

# 云偏振遥感综述

王宇瑶<sup>1,4</sup>, 麻金继<sup>1,4</sup>, 李婧晗<sup>1,4</sup>, 洪津<sup>2</sup>, 李正强<sup>3</sup>

1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 芜湖 241003;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031;

3. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

4. 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 芜湖 241003

**摘要:** 云是指停留在大气层中的水滴或冰晶胶体的集合体, 也是地球上庞大水循环产生的有形结果, 在全球气候中扮演着重要的角色。偏振遥感对光的辐射强度、方向、相位以及偏振状态等波谱特性进行描述, 丰富了观测信息量, 提升了观测信息的维度。为了更好地了解偏振遥感的优势, 本文对国际上发射的POLDER、APS、DPC等标志性的偏振传感器的特征和云反演算法进展进行了总结, 涉及到相关偏振载荷参数信息、云参量算法的介绍和产品等相关内容, 并就经典偏振云参量算法做了详细的总结和评价。随着国际上后续偏振传感器快速增加, 对未来偏振传感器的发展方向和相关算法进行了展望。

**关键词:** 大气遥感, 偏振, POLDER, APS, DPC, 云, 矢量辐射传输, 反演方法

**引用格式:** 王宇瑶, 麻金继, 李婧晗, 洪津, 李正强. 2022. 云偏振遥感综述. 遥感学报, 26(5): 852-872

Wang Y Y, Ma J J, Li J H, Hong J and Li Z Q. 2022. Review of cloud polarimetric remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 852-872 [DOI: 10.11834/jrs.20221404]

## 1 引言

云由大气中的水蒸气经遇冷液化或凝华而形成的水滴和冰晶凝结组成, 覆盖了全球67.5%的地球表面, 随着时间和空间位置的变化以及下垫面的不同情况呈现出不同的分布及特征 (Ilčev, 2019)。IPCC第六次评估报告指出, 近年来在云的研究方面虽然取得了一些进展, 但云仍然是气候变化最主要的不确定因子之一, 其复杂性与多样性影响着全球气候模拟结果的准确性。(IPCC, 2007, 2021; Rossow和Schiffer, 1999)。同时, 云作为太阳入射辐射和地球表面出射辐射的必经屏障, 在大气能量交换、地球辐射收支、降水循环系统与地—气系统中也起着不可忽视的调节作用 (Carney和Vincent, 1986; 任建奇等, 2010; Stephens等, 1990; Trenberth等, 2009); 并且对地表与卫星传感器之间的信号传播具有严重的阻碍作用, 会影响遥感信息的获取质量 (Matsui等,

2004)。云遥感平台有地基平台、机载平台和星载平台, 其中卫星观测平台因为可以进行全球尺度的云遥感研究而显得尤为重要 (严卫等, 2008)。由于辐射强度信号对于厚云, 尤其是对流云的内部物理特征无法进行精确地探测, 所以仅利用辐射强度信息无法实现高质量的云观测 (杨之文等, 2005); 而被称为大气粒子特性的“敏感指示器”的偏振光谱信息能够探测出云粒子的尺度、形状等微物理参量, 在云遥感领域展现出独特的应用优势 (郝增周等, 2006)。相对于传统光谱辐射云遥感而言, 利用多角度偏振观测能更好地从观测数据中剥离出下垫面信息, 从而获取更多更准确的大气散射信息 (吴浩, 2016)。自从法国发射了POLDER系列传感器以来, 通过其在气溶胶和云产品方面的应用 (Bouriez等, 1997; Goloub等, 2000; Tanré等, 2011; 汪杰君等, 2021), 国际上很多科学家意识到偏振传感器在探测气溶胶和云参量方面具有较好的优势 (Nadal和Breon, 1999;

收稿日期: 2021-06-11; 预印本: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41671352)

第一作者简介: 王宇瑶, 研究方向为大气偏振遥感、云偏振特性。E-mail: wangyuyao@ahnu.edu.cn

通信作者简介: 麻金继, 研究方向为环境参量遥感。E-mail: jinjima@ahnu.edu.cn

Peralta 等, 2007; Li 等, 2018)。虽然目前国际上偏振传感器的发展很快, 气溶胶偏振算法较多, 但云偏振遥感的算法相对较少, 本文梳理了近30年来偏振传感器的发展和云遥感算法的演变, 并详细介绍了典型偏振传感器及其经典云算法的贡献; 同时还对未来偏振传感器的发展方向及其对应的算法进行了展望。

## 2 云遥感偏振传感器

鉴于偏振传感器的蓬勃发展, 基于已发射偏振仪器和待发射偏振仪器两个方面, 从星载、机载和地基3个平台进行载荷的详细介绍。表1按首字母顺序汇总了所有载荷名称的简写、全称及中文名称, 表2列举了已投入使用的偏振载荷。

表1 载荷名称汇总表

Table 1 The summary table of the instrument name

仪器简称	仪器全称	中文名称
3MI	Multi-Viewing -Channel -Polarisation Imager	多角度—多通道—多偏振成像仪
AirMSPI	Airborne Multiangle Spectro Polarimetric Imager	机载多角度偏振光谱成像仪
APS	Aerosol Polarimetry Sensor	气溶胶偏振传感器
CAPI	Cloud and Aerosol Polarimetric Imager	多谱段云与气溶胶探测仪
CE318	CE318 Sunphotometer	全自动太阳光度计
DPC	Directional Polarimetric Camera	大气气溶胶多角度偏振探测仪
FSIPCD	Full-Sky Imaging Polarimetric Cloud Detector	全天空成像偏振云探测器
HARP	Hyper-Angular Rainbow Polarimeter	超角度彩虹偏振仪
MAIA	Multi-Angle Imager for Aerosols	多角度气溶胶成像仪
MAPI/MAI	Multi-Angle Polarization Imager	多角度偏振成像仪
MSIP	MultiSpectral Imaging Polarimeter	多光谱广角偏振成像仪
POLDER	POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances	多角度偏振成像观测仪
POSP	Particulate observing scanning polarimeter	高精度偏振扫描仪
RSP	Research Scanning Polarimeter	扫描偏振计
ScanPol	Scanning along track Polarimeter	多通道扫描旋光仪
SGLI	Second generation Global Imager	第二代全球成像仪
SPEX	Spectrometer for Planetary Exploration	紧凑型五角分光偏振计

### 2.1 已发射偏振仪器

#### 2.1.1 星载偏振仪器

(1) POLDER。法国空间局 (CNES) 为了验证偏振探测气溶胶和云的优势, 发射了POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 系列传感器。POLDER-1 的发射有效验证了偏振在探测小粒子和水云方面的优势, 但其空间分辨率有限; POLDER-2 更好地验证了偏振在高空间分辨率上探测气溶胶和云的优势, 但由于卫星的故障而停止运行; POLDER-3 更进一步优化了POLDER-1、2传感器的通道设置, 于2004-12-18搭载于PARASOL卫星升空, 并加入“A-Train”计划, 在轨运行近10年结束观测任务, 其波段信息如表3所示, 结构示意图如图1所示

(Andre 和李玲, 1997; Herman 等, 1997; 徐飞飞, 2018)。

POLDER 系列传感器通过获取对应通道顶部大气光谱辐射值从而获得辐亮度和偏振辐射值, 与传统的光谱传感器相比增加了维度信息, 从而更适合探测云和气溶胶的微物理特性。在气溶胶反演、地球辐射收支等研究方面作出了贡献 (Bréon 和 Colzy, 1999; Fougnie 和 Bach, 2009; Lacagnina 等, 2017; Nadal 和 Bréon, 1999; Tanré 等, 2011); 同时可以进行云识别和更高精度的云参量反演, 即云相态、云高、云滴谱、云光学厚度等 (Buriez 等, 1997; 陈震霆 等, 2018; Goloub 等, 1994; Herman 等, 2005; 李佳欣 等, 2020; Riedi 等, 2001, 2010; 汪杰君 等, 2021; Yasumoto 等, 2002)。

表2 已投入使用的偏振载荷参数

Table 2 Polarization load parameters that have been put into use

平台类型	仪器名	时间	国家	组织	搭载平台	参数配置
星载平台	POLDER-1	1996-08-17— 1997-06	法国	CNES	ADEOS I	中心波长:443 nm(偏振)、490 nm、565 nm、670 nm(偏振)、763 nm、765 nm、865 nm(偏振)和910 nm 空间分辨率:星下点6 km×7 km 角度:14个
	POLDER-2	2002-12-14— 2003-10	法国	CNES	ADEOS II	中心波长:443 nm(偏振)、490 nm、565 nm、670 nm(偏振)、763 nm、765 nm、865 nm(偏振)和910 nm 空间分辨率:星下点6 km×7 km 角度:14个
	POLDER-3	2004-12-18— 2013-12	法国	CNES	PARASOL	中心波长:443 nm、490 nm(偏振)、565 nm、670 nm(偏振)、763 nm、765 nm、865 nm(偏振)、910 nm和1020 nm 空间分辨率:星下点5.3 km×6.2 km 角度:16个
	APS	2011-03-04 (失败)	美国	NASA	Glory Mission	中心波长:410 nm、443 nm、555 nm、670 nm、865 nm、910 nm、1370 nm、1610 nm和2200 nm(全部偏振) 空间分辨率:星下点半径5.6 km 角度:250个
	MAPI/MAI	2016-09-15起	中国	—	TG-2	中心波长:565 nm(偏振)、670 nm(偏振)、763 nm、765 nm、865 nm(偏振)和910 nm 空间分辨率:星下点3 km×3 km 角度:12个
	CAPI	2016-12-22— 2020-01-15	中国	—	TanSat	中心波长:380 nm、670 nm(偏振)、870 nm、1375 nm和1640 nm(偏振) 空间分辨率:星下点1 km×1 km 角度:1个
	SGLI	2017-12-23起	日本	—	GCOM-C	传感器VNIR-POL中心波长:674 nm(偏振)和869 nm(偏振) 角度:1个
	DPC	2018-05-09— 2020-04-28	中国	CNSA 和CAS	GF-5	中心波长:443 nm、490 nm(偏振)、565 nm、670 nm(偏振)、763 nm、765 nm、865 nm(偏振)和910 nm 空间分辨率:星下点3.3 km×3.3 km 角度:9—12个
	HARP	2019-11-02起	美国	UMBC	CubeSat	中心波长:440 nm、550 nm、670 nm、870 nm(全部偏振) 空间分辨率:星下点5 km×5 km 角度:440 nm、550 nm、870 nm=20个,670 nm=60个
	DPC-II	2021-09-07起	中国	—	GF-5(02)	中心波长:443 nm、490 nm(偏振)、556 nm、670 nm(偏振)、763 nm、756 nm、865 nm(偏振)、910 nm 空间分辨率:星下点3.3 km×3.3 km 角度:17个
POSP	2021-09-07起	中国	—	GF-5(02)	中心波长:380 nm、410 nm、443 nm、490 nm、670 nm、865 nm、1380 nm、1610 nm、2250 nm(全部偏振) 角度:1个	
机载平台	RSP	1999	美国	NASA	ER-2	中心波长:410 nm、470 nm、555 nm、670 nm、865 nm、960 nm、1590 nm、1880 nm和2250 nm(全部偏振)
	AirHARP	2017	荷兰	UMBC	ER-2	中心波长:440 nm、550 nm、670 nm和870 nm(全部偏振) 角度:440、550和870 nm=20个,670 nm=60个
	SPEX airborne	2017	美国	NASA	ER-2	光谱范围:400—800 nm 角度:9个
地基平台	CE318	1992起	法国	Cimel	—	中心波长:440 nm、675 nm、870 nm、870 nm(P1)、870 nm(P2)、870 nm(P3)、936 nm和1020 nm(偏振来自870 nm(P1)、870 nm(P2)、870 nm(P3)的组合)
	CE318-DP	2010起	法国	Cimel	—	中心波长:340 nm、380 nm、440 nm、500 nm、675 nm、865 nm、936 nm、1020 nm和1640 nm(除936 nm外全部偏振)
	FSIPCD	—	匈牙利	—	—	中心波长:650 nm、550 nm、450 nm(全部偏振)

