏感, 因此可以提高对人为污染物等小粒径气溶胶粒子的反演精度。

综上所述, 偏振数据增加了多光谱信息的维度, 使反演更多的气溶胶参数成为现实。偏振信息对地表不敏感而对大气敏感的优势, 提高了地气分离的简易程度。偏振遥感技术利用监测细模态气溶胶光学物理特性的优势获取全球大气气溶胶的时空分布信息, 能够服务于全球气候变化研究、大气环境监测和遥感数据高精度大气校正等领域。因此, 偏振观测反演气溶胶参数为大气探测的重要方式, 仍然是未来的发展趋势。

## 5 气溶胶卫星遥感载荷发射的未来计划

从历代星载气溶胶光学遥感仪器的设计和气溶胶反演应用中得出, 理想星载气溶胶光学遥感仪器的主要技术是多光谱、多角度、偏振测量仪 (MMPI)。在一些主要用于未来气溶胶观测任务研制的卫星载荷上, 已经看出其研制方案正在朝这一技术方向改进。例如, 未来即将随卫星发射升空的 3MI (Multi-View Multi-Channel Multi-Polarization Imaging mission)、MAIA (Multi-Angle Imager for Aerosols) 和 MAP (Multi-Angle Polarimeter) 等遥感仪器<sup>[98-100]</sup>, 其中 3MI 是在 POLDER 基础上扩展得到的, 是 POLDER 的继承版本。表 5 列出了三款未来气溶胶光学遥感仪器的具体参数。

从表 5 可以看到, 未来星载气溶胶光学遥感仪器均为多光谱、多角度和偏振一体的设计, 并追求更多的偏振波段和更高的偏振测量精度。配备更多的偏振波段可以增加信息维度, 进而能获取更丰富的气溶胶特性参数和更多更精准的地表信息与大气信息, 最终可帮助解除表观辐射量中各部分的信息耦合, 提高气溶胶参数的反演精度。偏振测量精度优于 0.5% 的偏振

表 4 GLI 和 SGLI 光谱通道参数

Table 4 Summary for spectral channel parameters of GLI and SGLI

Imager	Wavelength / $\mu\text{m}$	Spatial resolution / km	Width /km
GLI	0.380, 0.400, 0.412, 0.443	1.00	
	0.460(10/70)	1.00/0.25	
	0.490, 0.520	1.00	
	0.545(10/50)	1.00/0.25	
	0.565, 0.625	1.00	1600
	0.660(10/60)	1.00/0.25	
	0.678, 0.680, 0.710(10/10), 0.749, 0.765	1.00	
	0.825	0.25	
	0.865(10/20), 1.050, 1.135, 1.240, 1.380	1.00	
	1.640, 2.210	0.25	
SGLI	3.715, 6.700, 7.300, 7.500, 8.600, 10.800, 12.000	1.00	
	0.3800, 0.4120, 0.4430, 0.4900, 0.5300, 0.5650, 0.6735, 0.7630, 0.8685	0.25	
	0.6735(P), 0.8685(P), 1.0500, 1.3800	1.00	1150(VNIR and polarization channels), 1400(SWIR and thermal IR channels)
	1.6300	0.25	
	2.2100	1.00	
	10.8000, 12.0000	0.50	

表 5 3MI, MAIA 和 MAP 光谱通道参数

Table 5 Summary for spectral channel parameters of 3MI, MAIA and MAP

Parameter	3MI	MAIA	MAP
Wavelength / $\mu\text{m}$	0.410(P), 0.443(P), 0.490(P), 0.555(P), 0.670(P), 0.763, 0.765, 0.865(P), 0.910, 1.370(P), 1.650(P), 2.130(P)	0.367, 0.389, 0.415, 0.445(P), 0.551, 0.645(P), 0.749, 0.7625, 0.864, 0.943, 1.039(P), 1.607, 1.880, 2.216	0.410(P), 0.443(P), 0.490(P), 0.555(P), 0.670(P), 0.753(P), 0.865(P)
Spatial resolution	4 km	200 m	1 km
Width	2200 km	300 km $\times$ 150 km	
Observation angle / ( $^{\circ}$ )	14 (VNIR channels), 12 (SWIR channels)	10	$\pm 60$ (forward), 10 (backward)