表3 POLDER-3通道信息表

Table 3 POLDER-3 channel information table

中心波长/nm	类型	特征	应用目标
443	非偏	—	海洋
490	偏振	该通道偏振反射率主要来自大气分子散射。散射角为80-120°时大气气溶胶、卷云和水云均呈现很大的偏振反射率,而地表反射率(如植被和土壤)比较小。	海洋/ 气溶胶/ 云
565	非偏	—	海洋
670	偏振	该通道云比晴空的偏振反射率值更大。对于内陆湖泊河流,需要剔除在镜面反射方向小于2°的太阳耀光区域。	陆地/ 气溶胶/ 云
763	非偏	—	云顶压强
765	非偏	—	
865	偏振	红外865 nm波段偏振图像主要用于海洋上空反射率的检测,它在140°散射角附近区分“积云”和“晴空”的能力更强。	陆地/ 气溶胶/ 云
910	非偏	—	水汽
1020	非偏	—	

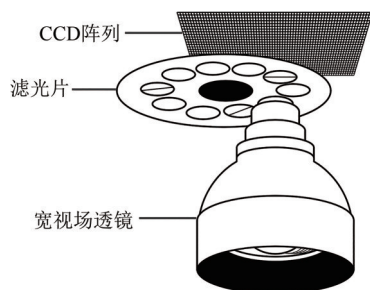


图1 POLDER结构示意图(Audre 和李玲, 1997)

Fig. 1 The schematic diagram of POLDER (Audre and Li, 1997)

(2) APS。法国POLDER系列传感器的发射及其气溶胶和云等系列产品的成功应用,让美国航天局(NASA)意识到了偏振探测在大气环境遥感领域的优势,同时也认识到低空间分辨率和低偏振精度对气溶胶反演的不确定性问题,从而NASA设计了非成像高偏振度的气溶胶偏振传感器APS (Aerosol Polarimetry Sensor)。APS是一种摆扫式偏振仪,采用了空间、时间、光谱上同步的成像测量模式,具有很高的偏振精度(偏振度DoLP优于0.2%),可与A-Train系列的其他仪器协同测量(Schmunk, 2018);同时APS是沿轨道扫描的非成像仪器,这在一定程度上会影响数据使用范围,其波段设置如表4所示,APS载荷如图2所示(Peralta等, 2007)。

表4 APS通道信息表

Table 4 APS channel information table

中心波长/nm	类型	辐射测量精度/%	偏振精度/%	应用目标
410	偏振	5	0.2—0.5	
443	偏振	5	0.2—0.5	
555	偏振	5	0.2—0.5	气溶胶
670	偏振	5	0.2—0.5	
865	偏振	5	0.2—0.5	
910	偏振	5	0.2—0.5	水汽和 卷云
1370	偏振	8	0.2—0.5	
1610	偏振	5	0.2—0.5	
2200	偏振	5	0.2—0.5	气溶胶

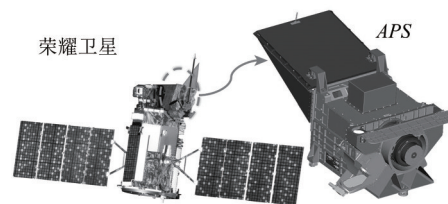


图2 荣耀卫星和APS载荷示意图(根据(Peralta等,2007)修改)

Fig. 2 Illustration of the Glory satellite and APS

(Peralta et al., 2007)

APS可以对全球云和气溶胶的分布、微物理特性、化学成分进行高精度和全范围的连续观测,以便分析气溶胶和云对全球气候变化的影响(Mishchenko等, 2007)。在云参量反演过程中,由于APS具备高偏振精度的特点,获取的数据可用于反演云滴粒子半径、云滴数浓度、冰水路径、光学厚度等(Alexandrov等, 2015, 2018; Segal-Rozenhaimer等, 2018; Sinclair等, 2019)。

虽然APS于2011-03-04发射失败,但由于它的航空样机RSP在探测气溶胶和云参量等方面表现出良好的效果,使得APS的设计理念具有重要的参考价值(Alexandrov等, 2015, 2018; Segal-Rozenhaimer等, 2018; Sinclair等, 2019)。国际多个偏振计的概念设计都继承了APS的设计理念,如中国高分五号02星搭载的POSP;乌克兰气溶胶计划即将发射的ScanPol (2.2.4 Aerosol-UA: ScanPol、MSIP)。

(3) DPC。鉴于POLDER系列的空间分辨率较低,RSP反演气溶胶和云参量的良好性能,中国综合两个仪器各自设计理念的优点,研制了大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC),于2018-05-09搭载于高分五号卫星上成功发射,目前已有相关



文献对高分五号载荷进行了总结(陈良富等, 2021)。DPC作为一台集多角度、多光谱和偏振探测能力于一体的星载传感器,对同一个像元,一般可获得9个角度、3个偏振波段(每个偏振测量波段采用3个检偏方向获取偏振图像)、5个非偏振波段的观测信息,共计126个有效观测值(陈斐楠等, 2019; 康晴等, 2018; Li等, 2018; 骆冬根等, 2019),其波段设置见表5, DPC及GF-5示意图如图3所示(Li等, 2018)。

表5 DPC通道信息表

Table 5 DPC channel information table

中心波长/nm	类型	应用目标
443	非偏	气溶胶光学厚度
490	偏振	气溶胶、地表反照率、云反射率等参数
565	非偏	地表反照率
670	偏振	气溶胶光学厚度
763	非偏	云与气溶胶高度
765	非偏	
865	偏振	气溶胶光学厚度、水汽含量约束
910	非偏	水汽含量

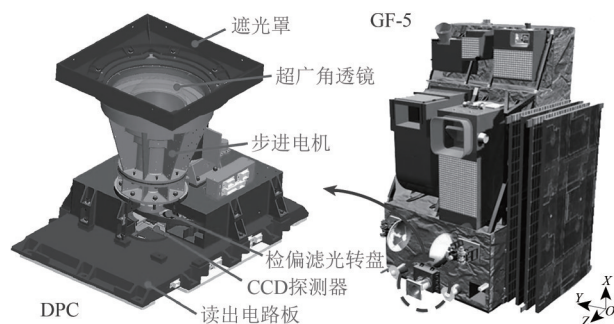


图3 DPC和GF-5示意图(Li等, 2018)

Fig. 3 Illustration of the DPC and GF-5 satellite (Li et al., 2018)

DPC可用于大气气溶胶分布、地表植被分布及海水叶绿素浓度等多项研究,其在轨定标方法可为中国自主偏振仪器在轨定标提供理论基础(陈斐楠等, 2019; 顾行发等, 2011; 涂碧海等, 2020; 谢一淞等, 2019; 张苗苗等, 2018);还可以通过获取云的强度辐射和偏振辐射信号,为云的识别和参量反演提供更多有效的观测信息,提高对云参量反演的精度,并利用多角度信息表征云的三维结构(常钰阳, 2020; 常钰阳等, 2020; 李超, 2019; Li等, 2021; 王佳佳等, 2021; 伟乐斯, 2020; Yu等, 2019)。

DPC在大气环境探测方面具有广泛的应用前景,自2018年高分五号(GF-5)成功发射以来,目前GF-5 02星已搭载其改进版升空,同时大气环境监测卫星、高精度温室气体综合探测卫星以及陆地生态系统碳监测卫星等多个卫星均计划搭载该卫星载荷。

(4) DPC-II、POSP。自2018年高分五号成功发射以来,偏振成像仪DPC在大气环境探测方面表现出广泛的应用前景,同时鉴于APS高精度非成像偏振仪对提高探测精度有较大的帮助,中国高分五号的后续型号GF-5 02星将搭载两台具有偏振能力且可以进行协同观测的载荷,分别为可成像的大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC-II)和非成像的高精度偏振扫描仪(POSP),二者波段设置如表6所示。

DPC-II在一代基础上增加了多角度观测角度数(从12个观测角度增加至17个观测角度)。其主要用来获取地球大气多角度多光谱偏振辐射数据,用于大气气溶胶和云的观测(包括云粒子尺寸分布、云相态、云光学厚度等),可获取全球大气气溶胶和云的时空分布信息。

高精度偏振扫描仪(POSP)采用沿轨扫描方式,9个谱段全部为偏振通道,并将工作谱段拓展到紫外及短波红外。POSP能通过“偏振交火”对DPC实现精度传递(李正强等, 2019)。这种设计组合为协同观测提供了非常宽的光谱和偏振范围(380—2250 nm)以及多角度能力,是现阶段气溶胶和云遥感综合观测能力最强的星载探测方案之一(杨洪春, 2019)。目前两台载荷已于2021-09-07搭载升空。

(5) 其他星载仪器: MAPI/MAI、CAPI、SGLI。多角度偏振成像仪MAPI或称MAI(Multi-Angle Polarization Imager)搭载于天宫二号空间实验室(TG-2),于2016-09-15成功发射,是国内首台应用于空间探测的多角度偏振仪器(郭俊杰等, 2019a, 2019b; 张一鹏等, 2020a, 2020b)。MAI可以获取气溶胶和大气水汽含量等信息,有效探测卷云,反演云顶高度,并探究云粒子的尺寸、形状等微观特性,其外观如图4所示(景振华等, 2020; 殷德奎, 2019; 张伟, 2016)。但由于受TG-2轨道的约束,只能获取南北纬42°区间的数

表6 DPC-II与POSP波段参数设置  
Table 6 Parameter settings of DPC-II and POSP bands

波段	DPC-II			POSP			应用目标
	中心波长/nm	类型	光谱带宽/nm	中心波长/nm	类型	光谱带宽/nm	
紫外波段	—	—	—	380	偏振	20	气溶胶层高
	—	—	—	410	偏振	20	气溶胶吸收特性
	443	非偏	20	443	偏振	20	气溶胶光学厚度
可见光 近红外波段	490	偏振	20	490	偏振	20	气溶胶、地表反照率、云反射率参数
	565	非偏	20	—	—	—	地表反照率
	670	偏振	20	670	偏振	20	气溶胶光学厚度
	763	非偏	10	—	—	—	云与气溶胶高度
	765	非偏	20	—	—	—	
	865	偏振	40	865	偏振	40	气溶胶光学厚度、水汽含量
	910	非偏	20	—	—	—	水汽含量
短波 红外波段	—	—	—	1380	偏振	40	卷云、气溶胶光学厚度
	—	—	—	1610	偏振	60	地表特性获取、驱动偏振地表模型,实现偏振地气解耦合
	—	—	—	2250	偏振	80	地表特性获取、驱动偏振地表模型,实现偏振地气解耦合; 云微物理特性、植被和火灾

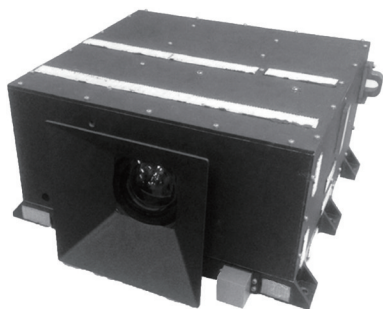


图4 多角度偏振成像仪(殷德奎,2019)  
Fig. 4 Multi-angle polarization imager(Yin, 2019)

多波段云与气溶胶探测仪 CAPI (Cloud and Aerosol Polarimetric Imager) 搭载于中国发射的 TanSat 卫星上, 具有 5 个光谱通道, 可以测量云、大气颗粒物等信息, 从而能够为更准确地反演二氧化碳剔除干扰因素, 并为研究大气污染物 (如 PM<sub>2.5</sub> 等) 的成因提供重要数据支撑 (Chen 等, 2017; Wang 等, 2017), 其可见光近红外单元及短波红外模块见图 5 (杨洪春, 2019)。由于不具备多角度观测能力, CAPI 的探测能力受到限制 (石光明 等, 2014)。

第二代全球成像仪 SGLI (Second generation Global Imager) 搭载于日本全球变化观测任务的气候卫星上 (GCOM-C), 于 2017-12-23 发射 (图 6)。SGLI 用于长时间监测气溶胶—云相互作用的变化趋势, 可利用该数据反演得到冰晶单次散射特性数据库, 为全球高精度的冰云探测提供服

务 (Imaoka 等, 2010; Letu 等, 2016; 李正强 等, 2019)。

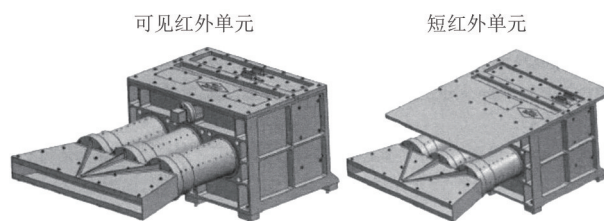


图5 CAPI可见近红外单元和短波红外模块  
(杨洪春,2019)

Fig. 5 CAPI's visible and near-infrared unit and short-wave infrared module (Yang, 2019)

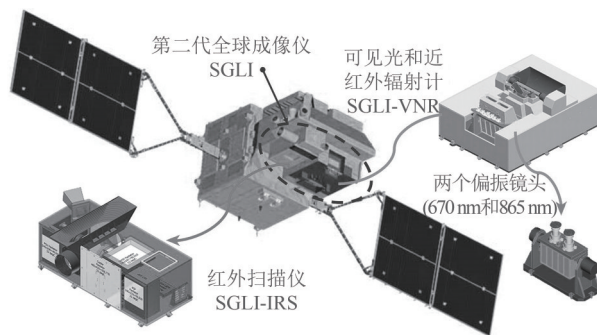


图6 SGLI红外扫描仪和可见光和近红外辐射计  
Fig. 6 SGLI-InfraRed Scanner and Visible and Nearinfrared Radiometer

### 2.1.2 机载偏振仪器

(1) RSP。为了验证高精度偏振对气溶胶和

云粒子的探测优势,美国航天局设计了一种沿轨道扫描器RSP (Research Scanning Polarimeter)。RSP是APS的原型样机,其通道和相关参数设置和APS完全一致(表7),相关航飞数据可为APS的在轨运行提供宝贵的参考信息(Alexandrov等,2018)。

表7 RSP通道信息表

Table 7 RSP channel information table

中心波长/nm	类型	应用目标
410	偏振	
470	偏振	
555	偏振	气溶胶
670	偏振	
865	偏振	
960	偏振	水汽
1590	偏振	气溶胶
1880	偏振	水汽监测和卷云
2250	偏振	气溶胶反演

自1999年以来RSP已经完成多个野外飞行实验任务,证明了高精度偏振的特殊潜能,验证了精细偏振度对云和气溶胶反演精度的提高有至关重要的作用(Alexandrov等,2020; Cairns等,2003; Chowdhary等,2001,2005; Gao等,2020; Stamnes等,2018)。所获得的观测数据已广泛用于气溶胶和云参量的反演,对云微物理特性有较好的探测精度;可反演得到云光学厚度、云相态、云滴粒子有效半径、云滴粒子数浓度、冰水路径等相关云参量(Alexandrov等,2015,2018; Segal-Rozenhaimer等,2018; Sinclair等,2019)。

(2) 其他机载仪器: AirHARP、SPEX airborne。AirHARP (Airborne Hyper-Angular Rainbow Polarimeter) 是一种宽视场成像仪,由马里兰大学的地球与空间研究所设计,具有在670 nm通道可获取60个沿航迹视角和其他通道(440、550和870 nm)可获取20个沿航迹视角的超角度成像能力(Fu等,2020; Puthukkudy等,2020)。AirHARP可用于表征云和气溶胶的光学特性,其670 nm通道是专门为利用偏振信号研究云虹而设计的,具有在亚千米空间分辨率下表征整视场云微物理参数的能力(McBride等,2020)。

SPEX airborne (Airborne Spectrometer for Plan-

etary Exploration) 是待发射偏振传感器SPEXone的机载原型(2.2.4 PACE: SPEXone、HARP-2),其主要用于气溶胶探测研究(Knobelspiesse等,2020; Van Amerongen等,2018)。

### 2.1.3 地基偏振仪器

太阳天空辐射计CE318是法国CIMEL公司生产的一种自动跟踪太阳的辐射计,可以进行云检测(李莉等,2019)。CE318已布设在全球气溶胶自动观测网(AERONET)和中国太阳/天空辐射计观测网(SONET)等多个地基观测网络中开展长期观测(Holben等,1998)。

多角度多光谱偏振型太阳天空辐射计CE318-DP是太阳天空辐射计中的一种类型,提供偏振测量功能。它具有的9个光谱通道和CE318仪器的中心波长相同,但与CE318不同的是,除936 nm通道外,其他通道均带偏振;所以与传统的强度测量相比,可以独立获得340—1640 nm范围内8个通道的多角度线偏振信息。

全天空成像偏振云探测器(FSIPCD)由匈牙利埃斯特拉托研发有限公司研发,该仪器可获取红光650 nm、绿光550 nm、蓝光450 nm光谱范围内光的强度、线偏振度和可选的圆偏振度(Horváth,2014)。因为云层或多或少地改变了晴朗天空的偏振模式特征,利用全天空成像偏振云探测器探测到的偏振模式可进一步探测云层的二维分布、确定云层的相对高度(Suhai和Horváth,2004)。这些地基偏振仪器的发展和其对应算法的开发,能为在轨偏振传感器提供产品精度验证并对气溶胶和云反演算法的改进提供服务。

## 2.2 计划发射偏振仪器

随着偏振数据在大气环境领域的广泛应用,科学家越来越意识到偏振传感器在探测人为气溶胶、云识别,尤其在污染水云特征识别等方面具有强大的优势。为了更好地获得多光谱高分辨率多角度偏振遥感数据,美国、中国、乌克兰等国家计划于近些年发射多台偏振载荷,从而为污染小粒子观测提供更优质的偏振数据,计划发射偏振载荷相关参量如表8所示。

### 2.2.1 EPS-SG:3MI

随着POLDER数据在大气遥感领域的广泛应用,欧盟认识到长时间偏振数据的优势,计划于



EUMETSAT极地系统—第二代 (EPS-SG) 任务搭载多角度—多通道—多偏振成像仪 3MI (Multi-Viewing-Channel-Polarisation Imager) 如图 7 所示。3MI 继承了 POLDER (2.1.1.1 POLDER) 传感器的所有优点, 同时其通道分辨率和偏振通道数都有

所改进, 如表 9 (Fougnie 等, 2018a; Heidinger 等, 2016; Marbach 等, 2015; Yao 等, 2010) 所示; 此外 3MI 传感器还将与 EPS-SG 上搭载的其他相关仪器进行同步协同观测, 可为云产品的精细反演提供更多的数据。

表 8 计划发射偏振载荷参数

Table 8 Polarization load parameters to be launched

仪器名	预计发射时间	国家和地区	组织	搭载平台	参数配置	继承性
3MI	2022:MetOp-SG A1; 2028:MetOp-SG A2; 2035:MetOp-SG A3.	欧盟	EUMETSAT	EPS-SG	中心波长:410 nm(偏振)、443 nm(偏振)、490 nm(偏振)、555 nm(偏振)、670 nm(偏振)、763 nm、754 nm、865 nm(偏振)、910 nm、1370 nm(偏振)、1640 nm(偏振)、2130 nm(偏振) 角度:10—14个	POLDER
MAIA	2022	美国	NASA	OTB-2	中心波长:365 nm、391 nm、415 nm、444 nm(偏振)、550 nm、646 nm(偏振)、750 nm、763 nm、866 nm、943 nm、1044 nm(偏振)、1610 nm、1886 nm 和 2126 nm 角度:5—9个	MISR
SPEXone	2024	荷兰和美国	SRON 和 NASA	PACE	波长范围:385—770 nm 角度:5个	SPEX airborne
HARP-2	2024	美国	UMBC	PACE	中心波长:440 nm、550 nm、670 nm、870nm(全部偏振) 角度:440 nm、550 nm 和 870 nm=20个,670 nm=60个	AirHARP
ScanPol	2022	乌克兰	MAO	Aerosol-UA	中心波长:370 nm、410 nm、555 nm、865 nm、1378 nm 和 1610 nm(全部偏振)	APS
MSIP	2022	乌克兰	MAO	Aerosol-UA	中心波长:410 nm、555 nm、865 nm(全部偏振)、410 nm、443 nm、470 nm 和 490 nm(单元4);555 nm、670 nm、865 nm 和 910 nm(单元5) 角度:15个	

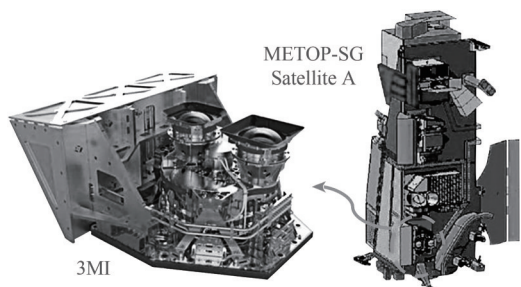


图7 3MI整机外形图和METOP-SG Satellite A结构示意图  
Fig. 7 The overall appearance of 3MI and the schematic diagram of METOP-SG Satellite A

3MI能提供多光谱、多角度的大气层顶出射辐射图像, 专门用于气象气候、大气成分、空气质量、气溶胶和云层特征的监测 (Riedi 等, 2014)。对于云, 3MI在云产品方面与POLDER非常相似, 可以获得云掩膜的产品以及云相态、云顶压强、云光学厚度和云滴谱等云参数反演产品, 同时由于增强了仪器性能, 从而提高了数据质量 (Fougnie 等, 2018b)。

### 2.2.2 OTB-2:MAIA

由于POLDER、DPC等多角度偏振数据在细颗

颗粒物探测方面具有广泛的应用前景, 以及A-Train系列卫星的协同观测在联合反演产品方面表现出独特的优势, 美国NASA提出在多角度卫星的基础上通过结合偏振测量和扩展光谱范围, 将多光谱、偏振和多角度能力结合到一个单一的集成成像系统中。以Terra卫星上的多角度成像光谱仪(MISR)为基础开发了多角度气溶胶成像仪MAIA (Multi-Angle Imager for Aerosols), 提高了MISR对大气颗粒物成分的灵敏度; MAIA预计于2022年发射, 并免费公开气溶胶和颗粒物的观测数据 (Liu 和 Diner, 2017)。

MAIA旨在研究可吸入颗粒物对健康的不利影响, 其继承于MISR的特点使其可以对云进行有效观测, 位于强水蒸气吸收特征中的谱带可以增强卷云识别能力, 氧气A波段附近的通道用可以用于反演云顶压强, 多角度观测数据可以重建云的三维形态 (Diner 等, 1998, 2005, 2018a, 2018b; Martonchik 等, 2009; Segal-Rozenhaimer 等, 2018)。

### 2.2.3 PACE:SPEXone、HARP-2

为了提高对海洋生态系统的认识, 美国宇



航局将于2024年发射浮游生物—气溶胶—云—海洋生态系计划PACE (Plankton, Aerosol, Cloud and ocean Ecosystem) (Rietjens等, 2019)。其上将携带两种具有偏振能力的载荷: 紧凑型五角分光

偏振计SPEXone和超角度彩虹偏振仪-2 HARP-2 (机载版本见2.1.2其他机载仪器: AirHARP、SPEX airborne)。

表9 POLDER-3与3MI波段参数对比

Table 9 Comparison of band parameters between POLDER-3 and 3MI

波段	POLDER-3			3MI			应用目标
	中心波长/nm	类型	光谱带宽/nm	中心波长/nm	类型	光谱带宽/nm	
可见光 近红外波段	—	—	—	410	偏振	20	气溶胶吸收特性
	443	非偏	20	443	偏振	20	气溶胶光学厚度
	490	偏振	20	490	偏振	20	气溶胶、地表反照率、云反射率等参数
	565	非偏	20	555	偏振	20	地表反照率
	670	偏振	20	670	偏振	20	气溶胶光学厚度
	763	非偏	10	763	非偏	10	云与气溶胶高度
	765	非偏	40	754	非偏	20	
	865	偏振	40	865	偏振	40	气溶胶光学厚度、水汽含量
	910	非偏	20	910	非偏	20	水汽含量
	1020	非偏	20	—	—	—	水汽
短波 红外波段	—	—	—	1370	偏振	40	卷云和气溶胶光学厚度
	—	—	—	1640	偏振	40	地表特性获取、驱动偏振地表模型,实现偏振地气解耦合
	—	—	—	2130	偏振	40	地表特性获取、驱动偏振地表模型,实现偏振地气解耦合; 云微物理特性、植被和火灾

SPEXone是在荷兰应用科学研究组织(TNO)的支持下,由荷兰空间研究所(SRON Netherlands Institute for Space Research)和空客国防与荷兰航天公司(Airbus Defense and Space Netherlands)合作开发的。将通过5个视角( $\pm 57^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $0^\circ$ )对光谱范围385—770 nm内的辐照度和偏振度进行超光谱测量,其对线偏振度(DoLP)的测量精度为0.3% (Hasekamp等, 2019)。