测量数据比强度测量数据具有更高的灵敏度,可使得气溶胶模式不确定性造成的反演误差减小<sup>[7]</sup>。另外,未来仪器将保持大视场、亚千米级中等空间分辨率的设计,可保证光学遥感仪器对全球范围区域性的气溶胶的研究分析与监测。

## 6 结束语

从星载气溶胶光学遥感仪器发展研究现状,可以总结得出未来仪器的发展方向:

- 1) 更多的偏振通道有利于区分气溶胶的形态、粒径和成分<sup>[45]</sup>;
- 2) 偏振测量精度优于 0.5% 可以保证偏振信息在提高气溶胶参数反演精度方面发挥优势;

3) 未来有效载荷的设计,不仅要加入偏振信号,而且要考虑多光谱的重要性,尤其是近紫外通道在判断气溶胶类型方面的优势,以及近红外和短波红外通道对改善粗颗粒的反演信息的贡献;

4) 更多的观测角度可以增加气溶胶观测信息维度,有助于估算更精确的地表反射特性,推导更准确的气溶胶散射相函数,进而提高气溶胶参数的丰富度和反演精度;

5) 保证大视场才能提供高时间分辨率的数据覆盖,进而保证气溶胶反演的时效性;

6) 亚千米级中等空间分辨率星载光学遥感仪器有效满足全球范围大中小城市尺度气溶胶特征的精细监控;



7) 针对未来更高维度的多光谱多角度偏振测量数据,需要研究匹配的算法,以实现高效准确的气溶胶参数反演;

8) 在改善载荷性能、增强匹配反演算法的同时,还需要大力发展偏振载荷的校准技术,稳定、高精度的校准系数为二次产品的开发和三次产品的应用提供基础。

在设计仪器之前,需要确认需求,充分论证一系列的性能模拟,如模拟不同观测角度信号的条件、偏振信

息、散射角的范围和地面类型等。只有设计功能满足气溶胶反演的应用需求,才能获取精准的气溶胶信息。此外,将国际上主要星载气溶胶光学遥感仪器汇总于表 6 中。在气溶胶遥感观测研究的发展进程中,研究者逐渐确定了星载气溶胶光学遥感仪器的发展方向,在仪器设计指标上体现出了满足应用需求的优化。集多光谱、多角度、中等空间分辨率、大视场和高精度偏振测量于一体是未来星载气溶胶光学遥感仪器的发展趋势。