HARP是一种宽视场成像仪,其一代载荷于2019-11-02搭载在CubeSat平台上发射到国际空间站,可以以低于5 km的高度进行宽条带偏振云反演。然而由于受到航天器存储和下行链路能力的严重限制,每天只能看到一个场景。在即将发射的改进版HARP-2中,该问题已被解决,同时HARP-2继承了宽条带偏振云反演能力,将与SPEXone协同观测,为未来的地球科学空间任务提供高分辨率、超角度成像的偏振数据(Frouin等, 2019)。

#### 2.2.4 Aerosol-UA: ScanPol、MSIP

虽然美国NASA的Glory任务发射失败了,其设计目的仍有借鉴意义,乌克兰国家天文台

(MAO)基于Glory计划启动了大气气溶胶探测计划Aerosol-UA,将多通道扫描旋光仪ScanPol和多光谱广角成像仪MSIP搭载于同一平台进行协同观测,目的是利用气溶胶偏振传感器监测大气中对流层与平流层中气溶胶和云的主要特征及其时空分布,该任务将于2022年发射。

ScanPol是一种连续扫描偏振传感器,继承了APS的设计原理,与APS相比,ScanPol中的光谱通道数量减少到6个,但增加了370 nm处的光谱通道(Milinevsky等, 2016)。ScanPol能够在很宽的光谱范围内收集从云中散射的偏振辐射数据,从而对全球的云层分布进行遥感研究,并具有分离卷云信号的能力(Syniavskiy等, 2015)。

MSIP是一种多光谱广角偏振成像仪,可以获取测量区域内有关大气状态(云分布)和地表的信息。两个载荷的协同观测将对研究自然和人为气溶胶对气候与生态的影响作出贡献(Milinevsky等, 2015)。

### 3 云偏振遥感经典方法

云层是太阳入射辐射和地球表面出射辐射的必经屏障,并在全球大气能量交换、水汽循环和全球辐射收支平衡中起着不可忽视的作用,进而

影响着全球的气候变化。当前已有较多学者通过传统的遥感观测手段从辐射强度、空间几何特性等方面对云进行了一系列研究,然而存在着云的检测精度、物理特性与光学特性探测效果差等问题。通过对偏振数据在云检测、云物理特性、云

光学特性方面展开的研究进行论述,梳理偏振仪器的云研究(表10),从而揭示云偏振遥感研究发展历程以及偏振探测的优势,探究偏振数据的应用在云相关研究中起到的重要作用。

表10 云偏振遥感的经典算法

Table 10 Classical algorithms for cloud polarization remote sensing

		传感器	现有研究文献
云检测		POLDER	Buriez等,1997;Bréon和Colzy,1999;陈震霆等,2018
		DPC	李超,2019;Li等,2020;伟乐斯,2020;伟乐斯等,2021
		CAPI	Wang等,2017
		MAI	Gao等,2019
		CE318-DP	李莉等,2019
云相态		POLDER	Goloub等,2000;Riedi等,2001,2010
		DPC	李超,2019;Li等,2020;Shang等,2020
		MAI	郭俊杰等,2018
物理特性	云顶气压与高度	POLDER	Vanbauce等,1998;Goloub等,1994
		DPC	乔瑞等,2021
	冰水路径	RSP	Cairns等,2003
云滴谱		POLDER	Bréon和Goloub,1998;Bréon和Doutriaux-Boucher,2005
			Shang等,2015,2019
		RSP	Alexandrov等,2015,2018
光学特性	云光学厚度	DPC	李超,2019;Li等,2020
		AirHARP	Knobelspiess等,2020

### 3.1 云检测

现有的云检测算法非常多,主要基于光谱通道、多角度、几何或纹理特征进行云像元的识别(Christodoulou等,2003;Li等,2004,2019;Wang等,2016),但反演结果存在问题,尤其在云下垫面为亮地表时的云检测以及云边缘的检测方面存在较大问题(Mahajan和Fataniya,2020)。由于偏振信息增加了信息的维度,所以能够提供更好的解决方案,在云检测方面更有优势(麻金继等,2021)。因为偏振载荷在波段设置上不同于传统的光学载荷,所以其云检测算法通常需要结合偏振与非偏振信息考虑(陈震霆等,2018)。POLDER云检测算法最早由Bréon与Buriez提出并由大量学者持续研究发展,算法大多是通过每一个观测方向的表观压强测试、865 nm通道或670 nm通道反射率测试、443 nm通道偏振反射率测试、865 nm偏振通道的测试来识别云像元,可充分使用云的偏振特性进行云识别(Bréon和

Colzy,1999;Buriez等,1997)。至今,该算法相对完整,但仍然存在问题:首先,由于POLDER空间分辨率较低导致云检测精度受到限制;其次,未考虑到不同的下垫面问题和时间空间变化的问题;此外,该算法中对检测结果缺失质量评价,缺乏云置信度产品。

高分五号卫星搭载的DPC传感器具有比法国POLDER传感器更高的光谱空间分辨率和更多的观测角,从而在云遥感方面提高云检测精度并反演得到更多的云参量。国内相关学者(李超,2019;Li等,2021)利用DPC数据在考虑了不同的下垫面及时空变化的情况下,构建了全球云检测算法;该算法首先使用矢量辐射传输方程模拟了不同时空、不同大气模式和不同下垫面的相关晴空和云的辐射值,正演获得云识别的动态阈值;与此同时,为了提高特殊场景及亮地表上空云检测结果的准确性,该算法还构建了全球月平均地表反照率数据库和全球冰雪覆盖数据库;此外,在

上述云判识算法基础上,增加了晴空判识方法,从而增加了DPC云判识结果的准确性评价;弥补POLDER云检测结果质量评估标准的缺失。该研究通过获取的云判识结果构建了DPC云置信度评价体系,将获得的云识别结果分为了高置信度云、可能性云、高置信度晴空和可能性晴空4类;与相关经典传感器的产品结果对比,该方法云检测结果精度为93.06% (CALIPSO)和85% (MODIS) (李超, 2019)。伟乐斯(2020)在参考POLDER云检测算法的基础上,利用表观压强、多波段反射率、NDVI、偏振反射率等信息获取DPC的云检测结果,识别结果与MODIS产品进行对比,云命中率平均值相较于MYD06云掩膜产品高出了13.50%,同时错误预报率平均值相差仅为3.561%。此外伟乐斯等(2021)还使用高精度的云—气溶胶激光雷达的垂直特性掩膜数据(CALIPSO-VFM)作为训练样本,针对DPC的多偏振多角度数据,使用随机森林的方法,利用机器学习训练得到云识别结果。

此外Wang等(2017)使用CAPI数据在870 nm和670 nm通道的反射率及其比值来进行云识别;基于MAPI数据,Gao等(2019)使用陆地归一化植被指数(NDVI)、670 nm波段反射率及观测结果与模拟结果的差异作为3个判断指标来进行云识别,与POLDER官方公布的云掩膜产品的一致性约为90%。

虽然上述卫星遥感可以获得覆盖面积广的云探测资料,但是仍受到偏振分辨率不足的限制,因此有必要利用数据质量更高、偏振精度更高的地基观测产品来补充和验证卫星遥感产品,从而验证卫星反演算法。李莉等(2019)开发了一种利用CE318-DP进行云检测的方法,使云检测的精度基本达到激光雷达进行云检测的精度,填补了主平面偏振观测无云检测方法的空白,同时也为未来空基遥感云检测算法的验证提供了一种选择。

## 3.2 云参量反演

### 3.2.1 云相态

传统非偏探测方法主要是基于仪器的红外通道利用亮温进行云相态的识别,这种方式会受到温度反演精度的影响(Baum等, 2003; Nasiri和Kahn, 2008; Platnick等, 2003);除温度外,冰

云和水云的另一个显著区别是成云粒子的形状,这一差别使得用偏振特性区分云相态优势显著,即偏振观测主要依赖于粒子的形状和尺寸,表现出球形液滴的水云粒子相对于冰云在散射角 $140^\circ$ 附近的偏振观测存在明显的峰值,通常称为主虹,并在 $150^\circ$ 附近出现多个附属虹,这也是进行多角度偏振云相态判识的主要理论依据。Goloub等(2000)应用不同相态的云在865 nm通道偏振特征差异,基于云在散射角 $60^\circ$ — $140^\circ$ 范围内的斜率和散射角 $140^\circ$ — $180^\circ$ 范围内的标准差不同,构建了POLDER的云相态反演算法,为云相态的识别开辟了新的算法。Riedi等(2010)综合了常用的3种方法:多角度偏振测量、短波红外和可见光测量、热红外测量,使用POLDER数据和MODIS数据协同观测得到一个综合的云相态反演算法,并可以根据3种算法的识别结果获得云相态置信度因子。

郭俊杰等(2018)利用国产机载多角度偏振成像仪(MAI)的首次观测试验数据获取了水云在 $140^\circ$ 散射角附近呈现出的主虹特征,证明了国产多角度偏振成像仪具有不依赖温度等先验知识而进行云相态识别的能力。相关学者同样基于水云的虹效应,构建了国产DPC数据的云相态判识算法模型,将识别结果与MODIS和CALIPSO结果进行对比,发现DPC水云识别的准确性为93.70%,冰云识别的准确性为85% (李超, 2019; Li等, 2021)。Shang等(2020)在POLDER云相态算法的基础上,基于不同散射角范围的偏振特征提出了一种多重测试的DPC云相态算法,将算法运用于全球,发现该算法反演得到的水云和冰云的分布情况与MODIS和POLDER具有较好的一致性,但是在混合相云的分布上存在差异。

### 3.2.2 云顶高度

传统利用波段辐射特性反演云顶高度的方法主要有亮温法、氧气A吸收带法、 $\text{CO}_2$ 薄片法。亮温反演法主要利用3—5  $\mu\text{m}$ 以及10—12  $\mu\text{m}$ 的红外窗口的辐射数据来反演云顶温度,进而根据温度廓线信息得到云顶高度,所以它受温度廓线的影响比较大(Hollars等, 2004);氧气A吸收带法的原理是根据反演出的氧气透过率,结合大气压强廓线得到云顶压强值,该方法对薄云的反演精度比较低(Piters等, 2006; 张岩等, 2011); $\text{CO}_2$ 薄片法是利用 $\text{CO}_2$ 的红外吸收波段对大气高度层次变



化敏感的特点得到云顶压强,对低云的反演精度较差(林琳等,2006;Platnick等,2003)。而利用POLDER数据进行云顶气压和高度的反演时有两种方法:第1种是其具备两个氧气A波段,可利用氧气透过率差异来反演云顶高度(Vanbauce等,1998),该方法与传统非偏仪器的方法一致;第2种是基于偏振辐射信息的云顶瑞利压强反演云顶高度,如Goloub等发现机载POLDER-1数据在865 nm观察到的偏振可以忽略不计,而450 nm的偏振光主要是分子散射的贡献,所以可利用两通道偏振反射率的差异获得云顶气压,进而得到云顶高度(Goloub等,1994)。

乔瑞等(2021)基于DPC数据的763 nm(带宽10 nm)和765 nm(带宽40 nm)两个氧气A吸收波段,通过多项式拟合得到云顶压强和两波段表观反射率比值的经验关系进行云顶压强反演的研究,反演结果与MODIS相比平均偏差约为98.6 hPa。

### 3.2.3 光学厚度

传统的双光谱技术是利用410 nm和1650 nm或2130 nm通道同时获取云光学厚度和有效粒子半径(Nakajima和King,1990;Nakajima等,1991),尽管该方法在AVHRR和MODIS上具有悠久的历史(Platnick等,2017),但在以下几个方面存在问题:首先,410 nm通道受瑞利散射的影响显著,会导致光学厚度反演的不确定性;其次,选择的冰晶模型不是最先进的。国际上相关学者针对传统方法出现的问题,考虑到波长对地表反照率影响较大而对云顶反照率的影响较小的特点,基于陆地和海洋分别使用POLDER数据的670 nm和865 nm反射率来反演云的光学厚度,从而避免410 nm通道受瑞利散射的影响导致反演结果的不确定(Goloub等,1999)。李树(2018)基于POLDER-3数据利用矢量辐射传输模型RT3分别计算在670 nm和865 nm大气顶的反射率、云光学厚度和观测几何——对应构建查找表从而进行海陆上空的云光学厚度反演;并就海洋上空的反演结果,针对GHM、ASC、SC等3种冰云模型与POLDER冰云产品进行了相关性分析,得出ASC模型的反演结果与POLDER-3的结果最为相近,间接验证了ASC模型的有效粒子半径变化对冰云光学厚度反演结果影响较小,研究表明建议采用ASC模型作为DPC冰云光学厚度反演的散射模型。

随后,国内其他学者在针对DPC数据的云光学厚度反演中,陆地、海洋上空分别选取了670 nm波段、865 nm波段,水云和冰云模型上分别选择了标准水滴模型和ASC模型进行云光学厚度反演(李超,2019;Li等,2021)。

### 3.2.4 云滴谱

在卫星遥感中获取云滴尺寸分布(CDSD)参数的方法一般有两种:其中双光谱反射率法是利用测量的可见光和近红外波段的反射率与预先计算的查找表中的反射率进行比较,从而获得有效半径CDR,但无法获取有效方差EV(Nakajima和King,1990;Nakajima等,1991);第2种多角度偏振反射率法是基于副虹(散射角范围:145°—165°)偏振反射率的峰值对CDR敏感、振幅对有效方差EV敏感的原理,来获取CDR和EV,但是反演要求水云具有较高的均匀性分布(Bréon和Goloub,1998;Bréon和Doutriaux-Boucher,2005)。Shang等(2015,2019)在前人的基础上通过加入主虹(散射角范围:135°—145°)的偏振观测,从而提升查找表检索范围,以便改进空间分辨率至40—60 km,达到降低由于水云的非均匀性导致的反演误差目的。由于利用偏振信息可以对不同尺寸半径的粒子进行很好的区分,如Xu等(2019),Shen等(2021)利用偏振对小粒子敏感的特性,构建了烟雾污染云和大陆性污染积云识别的方法。

对于云滴尺寸而言,机载RSP独特的高角度分辨率允许使用在散射角范围为135°—165°的偏振反射中观察到的彩虹结构来表征液滴尺寸(Alexandrov等,2015)。分析彩虹结构的方法有两种:第1种是利用参数拟合法得到液滴尺寸分布(DSD)的有效半径和方差;第2种是彩虹傅里叶变换(RFT),这是一种非参数反演方法,不需要任何关于液滴尺寸分布函数的先验知识,并且计算速度快,通常在670 nm和865 nm波段观察到最佳结果(Alexandrov等,2012)。Alexandrov等(2018)将RFT反演结果与RSP现场测量结果进行比较来估计反演精度,利用偏振云弓对云滴尺寸分布(droplet size distributions DSDs)的强依赖性,反演云滴大小,然后比较了由RSP观测得到的云滴尺寸分布(DSDs)和由云滴探针(CDP)测量得到的云滴尺寸分布;这是首次通过与相关的现场数据直接比较来验证极化液滴尺寸反演的有效性;



通过提出的极化云滴尺寸反演技术的验证,证明了偏振观测的价值。

除了 RSP 偏振数据之外,Knobelspiesse 等(2020)利用机载 AirHARP 偏振数据,使用传统的参数拟合方法反演了云滴谱分布,达到了提高相关产品精度的效果。

### 3.2.5 冰水路径

利用可见光—红外成像辐射仪观测的非偏振数据反演卷云的特性,需要对卷云中的冰晶颗粒物形状等特性进行相关假设,从而达到反演卷云中冰晶的数量、半径、光学厚度和冰水路径等参量;而利用 RSP 传感器获得偏振数据来反演卷云相关特征时,无需对卷云中的冰晶颗粒物的形状等特性进行假设,从而减小了卷云相关参量反演结果的不确定性,以便冰水路径(IWP)反演精度更高(Cairns 等,2003),这充分说明了偏振数据在冰云参量反演方面的优势。

## 4 结 语

通过对近 30 年来偏振传感器的梳理,我们发现偏振传感器从最开始的低空间分辨率、少偏振光谱、少角度和低偏振精度能力,逐渐发展到目前偏振传感器具有中高空间分辨率、多偏振光谱、多角度和高偏振能力,再到未来高空间分辨率、多光谱、多角度与高精度偏振耦合的偏振传感器。仪器的发展方向为:(1)单载荷通过提升自身能力实现高精度多角度偏振探测。例如欧盟即将发射的 3MI 将在 POLDER 的基础上进一步改进,增加短波红外信息的探测可以使得部分传统云相关研究算法得以在新数据中运用;美国将发射的 MAIA 是在 MISR 的基础上增加了偏振观测能力,增加信息获取的维度从而提升算法精度。(2)多载荷通过协同观测实现多光谱通道、多角度、高精度偏振融合。例如中国提出的“POSP+DPC”的“偏振交火”方案、美国与欧洲提出的“APS+3MI”的联合观测方案以及乌克兰启动的大气气溶胶探测计划 Aerosol-UA,都将通过偏振多角度成像仪与高精度的偏振探测仪相结合实现联合观测,该方案也是未来偏振仪器的主要发展方向之一。

在云遥感相关研究应用中,增加偏振信号能够很好地克服部分云遥感中出现的困难:在云检测中,多通道偏振信息有利于修正云边缘误分类;

在云相态的识别中,利用水云 865 nm 偏振通道散射角  $140^\circ$  附近呈现出的主虹特征,可以完成更为精确地云相态区分;与此同时,使用偏振探测能更有效地分析云层内部的微物理状态,在解析云粒子形状和尺寸分布时更为有效;除此之外,进行神经网络的训练时,在输入向量中加入线性偏振度可以提高训练精度。虽然偏振观测带来的观测目标信息量增加,使得云相关研究取得了一些进步,但是还有一些问题需在未来的研究中解决,如现实中云系统组成复杂,变化较快,但利用偏振数据进行云相关研究时涉及多层云或者复杂云系统的研究较少,未来应多考虑复合云场的偏振成像;在冰云辐射模拟过程中,由于卷云中冰晶粒子的形状和构成成分的复杂性比较大,未来需要进一步针对研究区域建立冰晶粒子散射特性数据库,来提高冰云偏振辐射模拟的精确度。随着偏振仪器精度的提升及多角度偏振仪器和高精度偏振计联合观测方案的实现,希望可以在上述偏振云遥感研究领域取得一些进展。本文虽然归纳总结了偏振传感器及其偏振云遥感的相关算法的发展历程,然而由于篇幅有限,对云偏振遥感研究领域调研还不够全面;此外针对经典方法没有对其不确定性加以描述。

综上所述,随着偏振传感器的日新月异,偏振通道越来越多、偏振精度越来越高、空间时间分辨率越来越高,可获取的偏振信号越来越多越来越复杂;其设计对应的遥感算法时,假设将会越来越少,算法将会越来越严谨,其反演精度将会越来越高。考虑到随着经验的积累、偏振传感器数量和种类的增加,相信未来可以使用多种长时间序列的偏振观测数据进行对比验证和更深入的研究,期待偏振数据在优化云参量方面会有重大进展。

### 参考文献(References)

- Alexandrov M D, Cairns B and Mishchenko M I. 2012. Rainbow Fourier transform. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(18): 2521-2535 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.03.025]
- Alexandrov M D, Cairns B, Sinclair K, Wasilewski A P, Ziemba L, Crosbie E, Moore R, Hair J, Scarino A J, Hu Y X, Stamnes S, Shook M A and Chen G. 2018. Retrievals of cloud droplet size from the research scanning polarimeter data: validation using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 210: 76-95

- [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.005]
- Alexandrov M D, Cairns B, Wasilewski A P, Ackerman A S, McGill M J, Yorks J E, Hlavka D L, Platnick S E, Arnold G T, van Diedenhoven B, Chowdhary J, Ottaviani M and Knobelspiesse K D. 2015. Liquid water cloud properties during the Polarimeter Definition Experiment (PODEX). *Remote Sensing of Environment*, 169: 20-36 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.029]
- Alexandrov M D, Miller D J, Rajapakshe C, Fridlind A, van Diedenhoven B, Cairns B, Ackerman A S and Zhang Z B. 2020. Vertical profiles of droplet size distributions derived from cloud-side observations by the research scanning polarimeter: tests on simulated data. *Atmospheric Research*, 239: 104924 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104924]
- Andre Y and Li L. 1997. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument. (PART 1). *Infrared*, (11): 1-8 (Andre Y, 李玲. 1997. POLDER 仪器的原理和性能(上). *红外*, (11): 1-8)
- Baum B A, Frey R A, Mace G G, Harkey M K and Yang P. 2003. Nighttime multilayered cloud detection using MODIS and ARM data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42(7): 905-919 [DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0905:NMCDUM>2.0.CO;2]
- Bréon F M and Colzy S. 1999. Cloud detection from the spaceborne POLDER instrument and validation against surface synoptic observations. *Journal of Applied Meteorology*, 38(6): 777-785 [DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0777:CDFTSP>2.0.CO;2]
- Bréon F M and Doutriaux-Boucher M. 2005. A comparison of cloud droplet radii measured from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1796-1805 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852838]
- Bréon F M and Goloub P. 1998. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements. *Geophysical Research Letters*, 25(11): 1879-1882 [DOI: 10.1029/98GL01221]
- Buriez J C, Vanbauce C, Parol F, Goloub P, Herman M, Bonnel B, Fouquart Y, Couvert P and Seze G. 1997. Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER. *International Journal of Remote Sensing*, 18(13): 2785-2813 [DOI: 10.1080/014311697217332]
- Cairns B, Russell E E, LaVeigne J D and Tennant P M W. 2003. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols//*Proceedings Volume 5158, Polarization Science and Remote Sensing*. San Diego, California: SPIE: 33-44 [DOI: 10.1117/12.518320]
- Carney T Q and Vincent D G. 1986. Meso-synoptic scale interactions during AVE/SESAME I, 10 11 April 1979. Part I: theoretical development of interaction equations. *Monthly Weather Review*, 114(2): 344-352 [DOI: 10.1175/1520-0493(1986)114<0344:MSSIDA>2.0.CO;2]
- Chang Y Y. 2020. Study on the Retrievals of Cloud Properties based on Multi-Directional Polarimetric Data. Hefei: University of Science and Technology of China (常钰阳. 2020. 基于多角度偏振数据的云参数反演研究. 合肥: 中国科学技术大学)
- Chang Y Y, Sun B, Huang C, Hong J and Qiao Y L. 2020. Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations. *Acta Optica Sinica*, 40(11): 1101002 (常钰阳, 孙斌, 黄禅, 洪津, 乔延利. 2020. 多角度偏振云检测及云参数反演. *光学学报*, 40(11): 1101002) [DOI: 10.3788/AOS202040.1101002]
- Chen F N, Huang C, Hong J, Luo D G, Sun L, Sun X B and Wei W. 2019. In Flight Radiation evaluation and validation of Directional Polarimetric Camera. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 126-136, 172 (陈斐楠, 黄禅, 洪津, 骆冬根, 孙亮, 孙晓兵, 韦玮. 2019. 大气气溶胶多角度偏振探测仪在轨辐射精度与真实性验证研究. *上海航天*, 36(S2): 126-136, 172) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.020]
- Chen L F, Shang H Z, Fan M, Tao J H, Husi L T, Zhang Y, Wang H M, Cheng L X, Zhang X X, Wei L S, Li M Y, Zou M M and Liu D D. 2021. Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1917-1931 (陈良富, 尚华哲, 范萌, 陶金花, 胡斯勒图, 张莹, 王红梅, 程良晓, 张欣欣, 伟乐斯, 李明阳, 邹铭敏, 刘冬冬. 2021. 高分五号卫星大气参数探测综述. *遥感学报*, 25(9): 1917-1931) [DOI: 10.11834/jrs.20210582]
- Chen X, Yang D X, Cai Z N, Liu Y and Spurr R J D. 2017. Aerosol retrieval sensitivity and error analysis for the cloud and aerosol polarimetric imager on board TanSat: the effect of multi-angle measurement. *Remote Sensing*, 9(2): 183 [DOI: 10.3390/rs9020183]
- Chen Z T, Sun X B and Qiao Y L. 2018. Cloud detection over ocean from PARASOL/POLDER3 satellite data. *Journal of Remote Sensing*, 22(6): 996-1004 (陈震霆, 孙晓兵, 乔延利. 2018. PARASOL/POLDER3 卫星数据的海洋上空云检测. *遥感学报*, 22(6): 996-1004) [DOI: 10.11834/jrs.20187366]
- Chowdhary J, Cairns B, Mishchenko M and Travis L. 2001. Retrieval of aerosol properties over the ocean using multispectral and multi-angle photopolarimetric measurements from the Research Scanning Polarimeter. *Geophysical Research Letters*, 28(2): 243-246 [DOI: 10.1029/2000GL011783]
- Chowdhary J, Cairns B, Mishchenko M I, Hobbs P V, Cota G F, Redemann J, Rutledge K, Holben B N and Russell E. 2005. Retrieval of aerosol scattering and absorption properties from photopolarimetric observations over the ocean during the CLAMS experiment. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4): 1093-1117 [DOI: 10.1175/JAS3389.1]
- Christodoulou C I, Michaelides S C and Pattichis C S. 2003. Multifeature texture analysis for the classification of clouds in satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2662-2668 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.815404]
- Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, Bruegge C J, Conel J E, Kahn R A, Martonchik J V, Ackerman T P, Davies R, Gerstl S A W, Gordon H R, Muller J P, Myneni R B, Sellers P J, Pinty B and Verstraete M M. 1998. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)-in-