表 6 国际上主要星载气溶胶光学遥感仪器一览

Table 6 List of major international spaceborne aerosol optical remote sensors

Time	Satellite	Sensor	Country/ organization	Number of wavelengths (wavelength / $\mu\text{m}$ )	Number of viewing angles
1972—2011	Landsat-1-5	MSS	USA	4(0.55,0.65,0.75,0.95)	1
1974—1993	SMS-1/-2, GOES-1-3	VISSR	USA	2(0.55-0.75,10.50-12.06)	1
1979—1994	Nimbus-7	SAM-2	USA	0.98-1.02	1
1979—1981	AEM-B	SAGE	USA	4(0.385,0.450,0.600,1.000)	1
1979—2001	TIROS-N NOAA-6 NOAA-8 NOAA-10	AVHRR	USA	4(0.615,0.912,3.740,11.000)	1
1981—2007	NOAA-7 NOAA-9 NOAA-11-14	AVHRR-2	USA	5(0.615,0.912,3.740,10.800, 12.000)	1
1985—2005	ERBS	SAGE-2	USA	7(0.385,0.448,0.453,0.525,0.600, 0.940,1.020)	1
1993—1996	SPOT-3	POAM-2	France	9(0.350-1.064)	1
1995—2011	ERS-2	GOME	European Union	4(0.240-0.295,0.290-0.405, 0.400-0.605,0.590-0.790), 3 polarization channels (0.292-0.402,0.402-0.597, 0.597-0.790)	1
1995—2011	ERS-2	ATSR-2	European Union	7(0.550,0.659,0.865,1.610,3.700, 10.850,12.000)	2
1996—1997	ADEOS	ILAS-1	Japan	2(0.753-0.784,6.210-11.770)	1
1996—1997	ADEOS	POLDER	France	8(0.4435,0.4909,0.5638,0.6699, 0.7629,0.7627,0.8637,0.9071), 3 polarization channels (0.4909,0.7629,0.9071)	14-16
1997—2010	OrbView-2/SeaStar	SeaWiFS	USA	8(0.412,0.443,0.490,0.510, 0.555,0.670,0.765,0.865)	1
1998—	NOAA-15-19, Metop-A, Metop-B, Metop-C	AVHRR-3	USA	6(0.630,0.862,1.610,3.740, 10.800,12.000)	1
1998—2013	SPOT-4	POAM-3	France	9(0.350-1.024)	1
1999—	Terra	MISR	USA	4(0.4464,0.5575,0.6717,0.8664)	9

续表

Time	Satellite	Sensor	Country/ organization	Number of wavelengths (wavelength / $\mu\text{m}$ )	Number of viewing angles
2000—	Terra, Aqua	MODIS	USA	36(0.412–14.235)	1
2001—	Odin	OSIRIS	Sweden	0.274–0.810	1
2002—2003	ADEOS-2	POLDER-2	France	8(0.4435, 0.4909, 0.5638, 0.6699, 0.7629, 0.7627, 0.8637, 0.9071), 3 polarization channels (0.4909, 0.7629, 0.9071)	14–16
2002—	Meteor-3M, ISS	SAGE-3	USA	9(0.28–1.04)	1
2002—2003	ADEOS-2	ILAS-2	Japan	4(0.753–0.784, 3.000–5.700, 6.210–11.760, 12.780–12.850)	1
2002—2003	ADEOS-2	GLI	Japan	36(0.38–12.00)	1
2002—2012	ENVISAT	MERIS	European Union	15(0.4125–0.9000)	1
2002—2012	ENVISAT	AATSR	European Union	7(0.550, 0.659, 0.865, 1.610, 3.700, 10.850, 12.000)	2
2002—2012	ENVISAT	SCIAMACHY	European Union	8(0.214–0.334, 0.300–0.412, 0.383–0.628, 0.595–0.812, 0.773–1.063, 0.971–1.773, 1.934–2.044, 2.259–2.386), 7 polarization channels (0.310–2.380)	1
2004—2013	PARASOL	POLDER-3	France	9(0.4435, 0.4909, 0.5638, 0.6699, 0.7629, 0.7627, 0.8637, 0.9071, 1.0196), 3 polarization channels (0.4909, 0.7629, 0.9071)	14–16
2004—	Aura	HIRDLS	USA	21(6.12–17.76)	1
2004—	Aura	OMI	USA	3(0.270–0.134, 0.306–0.380, 0.350–0.500)	1
2006—	Metop-A-C	GOME-2	European Union	4(0.240–0.315, 0.311–0.403, 0.401–0.600, 0.590–0.790), 200 polarization Channels (0.312–0.790)	1
2009—	GOSAT	TANSO-CAI	Japan	4(0.38, 0.674, 0.87, 1.60)	1
2011—2011	Glory	APS	USA	9(0.412, 0.443, 0.555, 0.672, 0.865, 0.910, 1.378, 1.610, 2.250), all wavelengths contain polarization channels	250
2016—2022	TANSAT	CAPI	China	5(0.38, 0.67, 0.87, 1.35, 1.64), 2 polarization channels (0.67, 1.64)	1
2016—	Sentinel-3A, Sentinel-3B	SLSTR	European Union	9(0.555, 0.659, 0.865, 1.375, 1.610, 2.250, 3.740, 10.850, 12.000)	2
2018—	GCOM-C	SGLI	Japan	19(0.38–12.00), 2 polarization Channels (0.6735, 0.8685)	1