- strument description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1072-1087 [DOI: 10.1109/36.700992]
- Diner D J, Boland S W, Brauer M, Bruegge C, Burke K A, Chipman R, Di Girolamo L, Garay M J, Hasheminassab S, Hyer E, Jerrett M, Jovanovic V, Kalashnikova O V, Liu Y, Lyapustin A I, Martin R V, Nastan A, Ostro B D, Ritz B, Schwartz J, Wang J and Xu F. 2018a. Advances in multiangle satellite remote sensing of specified airborne particulate matter and association with adverse health effects: from MISR to MAIA. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4): 042603 [DOI: 10.1117/1.JRS.12.042603]
- Diner D J, Boland S W, Brauer M, Bruegge C, Burke K A, Chipman R, Di Girolamo L, Garay M J, Hasheminassab S, Hyer E, Jerrett M, Jovanovic V, Kalashnikova O V, Liu Y, Lyapustin A I, Martin R V, Nastan A, Ostro B D, Ritz B, Schwartz J, Wang J and Xu F. 2018b. Advances in multiangle satellite remote sensing of specified airborne particulate matter and association with adverse health effects: from MISR to MAIA. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4): 042603 [DOI: 10.1117/1.JRS.12.042603]
- Diner D J, Braswell B H, Davies R, Gobron N, Hu J N, Jin Y F, Kahn R A, Knyazikhin Y, Loeb N, Muller J P, Nolin A W, Pinty B, Schaaf C B, Seiz G and Stroeve J. 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 495-518 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.006]
- Fougnie B and Bach R. 2009. Monitoring of radiometric sensitivity changes of space sensors using deep convective clouds: operational application to PARASOL. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3): 851-861 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2005634]
- Fougnie B, Marbach T, Lacan A, Lang R, Schlüssel P, Poli G, Munro R and Couto A B. 2018b. The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager-overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 219: 23-32 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.008]
- Fougnie B, Marbach T, Lacan A, Schlüssel P, Lang R, Poli G and Munro R. 2018a. The 3MI mission on-board EPS-SG: a multi-spectral multi-polarization multi-directional imager for operational characterization of aerosol and cloud//*Proceedings Volume 10764, Earth Observing Systems XXIII*. San Diego, California: SPIE [DOI: 10.1117/12.2320254]
- Frouin R J, Franz B A, Ibrahim A, Knobelspiesse K, Ahmad Z, Cairns B, Chowdhary J, Dierssen H M, Tan J, Dubovik O, Huang X, Davis A B, Kalashnikova O, Thompson D R, Remer L A, Boss E, Coddington O, Deschamps P Y, Gao B C, Gross L, Hasekamp O, Omar A, Pelletier B, Ramon D, Steinmetz F and Zhai P W. 2019. Atmospheric correction of satellite ocean-color imagery during the PACE era. *Frontiers in Earth Science*, 7: 145 [DOI: 10.3389/feart.2019.00145]
- Fu G L, Hasekamp O, Rietjens J, Smit M, Di Noia A, Cairns B, Wasilewski A, Diner D, Seidel F, Xu F, Knobelspiesse K, Gao M, Da Silva A, Burton S, Hostetler C, Hair J and Ferrare R. 2020. Aerosol retrievals from different polarimeters during the ACEPOL campaign using a common retrieval algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(2): 553-573 [DOI: 10.5194/amt-13-553-2020]
- Gao M, Zhai P W, Franz B A, Knobelspiesse K, Ibrahim A, Cairns B, Craig S E, Fu G L, Hasekamp O, Hu Y X and Werdell P J. 2020. Inversion of multiangular polarimetric measurements from the ACEPOL campaign: an application of improving aerosol property and hyperspectral ocean color retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(7): 3939-3956 [DOI: 10.5194/amt-13-3939-2020]
- Gao X, Hu X Q, Fang W and Yin D K. 2019. A cloud detection algorithm over land based on the polarized characteristics difference between cloudless and cloud targets. *Earth and Space Science*, 6(9): 1769-1780 [DOI: 10.1029/2019EA000677]
- Goloub P, Deuze J L, Herman M and Fouquart Y. 1994. Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(1): 78-88 [DOI: 10.1109/36.285191]
- Goloub P, Herman M, Chepfer H, Riedi J, Brogniez G, Couvert P and Séze G. 2000. Cloud thermodynamical phase classification from the POLDER spaceborne instrument. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D11): 14747-14759 [DOI: 10.1029/1999JD901183]
- Goloub P, Tanre D, Deuze J L, Herman M, Marchand A and Breon F M. 1999. Validation of the first algorithm applied for deriving the aerosol properties over the ocean using the POLDER/ADEOS measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1586-1596 [DOI: 10.1109/36.763270]
- Gu X F, Chen X F, Cheng T H, Li Z Q, Yu T, Xie H H and Xu H. 2011. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC. *Acta Physica Sinica*, 60(7): 172-179 (顾行发, 陈兴峰, 程天海, 李正强, 余涛, 谢东海, 许华. 2011. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标. *物理学报*, 60(7): 070702) [DOI: 10.7498/aps.60.070702]
- Guo J J, Yao Z G, Han Z G, Zhao Z L and Yan W. 2019a. TG-2/MAI CCD dark current characteristics and its channel dependence analysis and correction. *Chinese Journal of Lasers*, 46(1): 0110001 (郭俊杰, 姚志刚, 韩志刚, 赵增亮, 严卫. 2019a. TG-2/MAI CCD 暗电流特征及其通道依赖性分析与校正. *中国激光*, 46(1): 0110001) [DOI: 10.3788/CJL201946.0110001]
- Guo J J, Yao Z G, Han Z G, Zhao Z L, Yan W and Jiang J. 2019b. On-Orbit analysis and correction of the inconsistency in the response characteristics of TG-2/MAI CCD pixels. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(12): 3953-3962 (郭俊杰, 姚志刚, 韩志刚, 赵增

- 亮, 严卫, 江军. 2019b. TG-2/MAI CCD 像元响应特性不一致性的在轨分析及校正. *光谱学与光谱分析*, 39(12): 3953-3962 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3953-10]
- Guo J J, Yao Z G, Han Z G, Zhao Z L, Yin D K and Yan W. 2018. Airborne experiment of TG-2 multi-angle polarization imager for cloud phase identification. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(3): 439-448 (郭俊杰, 姚志刚, 韩志刚, 赵增亮, 殷德奎, 严卫. 2018. TG-2 多角度偏振成像仪云相态识别机载验证试验. *遥感技术与应用*, 33(3): 439-448) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.3.0439]
- Hao Z Z, Pan D L, Sun Z B and Gong F. 2006. Retrieval of the columnar aerosol grain density from SeaWiFS over the China seas. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(6): 32-38 (郝增周, 潘德炉, 孙照渤, 龚芳. 2006. 利用 SeaWiFS 资料反演我国海域气溶胶粒子密度分布. *海洋学报*, 28(6): 32-38) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2006.06.005]
- Hasekamp O P, Fu G L, Rusli S P, Wu L H, Di Noia A, van de Brugh J, Landgraf J, Smit J M, Rietjens J and van Amerongen A. 2019. Aerosol measurements by SPEXone on the NASA PACE mission: expected retrieval capabilities. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 227: 170-184 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.02.006]
- Heidinger A, Foster M, Botambekov D, Hiley M, Walther A and Li Y. 2016. Using the NASA EOS a-train to probe the performance of the NOAA PATMOS-x cloud fraction CDR. *Remote Sensing*, 8(6): 511 [DOI: 10.3390/rs8060511]
- Herman M, Deuzé J L, Devaux C, Goloub P, Bréon F M and Tanré D. 1997. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 17039-17049 [DOI: 10.1029/96JD02109]
- Herman M, Deuzé J L, Marchand A, Roger B and Lallart P. 2005. Aerosol remote sensing from POLDER/ADEOS over the ocean: improved retrieval using a nonspherical particle model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D10): D10S02 [DOI: 10.1029/2004JD004798]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]
- Hollars S, Fu Q, Comstock J and Ackerman T. 2004. Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MMCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP Manus site. *Atmospheric Research*, 72(1/4): 169-186 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.03.015]
- Horváth G. 2014. *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer [DOI: 10.1007/978-3-642-54718-8]
- Illčev S D. 2019. Satellite remote sensing in meteorology//*Global Satellite Meteorological Observation (GSMO) Applications*. Switzerland: Springer: 129-182 [DOI: 10.1007/978-3-319-67047-8\_3]
- Imaoka K, Kachi M, Fujii H, Murakami H, Hori M, Ono A, Igarashi T, Nakagawa K, Oki T, Honda Y and Shimoda H. 2010. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 717-734 [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2036869]
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: Summary for Policymakers*[M/OL]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)
- Jing Z H, Hu X Q and Yin D K. 2020. TG-2 multi-angle polarization imager remote sensing image geolocation and error correction. *Remote Sensing Technology and Application*, 35(2): 345-354 (景振华, 胡秀清, 殷德奎. 2020. TG-2 多角度偏振成像仪遥感影像地理定位与误差订正. *遥感技术与应用*, 35(2): 345-354) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.2.0345]
- Kang Q, Yuan Y L, Li J J, Zhai W C, Wu H Y, Hong J and Zheng X B. 2018. Effect of divergence angle of polarization calibration source on DPC polarization calibration: analysis and validation. *Journal of Remote Sensing*, 22(2): 203-210 (康晴, 袁银麟, 李健军, 翟文超, 吴浩宇, 洪津, 郑小兵. 2018. 光源发散角对 DPC 偏振定标的影响分析及验证. *遥感学报*, 22(2): 203-210) [DOI: 10.11834/jrs.20187051]
- Knobelspiesse K, Barbosa H M J, Bradley C, Bruegge C, Cairns B, Chen G, Chowdhary J, Cook A, Di Noia A, van Diedenhoven B, Diner D J, Ferrare R, Fu G L, Gao M, Garay M, Hair J, Harper D, van Harten G, Hasekamp O, Helmlinger M, Hostetler C, Kalashnikova O, Kupchock A, De Freitas K L, Maring H, Martins J V, McBride B, McGill M, Norlin K, Puthukkudy A, Rheingans B, Rietjens J, Seidel F C, Da Silva A, Smit M, Stamnes S, Tan Q, Val S, Wasilewski A, Xu F, Xu X G and Yorks J. 2020. The Aerosol Characterization from Polarimeter and Lidar (ACEPOL) airborne field campaign. *Earth System Science Data*, 12(3): 2183-2208 [DOI: 10.5194/essd-12-2183-2020]
- Lacagnina C, Hasekamp O P and Torres O. 2017. Direct radiative effect of aerosols based on PARASOL and OMI satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(4): 2366-2388 [DOI: 10.1002/2016JD025706]
- Letu H, Ishimoto H, Riedi J, Nakajima T Y, Labonnote L C, Baran A J, Nagao T M and Sekiguchi M. 2016. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18): 12287-12303 [DOI: 10.5194/acp-16-12287-2016]
- Li C. 2019. Retrieval of Cloud Parameters Based on Imagery from the DPC Onboard GF-5 Satellite. Wuhu: Anhui Normal University: 1-165 (李超. 2019. 基于 GF-5 DPC 数据的云参量反演研究. 芜湖: 安