续表

Time	Satellite	Sensor	Country/ organization	Number of wavelengths (wavelength / $\mu\text{m}$ )	Number of viewing angles
2018—	GF-5, GF-5-02	DPC	China	8(0.443, 0.490, 0.565, 0.670, 0.765, 0.768, 0.865, 0.910), 3 polarization channels(0.490, 0.670, 0.865)	9
2019—	GOSAT-2	TANSO-CAI- 2	Japan	7(0.343, 0.380, 0.443, 0.550, 0.674, 0.869, 1.630)	2 (forward and backward)
2022—2033	DQ-1, DQ-2	DPC-2	China	8(0.443, 0.490, 0.565, 0.670, 0.765, 0.768, 0.865, 0.910), 3 polarization channels(0.490, 0.670, 0.865)	1
2022—2026	NEMO-AM	MADPI	India	3(0.480–0.500, 0.650–0.675, 0.860–0.880), all wavelengths contain polarization channels	7
2023—2027	ACE, PACE	Polarimeters	France	12(0.41–2.13), 9 polarization channels (0.410, 0.443, 0.490, 0.555, 0.670, 0.865, 1.370, 1.650, 2.130)	14
2024—2027	MAIA	MAIA	USA	14(0.367–2.216), 3 polarization channels(0.445, 0.645, 1.039)	10
2024—2045	Metop-SG-A1, Metop-SG-A2, Metop-SG-A3	3MI	European Union	12(0.41, 0.443, 0.490, 0.555, 0.670, 0.763, 0.765, 0.865, 0.910, 1.370, 1.650, 2.130), 9 polarization channels(0.410, 0.443, 0.490, 0.555, 0.670, 0.865, 1.370, 1.650, 2.130)	14 (VNIR channels), 12 (SWIR channels)
2026—2031	CO2M	MAP	European Union	7(0.41, 0.443, 0.490, 0.555, 0.67, 0.753, 0.865), all wavelengths contain polarization channels	4

## 参 考 文 献

- [1] Kokhanovsky A A, de Leeuw G. Satellite aerosol remote sensing over land[M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [2] Lenoble J, Remer L, Tanré D. Aerosol remote sensing [M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [3] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 1998.
- [4] McCormick M P, Thomason L W, Trepte C R. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption[J]. Nature, 1995, 373(6513): 399-404.
- [5] Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over land surfaces: capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3332-3344.
- [6] Li Z Q, Xie Y S, Zhang Y, et al. Advance in the remote sensing of atmospheric aerosol composition[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(3): 359-373.
- [7] 吴良海. 基于多光谱多角度偏振测量的大气气溶胶反演研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- Wu L H. Aerosol retrieval from multiangle multispectral photopolarimetric measurements[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [8] 莫祖斯, 卜令兵, 王勤, 等. 基于GRNN神经网络模型结合气溶胶消光系数和气象要素评估颗粒物质量浓度[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1710001.
- Mo Z S, Bu L B, Wang Q, et al. Estimation of particulate matter mass concentration based on generalized regression neural network model combining aerosol extinction coefficient and meteorological elements [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1710001.
- [9] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, et al. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: a perspective[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative

- Transfer, 2007, 106(1/2/3): 325-347.
- [10] Higurashi A, Nakajima T. Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA AVHRR[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(7): 924-941.
- [11] Griggs M. Satellite measurements of tropospheric aerosols[J]. *Advances in Space Research*, 1982, 2(5): 109-118.
- [12] Ignatov A, Stowe L. Aerosol retrievals from individual AVHRR channels. Part I: retrieval algorithm and transition from Dave to 6S radiative transfer model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 313-334.
- [13] Ignatov A, Stowe L. Aerosol retrievals from individual AVHRR channels. Part II: quality control, probability distribution functions, information content, and consistency checks of retrievals[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 335-362.
- [14] Nagaraja Rao C R, Stowe L L, McClain E P. Remote sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data theory, practice and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(4/5): 743-749.
- [15] Stowe L L, Ignatov A M, Singh R R. Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the national environmental satellite, data, and information service of the national oceanic and atmospheric administration[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16923-16934.
- [16] Ignatov A, Sapper J, Cox S, et al. Operational aerosol observations (AEROS) from AVHRR/3 on board NOAA-KLM satellites[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(1): 3-26.
- [17] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, et al. Aerosol retrievals over the ocean by use of channels 1 and 2 AVHRR data: sensitivity analysis and preliminary results[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(36): 7325-7341.
- [18] Hauser A, Oesch D, Foppa N. Aerosol optical depth over land: comparing AERONET, AVHRR and MODIS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): L17816.
- [19] Hauser A, Oesch D, Foppa N, et al. NOAA AVHRR derived aerosol optical depth over land[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D8): D08204.
- [20] Riffler M, Popp C, Hauser A, et al. Validation of a modified AVHRR aerosol optical depth retrieval algorithm over Central Europe[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(5): 1255-1270.
- [21] 李英杰. 基于时间序列技术的陆地上空大气气溶胶卫星遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.  
Li Y J. Satellite remote sensing inversion of atmospheric aerosol over land based on time series technology[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [22] 何兴伟. 基于 AVHRR 数据的陆地气溶胶参数反演[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2016.  
He X W. Inversion of land aerosol parameters based on AVHRR data[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [23] Smith G S. The polarization of skylight: an example from nature[J]. *American Journal of Physics*, 2007, 75(1): 25-35.
- [24] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  channel: correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [25] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [26] Kaufman Y, Tanré D, Remer L, et al. Remote sensing of tropospheric aerosol from EOS-MODIS over the land using dark targets and dynamic aerosol models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [27] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D13): D13211.
- [28] Levy R C, Remer L A, Tanré D, et al. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS: collections 005 and 051 [EB/OL]. [2021-02-05]. [https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/ModAtmo/ATBD\\_MOD04\\_C005\\_rev2\\_0.pdf](https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/ModAtmo/ATBD_MOD04_C005_rev2_0.pdf).
- [29] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [30] Remer L A, Tanré D, Kaufman Y J, et al. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: collection 005[EB/OL]. [2021-02-05]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.385.6530&rep=rep1&type=pdf>.
- [31] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [32] Zhong G S, Wang X F, Guo M, et al. A dark target algorithm for the GOSAT TANSO-CAI sensor in aerosol optical depth retrieval over land[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 524.
- [33] 王峰, 汪小钦, 丁宇. 利用 Sentinel-3A OLCI 可见光通道反演台湾岛气溶胶光学厚度[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(10): 2038-2050.  
Wang F, Wang X Q, Ding Y. Retrieval of aerosol optical depth over Taiwan island using visible channels of Sentinel-3A OLCI[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(10): 2038-2050.

- [34] 毛前军, 金穗穗. 2009 年至 2018 年全球气溶胶光学厚度时空分布特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0301001.  
Mao Q J, Jin S S. Investigation of spatial and temporal distribution characteristics of global aerosol optical depth from 2009 to 2018[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0301001.
- [35] Change I C. Evaluation of climate models. In: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[EB/OL]. [2022-02-04]. <https://elib.dlr.de/95697/>.
- [36] GOSAT-2/IBUKI-2 data users handbook[EB/OL]. (2020-10)[2022-05-01]. [https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/documents/pdf/GOSAT-2\\_Data\\_Users\\_Handbook\\_1st\\_Edition\\_en.pdf](https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/documents/pdf/GOSAT-2_Data_Users_Handbook_1st_Edition_en.pdf).
- [37] Lee S, Kim J, Kim M, et al. Aerosol retrieval over East Asia from GOSAT-CAI measurements[EB/OL]. [2021-02-04]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-9661-2.pdf>.
- [38] Lee S, Kim M, Choi M, et al. Aerosol property retrieval algorithm over Northeast Asia from TANSO-CAI measurements onboard GOSAT[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 687.
- [39] Sano I, Tanabe M, Kamei T, et al. Carbonaceous aerosols over Siberia and Indonesia with GOSAT/CAI [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7859: 785906.
- [40] Zhong G S, Wang X F, Tani H, et al. A modified aerosol free vegetation index algorithm for aerosol optical depth retrieval using GOSAT TANSO-CAI data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(12): 998.
- [41] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6786: 67865L.
- [42] Tsekeri A, Gross B, Moshary F, et al. The development and assessment of a flexible inversion algorithm for aerosol property retrieval combining passive multiangle multispectral intensity and polarization measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7461: 74610W.
- [43] Middleton E M, Deering D W, Ahmad S P. Surface anisotropy and hemispheric reflectance for a semiarid ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 23(2): 193-212.
- [44] Deering D W, Eck T F, Otterman J. Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 52(1/2): 71-93.
- [45] Si Y D, Lu Q F, Zhang X Y, et al. A review of advances in the retrieval of aerosol properties by remote sensing multi-angle technology[J]. Atmospheric Environment, 2021, 244: 117928.
- [46] Llewellyn-Jones D, Remedios J. The Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) and its predecessors ATSR-1 and ATSR-2: an introduction to the special issue[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116: 1-3.
- [47] Sogacheva L, de Leeuw G, Kolmonen P, et al. Aerosol and cloud properties using (A)ATSR: retrieval algorithm and application for aerosol-cloud interaction[C]//40th COSPAR Scientific Assembly, August 2-10, 2014, Moscow, Russia. [S.l.: s.n.], 2014.
- [48] Kokhanovsky A A, Curier R L, De Leeuw G, et al. The inter-comparison of AATSR dual-view aerosol optical thickness retrievals with results from various algorithms and instruments[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(17): 4525-4537.
- [49] Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, et al. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 37-57.
- [50] Veefkind J P, de Leeuw G. A new algorithm to determine the spectral aerosol optical depth from satellite radiometer measurements[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(10): 1237-1248.
- [51] 吴孔逸, 侯伟真, 史正, 等. 基于卫星多角度观测的气溶胶遥感反演算法研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(4): 283-298.  
Wu K Y, Hou W Z, Shi Z, et al. Research progress of aerosol remote sensing retrieval algorithm based on satellite multi-angle observation[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, 16(4): 283-298.
- [52] Kolmonen P, Sogacheva L, Virtanen T H, et al. The ADV/ASV AATSR aerosol retrieval algorithm: current status and presentation of a full-mission AOD dataset[J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(6): 545-561.
- [53] Grey W M F, North P R J, Los S O. Computationally efficient method for retrieving aerosol optical depth from ATSR-2 and AATSR data[J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2786-2795.
- [54] Thomas G E, Carboni E, Sayer A M, et al. Oxford-RAL Aerosol and Cloud (ORAC): aerosol retrievals from satellite radiometers[M]//Kokhanivsky A A, Leeuw G. Satellite aerosol remote sensing over land. Springer praxis books. Heidelberg: Springer, 2009: 193-225.
- [55] Jovanovic V M. Global earth mapping with NASA's multiangle imaging spectroradiometer (MISR) [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4885: 22-33.
- [56] 冯晓明. 多角度 MISR 数据用于区域生态环境定量遥感研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.  
Feng X M. Quantitative remote sensing studies on eco-environment in Inner Mongolia with multi-angle MISR data[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [57] Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, et al. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 155-171.
- [58] Martonchik J V, Diner D J, Crean K A, et al. Regional aerosol retrieval results from MISR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(7): 1520-1531.