- 徽师范大学: 1-165)
- Li C, Ma J J, Yang P and Li Z Q. 2019. Detection of cloud cover using dynamic thresholds and radiative transfer models from the polarization satellite image. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 222-223: 196-214 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.10.026]
- Li J, Menzel W P, Zhang W J, Sun F Y, Schmit T J, Gurka J J and Weisz E. 2004. Synergistic use of MODIS and AIRS in a variational retrieval of cloud parameters. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(11): 1619-1634 [DOI: 10.1175/JAM2166.1]
- Li J H, Ma J J, Li C, Wang Y Y, Li Z Q and Hong J. 2021. Multi-information collaborative cloud identification algorithm in Gaofen-5 Directional Polarimetric Camera imagery. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 261: 107439 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107439]
- Li J X, Zhao P, Fang W and Song S X. 2020. Cloud detection of multi-angle remote sensing image based on deep learning. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 15(5): 380-392 (李佳欣, 赵鹏, 方薇, 宋尚香. 2020. 基于深度学习的多角度遥感影像云检测方法. *大气与环境光学学报*, 15(5): 380-392) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.05.007]
- Li L, Li Z Q, Xu H, Lv Y, Li K. 2019. A method for cloud detection using CE318-DP. China, CN 109959978 A (李莉, 李正强, 许华, 吕阳, 李凯. 2019. 一种利用太阳天空辐射计进行云检测的方法. 中国, CN 109959978 A)
- Li S. 2018. Analysis of Cloud Optical Characteristics and Retrieval of Main Cloud Parameters for Satellite Polarized Remote Sensing. Hefei: University of Science and Technology of China: 49-76 (李树. 2018. 卫星偏振遥感的云光学特性分析及主要参数反演研究. 合肥: 中国科学技术大学: 49-76)
- Li Z Q, Hou W Z, Hong J, Zheng F X, Luo D G, Wang J, Gu X F and Qiao Y L. 2018. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218: 21-37 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.003]
- Li Z Q, Xie Y S, Hong J, Wang Z T, Wang S P, Sun X B, Qiao Y L and Gu X F. 2019. Polarimetric satellite sensors for earth observation and applications in atmospheric remote sensing. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 14(1): 2-17 (李正强, 谢一焘, 洪津, 王中挺, 王舒鹏, 孙晓兵, 乔延利, 顾行发. 2019. 星载对地观测偏振传感器及其大气遥感应用. *大气与环境光学学报*, 14(1): 2-17) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.001]
- Lin L, Huang S X and Du H D. 2006. Retrieval of cloudtop properties from modis data. *Scientia Meteorologica Sinica*, 26(6): 655-661 (林琳, 黄思训, 杜华栋. 2006. 使用MODIS数据对云顶高的反演研究. *气象科学*, 26(6): 655-661) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2006.06.011]
- Liu Y and Diner D J. 2017. Multi-angle imager for aerosols: a satellite investigation to benefit public health. *Public Health Reports*, 132(1): 14-17 [DOI: 10.1177/0033354916679983]
- Luo D G, Zhang M M, Meng B H, Xu S L, Liu Z H, Yang W F and Hong J. 2019. Test method for spaceborne directional polarization camera. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 14(2): 144-153 (骆冬根, 张苗苗, 孟炳寰, 许孙龙, 刘振海, 杨伟锋, 洪津. 2019. 星载多角度偏振成像仪检测方法. *大气与环境光学学报*, 14(2): 144-153) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.010]
- Ma J J, Wang C L, Hong J and Li Z Q. 2021. Cloud Remote Sensing from Satellite Multi-Sensor Data. Beijing: Science Press: 328-337 (麻金继, 王春林, 洪津, 李正强. 2021. 多源卫星云遥感. 北京: 科学出版社: 328-337)
- Mahajan S and Fataniya B. 2020. Cloud detection methodologies: variants and development-a review. *Complex and Intelligent Systems*, 6(2): 251-261 [DOI: 10.1007/s40747-019-00128-0]
- Marbach T, Riedi J, Lacan A and Schlüssel P. 2015. The 3MI mission: multi-viewing-channel-polarisation imager of the EUMETSAT polar system: second generation (EPS-SG) dedicated to aerosol and cloud monitoring//Proceedings Volume 9613, Polarization Science and Remote Sensing VII. San Diego, California: SPIE [DOI: 10.1117/12.2186978]
- Martonchik J V, Kahn R A and Diner D J. 2009. Retrieval of aerosol properties over land using MISR observations//Satellite Aerosol Remote Sensing over Land. Berlin, Heidelberg: Springer: 267-293 [DOI: 10.1007/978-3-540-69397-0\_9]
- Matsui T, Masunaga H, Pielke R A and Tao W K. 2004. Impact of aerosols and atmospheric thermodynamics on cloud properties within the climate system. *Geophysical Research Letters*, 31(6): L06109 [DOI: 10.1029/2003GL019287]
- McBride B A, Martins J V, Barbosa H M J, Birmingham W and Remer L A. 2020. Spatial distribution of cloud droplet size properties from Airborne Hyper-Angular Rainbow Polarimeter (AirHARP) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(4): 1777-1796 [DOI: 10.5194/amt-13-1777-2020]
- Milinevsky G, Yatskiv Y, Degtyaryov O, Syniavskiy I, Ivanov Y, Bovchaliuk A, Mishchenko M, Danylevsky V, Sosonkin M and Bovchaliuk V. 2015. Remote sensing of aerosol in the terrestrial atmosphere from space: new missions. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 5(1): 11-16 [DOI: 10.17721/2227-1481.5.11-16]
- Milinevsky G, Yatskiv Y, Degtyaryov O, Syniavskiy I, Mishchenko M, Rosenbush V, Ivanov Y, Makarov A, Bovchaliuk A, Danylevsky V, Sosonkin M, Moskalov S, Bovchaliuk V, Lukenyuk A, Shymkiv A and Udodov E. 2016. New satellite project Aerosol-UA: remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, 123: 292-300 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.02.027]
- Mishchenko M I, Cairns B, Kopp G, Schueler C F, Fafaul B A, Hansen J E, Hooker R J, Itchkawich T, Maring H B and Travis L D. 2007. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the glory mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(5): 677-692 [DOI: 10.1175/BAMS-88-5-677]
- Nadal F and Breon F M. 1999. Parameterization of surface polarized

- reflectance derived from POLDER spaceborne measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1709-1718 [DOI: 10.1109/36.763292]
- Nakajima T and King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(15): 1878-1893 [DOI: 10.1175/1520-0469(1990)047<1878:DOTOTA>2.0.CO;2]
- Nakajima T, King M D, Spinhirne J D and Radke L F. 1991. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: marine stratocumulus observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(5): 728-751 [DOI: 10.1175/1520-0469(1991)048<0728:DOTOTA>2.0.CO;2]
- Nasiri S L and Kahn B H. 2008. Limitations of bispectral infrared cloud phase determination and potential for improvement. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11): 2895-2910 [DOI: 10.1175/2008JAMC1879.1]
- Peralta R J, Nardell C, Cairns B, Russell E E, Travis L D, Mishchenko M I, Fafaul B A and Hooker R J. 2007. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission//*Proceedings Volume 6786, MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multi-spectral Image Acquisition*. Wuhan: SPIE [DOI: 10.1117/12.783307]
- Piters A J M, Bramstedt K, Lambert J C and Kirchhoff B. 2006. Overview of SCIAMACHY validation: 2002-2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(1): 127-148 [DOI: 10.5194/acp-6-127-2006]
- Platnick S, King M D, Ackerman S A, Menzel W P, Baum B A, Riedi J C and Frey R A. 2003. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 459-473 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808301]
- Platnick S, Meyer K G, King M D, Wind G, Amarasinghe N, Marchant B, Arnold G T, Zhang Z B, Hubanks P A, Holz R E, Yang P, Ridgway W L and Riedi J. 2017. The MODIS cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from terra and aqua. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1): 502-525 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2610522]
- Puthukkudy A, Martins J V, Remer L A, Xu X G, Dubovik O, Litvinov P, McBride B, Burton S and Barbosa H M J. 2020. Retrieval of aerosol properties from Airborne Hyper-Angular Rainbow Polarimeter (AirHARP) observations during ACEPOL 2017. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(10): 5207-5236 [DOI: 10.5194/amt-13-5207-2020]
- Qiao R, Qie L L, Xu H, Li Z Q, Zhu S F, Xie Y S, Hong J, Dai H S and Ma J J. 2021. Retrieval of cloud top pressure in oxygen a-band based on data from DPC onboard GF-5 satellite. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(3): 256-268 (乔瑞, 伽丽丽, 许华, 李正强, 朱思峰, 谢一淞, 洪津, 代海山, 麻金继. 2021. 基于高分五号DPC氧气A吸收波段的云顶压强反演. *大气与环境光学学报*, 16(3): 256-268) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2021.03.011]
- Ren J Q, Yan W, Ye J and Han D. 2010. Advances in the study of cloud phase discrimination using satellite remote sensing data. *Advances in Earth Science*, 25(10): 1051-1060 (任建奇, 严卫, 叶晶, 韩丁. 2010. 云相态的卫星遥感研究进展. *地球科学进展*, 25(10): 1051-1060) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2010.10.1051]
- Riedi J, Goloub P and Marchand R T. 2001. Comparison of POLDER cloud phase retrievals to active remote sensors measurements at the ARM SGP site. *Geophysical Research Letters*, 28(11): 2185-2188 [DOI: 10.1029/2000GL012758]
- Riedi J, Marchant B, Platnick S, Baum B A, Thieuleux F, Oudard C, Parol F, Nicolas J M and Dubuisson P. 2010. Cloud thermodynamic phase inferred from merged POLDER and MODIS data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(23): 11851-11865 [DOI: 10.5194/acp-10-11851-2010]
- Riedi J, Merlin G, Labonnote L, Cornet C, Ferlay N, Desmons M, Dubuisson P, Parol F, Davis A B and Marbach T. 2014. Information Content Analysis for the Multi-Viewing, Multi-Channel, Multi-Polarization Imaging (3MI) Instrument: Toward Retrieval of Vertically Resolved Cloud Properties from Passive Only Measurements. Washington, DC: American Geophysical Union
- Rietjens J, Campo J, Chanumolu A, Smit M, Nalla R, Fernandez C, Dingjan J, van Amerongen A and Hasekamp O. 2019. Expected performance and error analysis for SPEXone, a multi-angle channelled spectropolarimeter for the NASA PACE mission//*Proceedings Volume 11132, Polarization Science and Remote Sensing IX*. San Diego, CA: SPIE: 11-15 [DOI: 10.1117/12.2530729]
- Rossow W B and Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11): 2261-2288 [DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2]
- Schmunk R B. 2018. Glory APS Science[EB/OL]. <https://glory.giss.nasa.gov/aps/>
- Segal-Rozenhaimer M, Miller D J, Knobelspiess K, Redemann J, Cairns B and Alexandrov M D. 2018. Development of neural network retrievals of liquid cloud properties from multi-angle polarimetric observations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 220: 39-51 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.08.030]
- Shang H, Chen L, Bréon F M, Letu H, Li S, Wang Z and Su L. 2015. Impact of cloud horizontal inhomogeneity and directional sampling on the retrieval of cloud droplet size by the POLDER instrument. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(11): 4931-4945 [DOI: 10.5194/amt-8-4931-2015]
- Shang H Z, Letu H, Bréon F M, Riedi J, Ma R, Wang Z M, Nakajima T Y, Wang Z T and Chen L F. 2019. An improved algorithm of cloud droplet size distribution from POLDER polarized measurements. *Remote Sensing of Environment*, 228: 61-74 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.013]
- Shang H Z, Letu H, Chen L F, Riedi J, Ma R, Wei L S, Labonnote L C, Hioki S, Liu C, Wang Z T and Wang J J. 2020. Cloud thermody-