- [59] Kahn R A, Gaitley B J, Garay M J, et al. Multiangle Imaging Spectroradiometer global aerosol product assessment by comparison with the Aerosol Robotic Network[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D23): D23209.
- [60] 高迦南, 李丽萍, 崔廷伟, 等. 基于卫星偏振遥感的细粒子气溶胶光学厚度反演[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030101.  
Gao J N, Li L P, Cui T W, et al. Retrieval of fine mode aerosol optical depth based on satellite polarization remote sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030101.
- [61] 崔岩, 张西光, 周鑫昌, 等. 气溶胶对天空光偏振分布的影响[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601001.  
Cui Y, Zhang X G, Zhou X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of sky light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601001.
- [62] Li Z Q, Goloub P, Dubovik O, et al. Improvements for ground-based remote sensing of atmospheric aerosol properties by additional polarimetric measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(17): 1954-1961.
- [63] Wang J, Xu X G, Ding S G, et al. A numerical testbed for remote sensing of aerosols, and its demonstration for evaluating retrieval synergy from a geostationary satellite constellation of GEO-CAPE and GOES-R[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 146: 510-528.
- [64] Mishchenko M I, Cairns B, Kopp G, et al. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(5): 677-692.
- [65] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [66] 赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 862-865.  
Zhao Y M, Jiang Y S, Lu X M. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by the aerosol[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865.
- [67] Duan M Z, Min Q L, Lü D. A polarized radiative transfer model based on successive order of scattering[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(4): 891-900.
- [68] Zhang Y, Liu Z H, Zhang J, et al. Retrieval of the fine-mode aerosol optical depth over East China using a grouped residual error sorting (GRES) method from multi-angle and polarized satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1838.
- [69] Wang H, Sun X B, Yang L K, et al. Aerosol retrieval algorithm based on adaptive land-atmospheric decoupling for polarized remote sensing over land surfaces[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 219: 74-84.
- [70] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [71] Dubovik O, Herman M, Holdak A, et al. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(5): 975-1018.
- [72] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, et al. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere [EB/OL]. (2014-09-19)[2021-02-05]. <https://www.spie.org/news/5558-grasp-a-versatile-algorithm-for-characterizing-the-atmosphere?SSO=1>.
- [73] Zheng F X, Li Z Q, Hou W Z, et al. Aerosol retrieval study from multiangle polarimetric satellite data based on optimal estimation method[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, 14(1): 014516.
- [74] Chen C, Dubovik O, Lapyonok T. Retrieval desert dust and carbonaceous aerosol emissions over Africa from PARASOL/GRASP observations[C]//AGU Fall Meeting Abstracts 2016, December 12-16, 2016, San Francisco, USA. [S.l.: s.n.], 2016: A42D-06.
- [75] Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, et al. An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: application and validation for POLDER-3[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111894.
- [76] 高鑫, 胡秀清, 方伟, 等. 利用 POLDER 多角度偏振数据反演陆上气溶胶光学厚度的群组残差最优方法[J]. *遥感学报*, 2022, 26(3): 505-515.  
Gao X, Hu X Q, Fang W, et al. Application of the optimal grouped residual method in retrieving the optical depth of aerosol over land with POLDER multi-angular polarized data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 505-515.
- [77] Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over the ocean from multispectral single-viewing-angle measurements of intensity and polarization: retrieval approach, information content, and sensitivity study[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D20): D20207.
- [78] Frouin R, Deschamps P Y, Rothschild R, et al. MAUVE/SWIPE: an imaging instrument concept with multi-angular, -spectral, and-polarized capability for remote sensing of aerosols, ocean color, clouds, and vegetation from space[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6406: 64060E.
- [79] 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.  
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.
- [80] Fan C, Fu G L, di Noia A, et al. Use of a neural network-based ocean body radiative transfer model for aerosol retrievals from multi-angle polarimetric

- measurements[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2877.
- [81] 提汝芳, 黄红莲, 刘晓, 等. 基于 DPC 的中国部分区域陆地气溶胶光学厚度反演[J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 239-246.
- Ti R F, Huang H L, Liu X, et al. Retrieval of aerosol optical depth over parts of China land based on directional polarimetric camera[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 239-246.
- [82] 王永前, 何孟琦, 张洋, 等. 基于高分五号 DPC 数据的细模态气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2): 451-459.
- Wang Y Q, He M Q, Zhang Y, et al. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on multi-angle polarization data of GF-5 satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(2): 451-459.
- [83] 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.
- [84] 郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优估计反演: 角度依赖与后验误差分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(4): 040701.
- Zheng F X, Hou W Z, Li Z Q. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(4): 040701.
- [85] 谢一淞, 李正强, 侯伟真, 等. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演[J]. *上海航天*, 2019, 36(S2): 219-226.
- Xie Y S, Li Z Q, Hou W Z, et al. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera onboard GF-5 satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 219-226.
- [86] 吴时超, 麻金继, 章群英, 等. 基于粒子偏振特性的雾霾区分算法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(3): 221-227.
- Wu S C, Ma J J, Zhang Q Y, et al. Research on haze and fog distinguishing algorithm based on particle polarization characteristics[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(3): 221-227.
- [87] Wang X, Guo Z, Huang Y P, et al. A cloud detection scheme for the Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite (TANSAT) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(1): 16-25.
- [88] Chen X, Wang J, Liu Y, et al. Angular dependence of aerosol information content in CAPI/TanSat observation over land: effect of polarization and synergy with A-train satellites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 163-177.
- [89] Chen X, Yang D X, Cai Z N, et al. Aerosol retrieval sensitivity and error analysis for the cloud and aerosol polarimetric imager on board TanSat: the effect of multi-angle measurement[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 183.
- [90] Ding N, Shao J B, Yan C X, et al. Near-ultraviolet to near-infrared band thresholds cloud detection algorithm for TANSAT-CAPI[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1906.
- [91] Mukai S, Sano I, Nakata M. Algorithms for the classification and characterization of aerosols: utility verification of near-UV satellite observations[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(1): 014527.
- [92] JAXA. GCOM-C "SHIKISAI" data users handbook[M]. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2018.
- [93] Mukai S, Sano I, Nakata M. Efficient algorithms for aerosol retrieval from GCOM-C/SGLI[C]//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 28-August 2, 2019, Yokohama, Japan. New York: IEEE Press, 2019: 7614-7617.
- [94] Mukai S, Sano I, Nakata M. Improved algorithms for remote sensing-based aerosol retrieval during extreme biomass burning events[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(3): 403.
- [95] Yoshida M. Algorithm theoretical basis document of aerosol by non-polarization for GCOM-C/SGLI version 1 [M]. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2018.
- [96] Yoshida M. Algorithm theoretical basis document of aerosol properties for GCOM-C/SGLI version 2[M]. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2020.
- [97] Yoshida M, Murakami H. Algorithm theoretical basis document of aerosol properties for GCOM-C/SGLI[M]. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency, 2021.
- [98] 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.
- [99] OSCAR. Instrument: MAIA[EB/OL]. (2022-07-18) [2022-08-04]. <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/maia>.
- [100] OSCAR. Instrument: MAP[EB/OL]. (2022-01-04) [2022-08-04]. <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/map>.

## 约稿专家简介:



颜昌翔(1973—),博士,研究员/博士生导师。1995年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于浙江大学获得硕士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。现任中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部副主任。作为技术骨干参与了“神舟五号”、“神舟六号”有效载荷研制,两载荷分别获得军队科学技术进步奖一等奖(2004年)、国家科学技术进步奖二等奖(2005年)和国家科学技术进步奖二等奖(2008年)。曾获中华人民共和国人力资源和社会保障部、中华人民共和国工业和信息化部、国家国防科技工业局、中国人民解放军总装备部四部委联合颁发的“中国载人航天工程突出贡献者”(2011年),以及国务院政府特殊津贴获得者(2012年)等荣誉称号,并于2020年被评选为吉林省B类人才。主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术、多光谱与超光谱空间遥感成像技术和偏振探测技术等方面的研究。共发表学术论文80余篇,已经培养毕业研究生30余人。E-mail: [yancx@ciomp.ac.cn](mailto:yancx@ciomp.ac.cn)。