- dynamic phase detection using a directional polarimetric camera (DPC). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 253: 107179 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107179]
- Shen F, Zhang Q Y, Ma J J, Li Z Q and Hong J. 2021. Identification of polluted clouds and composition analysis based on GF-5 DPC data. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 269: 107659 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107659]
- Shi G M, Li C C and Ren T. 2014. Sensitivity analysis of single-angle polarization reflectance observed by satellite. *Chinese Science Bulletin*, 59(14): 1519-1528 (石光明, 李成才, 任通. 2014. 卫星观测的单角度偏振反射率敏感性分析. *科学通报*, 59(20): 2016) [DOI: 10.1007/s11434-014-0213-x]
- Sinclair K, van Diedenhoven B, Cairns B, Alexandrov M, Moore R, Crosbie E and Ziemba L. 2019. Polarimetric retrievals of cloud droplet number concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 228: 227-240 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.008]
- Stamnes S, Hostetler C, Ferrare R, Burton S, Liu X, Hair J, Hu Y, Wasilewski A, Martin W, van Diedenhoven B, Chowdhary J, Cetinic I, Berg L K, Stamnes K and Cairns B. 2018. Simultaneous polarimeter retrievals of microphysical aerosol and ocean color parameters from the "MAPP" algorithm with comparison to high-spectral-resolution lidar aerosol and ocean products. *Applied Optics*, 57(10): 2394-2413 [DOI: 10.1364/AO.57.002394]
- Stephens G L, Tsay S C, Stackhouse P W Jr and Flatau P J. 1990. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(14): 1742-1754 [DOI: 10.1175/1520-0469(1990)047<1742:TROTMA>2.0.CO;2]
- Suhai B and Horváth G. 2004. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 21(9): 1669-1676 [DOI: 10.1364/JOSAA.21.001669]
- Syriavskiy I I, Milinevsky G P, Ivanov Y S, Sosonkin M G, Danylevsky V O, Rosenbush V K, Bovchaliuk A P, Lukenyuk A A, Shymkiv A P and Mishchenko M I. 2015. Methodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the aerosol-UA space experiment development. *Kosmična Nauka i Tehnologija*, 21(3): 9-17 [DOI: 10.15407/knit2015.03.009]
- Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, Dubovik O, Ducos F, François P, Goloub P, Herman M, Lifermann A and Waquet F. 2011. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(7): 1383-1395 [DOI: 10.5194/amt-4-1383-2011]
- Trenberth K E, Fasullo J T and Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3): 311-324 [DOI: 10.1175/2008BAMS2634.1]
- Tu B H, Hong J, Yao P P, Meng B H, Yuan Y L, Zhang M M and Weng J W. 2020. Polarization detection performance of directional polarimetric camera. *Acta Optica Sinica*, 40(7): 0712003 (涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 孟炳寰, 袁银麟, 张苗苗, 翁建文. 2020. 多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测. *光学学报*, 40(7): 0712003) [DOI: 10.3788/AOS202040.0712003]
- Van Amerongen A, Rietjens J, Campo J, Dogan E, Dingjan J, Nalla R, Caron J and Haseka O. 2018. SPEXone: a compact multi-angle polarimeter//Proceedings Volume 11180, International Conference on Space Optics. Chania: SPIE [DOI: 10.1117/12.2535940]
- Vanbauce C, Buriez J C, Parol F, Bonnel B, Sèze G and Couvert P. 1998. Apparent pressure derived from ADEOS-POLDER observations in the oxygen A-band over ocean. *Geophysical Research Letters*, 25(16): 3159-3162 [DOI: 10.1029/98GL02324]
- Wang J J, Liu S H, Li S, Ye S, Wang X Q and Wang F Y. 2021. Optimization algorithm for polarization remote sensing cloud detection based on machine learning. *Acta Photonica Sinica*, 50(2): 0228001 (汪杰君, 刘少晖, 李树, 叶松, 王新强, 王方原. 2021. 基于机器学习的偏振遥感云检测优化算法. *光子学报*, 50(2): 0228001) [DOI: 10.3788/gzxb20215002.0228001]
- Wang J J, Sun X B, Ti R F and Yu H X. 2021. Multi-Angle polarization radiation threshold detection method of cloud cover over ocean. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(3): 247-255 (王佳佳, 孙晓兵, 提汝芳, 余海啸. 2021. 海洋上空云多角度偏振辐射阈值检测方法研究. *大气与环境光学学报*, 16(3): 247-255) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2021.03.010]
- Wang T, Fetzer E J, Wong S, Kahn B H and Yue Q. 2016. Validation of MODIS cloud mask and multilayer flag using CloudSat-CALIPSO cloud profiles and a cross-reference of their cloud classifications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19): 11620-11635 [DOI: 10.1002/2016JD025239]
- Wang X, Guo Z, Huang Y P, Fan H J and Li W B. 2017. A cloud detection scheme for the Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite (TANSAT). *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(1): 16-25 [DOI: 10.1007/s00376-016-6033-y]
- Wei L S. 2020. Research on Cloud Detection Algorithm Based on Gaofen-5 -DPC Data. Hohhot: Inner Mongolia Normal University (伟乐斯. 2020. 基于高分五号-DPC数据的云识别算法研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学)
- Wei L S, Shang H Z, Husi L T, Ma R, Hu D H, Chao K F, Si F Q and Shi J C. 2021. Cloud detection algorithm based on GF-5 DPC data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(10): 2053-2066 (伟乐斯, 尚华哲, 胡斯勒图, 马润, 胡大海, 朝克夫, 司福祺, 施建成. 2021. GF-5 DPC数据的云检测方法研究. *遥感学报*, 25(10): 2053-2066) [DOI: 10.11834/jrs.20210226]
- Wu H. 2016. Polarization Imaging and Cloud Polarization Characteristics Research. Wuhu: Anhui Normal University: 1-45 (吴浩. 2016. 偏振成像及云偏振特性研究. 芜湖: 安徽师范大学: 1-45)
- Xie Y S, Li Z Q, Hou W Z, Zhang Y, Qie L L, Li L, Li K T and Xu H. 2019. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera on-

- board GF-5 satellite. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 219-226 (谢一淞, 李正强, 侯伟真, 张洋, 伽丽丽, 李莉, 李凯涛, 许华. 2019. 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. *上海航天*, 36(S2): 219-226) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.033]
- Xu F F. 2018. *Research on Pollution Cloud Recognition Algorithm Based on POLDER Data*. Wuhu: Anhui Normal University: 15-67 (徐飞飞. 2018. 基于POLDER数据的污染云识别算法研究. 芜湖: 安徽师范大学: 15-67)
- Xu F F, Ma J J, Wu S C and Li Z Q. 2019. Identification of smoke and polluted clouds based on polarized satellite images. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 224: 343-354 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.019]
- Yan W, Yang H L and Zhou X W. 2008. A-Train satellite formation and its application to cloud research. *Remote Sensing Information*, (2): 93-96 (严卫, 杨汉乐, 周兴旺. 2008. A-Train卫星编队及其在云研究领域中的应用. *遥感信息*, (2): 93-96) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2008.02.020]
- Yang H C. 2019. *On-Orbit Calibration of Particulate Matter Polarimetry Suits*. Hefei: University of Science and Technology of China (杨洪春. 2019. 大气颗粒物监测仪在轨定标研究. 合肥: 中国科学技术大学)
- Yang Z W, Gao S G and Wang P G. 2005. Polarization of reflected light by earth objects. *Acta Optica Sinica*, 25(2): 241-245 (杨之文, 高胜钢, 王培纲. 2005. 几种地物反射光的偏振特性. *光学学报*, 25(2): 241-245) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2005.02.022]
- Yao Z G, Han Z G, Zhao Z L, Lin L F and Fan X H. 2010. Synergetic use of POLDER and MODIS for multilayered cloud identification. *Remote Sensing of Environment*, 114(9): 1910-1923 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.03.014]
- Yasumoto M, Sano I and Mukai S. 2002. Combined use of OCTS and POLDER for cloud retrieval. *Advances in Space Research*, 29(1): 39-44 [DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00625-1]
- Yin D K. 2019. Multi-Angle polarization detection technology. *Infra-red*, 40(1): 1-6, 23 (殷德奎. 2019. 多角度偏振探测技术. *红外*, 40(1): 1-6, 23) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.001]
- Yu H X, Ma J J, Ahmad S, Sun E C, Li C, Li Z Q and Hong J. 2019. Three-dimensional cloud structure reconstruction from the directional polarimetric camera. *Remote Sensing*, 11(24): 2894 [DOI: 10.3390/rs11242894]
- Zhang M M, Meng B H, Luo D G, Yang B Y, Ti R F and Hong J. 2018. Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera. *Acta Optica Sinica*, 38(8): 0812004 (张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 杨本永, 提汝芳, 洪津. 2018. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析. *光学学报*, 38(8): 0812004) [DOI: 10.3788/AOS201838.0812004]
- Zhang W. 2016. Progress of Tiangong-2 space science and application mission. *Aerospace China*, (12): 18-23 (张伟. 2016. 天宫-2空间科学与应用任务及进展. *国际太空*, (12): 18-23) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2016.12.004]
- Zhang Y, Lv D R and Duan M Z. 2011. Two kinds of cloud top height retrieval methods with oxygen A-Band comparison by simulated data and verification with experimental results in China. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(1): 18-32 (张岩, 吕达仁, 段民征. 2011. 两种氧气A吸收带云顶高度反演算法的理论比较与实测结果验证. *遥感技术与应用*, 26(1): 18-32) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2011.1.18]
- Zhang Y P, Hu X Q, Yin D K and Gu M J. 2020a. Full image on-orbit polarization calibration method of multi-angle polarization imager. *Acta Optica Sinica*, 40(19): 1911001 (张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 顾明剑. 2020a. 多角度偏振成像仪全像面在轨偏振定标方法. *光学学报*, 40(19): 1911001) [DOI: 10.3788/AOS202040.1911001]
- Zhang Y P, Hu X Q, Yin D K and Gu M J. 2020b. Onboard polarization calibration technique of multi-angle polarization imager based on sun glint from ocean. *Acta Optica Sinica*, 40(15): 1528002 (张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 顾明剑. 2020b. 基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术. *光学学报*, 40(15): 1528002) [DOI: 10.3788/AOS202040.1528002]

## Review of cloud polarimetric remote sensing

WANG Yuyao<sup>1,4</sup>, MA Jinji<sup>1,4</sup>, LI Jinghan<sup>1,4</sup>, HONG Jin<sup>2</sup>, LI Zhengqiang<sup>3</sup>

1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. Engineering Technology Research Center of Resources Environment and GIS, Wuhu 241003, China

**Abstract:** Clouds are collections of water droplets or ice crystal colloids suspended in the atmosphere. They are a visible manifestation of the Earth's massive water cycle, which play an important role in global climate. Since the radiation intensity signal cannot accurately detect



the internal physical characteristics of thick clouds, especially convective clouds, high-quality cloud observations cannot be achieved only by using this signal. Polarimetric remote sensing can describe the spectral characteristics of intensity, directions, phase positions, and polarization states of light, so as to expand the volumes and dimensions of the information observed. It can detect the size, shape, and other microphysical parameters, showing unique application advantages in cloud remote sensing.

A wealth of literature on the development of polarimetric sensors can be found, for example, POLDER launched by France, ASP designed by the United States, and DPC developed by China. This paper summarizes the characteristics of internationally developed landmark polarimetric sensors and introduces the polarimetric sensor that will be launched soon. It is found that the development of polarimetric sensors underwent three main periods. During the first period, polarimetric sensors had low spatial resolution, fewer polarization spectrums, fewer angles, and low polarimetric accuracy. During the second period, the four elements mentioned above have been improved. In the third period, the sensors were developed into products with high spatial resolution, more polarization spectrum, large angles, and high polarimetric accuracy. The accessible spatial resolution, polarization data, and polarimetric accuracy were all greatly improved.

In addition, this paper discusses the research on polarization data of cloud detection, physical characteristics, and optical characteristics of clouds. Starting from a series of problems existing in traditional remote sensing observation methods in cloud research, including poor cloud detection of accuracy, physical and optical characteristics, etc., the advantages of polarization detection are revealed through a detailed introduction to the classical polarization cloud parameter algorithms. Moreover, the development history of cloud polarimetric remote sensing research and the critical role played by the application of polarization data in cloud-related studies are explored.

By reviewing the development of polarimetric sensors and the evolution of cloud remote sensing algorithms in the past three decades, we found that the polarimetric accuracy, and spatial and time resolution were improved as the number of polarimetric sensors increased. However, the acquired polarimetric signal is increasingly complex. Therefore, when designing the algorithm of cloud remote sensing, the factors we should consider will be fewer. In contrast, the algorithm will be more rigorous, and the inversion accuracy of cloud parameters will be higher. Considering that with the accumulation of experience and the development of instruments, it is believed that the polarization data will make significant progress in optimizing cloud parameters.

**Key words:** atmospheric remote sensing, polarization, POLDER, APS, DPC, cloud, vector radiative transfer, inversion algorithm

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No.41671352)